

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

У статті розглянуто один з етапів розробки багатопозиційної мультисенсорної системи – визначення зв'язків між її елементами. Конфігурація такої системи нестационарна, а кількість сенсорів може змінюватися в процесі виконання завдань за призначенням. З урахуванням показника оперативності застосування сенсора визначено критерій якості відображення, який характеризує оптимальний розподіл зв'язків між елементами системи. На основі методу "гілок і меж" запропоновано методику визначення зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи та наведено приклад її застосування. Розроблена методика дає змогу визначити оптимальний варіант розподілу зв'язків між елементами системи для конкретних умов обстановки, який забезпечує максимальну оперативність застосування сенсорів при виконанні мінімальних ресурсних вимог. Крім цього, за допомогою даної методики можна провести перерозподіл зв'язків між елементами системи в разі зміни її конфігурації з метою підвищення оперативності застосування її засобів.

Ключові слова: *структурний синтез, багатопозиційна мультисенсорна система.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Аналіз застосування засобів повітряного нападу (ЗПН) в останніх збройних конфліктах переконливо свідчить про зростання їх значущості для виконання спеціальних завдань. Ефективність протидії таким ЗПН залежить, у першу чергу, від можливостей засобів і систем їх виявлення. Особливе місце серед систем виявлення займають багатопозиційні мультисенсорні системи, призначені для забезпечення своєчасного виявлення ЗПН у заданому районі. До складу таких систем можуть бути включені різноманітні сенсори, а також засоби протидії (далі – вузли), а взаємозв'язки між ними визначаються сукупністю факторів, які забезпечують оперативне виконання поставлених завдань. Оскільки ефективність функціонування багатопозиційної мультисенсорної системи залежить від організації її структури, то завдання визначення розподілу зв'язків між її елементами є актуальним. При цьому розв'язання задачі визначення оптимального варіанта розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи дасть змогу надати практичні рекомендації для підвищення оперативності застосування її засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз джерел [1–5] свідчить про наявність різних методичних підходів до визначення зв'язків між елементами складних технічних систем. Так, у [1] розглянуто підходи щодо порядку встановлення послідовності застосування їх елементів, у [2–4] проаналізовано моделі та методи оптимізації структурних рішень, а в [5] визначено підходи до оптимізації просторової конфігурації таких систем. Проте в існуючих методиках не враховано особливостей застосування мультисенсорних систем, конфігурація яких нестационарна, а кількість підключених до кожного вузла сенсорів може змінюватися в процесі виконання

поставлених завдань. Тому існуючі методики потребують покращення з погляду визначення такого варіанта розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи, за якого буде досягнуто максимальну оперативність виконання завдань за призначенням.

Отже, **метою** досліджень є удосконалення методики визначення розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи для забезпечення максимальної оперативності виявлення ЗПН у заданому районі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Питання визначення зв'язків між елементами системи є частковим завданням синтезу її структури й у загальному вигляді полягає у відображенні певним чином згрупованих завдань за відповідними елементами системи, при якому досягається екстремум критерію якості відображення за умови виконання визначених обмежень [6].

Відповідно, для визначення зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи необхідно вибрати задачі, які розв'язуються її сенсорами, і провести їх розподіл за вузлами системи. Тобто постає завдання визначення такого розподілу зв'язків між елементами системи, який максимізує (або мінімізує) критерій якості відображення при виконанні визначених обмежень. Головними характеристиками якості відображення зазвичай приймаються або ефективність розроблюваної системи, або часові параметри, які характеризують якість виконання завдань системою за призначенням [2, 6].

Оскільки обсяг завдань, для виконання яких призначена багатопозиційна мультисенсорна система, розподілений між її елементами, то критерій якості відображення B_k^* , що характеризує оптимальний розподіл зв'язків між елементами системи Z^* , може бути записаний таким чином [6]:

$$Z^* \Leftrightarrow B_k^* = \sum_{ijk} b_{ij} x_{kj} y_{ki} z_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $k = \overline{1 \dots K}$ – кількість можливих варіантів розподілу зв'язків між елементами системи;

$i = \overline{2 \dots I}$ – кількість сенсорів системи;

$j = \overline{1 \dots J}$ – кількість вузлів системи;

b_{ij} – змінна, яка визначає міру взаємозв'язку i -го сенсора та j -го вузла;

$x_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-й вузол входить до визначеного варіанта розподілу } B_k, \\ 0 & \text{в іншому випадку;} \end{cases}$

$y_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й сенсор входить до визначеного варіанта розподілу } B_k, \\ 0 & \text{в іншому випадку;} \end{cases}$

$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й сенсор зв'язаний з } j\text{-м вузлом,} \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Зв'язки між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи виявлення L ЗПН, до складу якої входить I сенсорів та J вузлів (рис. 1), можна визначити з врахуванням потреб кожного вузла, особливостей ЗПН та деякого показника якості

функціонування системи b_{ij} , який характеризує ступінь взаємозв'язку i -го сенсора та j -го вузла, при чому його основними характеристиками є тип і числове значення взаємозв'язку.

