

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ, УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

DOI 10.33099/2786-7714-2024-1-6-5-13

УДК 623.746

Кравченко Юрій Васильович (доктор технічних наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0002-0281-4396>

Дахно Наталія Борисівна (кандидат технічних наук, доцент)

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

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СТРАТЕГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ГНУЧКОЮ СТРУКТУРОЮ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ У ФОРМАТІ GPS-СИГНАЛІВ ТА СЕНСОРНОГО МОНІТОРИНГУ ЛІНІЇ БОЙОВОГО ЗІТКНЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

Стаття присвячена стратегії інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням безпілотних літальних апаратів. Сенсорна система моніторингу місцевості та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням безпілотних літальних апаратів характеризується тим, що в системі одночасно в реальному часі вирішуються завдання забезпечення споживачів навігаційною інформацією у форматі GPS-сигналів, сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення, визначення оптимального місця розміщення стаціонарних та мобільних сенсорів моніторингу місцевості, стаціонарних та мобільних псевдолітів автономної радіонавігаційної системи, а також доставки сенсорів та псевдолітів на місто призначення за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Інтелектуальне керування сенсорною системою моніторингу місцевості та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням безпілотних літальних апаратів дозволяє формувати гнучку структуру сенсорів та псевдолітів, які перемикаються з пасивного вимкненого стану у активний увімкнений режим у залежності від стану зовнішнього середовища з метою зменшення можливого негативного впливу зовнішніх факторів, наприклад, противника. Пропонується стратегія інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи, яка забезпечує ефективне рішення завдань навігації та моніторингу і умовах невизначеності та наявності дестабілізуючих факторів.

Ключові слова: стратегія, інтелектуальне керування, гнучка структура, системи навігації, моніторинг, GPS, сенсорна мережа, безпілотний літальний апарат.

Вступ

Дослідження в галузі інформаційних технологій мають важливе значення для національної безпеки та обороноздатності країни, а саме, рішення завдань навігації та моніторингу лінії бойового зіткнення. Варто підкреслити те, що в сучасних умовах ведення бойових дій особливу роль для військових споживачів має якісне рішення задач навігації та моніторингу лінії бойового зіткнення. Сенсорна система моніторингу місцевості та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) характеризується тим, що в системі в реальному часі одночасно вирішується завдання моніторингу місцевості, забезпечення споживачів навігаційною інформацією, визначення оптимального місця

розміщення стаціонарних та мобільних сенсорів моніторингу місцевості, стаціонарних та мобільних псевдолітів автономної радіонавігаційної системи, а також доставки сенсорів та псевдолітів на місто призначення за допомогою БПЛА. Інтелектуальне керування дозволяє формувати гнучку структуру сенсорів та псевдолітів, які перемикаються з пасивного вимкненого стану у активний увімкнений режим у залежності від стану зовнішнього середовища з метою зменшення можливого негативного впливу противника. Існуючі принципи, моделі та методи теорії штучного інтелекту створюють підґрунтя для їх подальшого удосконалення з метою подальшого використання для керування гнучкою структурою комплексної системи навігації та моніторингу. Отже, актуальним є завдання

розробки стратегії інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи, яка забезпечує ефективне рішення завдань навігації та моніторингу і умовах невизначеності та наявності дестабілюючих факторів.

Метою статті є розробка стратегії інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БпЛА.

Матеріали та методи

Мережева система автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення – це розподілена інформаційна система, яка призначена для забезпечення військових споживачів навігаційною та розвідувальною інформацією в районі лінії бойового зіткнення у реальному часі. Авторами статті пропонується технологічно забезпечити комплексне функціонування псевдосупутникової радіонавігаційної системи (ПСРНС) [1, 2] та мережевої сенсорної системи розвідки [3-5, 7]. Пропонується використання БпЛА не тільки в якості ударно-розвідувального засобу, а й як носія радіонавігаційних точок – псевдолітів та сенсорів. Особливістю функціонування системи є протидія противника. Стратегія мінімізації впливу противника на систему реалізується шляхом забезпечення її властивості функціональної стійкості. Принциповою парадигмою функціональної стійкості є перерозподіл ресурсів системи для парирования наслідків дії противника на елементи системи [3-5, 8, 9]. Розв'язання таких задач на основі теорії штучного інтелекту дозволяє вирішити проблему в цілому і забезпечити ефективне функціонування системи в позаштатних ситуаціях.

Запропонована система складається з:

- 1 – мобільних сенсорів, які розміщені на БпЛА;
- 2 – псевдолітів, які розміщені на БпЛА;
- 3 – серверу наземного центру керування;
- 4 – псевдолітів наземного розташування;
- 5 – сенсорів наземного розташування;
- 6 – приймачів навігаційної інформації та результатів моніторингу (рис. 1).

