

№ 3'2016

НАУКА і ОБОРОНА

Щоквартальний
науково-теоретичний
та науково-практичний журнал
Міністерства оборони України

Видається з 1994 р.

Редакційна колегія:

Володимир Горбулін, *доктор технічних наук, професор,
академік НАН України;*

Юрій Гусак, *доктор військових наук;*

Олексій Загорка, *доктор військових наук, професор;*

Валерій Зубарев, *доктор технічних наук, професор;*

В'ячеслав Косевцов, *доктор військових наук, професор;*

Борис Олексієнко, *доктор військових наук, професор;*

Геннадій Певцов, *доктор технічних наук, професор;*

Григорій Перепелиця, *доктор політичних наук,
професор;*

Ігор Романченко, *доктор військових наук, професор;*

Іван Руснак, *доктор військових наук, професор;*

Андрій Семенченко, *доктор наук з державного
управління, професор;*

Василь Телелим, *доктор військових наук, професор;*

Юрій Терещенко, *доктор технічних наук, професор;*

Олександр Харченко, *доктор технічних наук,
професор;*

Ігор Чепков, *доктор технічних наук, професор*

Інформація для авторів журналу «Наука і оборона»

Матеріали до публікації в журналі відбираються з огляду на результати їх рецензування членами редакційної колегії або зовнішніми фахівцями. Передусім приймаються матеріали, у яких на основі виконаних автором досліджень розв'язано проблему, котра має важливе оборонне значення.

Приймаються також короткі повідомлення, які містять нове розв'язання конкретної задачі, важливої для певної галузі воєнної науки, або такі, у яких викладена суть науково обґрунтованих воєнних, технічних, економічних чи технологічних розробок, спрямованих на впровадження досягнень науки в будівництво Збройних Сил, виробництво й експлуатацію військової техніки та озброєння.

Авторам – здобувачам наукових ступенів редакційна колегія рекомендує готувати статті з урахуванням вимог ДАК Міністерства освіти і науки України до наукових публікацій у друкованих фахових виданнях. Видання «Наука і оборона» є фаховим у галузі військових і технічних наук.

Рукопис статті подається до журналу у двох примірниках. Сторінки мають бути пронумеровані, а рукопис – підписаний авторами.

Загальний обсяг рукопису разом з графічними матеріалами не повинен бути більшим за 16 сторінок. Формат аркуша – А4. На одній сторінці має бути не більш як 30 рядків та до 60 знаків (з урахуванням розділових знаків і проміжків між словами) у кожному рядку. Розмір шрифту підготовленого на комп'ютері матеріалу – 14; міжрядковий інтервал – 1,5 рядка (розмір кроку зсуву – 24). Розміри полів, мм: зліва – 30, справа – 10, зверху – 20, знизу – 25.

На початку рукопису наводяться відомості про автора: прізвище, ім'я та по батькові автора, його посада, вчений ступінь та звання, військове звання, назва статті, анотація (не більш як 6–8 рядків). Наприкінці статті наводяться номери контактних телефонів автора та адреса електронної пошти.

Формули, символи та знаки мають бути розмічені.

Оформлюючи бібліографічний перелік посилань, потрібно дотримуватися вимог ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання», зокрема вказати автора та назву твору, місце публікації (для книжки – місто та видавництво; для статті – назву збірника чи журналу, його номер або випуск), дату публікації, кількість сторінок у книжці або сторінки, на яких розміщено статтю.

Ілюстрації подаються окремо від тексту. Місце розташування ілюстрації позначається на лівому полі сторінки. З метою належного відтворення ілюстрацій потрібно подавати якісні чорно-білі рисунки та фотографії або їх електронний варіант у форматах *.tif чи *.eps.

До редакції треба надати також електронний варіант рукопису статті, ілюстрацій, які мають повністю відповідати друкованому варіантові.

До рукопису статті додаються:

- рекомендація вченої ради наукової установи / вищого навчального закладу щодо можливості публікації роботи автора в журналі «Наука і оборона»;
- документ про можливість відкритої публікації матеріалів;
- заява авторів (спільна) про згоду щодо невиконання авторського гонорару (для скорочення витрат на видання виплата авторських гонорарів не передбачається) та про те, що підписаний і поданий до редакції варіант є остаточним та вихідним для виконання редакційно-видавничих робіт, до якого автор може внести лише незначні (не більш як 3% обсягу статті) корективи на етапі читання ним верстки, а значні зміни в матеріалі або відкликання статті з метою перероблення її можуть здійснюватися в разі оплати автором пов'язаних із цим додаткових виробничих витрат.

Матеріали, які неохайно оформлені й не відповідають зазначеним вимогам, редакцією не розглядаються.

Редакція не повідомляє авторів про зміни й скорочення рукопису, які мають редакційний характер.

