

УДК 621.396.962

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗА НЕЛІНІЙНОЮ СХЕМОЮ КОМПРОМІСІВ



[О.О. ПИСАРЧУК](#)

Житомирський військовий
інститут імені С. П. Корольова
Національного авіаційного
університету

В статті запропоновано багатокритеріальну математичну модель визначення оптимальної просторової структури багатопозиційної інформаційної системи. Модель базується на врахуванні суперечливих частинних критеріїв при визначенні оптимальної кількості вимірювачів. Новизна моделі полягає у застосуванні технології вкладених згорток за нелінійною схемою компромісів.

This paper introduces multicriteria mathematical model for determining the optimal spatial structure of multi-site information system. This model is based on a consideration of conflicting partial criteria in determining the optimal number of meters. The novelty of the model is to use the technology embedded parcel of nonlinear scheme of compromises.

В статье предложена многокритериальная математическая модель определения оптимальной пространственной структуры многопозиционной информационной системы. Модель основана на учете противоречивых частных критериев при определении оптимального количества измерителей. Новизна модели состоит в применении технологии вложенных сверток по нелинейной схеме компромиссов.

Вступ

Якісний розв'язок задач навігації, зв'язку, реалізація специфічних завдань частотного нагляду в сучасних умовах потребують високоточного визначення координат об'єктів спостереження (ОС). У якості таких об'єктів виступають аеродинамічні або космічні об'єкти (КО), джерела радіовипромінювань (ДРВ) різного характеру та інше. Визначення координат ОС залежно від їх класу реалізується із застосуванням радіолокаційних станцій, квантово-оптичних вимірювачів або радіопеленгаторів. В свою чергу, одним із шляхів високоточного визначення координат ОС є застосування багатопозиційних технологій, тобто об'єднання декількох вимірювачів в єдину багатопозиційну систему. При цьому точності характеристики багатопозиційних інформаційних систем (БПІС) при незмінних інших умовах в значній мірі залежать від кількісного складу та просторової конфігурації багатопозиційної системи. Окрім жорстких вимог до точності кінцевих результатів важливо враховувати обмеження на територію дислокації вимірювачів та на вартість БПІС. Отже, важливою постає задача вироблення підходів щодо формування просторової структури БПІС, яка б забезпечувала вимоги та враховувала обмеження на її створення і функціонування.

Задача формування просторової структури БПІС може бути віднесена до класу задач синтезу складних систем. Структурний синтез складних систем докладно розг-

лядався в [1–5] і включає етапи: формування вимог до системи, вибір складових системи, опис їх взаємодії і формування оптимального варіанту побудови системи. Питання формування оптимальних структур БПІС розглянуто в роботах [6–8] і передбачає, перш за все, оптимізацію їх просторової конфігурації. При цьому оптимізаційна задача формалізується в однокритеріальній формі та не передбачає отримання її аналітичного розв'язку, що не забезпечує врахування зовнішніх умов та гнучкого об'єднання вимірювачів в систему. Таким чином, актуальною є задача формування математичної моделі та розробки методики визначення оптимальної просторової структури багатопозиційної інформаційної системи.

