

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 623.486

¹Хажанець Юрій Анатолійович (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0002-8926-2474>

¹Коренівська Ілона Сергіївна (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0002-0544-6082>

²Кас'яненко Максим Вікторович (кандидат військових наук)
<https://orcid.org/0000-0002-3749-4441>

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

²Департамент військової освіти і науки Міністерства оборони України, Київ, Україна

ВДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ ПРОТОКОЛУ СТАНУ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ (МЕРЕЖІ) ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті проведено аналіз наявних алгоритмів роботи протоколів станів каналів зв'язку, що необхідні для забезпечення маршрутизації в інформаційно-телекомунікаційній системі (мережі) оскільки вони були орієнтовані для цивільного користування виникла необхідність створення протоколу стану каналів зв'язку саме для військових інформаційно-телекомунікаційних систем (мереж). Адже як вказують проведені дослідження процесів в різних системах передачі даних, заснованих на мультисервісних мережах, фізичне виведення з ладу каналів зв'язку призводить до зменшення загальної пропускної здатності, але не тільки за рахунок втрати каналів зв'язку. Зміна структури мережі тягне за собою зростання обсягів службової інформації, спрямованої на забезпечення функціонування системи передачі даних, а отже до зменшення частки обчислювального ресурсу елементів мережі, спрямованого на виконання основної функції - передачі даних.

Ключові слова: протокол стану каналів зв'язку, інформаційно-телекомунікаційна система (мережа), алгоритм маршрутизації.

Вступ

Основою сучасної військової інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС) є мультисервісна мережа. Як показують дослідження процесів в різних системах передачі даних, заснованих на мультисервісних мережах, фізичне виведення з ладу каналів зв'язку призводить до зменшення загальної пропускної здатності, але не тільки за рахунок втрати каналів зв'язку. Зміна структури мережі тягне за собою зростання обсягів службової інформації, спрямованої на забезпечення функціонування системи передачі даних, а отже до зменшення частки обчислювального ресурсу елементів мережі, спрямованого на виконання основної функції - передачі даних. Таким чином, перспективні ІТС повинні забезпечувати необхідну якість доведення інформації в надзвичайних умовах, з урахуванням зростаючих можливостей РЕБ, засобів вогневого ураження і високоточної зброї. У цих умовах перспективними напрямком в удосконаленні військової інформаційно-телекомунікаційної системи

(ВІТС) є розробка і впровадження інформаційних технологій для ефективної роботи систем зв'язку (систем передачі даних), які б забезпечили передачу інформації між пунктами управління та підпорядкованими підрозділами з необхідною якістю.

Метою статті є вдосконалення алгоритму протоколу стану каналу зв'язку для забезпечення маршрутизації в інформаційно-телекомунікаційній системі (мережі) військового призначення.

Матеріали та методи

У даному дослідженні застосовуються наукові методи аналізу та синтезу.

Результати

Основою ВІТС є сукупність взаємопов'язаних і узгоджених за завданнями, місцем і часом дій вузлів і ліній зв'язку різного призначення, що розгортаються або створюються за єдиним планом для вирішення завдань забезпечення управління військами і зброєю [2].

В умовах зростання обсягів інформаційних потоків, що передаються між пунктами управління та підпорядкованими підрозділами і динамічної зміни

структури базової мережі, обумовленої впровадженням мобільних компонент системи зв'язку або втратою мережевих елементів, однією з найважливіших характеристик є оперативність обміну інформацією [1]. Саме завдяки швидкому і надійному обміну даними між складовими такої системи буде досягтися інформаційну перевагу і, як наслідок, перемога в бойових операціях. З огляду на вище сказане, підвищення якості процесів в глобальній мережі зв'язку (англ. Wide Area Network (WAN)) виходить на лідируючі позиції в сучасних дослідженнях.

Вивчення робіт попередників, що досліджували ефективність функціонування військових систем зв'язку як правило базувались на дослідженні аналогових систем зв'язку або з використанням технологій, що вже застаріли та не набули широкого поширення наприклад як ATM (англ. Asynchronous Transfer Mode – асинхронний спосіб передачі даних) [3]. На сьогодні у військах найбільш поширеною технологією передачі даних є технологія Ethernet (буквально: ефірна мережа) – найпопулярніший протокол кабельних комп'ютерних мереж, що працює на фізичному та каналному рівні мережевої моделі OSI. За технічним визначенням Ethernet – сімейство протоколів стандарту IEEE 802.3. Ethernet тісно пов'язаний з моделлю TCP/IP, оскільки у переважній більшості випадків служить для передачі IP-пакетів.

Ethernet-мережі працюють на швидкостях 10Мбіт/с, Fast Ethernet – на швидкостях 100Мбіт/с, Gigabit Ethernet – на швидкостях 1000Мбіт/с, 10 Gigabit Ethernet – на швидкостях 10Гбіт/с. В кінці листопада 2006 року було прийняте рішення про початок розробок наступної версії стандарту з досягненням швидкості 100Гбіт/с (100 Gigabit Ethernet).

З огляду на високу інтенсивність обміну в даній мережі і зміна характеру інформаційних потоків, виникає необхідність у зміні підходів до управління розподілом обчислювального ресурсу в мережі з метою досягнення необхідної оперативності (найчастіше в режимі, наближеному до режиму реального часу). Дані питання в даний час розглядаються при створенні і розвитку комплексних багатофункціональних системах автоматизації управління військами і зброєю в багатьох країнах світу.