ЗМІСТ

Національна і глобальна безпека

Тимошенко Р. І., Лобко М. М., Боцарніков В. П.,
Свешніков С. В. Погляди на планування розвитку
в секторі безпеки та оборони України3

Гріненко О. І., Кутувий О. П., Устименко О. В.
Стратегічні рішення керівництва держави
у формуванні завдань мобілізаційної підготовки
національної економіки10

Україна і НАТО

Голопатюк Л. С., Литовченко В. М., Кузьменко В. Ю.,
Васильєв Ю. Є. Запровадження стандартів НАТО
в повсякденну діяльність Збройних Сил України
в контексті підвищення рівня взаємосумісності
зі збройними силами держав – членів Альянсу17

Теорія воєнного мистецтва

Загорка О. М., Корецький А. А., Павліковський А. К.
Застосування нечіткої технології
під час вироблення замислу операції (бою):
методичний аспект23

Пєвцов Г. В., Залкін С. В., Сідченко С. О.,
Хударковський К. І. Методичний підхід
до аналізу інформаційно-психологічної
операції противника27

Військово-технічні проблеми

Семон Б. Й., Сафронов О. В., Неділько О. М.
Трансзвуковий флатер: від МіГ-25 до SpaceShip Two32

Родіонов С. С., Сергієнко В. Д., Пічак О. О.
Підвищення точності пеленгації джерел
електромагнітного випромінювання
в умовах впливу активних перешкод36

Прібілєв Ю. Б., Опенько П. В. Математичні моделі
системи технічної експлуатації та ремонту
комплексів зенітного ракетного озброєння40

Перспективні технології в оборонній сфері

Чепков І. Б., Григор'єв О. П., Беліков В. Т.,
Ковалішин С. С. Роль, місце та принципи побудови
тилових наземних роботизованих комплексів
під час виконання заходів матеріального
забезпечення військ у зоні бойових дій46

Кучеров Д. П., Козуб А. М., Голенковська Т. І.
Реконфігурація мультиагентних систем
в умовах завад52

Резюме59

Contents

National and global security

R. I. Tymoshenko, M. M. Lobko, V. P. Bocharnikov,
S. V. Sveshnikov. Views on development planning
in the security and defence sector of Ukraine3

O. I. Hrinenko, O. P. Kutovyi, O. V. Ustimenko.
Strategic decisions of state leadership in shaping
tasks of mobilization preparation of the national
economy10

Ukraine and NATO

L. S. Holopatiuk, V. M. Lytovchenko, V. Y. Kuzmenko,
Y. Y. Vasyliiev. The integration of NATO standards
into daily activity of the Armed Forces of Ukraine
in the context of interoperability level development
with the armed forces of the Alliance member-states17

Theory of art of war

O. M. Zahorka, A. A. Koretskyi, A. K. Pavlikovskiy.
The implementation of fuzzy technology
during the development of concept of operation
(combat): methodological aspects23

G. V. Pevtsov, S. V. Zalkin, S. O. Sidchenko,
K. I. Khudarkovskiy. A methodical approach
to the analysis of enemy's information
and psychological operations27

Military and technical issues

B. I. Semon, O. V. Safronov, O. M. Nedilko.
Transonic flutter: from MIG-25
to SpaceShip Two32

S. S. Rodionov, V. D. Serhiienko, O. O. Pichak.
Increasing the bearing accuracy of electromagnetic
radiation sources in conditions of active jamming36

Y. B. Pribylev, P. V. Openko. Mathematical models
of anti-aircraft armament maintenance
and repair systems40

Promising technologies in defense sphere

I. B. Chepikov, O. P. Hryhoriev, V. T. Belikov,
S. S. Kovalishyn. The role, place
and principles of construction of ground logistic
robotic systems for logistic support
in the combat zone46

D. P. Kycherov, A. M. Kozub, T. I. Holenkovska.
Reconfiguration of multi-agent systems
under conditions of interference52

Summaries59

УДК 004.722

Д. П. Кучеров,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України,

А. М. Козуб,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри застосування космічних систем та геоінформаційного забезпечення Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського,

Т. І. Голенковська,

науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України

Реконфігурація мультіагентних систем в умовах завад

Розглядається мультіагентна система, яка складається з обмеженої кількості агентів, що виконують спільне завдання. На підставі подібності побудови мультіагентних систем і комп'ютерних мереж проведений аналіз відомих топологій організації взаємодії агентів у системі. Обмін інформацією агентів з пунктом управління встановлюється за умовами мінімальної довжини маршруту передачі інформації. Дії в умовах природних та штучних перешкод потребують певної реконфігурації початкової топології, адекватність якої аналізується за схемою «загибель – розмноження».

Ключові слова: мультіагентна система, топологія мережі, маршрутизація інформації, схема «загибель – розмноження», реконфігурація системи.

© Д. П. Кучеров, А. М. Козуб, Т. І. Голенковська, 2016

Останнім часом значного поширення набули мультіагентні системи, які є сукупністю взаємопов'язаних агентів, зайнятих вирішенням певного завдання. Цей факт підтверджується стрімким зростанням кількості публікацій, наукових досліджень, відомостей про технічні новини за зазначеним напрямом [1–7]. Агентами можуть виступати люди, апаратні та програмні засоби, але незалежно від природи агентів їхня взаємодія в межах системи може бути реалізована за однаковими принципами. Серед агентів у системі може бути застосована ієрархія, якщо визначений агент-лідер або менеджер, з яким інші члени команди обмінюються повідомленнями або звітами. Структурно мультіагентна система має ієрархічну чи мережеву конфігурацію, котра складається з вузлів, роль яких виконують агенти чи менеджер, та зв'язків між ними.