I. Математична модель визначення оптимальної просторової структури БПІС

Методика оптимізації структури БПІС повинна забезпечувати раціональне використання наявних вимірювачів координат об'єкту спостереження, розробку рекомендацій щодо застосування додаткових інформаційних засобів при їх гнучкому інформаційному об'єднанні та враховувати вимоги високоточного визначення координат КО, ДРВ, обмеження на територію дислокації вимірювачів і до вартості БПІС. Для розв'язку зазначеної задачі розроблено багатокритеріальну математичну модель визначення оптимальної просторової структури БПІС. Модель є оптимізаційною і передбачає розв'язок задач визначення оптимального кількісного складу вимірювачів в БПІС, формування оптимальної просторової структури системи із стаціонарних вимірювачів та розрахунок координат дислокації додаткових вимірювальних пунктів. Модель базується на поданні задачі у багатокритеріальній формі та її розв'язку за нелінійною схемою компромісів із використанням технології вкладених згорток. Початковою інформацією для формування оптимальної структури БПІС є: координати дислокації (географічні широта, довгота) λ_i, φ_i та кількість стаціонарних $i = 1 \dots N$ і додаткових вимірювачів N_p ; обмеження на територію дислокації останніх $\lambda_S, \lambda_N, \varphi_W, \varphi_I$; координати просторої точки, відносно якої формуватиметься оптимальна просторова структура БПІС – $\bar{b}' = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$. Вектор $\bar{b}'$ характеризує координати об'єкту спостереження, які визначені обмеженим складом вимірювачів, або координати центру контрольованої просторової області, відносно якої формуватиметься БПІС. Зазначене позбавляє некоректності розв'язувану задачу.

Визначення оптимального кількісного складу вимірювачів в БПІС N_{opt} реалізується шляхом подання задачі у багатокритеріальній формі за ефективнісно-вартісною системою критеріїв, залежних від кількості вимірювачів N в системі,

$$Q^{-1}(N) = R(N) \Rightarrow \min, S(N) \Rightarrow \min. \quad (1)$$

де $Q(N)$, $R(N)$ – точність та похибка визначення координат об'єкту спостереження $S(N)$ – вартість системи.

Для розв'язку багатокритеріальної задачі при формуванні оптимальної структури БПІС застосовано підхід зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріа-

льної форми. Це передбачає формування за вектором суперечливих критеріїв (поданих дискретною або аналоговою моделлю) узагальненого функціоналу та визначення його екстремуму відносно шуканих (оптимізованих) параметрів. Для частинних критеріїв (1) дискретний їх опис подається множинами

$$R = \{R_i\}, \quad S = \{S_i\}, \quad (2)$$

а аналоговий – моделями

$$R(N) = \sum_{j=0}^m r_j N^j, \quad S(N) = \sum_{j=0}^m s_j N^j. \quad (3)$$

Множини (2) можуть бути апріорно задані, отримані методами моделювання чи експериментальним шляхом. Моделі (3) формуються або на підставі певних аналітичних перетворень, що відображають суть частинного критерію, або на підставі обробки даних (2). Для формування узагальненого критерію оптимальності використовуватиметься нелінійна схема компромісів відповідно до згортки професора Вороніна А.М. [3]. Порівняно з іншими схемами оптимізації [6] згортка має такі переваги: оптимізаційні задачі розв'язуються за наявності обмежень, в межах яких гарантується унімодальність функції узагальненого критерію та відносно невелика обчислювальна складність алгоритму пошуку рішення.

Згортка для дискретно заданих частинних критеріїв має вигляд [3]

$$Y(y_0) = \sum_{l=1}^b \gamma_{0l} (1 - y_{0l})^{-1} \Rightarrow \min, \quad (4)$$

де $l = 1 \dots b$ – кількість включених в згортку частинних критеріїв оптимальності системи; γ_{0l} – нормований ваговий коефіцієнт; y_{0l} – нормативний частинний критерій оптимальності.

Формування узагальненого функціоналу для аналітичного подання частинних критеріїв здійснюється відповідно до виразу

$$\chi^* = \arg \min_{\chi \in G} \sum_{l=1}^b \gamma_{l0} (1 - \varphi_{0l}(\chi))^{-1} = F(\chi), \quad (5)$$

де χ – параметр, що оптимізується; G – область визначення функцій частинних критеріїв оптимальності; $\varphi_{0l}(\chi)$ – нормована функція l -го частинного критерію оптимальності; χ^* – оптимальне значення параметра системи. Нормування частинних критеріїв здійснюється для приведення їх до безрозмірної мінімізованої форми відносно максимуму (мінімуму) на обмеженому інтервалі їх розгляду, або відносно суми отримуваних значень для дискретного подання.