Сучасні мультисервісні телекомунікаційні мережі Збройних Сил України функціонують за IP-протоколом, мають ієрархічну, просторово розподілену структуру та містять:

- транспортну мережу;
- мережі доступу;
- систему управління.

Перехід від аналогових систем зв'язку до цифрових призвели до створення саме інформаційно-телекомунікаційних систем (мереж) які мають свої властивості у наказі Генерального штабу Збройних Сил України від 26.08.2020 року №80 “Про затвердження та введення в дію методик розрахунку потреб та основних показників для забезпечення стійкого функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем і мереж Міністерства оборони та Збройних Сил України” були висунуті наступні вимоги до ІТС (рисунк 1) [4].

Провівши аналіз вимог зазначених на рисунку 1 слід звернути увагу на нову вимогу до ІТС яка раніше не

використовувалася - це “керованість” нажаль її було віднесено до додаткових показників, хоча проведені попередні дослідження вказують на те, що керованість буде значно впливати на такі показники як пропускна спроможність та стійкість, тому, при оцінці ефективності функціонування ІТС варто звернути особливу увагу на даний показник.

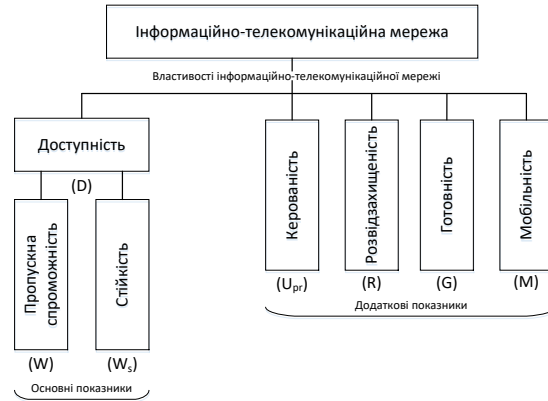


Рисунок 1. Структура показників властивостей інформаційно- телекомунікаційної мережі

Основною проблемою ІТС під час функціонування є проблема підвищення пропускної здатності під час пікових навантажень. На сьогоднішній час завдання керування перенавантаженням ІТМ вирішується протоколами маршрутизації OSPF, IS-IS, RIP в IP-мережах.

Алгоритм Дейкстри цей алгоритм є процедурою пошуку найкоротшого шляху на зваженому орієнтованому графі [5]. Алгоритм використовується протоколами маршрутизації OSPF та IS-IS в IP-мережах. Ребра графа мають вагу $\omega(i, j)$ таку, що

$$w_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } i = j, \text{ та сама вершина,} \\ w > 0, \text{ якщо } |i - j| < 2 \text{ сусідні вершини,} \\ \infty, \text{ якщо інакше.} \end{cases} \quad (1)$$

Довжина шляху на кожному кроці від вершини визначається правилом

$$L_k = \min_V [L(k), L(V) + w_{ij}] \text{ для } V \notin G, L(s) = 0. \quad (2)$$

Правило (1) не дозволяє робити проходи по дугам графа G з великою вагою. Таким чином, множина вершин в графі G являє собою впорядковану послідовність зв'язаних між собою вузлів, яка містить найкоротший шлях від вершини s до k . Цей шлях показаний на рисунку 2 стрілками.

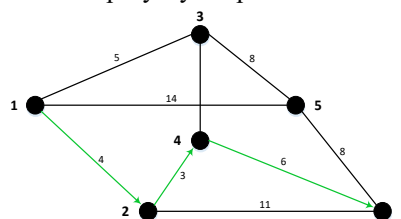


Рисунок 2. Структура зваженого графа

В кожний розрахунковий момент часу на маршрутизатор i поступає сумарний потік інформації, призначений для передавання кожному маршрутизатору j . Цей потік визначає таблицю маршрутизації, яку можна визначити матрицею $P(t)$ розмірності $N \times N$ з нульовою головною діагоналлю

$$P(t) = \sum_{i,j} c_{ij}(t), k \in K, \quad (3)$$

де K – множина потоків інформації, яка зв'язана з відповідними IP-адресами, а c_{ij} – пропускна здатність. Наприклад компанія Cisco в маршрутизаторах визначає вагу дуг за формулою

$$w_{ij} = \frac{10^8}{c_{ij}(t)}, \quad (4)$$

Оскільки алгоритм є ітераційним, то число ітерацій визначається кількістю вершин графа, тому часова складність алгоритму $O(N)$. В межах кожної ітерації, відбувається нове проходження з врахуванням нової $(j+1)$ вершини. При цьому вершини з найбільшою вагою вивільняються, а довжина шляху з новими вершинами поновлюється, кращий результат запам'ятовується. Це те ж оцінюється кількістю вершин. Загальна продуктивність алгоритму оцінюється величиною $O(N^2)$. Таким чином, алгоритм Дейкстри є ресурсоємним, але завдяки знанням топології мережі і шляху до потрібної вершини, маршрутизатор завжди знаходить альтернативний шлях до потрібного вузла мережі у випадку виникнення проблем у будь-якому вузлу визначеного шляху.