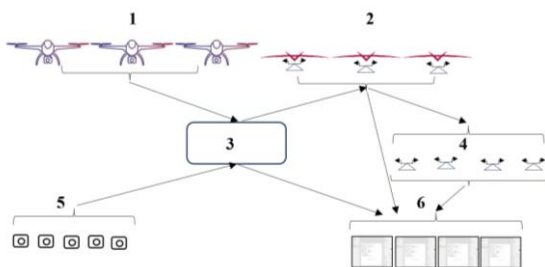


Рисунок 1. Структура комплексної системи

Принцип роботи даної системи полягає в наступному: для моніторингу місцевості використовуються сенсори на БпЛА та сенсори наземного стаціонарного розташування; інформація від сенсорів передається по бездротову каналу,

наприклад, на базі радіочастотного модулю; також дані передаються безпосередньо за допомогою SMS повідомлення, використовуючи GPRS інтерфейс та надсилаються в захищену мережу або в Інтернет до серверу наземного центру обробки та керування, який дану інформацію обробляє та результат моніторингу передає приймачам GPS-сигналів та результатів моніторингу; сервер наземного центру обробки та керування крім обробки інформації від сенсорів визначає їх оптимальне місце розташування та формує відповідну траєкторію руху БпЛА для переміщення сенсорів, також визначає надмірну структуру сенсорів з метою зменшення впливу ймовірних втрат на ефективність системи в цілому. Відстань між сенсорами та їх взаєморозташування визначається по принципу перекриття зони дії сенсорів всієї місцевості моніторингу. Псевдоліти, як радіонавігаційні точки, що працюють у форматі GPS-сигналів розміщуються на БпЛА та на землі. Пропонується використовувати наземні орієнтири з відомими координатами. Коптер (БпЛА) при “зависанні” над таким орієнтиром надає можливість псевдоліту повітряного базування передавати саме ті координати як свої, а тим самим забезпечує задану точність рішення задачі навігації GPS-приймачами.

Сервер наземного центру обробки та керування визначає координати оптимального місця розташування псевдолітів та траєкторії руху БпЛА, також він визначає надмірну структуру псевдолітів, алгоритм їх включення з пасивного у активний режим. Координати місця розташування псевдолітів визначаються як результат рішення задачі багатокритеріальної оптимізації: максимальна точність навігації при забезпеченні мінімального впливу зовнішніх факторів (завади та ін.) та мінімальної вартості.

Підвищення ефективності сенсорної системи моніторингу місцевості та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням БпЛА досягається за рахунок реалізації гнучкої плаваючої (змінної у реальному часі) структури сенсорів та псевдолітів, які перемикаються з пасивного вимкненого стану в активний увімкнений режим у залежності від стану зовнішнього середовища з метою зменшення можливого негативного впливу зовнішніх факторів, наприклад, противника. Керування процесом перемикавання сенсорів та псевдолітів з пасивного вимкненого стану в активний увімкнений режим реалізується на базі бездротового каналу.

Ефективне керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення доцільно реалізувати на основі моделей та методів штучного інтелекту. Наукові публікації за темою псевдосупутникової навігації, бездротових сенсорних мереж та штучного інтелекту [1-21] є теоретичною основою стратегії яка пропонується.

Існує ряд моделей, методів та методик вирішення завдань автономної навігації у форматі

GPS-сигналів та моніторингу навколишнього середовища на основі бездротової сенсорної мережі в умовах впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів, що базуються на загальній теорії управління, радіонавігації, комп'ютерних мереж, теорії розпізнавання образів, мережевому плануванні та багатокритеріальній оптимізації [18-20]. Дані методи досить успішно справляються з задачею пошуку оптимальних або квазіоптимальних рішень для детермінованих і стохастичних задач. За останні роки з'явилися прогресивні публікації стосовно досліджень, які базуються на теорії експертних оцінок та нечіткої логіки [1-6]. На думку фахівців саме ці підходи актуальні в умовах повної або часткової відсутності статистичних даних та максимально використовують інтелектуальний досвід. З іншого боку, є ряд наукових робіт в галузі воєнних та технічних наук стосовно моніторингу та навігації, що функціонують в умовах дестабілізуючих впливів [7-8]. Хоча авторами і були створені нові моделі, методи та методики управління складними системами, проте можливість впровадження моделей штучного інтелекту для системи моніторингу та навігації в умовах впливу дестабілізуючих факторів, забезпечення її функціональної стійкості взагалі не реалізована. Також актуальною та новою є ідея використання в функціонально стійкій мережевій системі навігації та моніторингу лінії бойового зіткнення інформації щодо достовірності елементів бази знань при формуванні алгоритмів управління.