Тоді для критеріїв (1) з дискретним і аналоговим їх поданням, відповідно до згорток (4), (5), матимемо математичні моделі для визначення оптимальної кількості вимірювачів в БПІС

$$Y_i = \gamma_{10} (1 - Q_{0i}^{-1})^{-1} + \gamma_{20} (1 - S_{0i})^{-1} \Rightarrow \min, \quad i = 1 \dots N, \quad (6)$$

$$N^* = \underset{\chi \in G}{\operatorname{argmin}} [\gamma_{10}(1 - Q_0^{-1}(N))^{-1} + \gamma_{20}(1 - S_0(N))^{-1}] = F(N). \quad (7)$$

Оптимальна кількість вимірювачів в БПІС з моделі (6) визначається за правилом $N_{opt} = i$, при $Y_i \Rightarrow \mathbf{min}$, та згідно з правилом округлення $N'_{opt} = \mathbf{min} F(N^* = \mathbf{max}, \text{або} \mathbf{min} N)$, що дає мінімум функціоналу (7) при отриманні значення N^* із розв'язку рівняння $dF(N)/dN = 0$.

Формування оптимальної просторової структури БПІС на базі стаціонарних вимірювачів передбачає встановлення критеріїв оптимальності у вигляді ієрархічної моделі факторів, показників та критеріїв, які забезпечують вибір для використання в БПІС N_{opt} вимірювачів з наявних. Узагальнені критерії оптимальності просторової структури БПІС подано у вигляді

$$E_i \Rightarrow extremum, E_j \Rightarrow extremum, E_{ij} \Rightarrow extremum, \quad (8)$$

де $E_{i,j}$ – характеризує ефективність виконання задач за призначенням i -м та j -м вимірювачем (одинарний критерій), $i = 1...N$; E_{ij} – відображають ефективність виконання задач за призначенням БПІС, складеної з i -го та j -го вимірювачів (комбінаторний критерій), $i = 2...N$. Опис зміни частинних критеріїв (8) здійснюється у дискретному вигляді.

Для формування оптимальної структури БПІС за сукупністю частинних критеріїв (8) необхідно прийняти рішення про включення (виключення) i -го вимірювача в багатопозиційну систему. Тому формування узагальнених критеріїв оптимальності реалізується для пари вимірювачів відповідно до дискретної згортки (4) (комбінаторні узагальнені критерії для пар вимірювачів)

$$W_{ij} = \gamma_{0E_i}(1 - E_{0i})^{-1} + \gamma_{0E_j}(1 - E_{0j})^{-1} + \gamma_{0E_{ij}}(1 - E_{0ij})^{-1} \Rightarrow \mathbf{min}. \quad (9)$$

Надалі, із застосуванням технології вкладених згорток [9], здійснюється формування узагальнених критеріїв оптимальності за кожним вимірювачем у вигляді оптимізаційної моделі

$$\begin{cases} D_f = \sum_{j=f+1}^N (1 - W_{0ff})^{-1} \Rightarrow \mathbf{min}, & \text{якщо } f = 1; \\ D_f = \left(\sum_{k=1}^{f-1} (1 - W_{0kf})^{-1} + \sum_{j=f+1}^N (1 - W_{0ff})^{-1} \right) \Rightarrow \mathbf{min}, & \text{якщо } f = 2...N. \end{cases} \quad (10)$$

Застосування вкладених згорток дозволяє реалізувати тут категороване послідовне зведення до узагальненого критерію значної кількості суперечливих частинних критеріїв оптимальності та врахувати у розв'язку багатокритеріальної оптимізаційної задачі вплив кожного з них. Нормування значень, що описують зміну узагальнених критеріїв оптимальності для пари вимірювачів W_{ij} , здійснюється відносно нормуючого (порогового) значення W_{por} – пари вимірювачів з найгіршими значеннями,

що характеризують зміну функцій частинних критеріїв – $\max E_{0i}$, $\max E_{0j}$, $\max E_{0ij}$ за виразом

$$W_{0ij} = W_{ij} / W_{por}. \quad (11)$$

Найгіршим є вимірювач з найбільшим значенням параметра (11), що дозволяє відібрати кількість вимірювачів (N_{opt}) для формування оптимальної щодо критеріїв (8) просторової структури БПІС.