Мережева структура системи має перевагу над ієрархічною за часом обміну інформацією, але є надзвичайно складною в разі збільшення кількості вузлів. При побудові мультіагентних систем може бути корисним досвід телефонних, комп'ютерних, транспортних мереж, нафтогазової системи [8, 9]. У військовій сфері мультіагентні системи вже використовуються для проведення розвідки, моніторингу, завдання масованого удару, прихованого знищення об'єктів, нанесення втрат противнику, виведення з ладу озброєння і військової техніки, порушення роботи інформаційних систем тощо [1–4].

Досвід останніх локальних конфліктів свідчить, що найпоширенішими апаратними мультіагентними системами є безпілотні літальні апарати, які використовуються під час підготовки та виконання бойових операцій [1, 2, 10, 11]. Наприклад, розробка БПЛА «Орлан-10» передбачає групу із чотирьох-шести апаратів, які передають інформацію один одному й далі на пункт управління. Їх використання стає доцільним під час досліджень територій великого розміру або застосування завад. Можливе також використання ешелонованої за висотою групи, координатором якої виступає супутник-ретранслятор. Відоме також використання надмалих літальних апаратів – носіїв бойового заряду невеликої маси, які, швидко збираючись в одному місці, здатні завдати великих втрат за рахунок сумарного тротилового еквіваленту вибухової речовини. Перспективним напрямом застосування групи БПЛА є постановка активних і пасивних завад радіоелектронним засобам різного типу. У статті проводиться аналіз поведінки мультіагентної системи в умовах завад.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Мультіагентні системи діють у навколишньому середовищі шляхом виконання певних рухів. При цьому першоплановим завданням стає безпека дій у групі. Звичайно, це завдання вирішується шляхом установлення дистанцій та інтервалів в умовах руху та забезпечення взаємодії за умови виходу з ладу окремих апаратів. Наявність великої кількості апаратів і ймовірність помилок

керування значно ускладнює цей процес, тому різні автори приділяють значну увагу саме цьому питанню.

Так, принципи динамічної децентралізованої взаємодії агентів на основі узгодженості рівнів функціонування (*service level agreement* – SLA) в мультиагентній системі наведені в [5]. Агенти не отримують завдань іззовні, але передбачається безперервна їх самоорганізація за часом. Динамічна взаємодія базується на клонуванні, розподілі ресурсів та адаптації зв'язку. Децентралізація не виключає центрального агента, який взаємодіє з кожним та через якого здійснюється виконання завдань, але постійно він не виконує жодного. Така система здатна обслуговувати кількох користувачів, тому нагадує звичайну мережу.

У [7] сформульовано підхід до контролю формування рою безпілотних літальних апаратів (роботів) для відстеження рухомої цілі в динамічному середовищі на основі методу створення штучного притягуючого потенціального поля в поєднанні з контролером стану зворотного зв'язку. При такому підході між лідером і ціллю генерується потенціальне поле, під дією якого фіксуються відносні положення елементів системи з лідером та здійснюється відстеження цілі. Інші роботи в рої контролюються притягуючим потенціальним полем, що дає їм можливість слідувати за лідером. Під впливом потенціального поля виконується організація побудови спільних дій сусідніх роботів, зіткнення між якими відсутні. Уникнення перешкод відбувається за рахунок відштовхуючого потенціального поля, створеного в регіоні навколо перешкоди.

Методика визначення оптимальної організації в групі на основі існуючих моделей побудови за допомогою теорії графів запропонована в [10]. Розроблений підхід дає змогу визначити оптимальну побудову групи залежно від інтенсивності обміну інформацією.

Альтернативний спосіб прокладання маршруту до цілі, який розглядається в [11], оснований на геометричному поданні маршруту в просторі. Маршрут задається точками, з'єднаними між собою в просторі. З'єднання відбувається прямими лініями та дугоподібними кривими, що породжує множинність вибору маршруту. Оптимальність маршруту досягається введенням обмеження на максимальну кривизну траєкторії та (з метою уникнення зіткнень агентів) додаткових умов стосовно дотримання мінімальної відстані між агентами та відсутності перетину кривих рівної відстані.

У [12] проаналізовані підходи до організації обміну інформацією між окремими елементами групи на основі пакетного підходу передачі інформації. Встановлено, що кращі показники мають протоколи, в яких забезпечується передача пакета даних обмеженого розміру з відповідним контролем.

Самоорганізація мультиагентних систем у реальних умовах призводить до змін у конфігурації системи, пов'язаних з виходом з ладу її елементів. Такі підходи розглядаються в роботах [13, 14] на прикладі мобільних

систем зв'язку. Як показники працездатності таких систем висувуються показники надійності, що може бути виправдано в окремих випадках. Слід зазначити, що єдиного підходу до аналізу мультиагентних систем наразі не вироблено. Тому *метою* цієї статті є оцінювання показників працездатності мультиагентної системи, котра являє собою групу БПЛА, які діють в умовах штучних і природних завад, що призводить до зміни конфігурації системи.