Попередні результати авторів статті в наступному: запропоновано необхідну та достатню умову функціональної стійкості (ФС) псевдосупутникових радіонавігаційних систем; проблема синтезу структури псевдосупутникової системи вирішена на основі моделей та методів, які базуються на теорії матроїдів, градієнтних алгоритмах і розробленому методі збільшення рангу k -однорідного матроїда; концепція синтезу структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи відрізняється від існуючих підходів побудови багатопозиційних систем забезпеченням властивості функціональної стійкості шляхом застосування структурної надмірності і формуванням відновлюючого керування з метою відбивання наслідків бойових ушкоджень; понятійний апарат функціональної стійкості псевдосупутникової радіонавігаційної системи відрізняється від існуючих аналогів тим, що він може бути застосований для будь-яких багатопозиційних радіонавігаційних систем, що дозволяє математично формалізувати цільову функцію й обмеження в задачі оптимізації структури, а також кількісно і якісно оцінювати властивість функціональної стійкості структур псевдосупутникових систем [1, 2]. Модель визначення значення показника функціональної стійкості структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи характеризується тим, що вона комплексно враховує як точність рішення

задачі навігації споживачами, так і структурну надмірність псевдосупутникової системи, а також можливість керування структурною надмірністю системи в умовах бойових та інших ушкоджень псевдосупутників. Отримані результати потребують розвитку в напрямку використання штучного інтелекту для комплексного вирішення завдань навігації та моніторингу лінії бойового зіткнення в умовах впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Результати

Стратегія інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БпЛА, як загальний підхід керування складною системою базуються на ідеї використання продукційних моделей виведення для забезпечення системі властивості функціональної стійкості. Деталізація стратегії виконується у відповідних моделях і методах інтелектуального керування, а її реалізація сприяє вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення комплексної системи автономної навігації та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення на рівні її структурної моделі властивості функціональної стійкості. Варто підкреслити те, що це і є керівною ідеєю для вирішення проблеми.

У вербальному вигляді задача пошуку керування гнучкою структурою комплексної системи приймає наступний опис: визначати у реальному часі в залежності від зміни зовнішніх та внутрішніх факторів (конкретної місцевості з її рельєфом та іншими особливостями; надійності, відмовостійкості, живучості, завадозахищеності комплектуючих підсистем та протидії противника) структуру системи, яка забезпечує максимальну точність рішення задачі навігації, максимальну достовірність інформації моніторингу при мінімальній вартості. Структура системи є моделлю, яка описує складові підсистеми та зв'язки між ними. Керування реалізує гнучкі зміни структури шляхом переміщення радіонавігаційних точок (РНТ), сенсорів та інших елементів за допомогою БпЛА повітряного та наземного базування для чого визначаються координати місця розташування псевдолітів та траєкторії руху БпЛА, також визначається надмірний склад псевдолітів, алгоритм їх включення з пасивного у активний режим. Координати місця розташування псевдолітів визначаються як результат рішення задачі багатокритеріальної оптимізації: максимальна точність навігації при забезпеченні мінімального впливу зовнішніх факторів та мінімальної вартості. Алгоритми керування враховують моделі обробки інформації від сенсорів та визначають оптимальні місця їх розташування, також формують відповідну траєкторію руху БпЛА для переміщення сенсорів, додатково визначають надмірний склад сенсорів з метою зменшення впливу ймовірних втрат на ефективність системи в цілому.

Математична формалізація задачі керування

структурою комплексної системи має вигляд

$$U: \begin{cases} \delta(X(U)) \rightarrow \min \\ d(X(U)) \rightarrow \max; \\ c(X(U)) \rightarrow \min \\ t \leq t_3 \end{cases} \quad (1)$$

де U – модель керування структурою;
 $\delta(X(U))$ – середня похибка рішення задачі навігації;
 $d(X(U))$ – достовірність моніторингу;
 $c(X(U))$ – вартість системи;
 $X(U)$ – модель структури системи;
 $t \leq t_3$ – обмеження на оперативність.

Модель структури у вигляді навантаженої матриці суміжності орграфу (рис.2)

$$X = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}(t) & \dots & a_{mn}(t) \end{pmatrix}; \quad n, m \in N \quad (2)$$

Елементи матриці $a_{mn}(t)$ у реальному часі описують склад системи (РНТ, сенсори та канали передачі інформації).

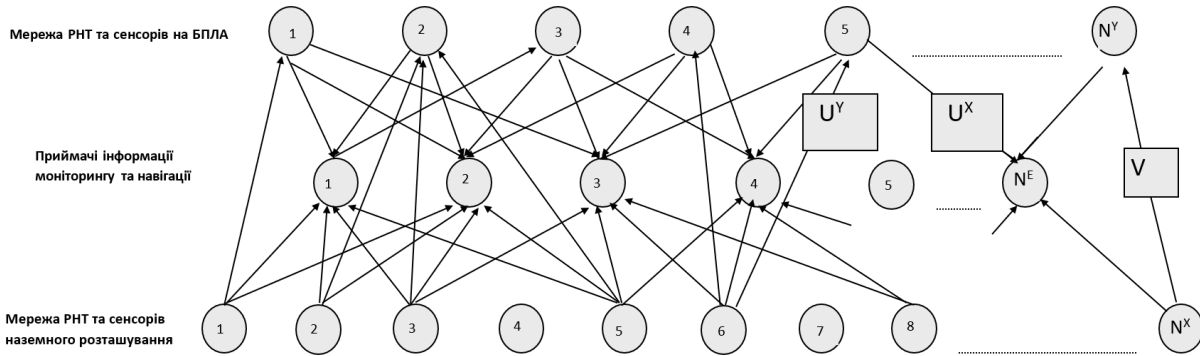


Рисунок 2. Граф структури системи

Стратегія інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БПЛА схематично представлена на

рис. 3 та поєднує моделі та методи на основі оригінальних підходів виведення: так званої FS-системи, категорійних моделей виведення, нечітких N-арних семантичних мереж та градієнтних методів дискретної оптимізації.