Визначення координат дислокації додаткових вимірювачів в БПІС базується на формуванні мінімізованої критеріальної функції – об'єму просторового еліпсоїда похибок визначення координат об'єкту спостереження V_S , утвореного перетинами порційних еліпсоїдів похибок кожного вимірювача. Суперечливим критерієм до точності БПІС є мінімізована її вартість S , пропорційна відстаням між вимірювачами, або максимізована площа багатокутника, утвореного ними. Варійованими параметрами виступають координати дислокації вимірювачів λ_i, φ_i , при цьому опис зміни частинних критеріїв здійснюється в аналітичній формі

$$\begin{cases} V_S(\lambda_i, \varphi_i) \Rightarrow \min; \\ S(\lambda_i, \varphi_i) \Rightarrow \min; \end{cases} \quad \text{при } \lambda_i, \varphi_i = \text{var}; i = 1 \dots N_{opt}. \quad (12)$$

Об'єм еліпсоїду похибок визначення координат об'єкту спостереження в БПІС $V_S(\lambda_i, \varphi_i)$ функціонально пов'язаний з варійованими параметрами і визначається за кореляційною матрицею похибок (КМП) визначення координат цілі в багатопозиційній системі, наприклад в геоцентричній системі координат (ГСК)

$$R_{RZ}(\lambda_i, \varphi_i) = \prod_{i=1}^{N_{opt}} R_{ГСКi}, \quad (13)$$

де $R_{ГСКi}$ – КМП визначення координат об'єкту спостереження i -м вимірювачем в ГСК, які розраховуються за КМП вимірювання координат в пунктової системі координат (ПСК)

$$R_{ГСК1} = F_1 R_{ПСК1} F_1^T, R_{ГСК2} = F_2 R_{ПСК2} F_2^T, \dots, R_{ГСК_{N_{opt}}} = F_{N_{opt}} R_{ПСК_{N_{opt}}} F_{N_{opt}}^T, \quad (14)$$

де F_i – матриці Якобі перетворень вектора координат ОС з ПСК в ГСК.

Модель зміни критерію вартості БПІС формується у вигляді

$$S(\lambda_i, \varphi_i) = \sum_{i=1}^{N_{opt}} L_i A_i^* + M_i, \quad (15)$$

де L_i – вартість одиниці довжини створення і обслуговування комутаційних ліній передачі інформації від вимірювачів до пункту збору і обробки даних в БПІС; A_i^* – відстань від вимірювача до пункту обробки даних (або відстані між вимірювачами); M_i – витрати (вартість) на створення, обслуговування і утримання i -го вимірювача.

Відповідно до згортки (5), за аналітичними частинними критеріями (12) матимемо оптимізаційну модель для визначення координат дислокації додаткових вимірювачів

$$\chi^* = \underset{\chi \in G}{\operatorname{argmin}} [\gamma_{0V}(1 - V_{S0}(\lambda_i, \varphi_i))^{-1} + \gamma_{0S}(1 - S_0(\lambda_i, \varphi_i))^{-1}] = F(\lambda_i, \varphi_i). \quad (16)$$