Постановка проблеми

Представимо мультиагентну систему інформаційною мережею з двонаправленими зв'язками між її елементами (вузлами). Вузли мережі здатні приймати, перетворювати, передавати інформацію та обмінюватися певними даними, дозволяється зміна конфігурації системи. За способом управління мережа відповідає архітектурі «клієнт – сервер». Організація зв'язку між вузлами визначається топологією комп'ютерної мережі або конфігурацією графа. Залежно від типу з'єднань вузлів розрізняють топології: шина, кільце, зірка, коміркова та їх комбінації. Необхідність вибору топології мережі диктується низкою факторів, визначальними серед яких є відстань, безпека, надійність, вартість мережі та деякі інші, котрі слід розглядати в кожному окремому випадку розробки системи. Відомі топології комп'ютерних мереж представлені в *таблиці 1*.

Аналіз комп'ютерних мереж за [8, 9] та їхніх можливостей відповідно до *таблиці 1* указують на рідкісне використання таких класичних варіантів топології, як шина, кільце та зірка. Найчастіше застосовуються гібридні топології. Важливість їх викликана розвитком обладнання для створення локальних мереж. Ці топології мають кращі показники надійності й масштабованості, але потребують розподілу трафіку та, відповідно, додаткового обладнання. У тих мережах, де є потреба в обміні великими потоками даних, зокрема потоків цифрових зображень, завантаження файлів, застосування додаткових засобів безпеки, здатність передавання інформації в мережі знижується.

Основною ознакою мультиагентності системи є кількість агентів, які утворюють систему. Їх традиційно більше трьох, вони здатні спільно діяти при виконанні певних завдань, взаємодія організується шляхом обміну повідомленнями. Таким чином, опис мультиагентної системи повинен містити переліки агентів A_i та завдань W_j , набір повідомлень M_k , спосіб обміну повідомленнями (приміром, синхронний чи асинхронний). Наприклад:

$$(A_i : i = 5; W_j : j = 1 \dots n; M_k : k = 1 \dots m; Async) \quad (1)$$

Запис (1) означає, що мультиагентна система складається з п'яти агентів, здатних виконувати n типів діяльності, обмін повідомленнями – асинхронний. Агент у системі характеризується станом, який може бути вільним, зайнятим, активним чи пасивним.

Таблиця 1

Типи топологій

| Мережа | Розгортання | Надійність | Доставка пакетів | Схема доступу |
|---|---|---|---|---|
| Шина  | Просте, шляхом підключення до загальної шини, але не більше 10 вузлів | Дефекти в кабельній магістралі виводять з ладу всю мережу | До кожного комп'ютера мережі пакети поступають одночасно | Конкурентна |
| Кільце  | Мінімум апаратного забезпечення, просте налаштування та розгортання | Відмова вузла призводить до відмови мережі | Рівні можливості отримання пакетів | Маркерна («token») |
| Зірка  | Просте масштабування, необхідність концентратора | Критичний елемент – концентратор | Одне посилання тільки одному комп'ютеру, можливі затримки | Адресна |
| Коміркова  | Потреба в забезпеченні взаємодії із сусідніми вузлами | Утрата однієї лінії зв'язку не впливає на роботу мережі | Пакети поступають адресно | Адресна |
| Шина-зірка  | Потребує додаткового обладнання | Утрата працездатності фрагменту не впливає на всю мережу | Проблеми розподілу трафіку | Конкурентність по шині, адресність по зірці |
| Зірка на кільці  | Необхідність додаткового обладнання | Залежність від концентратора, який керує кільцем | Проблеми розподілу трафіку | Рівний доступ за рахунок маркерів |
| Гібридна коміркова  | Потребує додаткового обладнання | Менша надійність, ніж чисто коміркової | Проблеми розподілу трафіку | Необхідність адресації |

Ставиться завдання визначити показники дій агентів системи в умовах впливу природних чи штучних перешкод на систему (1).

Обмін інформацією. Передача інформації в мульти-агентних системах відбувається згідно з правилами, які регламентуються відповідними протоколами. Ними встановлюються адреса, розмір і структура пакета, що передається, швидкість передачі даних.

Адреса може бути індивідуальною, коли повідомлення надсилається лише одному агенту, груповою, коли повідомлення розсилається кожному агенту в групі або деякій підгрупі агентів. Такий спосіб адресації подібний до адресації в комп'ютерних мережах. Передача даних відбувається від адреси джерела до адреси приймача.

Якщо група агентів значна, тоді виникає потреба передавати інформацію через транзитні вузли. Але при цьому необхідно прокласти маршрут з метою забезпечення мінімуму часу на доставку інформації, що досягається мінімумом транзитних вузлів або наявністю каналів з високою пропускною здатністю та надійністю ліній зв'язку. Зрозуміло, що невелике збільшення кількості транзитних вузлів, котрі мають велику пропускну здатність, є переважним над мінімальною кількістю вузлів з невеликою пропускною здатністю з погляду часу передачі

інформації. Надійні канали зв'язку характеризуються мінімальними втратами інформації, що передається.

Через вузол може проходити декілька підпотоків, їх відрізняють за адресою пункту призначення. Зрозуміло, щоб визначити маршрут, який забезпечив би рівний час потоків різного обсягу даних, потрібно враховувати швидкість передачі, яку мають окремі лінії, та надавати можливість проведення розпаралелювання підпотоків та їх збірку. Переключення вузлів для передачі підпотоків здійснюється за рахунок мультиплексування вільних каналів.