Резервування пропускної здатності повинно враховувати навантаження мережі. Для контролю маршрутизатор доповнюється засобами вимірювання навантаження, які будуть створювати аналогічно (3) матрицю навантажень $X = |x_{ij}|$. Тоді алгоритм з резервуванням трафіку може бути записаний як

$$\bar{c}_{ij}(t) = \begin{cases} c_{ij} + \Delta, & \text{якщо } c_{ij} < x_{ij}, \\ c_{ij}, & \text{якщо інакше,} \end{cases} \quad (5)$$

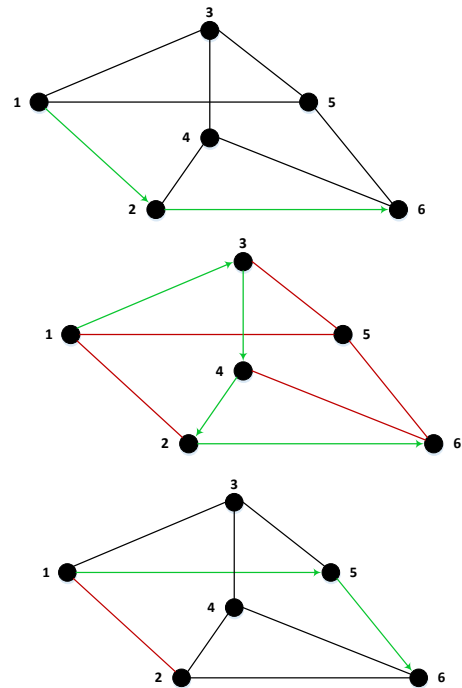
де Δ – частка, що компенсує перенавантаження.

Слід також звернути увагу і на алгоритм Белмана-Форда за сутністю він нагадує алгоритм Дейкстри. На відміну від алгоритму Дейкстри цей алгоритм не відкидає ребр з великою вагою та ітераційно розраховує довжину усіх шляхів в графі, запам'ятовуючи мінімальний шлях, використовується протоколом маршрутизації RIP при чому довжина маршруту не повинна бути більше 16 (безкінечність) це зроблено для того щоб уникнути великих петель в мережі. Кількість ітерацій, як і в алгоритмі Дейкстри визначається кількістю вершин, а кількість розрахунків в межах ітерації кількістю ребр, то часова складність алгоритму оцінюється величиною $O(V \cdot R)$. При однакових

розмірах графа алгоритм Дейкстри є менш ресурсоємним ніж Белмана-Форда, а значить більш швидкий. Зменшення ресурсоємності можна досягти зменшенням кількості ребр, тобто переходом до розрідженого графу.

Тож пропонуємо розглянути зміну структури системи, що функціонує за алгоритмом Белмана-Форда.

Під реконфігурацією інформаційної системи будемо розуміти зміну будови системи, яка стосується розміру чи її топології. Особливістю реконфігурації є перебудова структури та топології системи з метою виключення перевантажень та збоїв в роботі системи. Вважається, що мережа виконує свої функції, поки між вузлами здійснюється обмін інформації. Приклад реконфігурування системи показаний на рисунку 3.



Рисунк 3. Зміна будови інформаційно-телекомунікаційної системи в результаті втрати зв'язку

Таким чином, внаслідок перевантажень чи збоїв топологія локальної мережі змінюється до тих пір поки не залишиться хоча б один маршрут для передачі даних.

Відповідно до загального уявлення про інформаційно-телекомунікаційну мережу слід зауважити, що вона є системою з обмеженою кількістю можливих станів. Тому її поведінку можна промоделювати за допомогою математичного апарату аналізу марківських ланцюгів.

Будемо вважати, що в процесі роботи мережі, яка складається з кінцевої множини елементів N , обмінюється інформацією між всіма елементами за протоколами OSPF або RIP, що відповідає умовам нормального функціонування системи [6]. Початковий стан мережі позначимо S_1 . Якщо за якимись не випадковими причинами починають виходити з ладу елементи мережі чи може пропадати обмін інформацією, то відбувається перехід системи до іншого стану. Будемо вважати, що елементи системи не перевантажуються одночасно, а по одному, тому

здійснюються послідовні переходи зі стану S_i у стани S_2, S_3, \dots, S_i через певні інтервали часу Δt , i означає номер стану. Послідовний набір станів комп'ютерної мережі та переходів між ними утворює ланцюг Маркова. Оскільки ланцюг послідовний, то функціонування системи можна подати у вигляді схеми "загибель-розмноження".

Нехай комп'ютерна мережа складається з n вузлів, тому відповідно до підходу за схемою "загибель-розмноження" введемо стани $S_i, i=1..n+1$, де S_1 – стан мережі, що відповідає функціонуванню всіх вузлів без перевантажень. За умови впливу зовнішніх і внутрішніх факторів погіршується пропускна здатність каналів в мережі з фіксованою інтенсивністю λ . При цьому здійснюється перехід в стани, коли вузли поступово втрачають пакети, послідовно один за другим. Таким чином, здійснюється перехід в стан S_2 , коли не працює 1 вузол, і так далі, а відповідно S_{n+q} – комп'ютерна мережа перестала виконувати завдання у зв'язку з виходом з ладу $(n-q)$ - вузлів. Система також може вживати заходи щодо нарощування пропускної здатності, що відбувається з інтенсивністю $\mu > \lambda$. При цьому з інтенсивністю μ відбуваються послідовні переходи зі станів S_i у стани S_{i-1} . Знайдемо ймовірності P_i знаходження інформаційно-телекомунікаційної мережі в кожному з кінцевих станів S_i та проаналізуємо їх. Ймовірності знаходження системи у фінальних станах знаходяться за формулами

$$P_i = P_0 \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k}, i \neq 0, \quad P_0 = \left(1 + \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k} \right)^{-1} \quad (6)$$

Результати розрахунку за формулами (6) свідчать проте, що чим більше μ , тим краще система справляється з пакетами, більше ймовірність знаходження її у стані з мінімальними затримками та менше ймовірність знаходження у стані з найбільшими затримками.