де $\chi = (\lambda_i, \varphi_i)^T$ – вектор варійованих параметрів; $\chi^* = (\lambda_i^{opt}, \varphi_i^{opt})^T$ – вектор оптимальних значень варійованих параметрів; $G = \{\varphi_W \leq \varphi_i \leq \varphi_I, \lambda_S \leq \lambda_i \leq \lambda_N\}$ – обмеження на розв’язок багатокритеріальної задачі, які відображають обмеження на територію дислокації додаткових вимірювачів. Визначення координат дислокації додаткових вимірювачів $\lambda_i^{opt}, \varphi_i^{opt}$ за багатокритеріальною моделлю (16) здійснюється шляхом розв’язку системи рівнянь

$$\partial F(\lambda_i, \varphi_i) / \partial \lambda_i = 0, \quad \partial F(\lambda_i, \varphi_i) / \partial \varphi_i = 0. \quad (17)$$

Таким чином, вирази (6), (7), (10) та (16) являють собою багатокритеріальну математичну модель визначення оптимальної просторової структури БПІС. Порядок застосування моделі регламентується етапами методики:

1. Визначення сегменту початкових даних:
 - 1.1. Координати дислокації та кількість стаціонарних вимірювачів.
 - 1.2. Кількість додаткових вимірювачів та обмеження на територію їх дислокації.
 - 1.3. Визначення обмеженим складом вимірювачів координат ОС або встановлення координат центру контрольованої просторової області, відносно якої формуватиметься БПІС.
2. Визначення оптимального кількісного складу вимірювачів в багатопозиційній інформаційній системі за моделлю (6) або (7).
3. Формування оптимальної просторової структури БПІС на базі стаціонарних вимірювачів за моделлю (10).
4. Визначення координат дислокації додаткових вимірювальних пунктів багатопозиційної системи згідно з моделлю (16).

Особливості та можливості розробленої моделі розкривають приклади її застосування, де розглянуто БПІС з активних та пасивних вимірювачів.

Нехай об’єктом спостереження в БПІС є КО, а активними вимірювачами – радіодислокаційні станції (РЛС) контролю космічного простору. Необхідно визначити оптимальну структуру БПІС, складену з РЛС для отримання параметрів руху КО.

Визначення оптимального кількісного складу вимірювачів в БПІС – n реалізуємо за аналоговою та дискретною моделями критеріїв (1), опис зміни яких (табл. 1) отримано при моделюванні роботи малобазової ($Q_M(n)$) та великобазової ($Q_B(n)$) систем РЛС з похибками вимірювання дальності, азимута та кута місця відповідно $\sigma_r = 0,15$ км, $\sigma_\varepsilon = 0,025$ рад, $\sigma_\beta = 0,25$ рад.

Таблиця 1. Опис зміни значень критеріїв (1)

n	1	2	3	4	6
$Q_M(n)$	1	1,41	1,73	2,0	2,44
$Q_B(n)$	1	2,60	3,96	4,18	4,29
$S(n)$	1	2	3	4	6

За даними табл. 1 згідно з МНК матимемо критеріальні функції

$$Q_M(n) = 0,5798 + 0,455n - 0,0241n^2, Q_B(n) = -1,0333 + 2,3018n - 0,2369n^2, S(n) = n, \quad (18)$$

які після нормування та за моделлю (7) формують рівняння для пошуку оптимальної кількості вимірювачів в малобазовій

$$\frac{-0,459 + 0,048n}{(0,579 + 0,455n + 0,024n^2)^2 \left(1 - \frac{1,01}{0,579 + 0,455n + 0,024n^2}\right)} + \frac{0,166}{(1 - 0,166n)^2} = 0 \quad (19)$$

та великобазовій системах

$$\frac{-0,459 + 0,048n}{(0,579 + 0,455n + 0,024n^2)^2 \left(1 - \frac{1,01}{0,579 + 0,455n + 0,024n^2}\right)} + \frac{0,166}{(1 - 0,166n)^2} = 0. \quad (20)$$

Розв'язком рівнянь (19), (20) є кількість вимірювачів для малобазової системи $n_M = 2,94$ та для великобазової – $n_B = 2,15$, що після округлення дає рішення $n_M = 3$ і $n_B = 2$. Для дискретного подання критеріїв (1) за даними табл. 1 матимемо зміну узагальнених критеріїв для малобазової Y_M та великобазової Y_B систем, які отримані за моделлю (6)