Задача маршрутизації. Ця задача полягає у визначенні маршруту проходження інформації до кінцевого агента. Маршрути можуть бути статичними або динамічними. Статичний маршрут задається одноразово або за певним розкладом та не змінюється в межах певного часу дії інформаційної системи. Динамічні маршрути обчислюються відповідними алгоритмами залежно від топології та стану інформаційної мережі. До них належать алгоритми пошуку найкоротшої відстані в ширину, Дейкстри, Беллмана – Форда, Флойда – Воршалла [15, 16].

Пошук у ширину. Нехай заданий граф $G = (W, E)$, у якому визначені стартова s і кінцева k вершини. Проводиться обхід кожної вершини $w_j \in W$ графа G ,

запам'ятовується кількість пройдених ребер (дуг) $e_i \in E$, $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots M$. Мінімальна відстань $L(s, k)$ між точками s та k відповідає найменшій кількості ребер, які з'єднують вершини s і k

$$L(s, k) = \min_{e \in E} \sum_{i=1}^N e_i, \quad (2)$$

де N – кількість дуг у графі. Приклад застосування алгоритму наведено на *рисунок 1*.

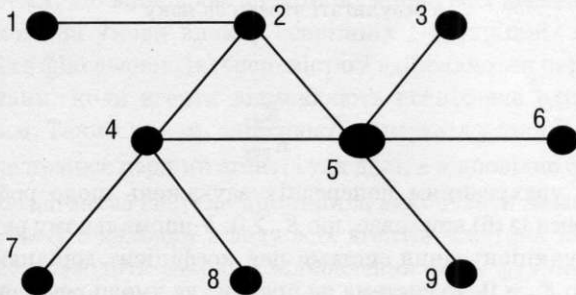


Рис. 1. Мультиагентна система, яка складається з дев'яти агентів

Найкоротший маршрут передачі інформації між вершинами 1–9 за алгоритмом (2) відповідно до *рисунок 1* становить $L(1, 9) = 3$.

Алгоритм однаково працює з орієнтованими та неорієнтованими графами. Оцінкою продуктивності графа виступає часова складність $O(\cdot)$, що визначається кількістю операцій за алгоритмом (2). За цим алгоритмом усі вузли та ребра скануються одноразово, тому часова складність визначається їх кількістю, а саме $O(M+N)$.

Алгоритм Дейкстри є процедурою пошуку найкоротшого шляху на зваженому орієнтованому графі. Алгоритм використовується протоколами маршрутизації OSPF та IS-IS в IP-мережах [8, 17]. Відповідно до цього алгоритму з наявних вершин $y \leq N$ графа, починаючи з вершини $s = 1$, де N – загальна кількість вершин, будується дерево D , ребра якого мають вагу $\omega(i, j)$, таку, що

$$\omega(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i = j, \text{ тобто та сама вершина,} \\ \omega > 0, & \text{якщо } i \text{ та } j \text{ – сусідні вершини,} \\ \infty, & \text{якщо інакше} \end{cases} \quad (3)$$

Довжина шляху на кожному кроці k від вершини s визначається правилом

$$L(k) = \min_y [L(k), L(y) + \omega(y, k)] \text{ для } y \notin D, L(s) = 0 \quad (4)$$

Правило (4) не дозволяє робити проходи по гілках дерева D з великою вагою. Таким чином, множина вершин у створюваному дереві шляхів D являє собою впорядковану послідовність зв'язаних між собою вузлів, яка містить найкоротший шлях від вершини x до k . Цей шлях показаний на *рисунок 2* стрілками.

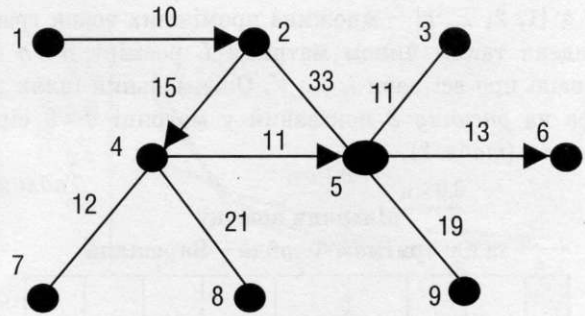


Рис. 2. Мультиагентна система зі зваженою структурою графа

Оскільки алгоритм є ітераційним, то число ітерацій визначається кількістю вершин графа, тому часова складність алгоритму оцінюється $O(N)$. У межах кожної ітерації відбувається нове проходження з урахуванням нової $(y + 1)$ вершини. При цьому вершини з найбільшою вагою вивільняються, а довжина шляху з новими вершинами поновлюється, кращий результат запам'ятовується. Довжина маршруту за цим алгоритмом оцінюється теж кількістю вершин. Загальна продуктивність алгоритму оцінюється величиною $O(N^2)$. Таким чином, алгоритм Дейкстри є ресурсоемним, але завдяки знанням топології мережі та шляху до потрібної вершини маршрутизатор завжди знаходить альтернативний шлях до потрібного вузла мережі у випадку виникнення проблем у будь-якому вузлі визначеного шляху.