Рисунок 3. Схема стратегії інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи навігації та моніторингу

Загальна теорія функціональної стійкості (ФС) описана в роботах [3-5, 9].

Представимо *керівну ідею (концепцію)* стратегії керування структурою комплексної системи як необхідність надання системі властивості функціональної стійкості. Принципом забезпечення якої є реалізація послідовності етапів моделі забезпечення функціональної стійкості будь-якої складної технічної системи: виявлення

→ розпізнавання → парировання.

Виявлення. Цей етап трактується, як виявлення позаштатної ситуації. Формально представляємо його тирадою

$$\langle S, M, Md \rangle, \quad (3)$$

де S – множина позаштатних ситуацій;
 M – множина моделей;

Md – множина методів.

Це означає, що будь-яка позаштатна ситуація буде вчасно виявлена на основі адекватних моделей та методів.

Розпізнавання. Процес розпізнавання позаштатних ситуацій трактується як формування альтернатив деталізації ситуації

$$\forall m_i \in M, md_j \in Md, \quad (4)$$

$$(i = 1 \dots n, j = 1 \dots m, n = |M|, m = |Md|).$$

Парирування. Для динамічних систем існуюча теорія функціональної стійкості наступним етапом виділяє етап парирування. Етап парирування наслідків позаштатних ситуацій полягає у формуванні та впливу на систему так званого відновлюючого керування. Під відновлюючим керуванням розуміється таке, що парирує наслідки відмов, збоїв, руйнувань, а також впливів інших зовнішніх дестабілізуючих чинників, передбачених умовами, з метою збереження, хоч і з деяким погіршенням, основних функцій системи [1]. Його математична формалізація має вигляд (1). Ознаки, показники, критерії, межа, область ФС для різних систем описано у роботах [3-5, 9].

Стосовно теоретичних основ стратегії, як сукупності моделей та методів рішення часткових задач, варто звернути увагу на наступне. Принцип пошуку керування пояснимо таким чином. Для комплексної системи існує мінімальний склад структури, при якому система виконує свої функції, наприклад, для вирішення навігаційної задачі приймач повинен мати у зоні прямої видимості мінімум 4 РНТ, для моніторингу також існує відповідний аналог. Цей мінімальний склад структури опишемо базою матроїда – мінімальною за потужністю незалежною підмножиною деякої множини. Матроїд – це математична структура, яка узагальнює поняття незалежності елементів,

подібно до незалежності векторів у лінійному просторі. Він класифікує підмножини деякої множини на основі аксіом, що визначають незалежні та залежні множини. У нашому випадку це множина припустимих рішень.

В [1] апробовано комбінаторний підхід у дискретній оптимізації для побудови структури ПСРНС. Цей підхід доцільно використовувати для керування гнучкою структурою комплексної системи та розглядати його як сукупність методу часткових порядків, концепції опуклості в частково упорядкованих множинах і схеми побудови жадібних алгоритмів.

Суть методу часткових порядків полягає в тому, що з елементів множини припустимих рішень X задачі дискретної оптимізації формується така частково впорядкована множина (X, \prec) , для якої цільові функції і їхні градієнти монотонні уздовж ланцюгів, які сформовані частковим порядком \prec . У методі часткових порядків інформація про клас цільових функцій задається у вигляді часткового порядку на множині X . Множина ефективних рішень включає найкращі рішення кожного ланцюга, та в порівнянні з повним перебором не потребує використання трудомісткого алгоритму розрахунку значення показника ФС. Далі на цій множині жадібний алгоритм знаходить оптимальне рішення (цей факт доведено теоремою Радо-Едмондса). Схема комбінаторного підходу при рішенні задачі керування структурою системи представлена на рис. 4.

Отже, метод часткових порядків дозволяє одержати оптимальне рішення задачі дискретної оптимізації без трудомісткого обчислення цільової функції по відомій апріорній інформації про клас цільової функції через відношення часткового порядку.