Таблиця 2. Зміна узагальнених критеріїв для малобазової та великобазової систем

N	1	2	3	4	6
Y_M	11,20	4,91	4,36	5,00	11,68
Y_B	11,20	3,12	3,33	4,31	11,30

За мінімальними значенням, що характеризують зміну узагальнених критеріїв (табл. 2), матимемо оптимальну за критеріями найвищої точності визначення координат КО та мінімальною вартістю БПС кількість РЛС для малобазового та великобазового комплексів $N_M^{opt} = 3$, $N_B^{opt} = 2$. Отримані результати розрахунків та співпадіння розв'язків доводять ефективність сформованих оптимізаційних моделей (6), (7). При цьому дискретний спосіб опису частинних критеріїв має порівняно невелику обчислювальну складність, а аналоговий – знижує витрати на отримання початкових даних, використовуючи прогностичні властивості моделей.

Формування оптимальної просторової структури БПС на базі стаціонарних вимірювачів полягає у гнучкому динамічному виборі інформаційних засобів для високо-точного визначення параметрів траєкторію руху ОС (віртуальна БПС, що формуєть-

ся для супроводження цілі з траєкторіями заданого типу) і здійснюється за багатокритеріальною моделлю (9), (10). Конкретизація критеріїв (8) дає систему

$$\Omega_i = \begin{cases} t_{icn} \Rightarrow \max; \\ \Delta_i \Rightarrow \min; \\ \det R_i \Rightarrow \min; \\ Nad_i \Rightarrow \max; \end{cases} \quad \Omega_j = \begin{cases} t_{jcn} \Rightarrow \max; \\ \Delta_j \Rightarrow \min; \\ \det R_j \Rightarrow \min; \\ Nad_j \Rightarrow \max; \end{cases} \quad B_{ij} \Rightarrow \max, \quad W_{ij} = \begin{cases} \Omega_i \Rightarrow \min; \\ \Omega_j \Rightarrow \min; \\ B_{ij} \Rightarrow \max; \end{cases} \quad (21)$$

де позначено: t_{cn} – час спостереження цілі; Δ – різниця між кількістю вимірюваних та необхідних параметрів руху; $\det R$ – визначник КМП вимірювання параметрів руху цілі; Nad – узагальнений показник надійності вимірювача; B_{ij} – база (відстань) між вимірювачами з номерами $i = 1 \dots n$, $j = 1 \dots m$. Згідно з (9) за критеріями (21) формуються комбінаторні узагальнені критерії для пар вимірювачів із застосуванням технології вкладених згорток

$$\begin{cases} W_{ij} = \gamma_{0\Omega_i} (1 - \Omega_{0i})^{-1} + \gamma_{0\Omega_j} (1 - \Omega_{0j})^{-1} + \gamma_{0B_{ij}} (1 - B_{0ij})^{-1}; \\ \Omega_{0i} = \gamma_{0t_i} (1 - t_{0icn})^{-1} + \gamma_{0\Delta_i} (1 - \Delta_{0i})^{-1} + \gamma_{0R_i} (1 - \det R_{0i})^{-1} + \gamma_{0N_i} (1 - Nad_{0i})^{-1}; \\ \Omega_{0j} = \gamma_{0t_j} (1 - t_{0jcn})^{-1} + \gamma_{0\Delta_j} (1 - \Delta_{0j})^{-1} + \gamma_{0R_j} (1 - \det R_{0j})^{-1} + \gamma_{0N_j} (1 - Nad_{0j})^{-1}. \end{cases} \quad (22)$$

Із узагальнених комбінаторних критеріїв (22) формується модель вигляду (10) для кожного вимірювача та за мінімальним значенням D_f відбирається оптимальна кількість вимірювачів до складу БПІС.