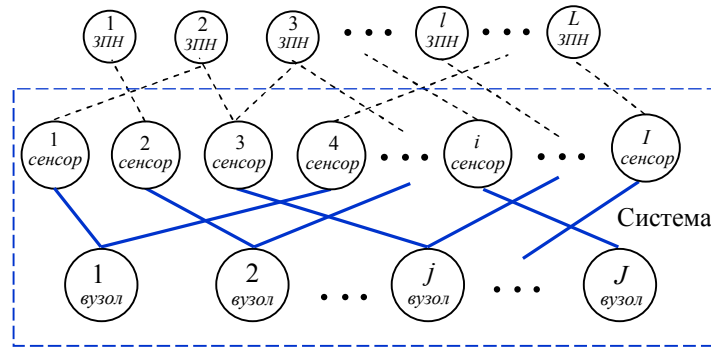


Рис. 1. Загальна структура багатопозиційної мультисенсорної системи

Отже, задача визначення оптимального варіанта розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи (з урахуванням їх кількості) зводиться до знаходження такої сукупності взаємозв'язків між ними, яка дозволить задовольнити встановлені вимоги кожного вузла до відповідного сенсора з максимальною оперативністю виявлення ЗПН при заданих ресурсних обмеженнях. Під оптимальним варіантом розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи розуміється таке співвідношення значень показника якості функціонування системи, яке найбільше відповідає обсягу покладених на неї завдань.

Оскільки одним з головних завдань, для вирішення якого призначена система, є забезпечення максимальної оперативності виявлення ЗПН, а просторове розміщення сенсорів та вузлів не дозволяє повністю визначити перевагу того чи іншого варіанта розподілу зв'язків між її елементами, то за показник якості функціонування системи, що характеризує взаємозв'язок i -го сенсора та j -го вузла, доцільно взяти значення показника оперативності застосування i -го сенсора для j -го вузла. Він полягає в здатності сенсора вирішувати завдання в режимі часу, який забезпечує швидке реагування на зміну обстановки та своєчасну протидію ЗПН. Показник оперативності p_{ij}^{on} може бути встановлений за часовими нормативами на виконання визначеного переліку операцій відповідними елементами системи [7]:

$$p_{ij}^{on} = 1 - e^{-\frac{t_i}{t_j}}, \quad (2)$$

де t_i – підлітний час ЗПН, який визначається дальністю дії i -го сенсора;

t_j – час, що характеризує можливості j -го вузла щодо протидії ЗПН.

З урахуванням (2) для багатопозиційної мультисенсорної системи критерій (1), який набуває змісту ефективності своєчасного виявлення ЗПН, може бути записаний як

$$B_k^* = \sum_{ijk} (1 - p_{ij}^{on}) x_{kj} y_{ki} z_{ij} \rightarrow \min \quad (3)$$

при таких обмеженнях:

$$\sum_{ij} c_{ij} y_{ki} \leq c_{max}, \quad (4)$$

де c_{max} – допустимі витрати ресурсів;

c_{ij} – затрати на експлуатацію i -го сенсора в j -му вузлі;

$$\sum_{jk} m_j x_{kj} \leq \sum_i m_i y_{ki}, \quad (5)$$

де m_j – потреба j -го вузла у ресурсах;

m_i – величина, яка відображає можливості i -го сенсора;

$$p_{ij}^{on} \geq p_{don}^{on}, \quad (6)$$

де p_{don}^{on} – допустиме значення показника оперативності.

Обмеження (4) враховує той факт, що ресурси на експлуатацію багатопозиційної мультисенсорної системи не повинні перевищувати заданої величини c_{max} , обмеження (5) показує, що кількість задіяних сенсорів не може бути більшою, ніж потреби j -го вузла, а обмеження (6) встановлює, що показник оперативності застосування i -го сенсора j -го вузла повинен бути не гірший за визначене допустиме значення.