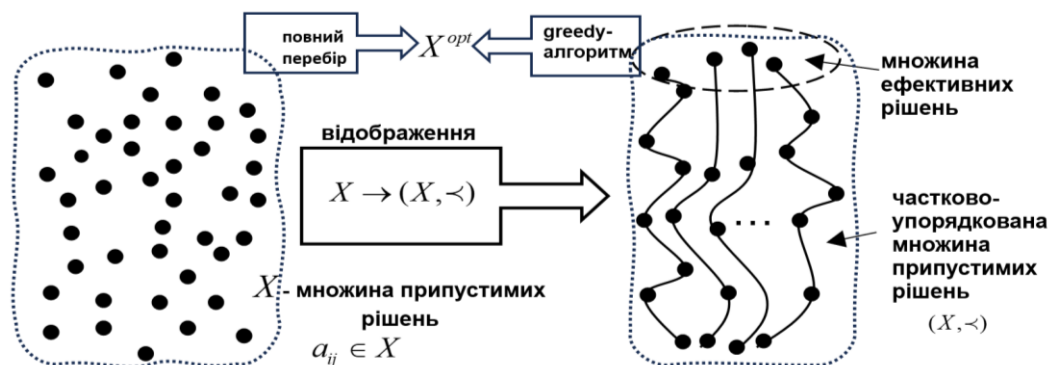


Рисунок 4. Схема комбінаторного підходу

Розглянемо застосування методу послідовного збільшення рангу k -однорідного матроїда в задачі керування структурою комплексної системи навігації та моніторингу. Пошук рішення здійснюється за принципом послідовного збільшення кількості надлишкових елементів і зв'язків структури для забезпечення максимальних функціональних можливостей при мінімальному використанні ресурсу (рис. 5) [1]. На всіх етапах

занурення множини припустимих рішень в частково-впорядковану множину здійснюється на основі відношення мажоризації. Спочатку формується k -однорідний матроїд, як модель структури системи з елементів і зв'язків, множина баз, яких є множиною всіх можливих структур з максимальної кількості елементів і зв'язків.

$$M = (E, \varepsilon); X \subseteq \varepsilon; \rho(X) = |X| \quad (5)$$

де M – матроїд структури системи;
 E – множина елементів матроїда;
 ε – множина баз;
 ρ – ранг.

Далі застосування жадібного алгоритму дозволяє знайти найкраще рішення, для якого розраховується значення показника функціональної стійкості $P(X)$

$$X_1^{opt} = \arg \max P(X_1) \forall X_1 \in X \quad (6)$$

де X_1^{opt} – оптимальне рішення для X_1 ;
 X – множина припустимих рішень;
 $P(X_1)$ – показник функціональної стійкості;
 X_1 – множина рішень.

На наступному етапі у випадку не відповідності показника ФС вимогам відбувається збільшення потужності бази (рангу матроїда) на одиницю та попередня процедура повторюється із застосуванням градієнтного алгоритму та розрахунком значення показника функціональної стійкості. Далі виконується по показнику функціональної стійкості порівняння знайденого рішення із заданим рівнем функціональної стійкості. Для рішення, що задовольняє по показнику ефективності, послідовно перевіряються варіанти, включені за допомогою відношення часткового порядку в даний варіант з метою пошуку рішення з мінімальним складом структури системи і заданим рівнем функціональної стійкості. Процедура поетапного збільшення потужності бази матроїда буде тривати

доти, поки рішення не вийде за межі обмежень. У цьому випадку оптимальним буде рішення, отримане на попередньому етапі.

$$X_N^{opt} = \arg \max P(X_N) \forall X_N \in X \quad (6)$$

де X_N^{opt} – оптимальне рішення.

Даний метод є точним методом дискретної оптимізації, а саме, методом спрямованого перебору.

Моделі продукційного виведення на алгебраїчній структурі опубліковані в роботі [8] та отримали назву FS-система моделей виведення. FS-система (Functional stability) – алгебраїчна система в якій поряд із операціями над будь-якою парою її елементів задане правило їх логічного, так званого, “порівняння” або виведення. Саме FS-система є концепцією математичного забезпечення для формування такої властивості, як функціональна стійкість. В будь-якій нештатній ситуації, пов’язаній з негативними зовнішніми та внутрішніми факторами властивість функціональної стійкості дозволяє складній системі продовжувати знаходитися в працездатному стані за рахунок використання надмірності.

Відомо, що алгебраїчна система $\langle F_F, \Omega_F, \Omega_R \rangle$ – це непорожня множина $F_F \in \emptyset$ з заданим на ній набором операцій Ω_F та відношень Ω_R , що задовольняють деякій системі аксіом.