Розглянувши алгоритми Дейкстри та Белмана-Форда можна зробити висновки щодо їх ефективності адже керованість в даних мережах не потребує втручання з зовні, система працює автономно. Алгоритм Дейкстри більш складний, але враховує пропускну здатність каналу зв'язку, але на жаль не враховує перевантаженість каналу це призводить до того що деякі канали більш навантажені ніж інші. Вирішення цього питання можливо врахувавши навантаженість каналу і таким чином навантаження в мережі здійснюватиметься більш рівномірно, алгоритм Белмана-Форда, пропускну спроможність каналу зв'язку не враховує, але за рахунок своєї простоти він є більш швидким. Обидва методи за рахунок автоматизації процесів позитивно впливають на стійкість ІТС, але лише опосередковано, для ВІТС цього не зовсім достатньо. Тому пропонється створити алгоритм маршрутизації який би задовольнив потреби військових.

На рисунку 1 зазначені вимоги до ВІТС відповідно до них ми робимо висновки, що основними показниками ефективності функціонування ВІТС є пропускна здатність та стійкість, але є вимога така як розвідзахищеність, яка повинна бути також врахована в алгоритмі маршрутизації ВІТС, адже скритність управління досягається за рахунок використання максимально розвідзахищених каналів зв'язку, проте не завжди такі канали зв'язку можливо забезпечити. В такому випадку інформація по таких каналах зв'язку повинна проходити лише в тому випадку коли решта каналів зв'язку не можуть забезпечити обмін інформацією. Таку задачу в автоматичному режимі може вирішити запропонований варіант маршрутизації.

Тому запропонований протокол маршрутизації буде враховувати пропускну спроможність та стійкість назвемо його throughput and stability (T&S) який будемо використовувати в IP-мережах. Ребра графа мають вагу ω таку, що

$$\omega_{\mu, K_{cm}, K_{p/3}} = \begin{cases} \mu = \mu_{k3} - \mu_n, \text{ при умові, що } \mu > 0, \\ 0 < K_{cm} \leq 1, \text{ чим ближче до 1 тим краще,} \\ 0 < K_{p/3} \leq 1, \text{ чим ближче до 1 тим краще.} \end{cases} \quad (7)$$

Таким чином для вибору найкращого маршруту необхідно побудувати матриці маршрутизації за кожним з критеріїв, тоді отримаємо

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \dots & \mu_{mn} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$K_{cm} = \begin{vmatrix} K_{cm11} & K_{cm12} & \dots & K_{cm1n} \\ K_{cm21} & K_{cm22} & \dots & K_{cm2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{cmm1} & K_{cmm2} & \dots & K_{cmmn} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$K_{p/3} = \begin{vmatrix} K_{p/311} & K_{p/312} & \dots & K_{p/31n} \\ K_{p/321} & K_{p/322} & \dots & K_{p/32n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{p/3m1} & K_{p/3m2} & \dots & K_{p/3mn} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

Маючи дані з даних трьох матриць необхідно побудувати таблицю маршрутизації у вигляді матриці за найбільш ефективним маршрутом

$$\omega = \begin{vmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{m1} & \omega_{m2} & \dots & \omega_{mn} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{де } \omega_{mn} = \mu_{mn} \cdot K_{cmmn} \cdot K_{p/3mn}.$$

Для того щоб не завантажувати маршрутизатори надлишковими обчислювальними процесами наповнення матриці здійснити лавинним методом як це

реалізовано в протоколі OSPF. Також для підвищення ефективності функціонування доцільно створити центр контролю та управління ВІТС це дасть змогу своєчасно реагувати на кризові ситуації, виявляти несанкціоновані підключення та своєчасно підключати резерв сил і засобів для ефективного функціонування ВІТС.

Висновки

Отже для того щоб ВІТС більш ефективно функціонувала за наявними протоколами необхідно провести лише розрахунки необхідної пропускної спроможності що включатиме вхідний та вихідний потік даних та резерв пропускної спроможності. Для запропонованого алгоритму маршрутизації T&S необхідно крім розрахунків пропускної спроможності провести ще й розрахунки стійкості та розвідзахищеності. Для визначення наскільки це вплине на швидкість формулювання таблиць маршрутизації необхідно провести додаткові дослідження.

Список використаних джерел

1. ВСТ 01.112.001-2006. Військовий зв'язок. Терміни та визначення. – К., 2006. – 26 с.
2. Технологія АТМ – асинхронний режим переносу інформації [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://learn.ztu.edu.ua>.
3. Зв'язок та інформаційні системи : доктрина / Центральне управління зв'язку та інформаційних систем Генерального Штабу Збройних Сил України. Київ, 2020. 74 с.
4. Наказ Генерального штабу Збройних Сил України №80 від 26.08.2020 року "Про затвердження та введення в дію методик розрахунку потреб та основних показників для забезпечення стійкого функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем і мереж Міністерства оборони України та Збройних Сил України".
5. Алгоритм Дейкстри [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://disted.edu.vn.ua>.
6. Розв'язок задачі про найкоротший шлях використовуючи алгоритм Беллмана-Форда. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.mathros.net.ua/rozvjazok-zadachi-pro-najkorotshyj-shljah-vukorustovujuchu-algorytm-bellmana-forda.html>.