Отже, критерій (3) з урахуванням обмежень (4)–(6) визначає оптимальний варіант розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи. Задача (3)–(6) є цілочисловою задачею розподілу, яку можливо розв'язувати точними і наближеними методами [4, 8]. Застосування кожного з них залежить від кількості елементів, які можуть входити до складу системи, та складності взаємозв'язків між ними. Для визначення зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи доцільно скористатися методом "гілок і меж", що зумовлено типовою розмірністю [6] розв'язуваної задачі.

Таким чином, методика визначення оптимального варіанта розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи включає:

1. Встановлення вихідних даних для реалізації запропонованої методики: кількість сенсорів I та вузлів J , які можуть бути включені до складу багатопозиційної мультисенсорної системи, а також параметрів, що дозволяють обчислити кількісне значення показника оперативності застосування i -го сенсора для j -го вузла.

2. Визначення області критерійних обмежень c_{max} , m_j та p_{don}^{on} , встановлених системою вищого рівня.

3. Розрахунок значень показника оперативності за формулою (2). Кожне обчислене значення p_{ij}^{on} характеризує якість застосування i -го сенсора щодо виконання разового завдання j -м вузлом. Отримана результуюча матриця $P^{on} = |p_{ij}^{on}|$, де $i = \overline{2..I}$, $j = \overline{1..J}$, містить безрозмірні елементи, над якими в подальшому можуть бути виконані необхідні математичні операції.

4. Виконання перевірки відповідності отриманих значень умові (6). При задоволенні встановленої вимоги елементи матриці P^{on} розмірністю $I \times J$ залишаються без змін, а в іншому випадку відповідному ij -му елементу матриці P^{on} присвоюється нульове значення.

5. Визначення за допомогою процедури, що формує алгоритм методу "гілок і меж", мінімуму цільової функції B_k^* , яка характеризує оптимальний варіант розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи Z^* .

6. Контроль виконання умов (4) та (5). У разі невідповідності ресурсних можливостей виконується коригування вихідних даних і подальше виконання пунктів 2–5.

7. Формування оптимального варіанта розподілу зв'язків між елементами багатопозиційної мультисенсорної системи у вигляді булевої матриці $Z^* = |z_{ij}^*|$.

Для дослідження ефективності застосування запропонованої методики було розроблено імітаційну модель системи. До її складу включено $I = 8$ сенсорів, які можуть бути розподілені за $J = 4$ вузлами. Відповідні значення показників оперативності для розробленої моделі, які формують матрицю P^{on} , наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення показника оперативності p_{ij}^{on}

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0,85	0,88	0,84	0,93
2	0,93	0,91	0,79	0,85
3	0,66	0,71	0,88	0,84
4	0,81	0,71	0,92	0,83
5	0,9	0,88	0,77	0,8
6	0,73	0,81	0,76	0,91
7	0,92	0,85	0,83	0,72
8	0,73	0,93	0,81	0,83

За допомогою реалізації розробленої методики сформовано матрицю Z^* , яка характеризує оптимальний розподіл зв'язків між вузлами та сенсорами досліджуваної системи (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця розподілу зв'язків між елементами системи Z^*

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0	0	0	1
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	1	0
5	1	0	0	0
6	0	0	0	1
7	1	0	0	0
8	0	0	0	1

У результаті змін конфігурації змодельованої багатопозиційної мультисенсорної системи в певні моменти часу $t + \Delta t$, $t + 2\Delta t$, $t + 3\Delta t$ отримано нові матриці P^{on} , значення елементів яких наведено в табл. 3–5.

Таблиця 3

Значення показника оперативності p_{ij}^{on} у час $t + \Delta t$

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0,15	0,12	0,16	0,07
2	0,07	0,09	0,21	0,15
3	0,34	0,29	0,12	0,16
4	0,19	0,29	0,08	0,17
5	0,72	0,67	0,87	0,88
6	0,27	0,19	0,24	0,09
7	0,08	0,15	0,17	0,28
8	0,27	0,07	0,19	0,17

Таблиця 4

Значення показника оперативності p_{ij}^{on} у час $t + 2\Delta t$

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0,15	0,12	0,16	0,07
2	0,07	0,09	0,21	0,15
3	0,86	0,61	0,78	0,73
4	0,19	0,29	0,08	0,17
5	0,1	0,12	0,23	0,2
6	0,27	0,19	0,24	0,09
7	0,08	0,15	0,17	0,28
8	0,27	0,07	0,19	0,17