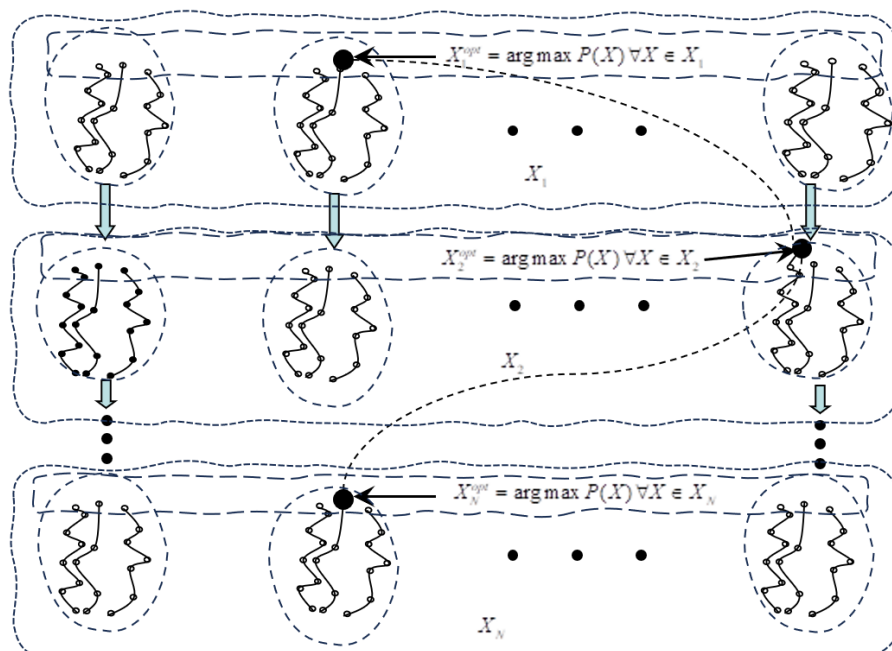


Рисунок 5. Схема методу послідовного збільшення рангу k -однорідного матроїда

Загальна ідея при формуванні моделей виведення полягає в наданні сигнатурі алгебраїчної системи (" Ω " " $_F$ " " $_R$ ") продукційних властивостей схеми виведення “якщо ... то”.

FS-система це система алгебри, в якій разом з

операціями над будь-якою парою її елементів (\wedge (“перетин”) та \vee (“об’єднання”)) додатково задано бінарне відношення з продукційними властивостями. Відношення називається продукційно-логічним, якщо воно має рефлексивність, транзитивність і інші властивості,

які визначаються конкретною моделлю. Одна з таких властивостей є дистрибутивність. Неформально дистрибутивність відношення означає можливість логічного виведення по частинах і об'єднання його результатів на основі операцій \wedge та \vee . Нехай в FS-системі задано деяке бінарне відношення $[[R \in \Omega]] _R$.

Сукупність усіх атомів FS-системи, пар відношення R , що містяться в елементах, називатимемо множиною атомів, якими оперує відношення R . Бінарне відношення R в FS-системі називається продукційно-логічним, якщо воно є дистрибутивне і транзитивне.

Отже, в FS-системі на ряду з операціями над будь-якою парою її елементів задане правило їх логічного "порівняння" або виведення. Математична формалізація цього правила дозволяє розробити алгоритми інтелектуалізованого керування структурою з метою реагування на позаштатні ситуації за рахунок перерозподілу надмірності.

Обговорення

В роботі [21] запропоноване N-арну неоднорідну семантичну мережу, яка поєднує переваги семантичних мереж, предикатів та нечіткої логіки. Застосування нечітких предикатів у векторно-матричному представленні дозволяє ввести логічні операції без довільних допущень. Логічні операції над нечіткими змінними описуються тими ж самими тензорами, що і в алгебраїчній логіці.

У результаті отримана гнучка й обґрунтована система розрахунків. Зручність векторного представлення полягає в тому, що операції над логічними змінними можуть бути представлені в матричному виді. Запропонований підхід на основі використання елементарних семантичних мереж 1-го та 2-го роду дозволить вирішити проблему математичної формалізації N-арної неоднорідної семантичної мережі.

Подальше удосконалення даної моделі пропонується у вигляді процедури синергетично-категорійного розширення рангу матриці суміжності N-арної неоднорідної семантичної мережі.

Висновки

За результатами дослідження на основі комп'ютерного моделювання відображено схему похибки навігаційного поля рис. 6.

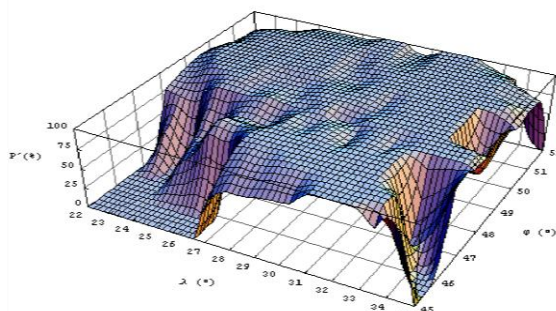


Рисунок 6. Схема похибки навігаційного поля

При реалізації алгоритмів інтелектуального

керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БПЛА визначено, що дана система дозволяє забезпечити похибку рішення задачі навігації приймачами GPS-сигналів від 5 до 25 м, достовірність інформації моніторингу до 0,9 на території до 150 км².

