

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ І МЕХАНІКИ НАНУ

ПАНТЄСВ РОМАН ЛЕОНІДОВИЧ



УДК 004.94 : 004.89: 004.62

**СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ
ІНТЕГРОВАНИМИ БАГАТОПОЗИЦІЙНИМИ КОМПЛЕКСАМИ
РАДІОМОНІТОРИНГУ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі теорії керуючих систем Інституту прикладної математики і механіки НАНУ (м. Слов'янськ), а також на базі ПАТ «СКБ РТП».

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Валерій Миколайович,
Інститут прикладної математики та механіки
Національної академії наук України,
в.о. завідувача відділу теорії керуючих систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Жук Сергій Якович
Національний технічний університет України
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
професор кафедри радіотехнічних пристроїв
та систем.

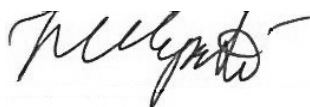
доктор технічних наук, професор
Яновський Фелікс Йосипович
Інститут Аеронавігації Національного авіаційного
університету, завідувач кафедри електроніки.

Захист відбудеться “ 20 ” жовтня 2016р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058 Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою:
03058 Київ, пр. Космонавта Комарова, 1

Автореферат розісланий “ 20 ” вересня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.08
д.т.н., проф.



Шутко В. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні роки спостерігається постійне зростання вимог до точності визначення координат джерел радіовипромінювання (ДРВ) інтегрованими багатопозиційними комплексами радіомоніторингу. Основними методами визначення координат є триангуляційний метод і різницево-далекомірний метод (РДМ). Ці методи є широко відомими, успішно апробованими і активно застосовуються в системах як пасивної, так і активної локації різного призначення. Тим не менш, при досягненні певних умов, пов'язаних з особливостями поширення сигналу від ДРВ, взаємним положенням цілі і багатопозиційного пасивного комплексу, а також насиченістю радіоелектронної обстановки, точність визначення координат ДРВ класичними методами виявляється недостатньою. Розвиток обчислювальної техніки надає можливість для успішного впровадження нових методів визначення координат цілей, в тому числі, заснованих на використанні надлишкової інформації про місцезнаходження цілі. При цьому важливою вимогою до розроблюваних алгоритмів є необхідність здійснення розрахунків, пов'язаних з визначенням місця розташування цілі в режимі м'якого реального часу.

Значення задачі підвищення точності визначення координат цілі в даний час ще більше зростає у зв'язку з появою тенденції інтеграції пасивних і активних засобів в єдині комплекси. Тому розробка методів, заснованих на використанні надлишкової інформації та здатних підвищити точність визначення координат ДРВ в інтегрованих багатопозиційних комплексах радіомоніторингу є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи та отримані результати відповідають проблематиці держбюджетних тем, які виконуються в Інституті прикладної математики і механіки НАН України. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану держбюджетних науково-дослідних робіт за такими темами:

– № 0105U000266 «Алгебраїчні, комбінаторні, логічні та еволюційні методи дослідження дискретних і безперервних систем та їх використання в задачах ідентифікації та управління»;

– № 0114U002024 «Розробка сучасних аналітичних і чисельних методів аналізу і синтезу дискретних і безперервних динамічних систем».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка методів підвищення точності і швидкості визначення координат ДРВ комплексами системами пасивного радіомоніторингу, інтеграція пасивних і активних систем, а також створення системи обробки сигналів ДРВ з метою розрахунку його координат.

Завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

1. Провести дослідження основних завдань і особливостей побудови технічних систем визначення координат, проаналізувати основні завдання і проблеми сучасних систем контролю радіоелектронної обстановки (РЕО).

2. Виконати аналіз існуючих методів визначення координат ДРВ в багатопозиційних комплексах пасивної локації;

3. Розробити і дослідити новий метод визначення координат ДРВ, заснований на використанні вагових коефіцієнтів при вирішенні екстремальної постановки РДМ на основі мінімізації квадратичного функціоналу в цілях підвищення точності визначення координат ДРВ.

4. Розробити і дослідити новий метод сумісної обробки інформації від комплексу пасивного радіомоніторингу (КПМР) та висотоміру в цілях підвищення точності визначення координат ДРВ.

5. Розробити і дослідити новий метод сумісної обробки інформації від КПМР та активної РЛС в цілях підвищення точності визначення координат ДРВ.

6. Розробити модифікований обчислювальний метод для зменшення часу розрахунку координат ДРВ при неістотному погіршенні точності розрахунку.