Визначення координат дислокації додаткових вимірювачів в БПІС з урахуванням обмежень на територію їх дислокації здійснюється за моделлю (16) за умов: вимірювачами є активні РЛС контролю космічного простору; дислокація двох з них відома – $\lambda = 48,460$ град, $\varphi = 22,780$ град, та другої $\lambda = 44,580$ град, $\varphi = 33,380$ град; спостереженню підлягає КО з параметрами траєкторії типу «Січ»; центром контрольованої просторової області БПІС є точка з проекцією на поверхню Землі $\lambda = 31,340$ град, $\varphi = 49,596$ град. Необхідно визначити координати дислокації третьої РЛС, що доповнює до оптимальної за критеріями (12) структуру БПІС з урахуванням обмежень на дислокацію над територією України. Використання оптимізаційної моделі (16), з урахуванням обмежень території, дає очевидний розв'язок – координати третьої позиції $\lambda = 52,023$ град, $\varphi = 33,452$ град, що доповнює БПІС до правильного трикутника. Розрахунки показали, що будь-яка зміна в просторовій конфігурації сформованої БПІС призводить до зниження точності кінцевих результатів. Отримані результати є підтвердженням працездатності запропонованого підходу.

Формування БПІС з пасивних вимірювачів здійснюватиметься за таких умов. Нехай у ході радіомоніторингу радіопеленгаторною мережею (РПМ), що складається із п'яти ($N = 5$) стаціонарних радіопеленгаторів (РП), розташованих по периметру контрольованого району неправильної форми на відстані від ДРВ близько 80 км, отримані вимірювання пеленгу на джерело радіовипромінювань (ДРВ): $\theta_1 = 323^\circ$, $\theta_2 = 248^\circ$, $\theta_3 = 272^\circ$, $\theta_4 = 258^\circ$, $\theta_5 = 201^\circ$. Середньоквадратичне відхилення (СКВ) по-

хибки вимірювання пеленга складає $\sigma_\theta = 1^\circ$. Необхідно сформувати оптимальну структуру РПМ із забезпеченням найкращої точності визначення координат ДРВ з мінімальною вартістю мережі.

Визначення оптимальної кількості РП в РПМ здійснюється за початковими даними табл. 3, що отримані за виразом (23) та моделлю (6)

$$R_p(N) = \sqrt{\sum_{q=1}^N (\sigma_{\theta_q} R_q)^{-2} \left[\sum_{q=1}^N \sum_{\xi=q+1}^N (\sin \gamma_{q\xi} / (\sigma_{\theta_q} \sigma_{\theta_\xi} R_q R_\xi))^2 \right]^{-1}}, \quad (23)$$

де $\gamma_{q\xi}$ – кут засічки, утворений лініями пеленга від q -го та ξ -го РП на ДРВ; $\sigma_{\theta_q}, \sigma_{\theta_\xi}$ – СКВ похибки визначення пеленгів відповідним РП; R_q, R_ξ – відстань від точки розташування ДРВ до кожного РП в радіопеленгаторній парі.

Таблиця 3. Початкові дані для розрахунків

N	2	3	4	5
$Q^{-1}(N)$	2,279	1,610	1,395	1,247
$S(N)$	2,0	3,0	4,0	5,0
Y_i	2,320	2,251	2,250	2,261

За мінімальним значенням узагальненого критерію Y_i приймається рішення про оптимальну для поточних умов кількість вимірювачів в РПМ $N_{opt} = 4$.