Алгоритм Беллмана – Форда. За сутністю цей алгоритм нагадує попередній (Дейкстри), але на відміну від нього не відкидає ребер з великою вагою та ітераційно розраховує довжину всіх шляхів у графі, запам'ятовуючи мінімальний шлях. Кількість ітерацій, як і в алгоритмі Дейкстри, визначається кількістю вершин, а кількість розрахунків у межах ітерації – кількістю ребер, тому часова складність алгоритму оцінюється величиною $O(V \cdot E)$. Результат цього алгоритму для графа *рисунок 2* збігається з алгоритмом Дейкстри. При однакових розмірах графа алгоритм Дейкстри є менш ресурсоемним, ніж Беллмана – Форда, а значить, швидшим. Зменшення ресурсоемності можна досягти зменшенням кількості ребер, тобто переходом до розрідженого графа.

Алгоритм Флойда – Варшалла. Основою цього алгоритму є метод динамічного програмування, відповідно до якого ділянка найкоротшого шляху є теж найкоротшим шляхом. Таким чином, якщо знайдені всі проміжні ділянки (вузлові точки) найкоротшого шляху, то можна говорити, що й найкоротший шлях знайдений.

Нехай відома матриця вагових коефіцієнтів графа w_{ij} , тоді найкоротший шлях з вершини i у вершину j знаходиться за процедурою

$$l_{ij}^k = \begin{cases} \omega_{ij}, & \text{якщо } k = 0, \\ \min_k (l_{ij}^{k-1}, l_{ik}^{k-1} + l_{kj}^{k-1}), & \text{якщо } k \geq 1 \end{cases}, \quad (5)$$

де $k \in \{1, 2, \dots, k\}$ – множина проміжних точок графа. Складена таким чином матриця L розміру $n \times n$ дає відповіді про всі пари $i, j \in V$. Оптимальний шлях для графа на *рисунку 2* показаний у матриці 9×9 сірим кольором (*табл. 2*).

Таблиця 2

Матриця пошуку
за алгоритмом Флойда – Варшалла

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Цей алгоритм матричного типу включає додатковий пошук k проміжних вершин, тому обчислювальна складність не перевищує $O(N^3)$. Доцільність застосування алгоритму визначається необхідністю виявлення найкоротшого шляху між усіма парами вершин графу.

Зміна структури системи. Основною властивістю мультиагентної системи є те, що вона в процесі виконання завдань може змінювати свою структуру. Ці зміни можуть бути викликані не лише результатами внутрішніх рішень щодо виконання завдань, а й діями зовнішніх факторів. Структура системи може змінюватися в разі виходу з ладу каналу зв'язку чи окремого елемента. Унаслідок цього зменшується розмір системи. Розмір може відновлюватися й навіть збільшуватися за рахунок підключення до системи нових елементів, тобто розмір системи є її показником. Реакцією на зовнішні події є зміна топології системи. Кільце може стати шиною або зіркою при визначенні вузла, який виконуватиме роль координатора системи.

Під реконфігурацією мультиагентної системи розумітимемо зміну побудови системи, яка стосується її розміру чи топології. Особливістю реконфігурації є перебудова структури й топології системи з метою виключення збоїв у роботі системи. Приклад реконфігурованої системи показано на *рисунку 3*.

Для оцінювання працездатності системи введемо коефіцієнти розміру системи K_Σ , ступінь виконання завдання $N_{вик}$ та швидкість реконфігурації $v_{рек}$.

Коефіцієнтом розміру системи K_Σ називатимемо відношення діючої кількості елементів системи K_δ до її початкової кількості $K_{поч}$:

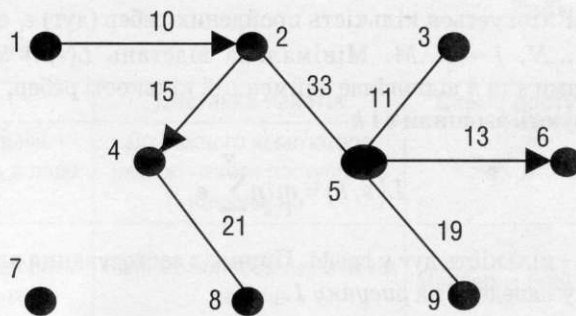


Рис. 3. Зміна будови мультиагентної системи в результаті втрати зв'язку

$$K_\Sigma = \frac{K_\delta}{K_{поч}} \quad (6)$$

З урахуванням попередніх зауважень щодо роботи системи із (6) випливає, що $K_\Sigma \geq 0$. У нормальному режимі функціонування системи цей коефіцієнт дорівнює 1, якщо $K_\Sigma = 0$, то система не працює, за умови реконфігурації він приймає значення $K_\Sigma \in [0, 1]$, якщо $K_\Sigma > 1$, то відбувається нарощування системи.

Ступінь виконання завдання мультиагентної системи $N_{вик}$ можна кількісно оцінити звітністю елементів системи перед координатором або оператором системи, при цьому кількість звітів $N_{зв}$ дорівнює або перевищує кількість поставлених завдань $N_{зав}$

$$N_{вик} = \frac{N_{зв}}{N_{зав}} \quad (7)$$

У разі невиконання завдань значення виразу (7) $N_{вик} < 1$; для повністю виконаного завдання – $N_{вик} \geq 2$. Мінімальне значення означає, що система сформувала щонайменше два звіти: про прийняття його до виконання та доповідь про його виконання.