Список використаних джерел

1. Кравченко Ю.В. Застосування методу послідовного збільшення рангу k-однорідного матрицю в задачі синтезу структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2008. № 2(2). С. 19-22.
2. Лаврінчук О.В., Залужний Р.М., Кравченко Ю.В. Концепція синтезу локальної багатопозиційної радіонавігаційної системи. Системи озброєння і військова техніка. 2009. № 2(18). С. 75-78.
3. Собчук А. В. Математична модель та характеристика особливостей функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, як мереж окремого класу. Збірник наукових праць "Новітні технології". 2018. №2. С. 130-137.
4. Коваль М. О., Собчук А. В., Кравченко Ю. В., Барабаш О. В. Математична модель функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі. Системи управління, навігації та зв'язку. 2017. Вип. 6. С. 122-126. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2017_6_29.
5. Sobchuk A. V., Sobchuk V. V., Barabash A. O., Liashenko I. Functionally sustainable wireless sensor network technologies aspects analysis. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. 2019. pp. 46-48. <http://dx.doi.org/10.31174/SEND-NT2019-193VII23-11>.
6. Leshchenko O., Dakhno N., Pliushch O., Trush O., Yermakov Y. Development of Model of Artificial Ecosystem on the Basis of Genetic Algorithm. IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2022 - Proceedings, 2022, pp. 199-203.
7. Dudnik A., Trush O., Kravchenko Y., Leshchenko O., Dakhno N. and Ryabokin Y. Routing Method in Wireless IoT Sensor Networks. IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC). 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAIC57818.2022.9922998.
8. Afanasyeva O., Tyshchenko M., Mykus S. Intellectualisation of Decision Support Systems For Computer Networks: Production-Logical F-Inference. International conference Information Technology and Interactions, IT&I-2020, CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2845, pp.117-126. https://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_12.pdf
9. Mykus S. A., Leschenko O. A. Functional stability of information and telecommunication systems. East European Scientific Journal. 2016. №2(6). pp.47-52.
10. Leshchenko, O., Yaroshchuk, N., Krasnopyorov, P. Information Modelling through GIS for Visualizing Air Alarms. CEUR Workshop Proceedings this link is disabled, 2022, 3347, pp. 279-289.
11. J. Wang. Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems. Journal of Global Positioning Systems. 2002. Vol. 1, No. 1. pp. 48-56.
12. S. Liu, L. Wang, and Z. Yao. Research on layout method of ground-based pseudolite positioning system based on NSGA-II algorithm. Application Research of Computers, 2020. vol. 37, pp. 1839-1843.
13. Li Yang, Kaiyuan Yang, and Danshi Sun. Research

on the Station Layout Method of Ground-Based Pseudolite Positioning System Based on NSGA-II Algorithm. *Wireless Communications and Mobile Computing*. Volume 2021, Article ID 1520859, 7 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/1520859>

14. X. Xue and L. Wang. Pseudolite base station selection method based on weighted level precision factor. *Geodesy and Geodynamics*. 2019.vol. 39, pp. 1070–1075.

15. L. Zeng, D. Li, Y. Qu, A. Ren, and Y. Feng. Route planning algorithm for space-based pseudolite network deployment. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2016.vol. 42, pp. 1388–1397.

16. Heng Zhang, Baoguo Yu, Shuguo Pan, Chuanzhen Sheng, Huang Lu, and Yaning Li. A Pseudolite Indoor Wide-Area Networking Technology Based on Signal Multilevel Features. *Wireless Communications and Mobile Computing* Volume 2022, Article ID 2190025, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2022/2190025>

17. K. Fujii, Y. Sakamoto, W. Wang, H. Arie, A. Schmitz, and S. Sugano. Hyperbolic positioning with antenna arrays and multi-channel pseudolite for indoor localization. // *Sensors*, 2015. vol. 15, no. 10, pp. 25157–

25175.

18. Чумаченко С.М., Яковлев Є.О., Пиріков О.В., Парталян А.С. Особливості реалізації мережі екологічного моніторингу бойових дій для Збройних Сил України. *Екологічна безпека та природокористування*, 2022, № 2 (42), С. 23-34.

19. Chumachenko S., Lunova O., Murasov R. Kurtseitov T., Honcharenko I. A Method for Assessing Threats for Critical Infrastructure Objects on the Example of an Enemy's Attack on the Sludge Storage Facilities of the Avdiivka Coke Chemical Plant. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2024. vol. 32, №4. <https://doi.org/10.15421/112360>

20. Skorobohatko S., Fesenko H., Kharchenko V., Yakovlev S. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2024. 60(2), pp. 293–304.

21. Поліщук А.О., Кравченко Ю.В. Математична модель представлення знань у системі екологічного моніторингу. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2015. №1. С. 11–15.

Yurii Kravchenko (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-0281-4396>

Nataliya Dakhno (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

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

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

STRATEGY OF INTELLIGENT CONTROL OF THE FLEXIBLE STRUCTURE OF A COMPLEX SYSTEM OF AUTONOMOUS NAVIGATION IN THE FORMAT OF GPS-SIGNALS AND SENSOR MONITORING OF THE COMBAT LINE OF COMBAT WITH UAVS

The article is devoted to the strategy of intelligent control of the flexible structure of the complex system of autonomous navigation in the format of GPS signals and sensor monitoring of the combat line of contact using UAVs. The sensor system of terrain monitoring and autonomous navigation in the format of GPS signals using UAVs is characterized by the fact that the system simultaneously solves the tasks of providing consumers with navigation information in the format of GPS signals, sensor monitoring of the battle line, determining the optimal city for the placement of stationary and mobile terrain monitoring sensors, stationary and mobile pseudolites of the autonomous radio navigation system, as well as delivery of sensors and pseudolites to the destination city using UAVs.

Intelligent control of the sensor system of terrain monitoring and autonomous navigation in the format of GPS signals using UAVs allows forming a flexible structure of sensors and pseudolites that switch from a passive off state to an active on mode depending on the state of the external environment in order to reduce the possible negative impact of external factors. for example, the enemy. A strategy of intelligent control of the flexible structure of the complex system is proposed, which provides an effective solution to the tasks of navigation and monitoring and conditions of uncertainty and the presence of destabilizing factors.