Формування оптимальної просторової структури РПМ із стаціонарних вимірювачів здійснюється за критеріями (8), які уточнюються за результатами (23) і включають

$$\begin{cases} \Delta\gamma_{q\xi} \Rightarrow \min, \Delta h_{q\xi} \Rightarrow \min, \\ P_{Eq} \Rightarrow \max, P_{E\xi} \Rightarrow \max, \end{cases} \quad \text{при } q=1...(N-1), \xi=q+(1...N), \quad (24)$$

де $\Delta\gamma_{q\xi}$ – відхилення реального значення параметра $\gamma_{q\xi}$ від величини, для якої похибка визначення координат ДРВ буде мінімальною; $\Delta h_{q\xi}$ – різниця реального значення висоти трикутника, утвореного РП і ДРВ, опущеної з вершини, де розташоване джерело, від значення цього параметра, що забезпечує найкращу точність визначення координат джерела; $P_{Eq, \xi}$ – ймовірність електромагнітної доступності ДРВ для кожного РП в парі. Для прийняття рішення про використання РП в РПМ за критеріями (24) відповідно до моделі (9) формуються узагальнені критерії оптимальності РПМ за кожною РП парою

$$W_{q\xi} = \eta_{10}(1 - \Delta\gamma_{q\xi 0})^{-1} + \eta_{20}(1 - \Delta h_{q\xi 0})^{-1} + \eta_{30}(1 - P_{Eq0})^{-1} + \eta_{40}(1 - P_{E\xi 0})^{-1} \Rightarrow \min. \quad (24)$$

Результати розрахунків за моделлю (25) значень, що характеризують зміну узагальнених критеріїв оптимальності РПМ за кожним РП, наведені в табл. 4. Згідно з (10) отримані значення зміни узагальненого критерію по кожному РП: $D_1 = 0,44456$, $D_2 = 0,44463$, $D_3 = 0,44366$, $D_4 = 0,44487$, $D_5 = 0,44450$.

Таблиця 4. Результати розрахунків

q, ξ	1,2	1,3	1,4	1,5	2,3	2,4	2,5	3,4	3,5	4,5
$W_{0q\xi}$	0,900	0,874	0,885	0,912	0,910	0,895	0,871	0,877	0,846	0,937

Для заданих початкових умов і обмежень оптимальною за критеріями найвищої точності визначення координат ДРВ і мінімальних витратах на її створення є РПМ у складі РП з номерами 1, 2, 3, 5 (найбільше значення D_i є ознакою для виключення РП з РПМ). При цьому точність місцевизначення ДРВ повним складом РП складає $R_p = 11,543$ км, а РПМ з 4-х відібраних вимірювачів $R_p = 11,843$ км. Будь-яка зміна в конфігурації сформованої РПМ призводить до істотного зниження точності кінцевих результатів, що є ознакою оптимальності сформованої структури для заданих умов і прийнятих обмежень.

Визначення координат дислокації додаткових РП з урахуванням обмежень на район їх розміщення здійснюється згідно з моделлю (16), аналогічно до попереднього прикладу з урахуванням складу вимірювальної інформації від РП в РПМ.

Висновки

Таким чином, запропонований підхід щодо визначення оптимальної просторової структури БПС є працездатним та ефективним. Застосування запропонованої методики особливо необхідне у випадках використання різнотипних за складом вимірюваних параметрів, принципів функціонування та точнісних характеристик вимірювачів, при зміні контрольованої області простору та призначень і функцій БПС, для урахування обмежень на територію дислокації вимірювачів, що характерно для мобільних засобів і при створенні нових БПС.

Список літератури:

1. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 200с.
2. Основы моделирования сложных систем: Учебное пособие для студентов вузов / под ред. И.В.Кузьмина.– К.: Высшая школа, 1981.– 360с.
3. Сложные технические и эргатические системы: метод использования / Воронин А.Н., Зиятдинов Ю.К., Харченко А.В., Осташевский В.В. – Харьков: Факт, 1997. – 240с.
4. Баранов Г.Л. Макаров А.В. Структурное моделирование сложных динамических систем. – К.: Наукова думка, 1986.– 272с.
5. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288с.
6. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.
7. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. проф. В.В. Цветкова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
8. Чуров Е.П. Спутниковые системы радионавигации. – М.: Сов. радио, 1977, – 392с.
9. Воронин А.Н. Вложенные скалярные свертки векторного критерия // Проблемы управления и информатики. – 2003. – №5. – С. 10–21.