IMPROVED ALGORITHM FOR COMMUNICATION CHANNEL STATE PROTOCOL FOR ROUTING IN A MILITARY INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM (NETWORK)

¹Yurii Khazhanets (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-8926-2474>

¹Iona Korenivska (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-0544-6082>

²Maxim Kasianenko (Candidate of Military Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-3749-4441>

¹The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine

²Department of Military Education and Science of the Ministry of Defense of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article analyzes the available algorithms for communication channel state protocols, which are necessary to ensure routing in the information and telecommunication system (network), since they were oriented for civilian use, there was a need to create a communication channel state protocol specifically for military information and telecommunication systems (network). After all, as indicated by the conducted studies of processes in various data transmission systems based on multi-service networks, the physical failure of communication channels leads to a decrease in the total bandwidth, but not only due to the loss of communication channels. A change in the structure of the network entails an increase in the volume of service information aimed at ensuring the functioning of the data transmission system, and therefore to a decrease in the share of computing resources of network elements aimed at performing the main function - data transmission.

Keywords: communication channel status protocol, information and telecommunication system (network), routing algorithm.

References

1. VST 01.112.001-2006. Military communications. Terms and definitions. - K., 2006. - 26 p.
2. ATM technology - asynchronous mode of information transfer [Electronic resource] / Access mode: <https://learn.ztu.edu.ua>
3. Communication and information systems: doctrine / Central Department of Communication and Information Systems of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine. Kyiv, 2020. 74 p.
4. Order of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine

"On the approval and implementation of methods for calculating needs and key indicators to ensure the stable functioning of information and telecommunication systems and networks of the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine" No. 80 dated August 26, 2020.

5. Dijkstra's algorithm [Electronic resource] / Access mode: <https://disted.edu.vn.ua>.

6. Solving the shortest path problem using the Bellman-Ford algorithm [Electronic resource] / Access mode: <https://www.mathros.net.ua/rozvjazok-zadachi-pro-najkorotshyj-shljah-vukorustovujuchu-algorytm-bellmana-forda.html>

УДК 681.324

¹Дахно Наталія Борисівна (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-3892-4543>

²Барабаш Олег Володимирович (доктор технічних наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0002-5030-2580>

²Миронюк Микола Юрійович (кандидат військових наук)

<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700>

²Базіло Сергій Михайлович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-1597-3724>

²Коломієць Юрій Миколайович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-9767-0750>

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ОДНОКРОКОВОГО ВАРІАЦІЙНО-ГРАДІЄНТНОГО МЕТОДУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В статті розглядається застосування однокрокового варіаційно-градієнтного методу в системах керування безпілотними літальними апаратами у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень. Проведено чисельний експеримент, який показав ефективність застосування вказаного методу. Вирішено завдання розробки оптимальної програми польоту БпЛА із застосуванням наближених методів для класу завдань спостережень та пошуку заданих об'єктів, а також виконання польоту згідно з заданою програмою для використання у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень для забезпечення якості і ефективності управління.

Ключові слова: протокол стану каналів зв'язку, інформаційно-телекомунікаційна система (мережа), алгоритм маршрутизації.

Вступ

Інтенсивний розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА) за останній час привів до значного поширення переліку завдань, які успішно вирішуються безпіотною авіацією як в військовій, так і в цивільній сферах [1, 2].

У зв'язку із бойовими діями в нашій країні цей напрямок набув ще більшого значення. Застосування безпілотної авіації на лінії бойового зіткнення призводить до більш успішних дій Сил оборони та допомагає значно зменшити втрати.

Особливе місце на лінії бойового зіткнення займає клас завдань спостереження та пошуку об'єктів. Очевидно що для мінімізації витрат на виконання завдань пошуку конкретних об'єктів за їх розмірами та з урахуванням погодних умов кожного разу повинна розроблятися спеціальна програма польоту БпЛА [3, 4]. В зв'язку з цим можна стверджувати, що завдання розробки оптимальної програми польоту БпЛА із застосуванням наближених методів для класу завдань спостережень та пошуку заданих об'єктів, а також виконання польоту згідно з заданою програмою, є безумовно актуальним.

Матеріали та методи

Дослідження і розробка алгоритмів, що узгоджують динамічні характеристики об'єкта пошуку з параметрами польоту БпЛА дозволяє в реальному масштабі часу розробляти оптимальну програму польоту БпЛА для вирішення задач спостереження та пошуку заданих об'єктів.

Система підтримки прийняття рішень (СППР)

повинна вирішувати ряд основних задач, серед яких: визначення оптимальних режимів польоту в залежності від завдань, що вирішуються; визначення оптимальної траєкторії польоту для виконання польотного завдання; побудова оптимальних планів (програм) польотів [5 – 8]. З метою вирішення цих завдань в останній час широко застосовуються обернені задачі механіки. Ці задачі по визначенню прикладених до механічної системи активних сил і моментів, а також параметрів даної системи і накладених на неї зв'язків, при яких стає можливим один із рухів із заданими властивостями. Це дає можливість побудови траєкторій, наближених до оптимальних з урахуванням прийнятих обмежень.