7. За допомогою теорії параметричної чутливості розробити спосіб визначення станції, що вносить найбільшу похибку, що дозволяє виключити її з розрахунків у випадку, якщо одна з координат ДРВ залишається незмінною;

8. Розробити систему обробки інформації для системи радіомоніторингу на основі розроблених методів підвищення точності та швидкості розрахунку координат ДРВ.

Основна ідея роботи полягає в розробці нових методів обробки інформації, що отримується від ДРВ, які дозволяють підвищити точність і швидкість розрахунку координат ДРВ інтегрованими багатопозиційними комплексами радіомоніторингу. Нові методи дозволяють досягти мети за рахунок сумісної обробки інформації від КПМР та активних засобів радіолокації, використання модифікованого методу Ньютона стосовно вирішуваного завдання, використання методів параметричної чутливості, а також екстремальної постановки РДМ.

Об'єктом досліджень є КПМР, а також спільна робота систем «КПМР – висотомір», «КПМР – активна РЛС», що володіють інформаційною надмірністю.

Предметом досліджень є визначення координат ДРВ на основі екстремальної постановки РДМ, вплив параметричної чутливості комплексу пасивного радіомоніторингу, а також інформаційної надмірності при спільній роботі активних і пасивних засобів радіомоніторингу на точність визначення координат ДРВ.

Методи досліджень. У роботі використані наступні методи: метод найменших квадратів, методи розв'язання екстремальних задач і систем нелінійних рівнянь; математичний апарат функцій параметричної чутливості – для визначення вхідних параметрів методу визначення координат цілі; модифікований метод Ньютона – для зменшення часу розрахунку координат ДРВ; математичний апарат математичної статистики і теорії випадкових процесів, метод статистичних випробувань, імітаційне моделювання – для дослідження розроблених методів визначення координат цілі.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше запропоновано метод визначення координат ДРВ, який, на відміну від існуючих, заснований на використанні вагових коефіцієнтів при вирішенні екстремальної постановки РДМ на основі мінімізації квадратичного функціоналу, що дозволило збільшити точність визначення координат ДРВ.

2. Розроблено новий метод сумісної обробки інформації від КПРМ та висотоміра, який, на відміну від існуючих, заснований на мінімізації квадратичного функціоналу з використанням вагових коефіцієнтів, що дозволило підвищити точність визначення координат ДРВ за рахунок отримання додаткової інформації від висотоміра.

3. Розроблено новий метод сумісної обробки інформації від КПРМ та активної РЛС, який, на відміну від існуючих, заснований на мінімізації квадратичного функціоналу з використанням вагових коефіцієнтів, що дозволило підвищити точність визначення координат ДРВ за рахунок отримання додаткової інформації від активної РЛС.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблений метод сумісної обробки інформації від КПРМ та висотоміра дозволив зменшити похибку визначення висоти z до 50 %. При цьому похибка визначення двох інших координат x та y та відстані D до ДРВ також зменшується на 50 % відносно величини похибки визначення координати z .

2. Розроблений метод сумісної обробки інформації від КПРМ та активної РЛС дозволив зменшити похибку визначення координат x , y , z та відстані D до ДРВ на 50 %–60 %.

3. Вдосконалений метод визначення координат ДРВ на основі модифікації методу Ньютона дозволяє значно зменшити час розрахунку координат ДРВ при неістотному погіршенні точності розрахунку, що є важливим при великій кількості ДРВ.

4. Розроблений за допомогою теорії параметричної чутливості спосіб визначення станції, що вносить найбільшу похибку, дозволяє виключити її з розрахунків у випадку, якщо одна з координат ДРВ залишається незмінною.

Розроблено практичні рекомендації відносно впровадження і використання розроблених методів визначення координат ДРВ в інтегрованих багатопозиційних КПРМ.

Розроблені в дисертації методи й алгоритми впроваджені в системи визначення координат радіолокаційних комплексів виробництва ПАТ «Топаз».

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів та висновків обумовлені коректним використанням математичного апарату, результатами імітаційного моделювання розроблених методів та експериментальних досліджень, відсутності протиріччя між отриманими та відомими результатами, впровадженням розроблених методів у існуючу систему.