Таблиця 5

Значення показника оперативності p_{ij}^{on} у час $t + 3\Delta t$

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0,85	0,88	0,84	0,93
2	0,07	0,09	0,21	0,15
3	0,34	0,29	0,12	0,16
4	0,19	0,29	0,08	0,17
5	0,1	0,12	0,23	0,2
6	0,27	0,19	0,24	0,09
7	0,08	0,15	0,17	0,28
8	0,73	0,93	0,81	0,83

Результатом застосування запропонованої методики є сформовані на кожному кроці реконфігурації системи матриці $Z^*(t + \Delta t)$, $Z^*(t + 2\Delta t)$, $Z^*(t + 3\Delta t)$, які характеризують новий оптимальний розподіл зв'язків між елементами системи у відповідні моменти часу зміни її конфігурації. Значення елементів отриманих матриць зведено в табл. 6–8, а виділені чарунки пояснюють динаміку змін зв'язків між елементами змодельованої системи.

Таблиця 6

Матриця розподілу зв'язків між елементами системи $Z^*(t + \Delta t)$

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0	0	0	1
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	0	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	0
8	0	0	0	1

Таблиця 7

Матриця розподілу зв'язків між елементами системи $Z^*(t + 2\Delta t)$

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0	0	0	1
2	0	1	0	0
3	1	0	0	0
4	0	0	1	0
5	0	0	0	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	0
8	0	0	0	1

Таблиця 8

Матриця розподілу зв'язків між елементами системи $Z^*(t + 3\Delta t)$

Сенсор	Вузол			
	1	2	3	4
1	0	0	0	1
2	1	0	0	0
3	1	0	0	0
4	0	0	1	0
5	0	0	0	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	0
8	0	1	0	0

Кількісно ступінь якості визначення зв'язків між елементами системи оцінюється коефіцієнтом розбіжності нормованих отриманих значень цільової функції ΔB_k у відповідний момент часу m -ої зміни конфігурації системи, що обчислюється за формулою [9]:

$$\Delta B_k = (B_k^{norm}(t_m) - B_k^{norm*}(t_m + m\Delta t)) \cdot 100\%, m = \overline{1..M}, \quad (7)$$

де $B_k^{norm}(t_m) = \frac{B_k(t_m)}{B_k^{max}}$ – нормоване значення цільової функції в момент часу t_m , яке визначається розподілом зв'язків між елементами системи без застосування розробленої методики;

$$B_k^{norm*}(t_m + m\Delta t) = \frac{B_k^*(t_m + m\Delta t)}{B_k^{max}} - \text{нормоване мінімальне значення цільової функції в}$$

момент часу $(t_m + m\Delta t)$, визначене за допомогою розробленої методики;

B_k^{max} – значення цільової функції для граничного варіанта – нульових значень усіх показників оперативності, які містяться в матриці P^{on} ;

M – кількість змін конфігурації системи.

Результати розрахунків значень цільової функції для змодельованої багатопозиційної мультисенсорної системи для визначених моментів часу наведено в табл. 9. Слід зауважити, що при цьому умови (4) та (5) приймаються такими, що виконуються. У таблиці курсивом виділено значення цільової функції B_k для системи, зв'язки між елементами якої залишаються сталими для визначених моментів зміни конфігурації. Окремо виділено отримані коефіцієнти розбіжності значень цільової функції ΔB_k для проведених переконфігурацій системи при $B_k^{max} = 8$.

Таблиця 9

Значення цільової функції в задані моменти часу

Час	$Z^* = const$	$Z^*(t + \Delta t)$	$Z^*(t + 2\Delta t)$	$Z^*(t + 3\Delta t)$	$\Delta B_k, \%$
t	0,77	-	-	-	0
$t + \Delta t_m$	0,95	0,79	-	-	2
$t + 2\Delta t_m$	1,05	0,89	0,81	-	3
$t + 3\Delta t_m$	0,98	0,82	0,8	0,7	3,5

Аналіз отриманих результатів показує, що через зміни конфігурації системи значення цільової функції за постійного розподілу зв'язків між її елементами також нерівномірно змінюється. При цьому розбіжність між отриманим та мінімальним значенням цільової функції з кожним кроком буде зростати. Визначений за допомогою запропонованої методики новий оптимальний розподіл зв'язків між елементами системи для відповідного моменту часу зміни конфігурації системи дає змогу усунути дану розбіжність та, відповідно, підвищити оперативність виявлення ЗПН.