Метою статті є вирішення завдання розробки оптимальної програми польоту БпЛА із застосуванням однокрокового варіаційно-градієнтного методу для класу завдань спостережень та пошуку заданих об'єктів, а також виконання польоту згідно з заданою програмою у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень із забезпечення якості і ефективності управління.

Результати

Система підтримки прийняття рішень в контурі системи управління БпЛА функціонує наступним чином: керівник розрахунку плану використання БпЛА – особа, що приймає рішення (ОПР), отримує завдання на проведення пошуку заданого об'єкта в визначеному районі, уточнює та доводить його до оператора керування БпЛА. Оператор формалізує

задачу та на її основі, з урахуванням картографічної інформації, оцінки ситуації, аналізу даних, розробляє основні вимоги до виконання польотного завдання для БпЛА. Далі він вводить в СППР відповідні необхідні дані. На основі аналізу вхідної інформації щодо виконання задачі пошуку і розрахунків параметрів польоту БпЛА, СППР за допомогою модулів побудови варіантів плану (програми) польоту формує варіанти цього плану. В модулі прийняття рішення СППР на основі отриманих варіантів здійснюється вибір оптимального плану польоту. При необхідності ОПР контролює і корегує процес вибору плану польоту та, при необхідності, вносить зміни в нього. Характеристики отриманої програми польоту від СППР передаються в підсистему керування БпЛА, яка забезпечує виконання цієї програми.

Будемо досліджувати БпЛА, що рухається в площині і моделюється матеріальною точкою масою m [9]. Його рух описується системою із трьох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. При відповідному виборі управляючих сил (F_r, F_φ) рівняння такого типу описують плоский рух літального апарату в фазових змінних $(r, \dot{r}, \dot{\varphi})$, де (r, φ) вихідна полярна система координат. При цих умовах динамічна модель руху літального апарату описується рівняннями:

$$m(\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) = F_r, \quad m(r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}) = F_\varphi. \quad (1)$$

Нехай управляючі сили

$$F_r = m[\mu_2^2 r^2 - r\dot{\varphi}^2 - (\mu_1 + \mu_2)(\dot{r} + \mu_2 r) + g(\dot{\varphi})], \quad (2)$$

$$F_\varphi = m[(2\dot{r} - \mu_3 r)\dot{\varphi} + r^2],$$

де μ_1, μ_2, μ_3 сталі і $g(\dot{\varphi})$ управляюча функція. Можна провести заміну змінних наступним чином:

$$x_1 = \dot{r} + \mu_2 r, \quad x_2 = r, \quad x_3 = \dot{\varphi}. \quad (3)$$

Тоді вихідні рівняння траєкторії руху БпЛА можна записати у вигляді трьохвимірної системи:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\mu_1 x_1 + g(x_3), \\ \dot{x}_2 = -\mu_2 x_2 + x_1, \\ \dot{x}_3 = -\mu_3 x_3 + x_2. \end{cases} \quad (4)$$

Ця система є основним об'єктом дослідження. Отримана система рівнянь зводиться до звичайного диференціального рівняння третього порядку

$$y''' + (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)y'' + (\mu_1\mu_2 + \mu_1\mu_3 + \mu_2\mu_3)y' + \mu_1\mu_2\mu_3 y = g(y); \quad (5)$$

відносно невідомої $y(t) = x_3(t)$.

В класичному аналізі розроблено багато прийомів знаходження розв'язків таких рівнянь за допомогою елементарних (або спеціальних) функцій. Але часто при розв'язанні практичних задач ці методи виявляються або геть безпорадними, або надто витратними в часі. Тобто не мають застосування у режимі реального часу, у якому має коригуватися траєкторія руху та польотне завдання БпЛА. По цій причині для розв'язання задач практики були створені методи наближеного розв'язку диференціальних рівнянь. Серед великої кількості цих методів найчастіше на практиці застосовують варіаційні, проєкційні, градієнтні та різницеві методи. Останнім часом все частіше застосовуються підходи, які суттєво прискорюють швидкість збіжності градієнтних методів, мають більш широку область застосування і більш стійкі до збурень. Ці підходи поєднують у собі ідеї як варіаційних, так і градієнтних методів [1, 10, 11].

Проведемо порівняльний експеримент з метою демонстрації реальних можливостей варіаційно-градієнтних методів в порівнянні з градієнтним методом при дослідженні динамічних моделей руху БпЛА (1), (2).

Для цього розглянемо динамічну модель, що описується рівняннями (1) і управляючими силами:

$$\begin{aligned} F_r &= m[5r^2 - r\dot{\varphi}^2 + 56 - 24t^2 - \\ &- 4 \int_0^1 G(t, \xi) \dot{\varphi}(\xi) d\xi], \\ F_\varphi &= m[2\dot{r}\dot{\varphi} + r^2], \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$G(t, \xi) = \begin{cases} \xi, & 0 \leq \xi \leq t \\ \xi - 1, & t \leq \xi \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

При умовах $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}(1) = \ddot{\varphi}(1) = 0$.