Швидкість реконфігурації $v_{рек}$ повинна перевищувати швидкість виявлення збоїв у системі, тобто

$$v_{рек} \geq (2..5)N_{зв}/\Delta t \quad (8)$$

де $N_{зв}$ – кількість збійних вузлів упродовж інтервалу Δt .

Аналіз реконфігурації мультиагентної системи. Відповідно до загального уявлення про мультиагентну систему (1), вона є системою з обмеженою кількістю можливих станів. Тому її поведінку можна промоделювати за допомогою математичного апарату аналізу марковських ланцюгів.

Вважатимемо, що в процесі роботи мультиагентна система, яка складається з кінцевої множини елементів N , обмінюється інформацією між усіма елементами за алгоритмом Дейкстри, що відповідає умовам нормального функціонування системи. Цей початковий стан позначимо S_1 . Якщо з якихось не випадкових причин починають виходити з ладу елементи системи чи може зникати обмін інформацією, то відбувається перехід системи до іншого

стану. Елементи системи виходять з ладу не одночасно, а по одному, тому вважається, що здійснюються послідовні переходи зі стану S_1 у стани S_2, S_3, \dots, S_i через певні інтервали часу Δt ; i – означає номер стану. Послідовний набір станів мультиагентної системи та переходів між ними утворює ланцюг Маркова. Оскільки ланцюг послідовний, то функціонування системи можна подати у вигляді схеми «загибель – розмноження» [18].

Нехай мультиагентна система складається з n агентів, тому відповідно до підходу за схемою «загибель – розмноження» введемо стани $S_i, i = 1 \dots n + 1$, де S_1 – стан системи, що відповідає функціонуванню всіх агентів без відмов. За умови впливу зовнішніх і внутрішніх факторів з фіксованою інтенсивністю λ здійснюється перехід у стани, коли агенти відмовляють послідовно один за одним. Таким чином, здійснюється перехід у стан S_2 , коли не працює перший агент, і так далі, а відповідно S_{n+1} – мультиагентна система припинила виконувати завдання у зв'язку з виходом з ладу всіх агентів. Система також може проводити заходи з відновлення свого функціонування; це 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 перебування мультиагентної системи в кожному з кінцевих станів S_i та проаналізуємо їх. Імовірності перебування системи у фінальних станах знаходяться за формулами [18]

$$p_i = p_0 \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k}, i \neq 0, p_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Розглянемо цю задачу для випадку $n = 5, \lambda = 0,5, \mu_1 = 0,8, \mu_2 = 1,6, \mu_3 = 2,4$. Результати розрахунку за формулами (9) наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Імовірності станів мультиагентної системи в умовах реконфігурації

| μ | p_0 | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 | p_5 |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 0,8 | 0,4 | 0,25 | 0,1564 | 0,098 | 0,061 | 0,037 |
| 1,6 | 0,69 | 0,22 | 0,07 | 0,02 | 0,01 | 0 |
| 2,4 | 0,79 | 0,17 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0 |

Деградація станів мультиагентної системи під впливом перешкоджаючих факторів показана на *рисунку 4*. Аналіз *рисунку* свідчить, що чим більше μ , тим краще система справляється із завданнями, вище ймовірність перебування її в працездатному стані та нижче ймовірність перебування в непрацездатному стані.

Будь-яке пошкодження системи впливає на її розмір, він зменшується, але при відновленні конфігурації цей показник здатний повертатися до початкового значення. Мінімальне значення $K_{\Sigma} = 0,2$ відповідає одному працюючому агенту.

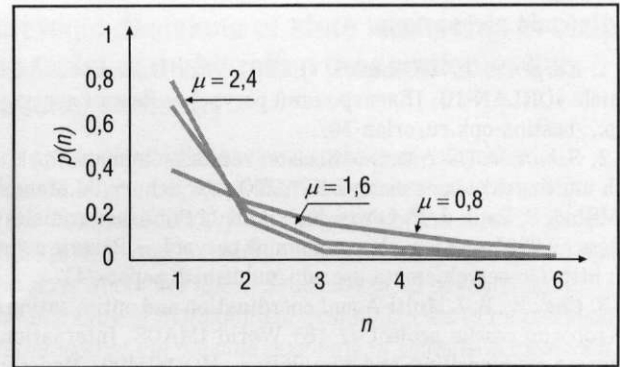


Рис. 4. Деградація мультиагентної системи в умовах завдань

Ураховуючи, що агенти в процесі виконання своїх завдань роблять донесення або звіти, то мінімальний ступінь виконання завдань мультиагентною системою незалежно від її складу становить $N_{\text{внк}} = 2$.

Швидкість реконфігурації можна оцінити за показниками інтенсивності відмов λ та відновлення агентів. Як видно з *рисунку*, якщо $\mu > (2 \dots 5)\lambda$, то система є більш стійкою до перешкод різних типів.