Висновки. У результаті проведених досліджень отримала подальший розвиток методика визначення зв'язків між елементами складних технічних системи, яка може бути використана на етапі структурного синтезу багатопозиційної мультисенсорної системи. Вона дозволяє визначити оптимальний варіант розподілу зв'язків між елементами системи для конкретних умов обстановки, який забезпечує максимальну оперативність виявлення ЗПН при виконанні мінімальних ресурсних вимог. Новизна методики полягає у врахуванні показника оперативності застосування елементів багатопозиційної мультисенсорної системи та використанні методу "гілок і меж", що дозволяє забезпечити раціональне функціонування наявних засобів залежно від потреб системи.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка методики оптимізації просторового розміщення елементів багатопозиційної мультисенсорної системи з урахуванням характеристик ЗПН, які можуть застосовуватися.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rama Murthy P. Operations research (Second editions) / P. Rama Murthy. – New Delhi : New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. – 716 p.
2. Шматок С. О. Введення до теорії дослідження операцій / С. О. Шматок, Ю. Г. Даник, О. О. Писарчук. – Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. – 301 с.
3. Сложные технические и эргатические системы: метод использования / А. Н. Воронин, Ю. К. Зиятдинов, А. В. Харченко, В. В. Осташевский. – Х. : Факт, 1997. – 240 с.
4. Силин В. Б. Поиск структурных решений комбинаторными методами. – М. : Изд-во МАИ, 1992. – 216 с.
5. Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони: монографія / С. П. Ярош; за ред. І. О. Кириченка. – Х. : ХУПС, 2012. – 512 с.
6. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: Теория, синтез, эффективность / В. О. Тарасов, Б. М. Герасимов, І. О. Левін, В. О. Корнійчук. – К. : МАКНС, 2007. – 336 с.
7. Довідник з протиповітряної оборони / А. Я. Торопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник та ін. – К. : МО України ; Х. : ХВУ, 2003. – 368 с.
8. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 496 с., ил.
9. Методологічні основи наукових досліджень. Математичне моделювання та оптимізація складних систем і процесів : навч. посіб. / І. Г. Грабар, М. О. Гуменюк, Ю. Г. Даник та ін. – Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. – 600 с.

Подано 02.11.2016

С. А. Дупелич

УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассмотрен один из этапов разработки многопозиционной мультисенсорной системы – определения связей между ее элементами. Конфигурация такой системы нестационарна, а количество сенсоров может изменяться в процессе выполнения заданий по назначению. С учетом показателя оперативности применения сенсора

определен критерий качества отображения, который характеризует оптимальное распределение связей между элементами системы. На основе метода "ветвей и границ" предложена методика определения связей между элементами многопозиционной мультисенсорной системы и приведен пример ее использования. Разработанная методика дает возможность определять оптимальный вариант распределения связей между элементами системы для конкретных условий обстановки, который обеспечивает максимальную оперативность применения сенсоров при выполнении минимальных ресурсных требований. Кроме этого, с помощью данной методики возможно выполнить перераспределение связей между элементами системы в случае изменения ее конфигурации с целью повышения оперативности применения ее средств.

Ключевые слова: *структурный синтез, многопозиционная мультисенсорна система.*

S. O. Dupelich

IMPROVED METHOD OF DETERMINATION OF CONNECTIONS BETWEEN ELEMENTS OF MULTIPosition MULTISENSOR SYSTEM

Determination of connections between elements of the multiposition multisensor system is considered in the article. The system configuration is non-stationary. In addition, the amount of sensors can change in the process of implementation of tasks. The criterion of quality of reflection is entered, taking into account the index of operationability of uses of sensor. It characterizes the optimum distributing of connections between the elements of the system. On the basis of branch-and-bound the method of determination of connections between the elements of the multiposition multisensor system is offered and the example of its use is given. The developed method enables to determine the optimum variant of distributing of connections between the elements of the system for the concrete condition of situation, which provides the maximal operationability of uses of sensors at implementation of minimum resource requirements. Except for it, by the developed method it is possible to execute the redistribution of connections between the elements of the system in the case of change to its configuration with the purpose of increase of operationability of uses its means.

Keywords: *structural synthesis, multiposition multisensor system.*