Зводячи (1), (6) до звичайного диференціального рівняння третього порядку отримаємо задачу:

$$\begin{cases} y'''(t) - 5y'(t) + 4 \int_0^1 G(t, \xi) y(\xi) d\xi = 56 - 24t^2; \\ y(0) = y(1) = y''(1) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

В процесі експерименту до динамічної моделі (8), (7) для аналізу траєкторії руху БпЛА застосовувались метод найшвидшого спуску та однокроковий і двокроковий варіаційно-градієнтні методи для рівнянь з K - позитивно визначеними K - симетричними операторами.

Задача (8), (7) задовільняє умовам теорем про збіжність однокрокового і варіаційно-градієнтного метода для рівнянь з K - позитивно визначеними K - симетричними операторами [3, 7], якщо

Таблиця 1

$$Ky(t) = \int_0^t y(\xi) d\xi, \quad \begin{cases} By(t) = y''', \\ y(0) = y(1) = y''(1) = 0. \end{cases}$$

Значить система (1), (8), що описує динамічну модель руху БПЛА має єдиний розв'язок, а також однокроковий варіаційно-градієнтний метод для цієї задачі збігається.

Для рівняння (8) точний розв'язок можна отримати аналітичним чином. Точний розв'язок має наступний вигляд (рис.1):

$$\dot{\varphi} = y^*(t) = -0.2529233637e^{2t} + 4.3030627419e^t + 11.6969372581e^{-t} - 15.7470766363e^{-2t} - 12t.$$

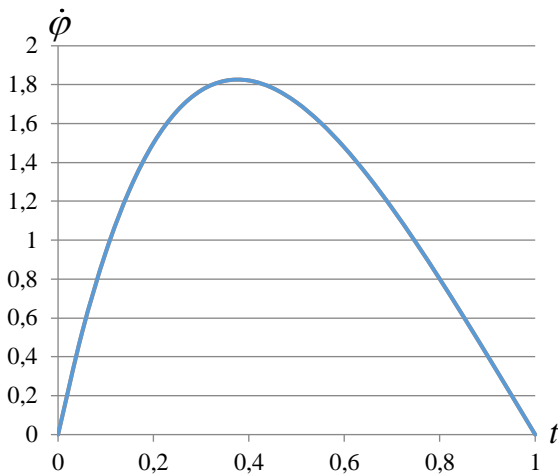


Рисунок 1. Швидкість зміни кута поворота БПЛА

Для реалізації однокрокового варіаційно-градієнтного методу обчислення проводились за допомогою математичного пакету Derive A Mathematical Assistant.

За координатні функції була взята послідовність функцій

$$\{\varphi_i(t) = t^i(t-1)^3\}_{i \geq 1} \subset H_0.$$

При побудові наближень було покладено $n = 2$, тобто брались дві координатні функції

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= t(t-1)^3, \\ \varphi_2(t) &= t^2(t-1)^3. \end{aligned}$$

За початкове наближення була взята довільна функція з H :

$$y_0 = t(t-1)^3.$$

При розв'язанні цієї задачі однокроковим варіаційно-градієнтним методом, вже після першої ітерації ми отримали розв'язок з точністю до $\varepsilon = 10^{-4}$. Після другої ітерації точність розв'язку вже складала $\varepsilon = 10^{-6}$.

Нижче в таблиці наведені результати обчислень.

Однокроковий варіаційно-градієнтний метод

$t y$	$ y^*-y_1 $	$ y^*-y_2 $	$ y^*-y_3 $
0	0	0	0
0,25	$8,688108 \cdot 10^{-4}$	$5,94684 \cdot 10^{-7}$	$9,920092 \cdot 10^{-8}$
0,5	$8,284705 \cdot 10^{-4}$	$1,6588193 \cdot 10^{-6}$	$6,572202 \cdot 10^{-7}$
0,75	$4,087585 \cdot 10^{-4}$	$9,157572 \cdot 10^{-6}$	$1,402053 \cdot 10^{-6}$
1	0	0	0

Таким чином, однокроковий варіаційно-градієнтний метод показує дуже хорошу швидкість збіжності і є стійким до збурень. Такі показники дозволять суттєво зменшити розрахункові затрати при незмінній точності обчислень.

Висновки

Таким чином, в статті був розглянутий варіант вирішення завдання розробки оптимальної програми польоту БПЛА із застосуванням однокрокового варіаційно-градієнтного методу для керування безпілотними літальними апаратами у складі програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень, реалізація якого дозволить досягти нової якості функціонування автоматизованих систем управління, істотно підвищити оперативність обробки інформації в процесах прийняття рішень і тим самим підвищити якість і ефективність управління. Це дозволить підвищити ефективність застосування безпілотних комплексів розвідки та спостереження за рахунок автоматизації підготовки польотного завдання, оптимізації маршруту польоту з прив'язкою до електронної мапи місцевості та визначення оптимальних параметрів польоту з можливістю корегування параметрів польотного завдання в реальному масштабі часу.