Висновки

Мультиагентні системи являють собою новий науковий напрям організації побудови технічних систем для виконання широкого кола завдань суспільного життя. Найінтенсивніше їх застосування відбувається нині у військовій сфері, що підтверджується практикою вирішення завдань моніторингу, космічної та повітряної розвідки, груповим виконанням бойових операцій.

Застосування мультиагентних систем неможливе без вивчення проблемних питань, головним серед яких є обмін інформацією для взаємодії окремих агентів. Організація взаємодії базується на топології, відповідно за якою встановлюється адресний обмін інформацією за мінімальним маршрутом. Топологія мультиагентної системи військового призначення не є сталою, а піддається реконфігурації в умовах дії реальних перешкод. Аналіз функціонування системи зручно зробити за відомою схемою «загибель – розмноження» агентів і встановлення відповідних її показників, до яких можуть належати відносний розмір системи, ступінь виконання завдань і швидкість реконфігурації в сталому режимі роботи чи для певного моменту функціонування системи. Швидкість реконфігурації системи в статті асоційовано з інтенсивністю відмов та відновленням агентів. У розрахунках за схемою «загибель – розмноження» показано, що реконфігурація досягає мети, якщо вона відбувається зі швидкістю, більшою за інтенсивність виходу агентів з ладу приблизно у 2...5 разів.

Подальші дослідження реконфігурації мультиагентних систем планується зосередити на аналізі їх динамічних властивостей.

Перелік літератури

1. *Karpenko A.V.* Complex «LEER» with Unmanned Aerial Vehicle «ORLAN-10» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://bastion-opk.ru/orlan-10/>.
2. *Schurr N.* The future of disaster response: humans working with multiagent teams using DEFACTO / N. Schurr, M. Janusz, T. Milind, S. Paul, J. P. Lewis, K. Nikhil // Published Articles & Papers. – 2005. – 41 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://research.create.usc.edu/published_papers/41.
3. *Chou W. Y. J.* Multi-Agent coordination and optimisation in the robocup rescue project // 18th World IMACS. International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM09. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Cairns, Australia, 13–17 July 2009. – P. 1608–1614 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mssanz.org.au/modsim09>.
4. *Marsh L.* Multi-agent UAV path planning / L. Marsh, G. Calbert, J. Tu, D. Gossink, H. Kwok // International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM05. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2005. – P. 2188–2194 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/marsh.pdf>.
5. *Jesintha D. K.* Dynamic analysis of agent network in self organization using service level agreement technique / D. K. Jesintha, J. P. Anandh, M. Ramnath // International Journal of Engineering Science Invention. – Vol. 4. – № 3. – 2015. – P. 44–49.
6. *Козуб А. Н.* Інформаційне забезпечення групового польоту БПЛА / Д. П. Кучеров, А. Н. Козуб, Б. П. Иванов // Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем : Зб. матер. НПК 29.01.15 р. – Львів : АСВ, 2015. – С. 249–251.
7. *Dang A.* Formation control of leader-following UAVS to track a moving target in a dynamic environment / A. Dang, J. Horn // Journal of Automation and Control Engineering. – Vol. 3. – No 1. – 2015. – P. 1–8.
8. *Столлинс В.* Современные компьютерные сети / В. Столлинс. – СПб. : Питер, 2003. – 783 с.
9. *Олифер В. Г.* Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2006. – 958 с.
10. *Бондарев Д. П.* Моделі групових польотів безпілотних літальних апаратів з використанням теорії графів / Д. П. Бондарев, Д. П. Кучеров, Т. Ф. Шмельова // Наука і техніка Повітряних Сил України. – 2015. – № 3 (20). – С. 68–74.
11. *Shanmugavel M.* Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs / M. Shanmugavel, A. Tsourdos, B. A. White, R. Zbikowski // Transactions of the ASME. Journal of dynamic systems, measurement, and control. – Vol. 129. – September. – 2007. – P. 620–632.
12. *Kuchеров D. P.* Control System Objects with Multiple Stream of Information / D. P. Kuchеров, A. N. Kozub // Proceedings 2015 IEEE 3rd International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)», October 13–15, 2015. – P. 290–293.
13. *Горбунов И. Э.* Методология анализа и синтеза реконфигурируемых топологий мобильных сетей связи / И. Э. Горбунов // Математичні машини і системи. – 2006. – № 2. – С. 48–59.
14. *Ластовченко М. М.* Метод анализа эффективности реконфигурации топологии беспроводных мультисерверных сетей повышенной помехозащищенности / М. М. Ластовченко, Е. Е. Зубарева, В. О. Саченко // УСиМ. № 6. – 2009. – С. 79–86.
15. *Кормен Т.* Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М. : ИД «Вильямс», 2005. – 1296 с.
16. *Кузнецов Н. А.* Алгоритм Дейкстры с улучшенной робастностью для управления маршрутизацией в IP-сетях / Н. А. Кузнецов, В. Н. Фетисов // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 80–85.
17. *Fortz B.* Optimizing OSPF / IS-IS weights in a changing world / B. Fortz, M. Throup // IEEE Journal on selected areas in communications, June, 2002. – P. 1–31 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : DOI: 10.1109/JSAC.2002.1003042.
18. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1988. – 208 с.