Keywords: *strategy, intelligent control, flexible structure, navigation systems, monitoring, GPS, sensor network, UAV.*

References

1. Kravchenko Yu.V. Application of the method of sequential increase in the rank of the k-homogeneous matroid in the problem of synthesizing the structure of a pseudo-satellite radio navigation system. *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2008. No. 2(2). pp. 19–22.

2. O. V. Lavrinchuk, R. M. Zaluzhnyi and Yu. V. Kravchenko. The concept of the synthesis of a local multi-position radio navigation system. *Weapon systems and military equipment*. 2009. No. 2(18). pp. 75–78.

3. Sobchuk A.V. Mathematical model and characteristics of functionally stable wireless sensor

networks as networks of a separate class. *Collection of scientific works "New technologies"*. 2018. No. 2. pp. 130–137.

4. Koval M.O., Sobchuk A.V., Kravchenko Yu.V., Barabash O.V. Mathematical model of a functionally stable wireless sensor network. *Management, navigation and communication systems*. 2017. Issue 6. P. 122-126. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2017_6_29.

5. Sobchuk A. V., Sobchuk V. V., Barabash A. O., Liashenko I. Functionally sustainable wireless sensor network technologies aspects analysis. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2019. pp. 46–48.

<http://dx.doi.org/10.31174/SEND-NT2019-193VII23-11>

6. Leshchenko O., Dakhno N., Pliushch O., Trush O., Yermakov Y. Development of Model of Artificial Ecosystem on the Basis of Genetic Algorithm. IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2022 - Proceedings, 2022, pp. 199–203.
7. Dudnik A., Trush O., Kravchenko Y., Leshchenko O., Dakhno N. and Ryabokin Y. Routing Method in Wireless IoT Sensor Networks. IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC). 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAIC57818.2022.9922998.
8. Afanasyeva O., Tyshchenko M., Mykus S. Intellectualisation of Decision Support Systems for Computer Networks: Production-Logical F-Inference. International conference Information Technology and Interactions, IT&I-2020, CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2845, pp.117–126. https://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_12.pdf
9. Mykus S. A., Leshchenko O. A. Functional stability of information and telecommunication systems. East European Scientific Journal. 2016. №.2(6). pp.47–52.
10. Leshchenko, O., Yaroshchuk, N., Krasnopyorov, P. Information Modelling through GIS for Visualizing Air Alarms. CEUR Workshop Proceedings this link is disabled, 2022, 3347, pp. 279–289.
11. J. Wang. Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems. Journal of Global Positioning Systems. 2002. Vol. 1, No. 1. pp. 48-56.
12. S. Liu, L. Wang, and Z. Yao. Research on layout method of ground-based pseudolite positioning system based on NSGA-II algorithm. Application Research of Computers, 2020. vol. 37, pp. 1839–1843.
13. Li Yang, Kaiyuan Yang, and Danshi Sun. Research on the Station Layout Method of Ground-Based Pseudolite Positioning System Based on NSGA-II Algorithm. Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 2021, Article ID 1520859, 7 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/1520859>
14. X. Xue and L. Wang. Pseudolite base station selection method based on weighted level precision factor. Geodesy and Geodynamics. 2019.vol. 39, pp. 1070–1075.
15. L. Zeng, D. Li, Y. Qu, A. Ren, and Y. Feng. Route planning algorithm for space-based pseudolite network deployment. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2016.vol. 42, pp. 1388–1397.
16. Heng Zhang, Baoguo Yu, Shuguo Pan, Chuanzhen Sheng, Huang Lu, and Yaning Li. A Pseudolite Indoor Wide-Area Networking Technology Based on Signal Multilevel Features. Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2022, Article ID 2190025, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2022/2190025>
17. K. Fujii, Y. Sakamoto, W. Wang, H. Arie, A. Schmitz, and S. Sugano. Hyperbolic positioning with antenna arrays and multi-channel pseudolite for indoor localization. // Sensors, 2015. vol. 15, no. 10, pp. 25157–25175.
18. Chumachenko S.M., Yakovlev E.O., Pirikov O.V., Partalyan A.S. Peculiarities of implementation of the network of environmental monitoring of combat operations for the Armed Forces of Ukraine. Ecological safety and nature management, 2022, No. 2 (42), pp. 23-34.
19. Chumachenko S., Lunova O., Murasov R. Kurtseitov T., Honcharenko I. A Method for Assessing Threats for Critical Infrastructure Objects on the Example of an Enemy's Attack on the Sludge Storage Facilities of the Avdiivka Coke Chemical Plant. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2024. vol. 32, №4. <https://doi.org/10.15421/112360>
20. Skorobohatko S., Fesenko H., Kharchenko V., Yakovlev S. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems. Cybernetics and Systems Analysis. 2024, 60(2), pp. 293–304.
21. Polishchuk A.O., Kravchenko Yu.V. Mathematical model of knowledge representation in the environmental monitoring system. Telecommunications and information technologies. 2015. No. 1. pp. 11–15.