Список використаних джерел

1. N. Dakhno, O. Barabash, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), KYIV, Ukraine, 2020, pp. 81-84, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255516.
2. Tyurin V., Martyniuk O., Mirnenko V., Korenivska I. General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles. 5th International Conference ACTUAL PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DEVELOPMENT (APUAVD-2019) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 22-24, 2019 Kyiv, Ukraine, pp. 75 – 78.
3. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик/ В.М. Ильюшко, М.М. Митрахович, А.В. Самков, В.И. Силков и др.; под об. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. 302 с.
4. Беспилотные летательные аппараты: Методика сравнительной оценки боевых возможностей/ М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков, Х.В. Бурштынская и др.; под об. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. 288 с.
5. Сільков В.І. Бойове маневрування літальних апаратів. К.: НАОУ, 2004. 340 с.
6. Силков В.И. Динамика полета летательных аппаратов. К.: КМУ ГА, 1997. 425 с.

7. Mashkov O.A., Murasov R.K., Kravchenko Y.V., Dakhno N.B., Leschenko O.A., Trush, A.V. Optimal forecast algorithm based on compatible linear filtration and extrapolation. *Mathematical Modeling and Computing*, 2021, № 8 (2), pp. 157 – 167. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.02.157>

8. Tymochko O., Pavlenko M., Larin V., Osieivskiy S., Kasianenko M. Research of providing the video information protection using wireless technologies for aerial reconnaissance by unmanned aerial vehicles. 6th International Conference Actual problems of unmanned aerial vehicles development (APUAVD-2021) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 19-21, 2021 Kyiv, Ukraine, pp. 49–52.

9. Кондратьева Л.А. Обратные краевые задачи на многообразиях // Вестник Российского университета дружбы народов, Серия Математика. Информатика. Физика. 2010. №1. С.34-38.

10. Barabash O. V., Shevchenko H. V. Modified gradient method in a decision support system for control unmanned aerial vehicles. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 2016, №16. 60 – 62 с.

11. N. Dakhno, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2020, pp. 81-84.

APPLICATION OF THE ONE-STEP VARIATION-GRADIENT METHOD FOR CONTROLLING UNMANNED AIRCRAFT

¹**Nataliia Dakhno** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-3892-4543>

²**Oleg Barabash** (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-5030-2580>

²**Mykola Myroniuk** (Candidate of Military Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700>

²**Serhii Bazilo** (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-1597-3724>

²**Yurii Kolomiets** (Ph.D.)

<https://orcid.org/0000-0002-9767-0750>

¹*Kyiv National University named after Taras Shevchenko, Kyiv, Ukraine*

²*The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine*

The article considers the application of the one-step variational-gradient method in control systems of unmanned aerial vehicles as part of the software of decision support systems. A numerical experiment was conducted that showed the effectiveness of the specified method. The task of developing the optimal UAV flight program using approximate methods for the class of tasks of observation and searching for given objects, as well as flight execution according to the given program for use as part of decision support system software to ensure the quality and efficiency of management, has been solved.

Keywords: *communication channel status protocol, information and telecommunication system (network), routing algorithm.*

References

1. N. Dakhno, O. Barabash, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), KYIV, Ukraine, 2020, pp. 81-84, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255516.

2. Tyurin V., Martyniuk O., Mimenko V., Korenivska I. General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles. 5th International Conference ACTUAL PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DEVELOPMENT (APUAVD-2019) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 22-24, 2019 Kyiv, Ukraine, pp. 75 – 78.

3. Bespylotnye letatelnye apparaty: Metodyky priblyzhennykh raschetov osnovnykh parametrov y kharakterystyk/ V.M. Yliushko, M.M. Mytrakhovych, A.V. Samkov, V.Y. Sylkov y dr.; pod ob. red. V.Y. Sylkova. – K.: TsNYY VVT VS Ukrayny, 2012. 302 s.

4. Bespylotnye letatelnye apparaty: Metodyka sravnytelnoi otsenky boevykh vozmozhnostei/ M.M. Mytrakhovych, V.Y. Sylkov, A.V. Samkov, Kh.V. Burshtynskaia y dr.; pod ob. red. V.Y. Sylkova. – K.: TsNYY VVT VS Ukrayny, 2012. 288 s.

5. Silkov V.I. Boiove manevruvannia litalnykh aparativ. K.: NAOU, 2004. 340 s.

6. Sylkov V.Y. *Dynamiyka poleta letatelnykh apparatov*. K.: KМУ HA, 1997. 425 s.

7. Mashkov O.A., Murasov R.K., Kravchenko Y.V., Dakhno N.B., Leschenko O.A., Trush, A.V. Optimal forecast algorithm based on compatible linear filtration and extrapolation. *Mathematical Modeling and Computing*, 2021, № 8 (2), pp. 157 – 167. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.02.157>

8. Tymochko O., Pavlenko M., Larin V., Osieivskiy S., Kasianenko M. Research of providing the video information protection using wireless technologies for aerial reconnaissance by unmanned aerial vehicles. 6th International Conference Actual problems of unmanned aerial vehicles development (APUAVD-2021) Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), October 19-21, 2021 Kyiv, Ukraine, pp. 49–52.

9. Kondrateva L.A. Обратные краевые задачи на многообразиях // Вестник Росийского университета дружбы народов, Серия Математика. Информатика. Физика. 2010. №1. С.34-38.

10. Barabash O. V., Shevchenko H. V. Modified gradient method in a decision support system for control unmanned aerial vehicles. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 2016, №16. 60 – 62 с.

11. N. Dakhno, H. Shevchenko, O. Leshchenko and A. Musienko, "Modified Gradient Method for K-positive Operator Models for Unmanned Aerial Vehicle Control," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2020, pp. 81-84.