Особистий внесок здобувача. Всі представлені в дисертації наукові та прикладні результати отримані автором самостійно. У працях, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: [1] – проаналізовано модифікований метод Ньютона стосовно вирішення системи гіперболічних рівнянь РДМ; [2] – проведено дослідження параметричної чутливості КПРМ, розташованого за схемою «зірка»; [3] – проведений детальний аналіз екстремальної постановки РДМ на основі мінімізації квадратичного функціонала; [4] – проведені статистичні випробування і аналіз роботи системи «КПРМ - висотомір»; [5] – проведені статистичні випробування і аналіз роботи системи «КПРМ – активна РЛС»; [6] – запропонований варіант реалізації систем, що забезпечують визначення координат ДРВ, на основі КПРМ, а також

«КПРМ – висотомір», «КПРМ – активна РЛС»; [7] – розробка математичної просторово-часової моделі об'єктів КПРМ і ДРВ; [8] – розробка просторово-часових моделей пасивного радіомоніторингу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

– IV науково-практичній конференції студентів і аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». (2011 р., м. Київ);

– 4-му Міжнародному Радіоелектронному Форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (2011 р., м. Харків);

– 16-му міжнародному молодіжному форумі «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА І МОЛОДЬ В XXI столітті». (2012 р., м. Харків);

– VI міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів, студентів «Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія» (2012 р., м. Донецьк);

– XIX міжнародній конференції з автоматичного управління "АВТОМАТИКА/AUTOMATICS - 2012" (2012 г., г. Киев);

– 22-й міжнародній кримській конференції «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (2012 р., м. Севастополь);

– П'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і комп'ютерна інженерія» (2015 р., м. Івано-Франківськ);

– IEEE 3rd International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (2015, Kyiv).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 друкованих робіт. Основний зміст і результати досліджень викладені в 7 друкованих роботах в наукових виданнях, рекомендованих ВАК України і в 2 роботах, опублікованих в іноземних виданнях, що включені в міжнародні наукометричні бази. Сім друкованих робіт опубліковано в збірках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку літератури з 135 найменувань. Робота викладена на 146 сторінках друкованого тексту, містить 10 таблиць, 42 рисунки та 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, виконано формулювання мети й завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, методологічні основи досліджень, описані основні наукові результати, новизна та практична цінність отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами й темами, а також наведено відомості про публікації, апробацію та структуру роботи.

У **першому розділі** проаналізовані основні принципи побудови систем пасивних і активних радіолокаційних комплексів, розглянуті технічні проблеми, які виникають перед сучасними системами радіомоніторингу, виконано аналіз рішень для вирішення цих проблем.

Виконується огляд існуючих систем пасивної та активної радіолокації, а також методів визначення координат ДРВ. Розглянуті недоліки існуючих способів визначення координат ДРВ. На основі проведеного аналізу, уточнюються вимоги до розроблюваних способів, а також задачі дослідження.

У другому розділі розглянуті питання, пов'язані з підвищенням точності та зменшенням часу розрахунку координат ДРВ комплексами пасивної радіолокації. Розглянуто модифікований метод Ньютона стосовно вирішення координатно-трасових задач пасивними комплексами супроводження повітряних цілей. Досліджено рішення модифікованим методом Ньютона системи рівнянь РДМ та збіжність розрахунку координат з одноразово розрахованою матрицею Якобі. Проведено аналіз впливу модифікації методу Ньютона на розрахунок координат.

У дисертаційній роботі для вирішення задачі зменшення часу розрахунку координат ДРВ пропонується модифікований метод Ньютона.

Геометрія розташування приймальних станцій (ПС) та ДРВ показана на рис. 1.

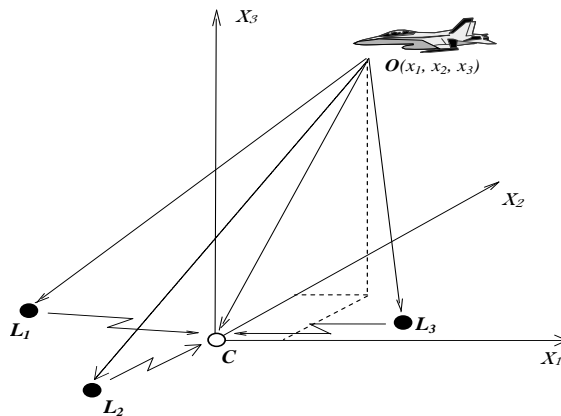


Рис.1. Взаємне розташування комплексу пасивної радіолокації та ДРВ

Координати цілей в поточний момент часу описуються системою трьох рівнянь (1).

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{1}{c}(OL_1 + CL_1 - OC); \\ \tau_2 &= \frac{1}{c}(OL_2 + CL_2 - OC); \\ \tau_3 &= \frac{1}{c}(OL_3 + CL_3 - OC),\end{aligned}\tag{1}$$

де $\tau_{1,2,3}$ – затримки часу приходу сигналу від ДРВ на центральну станцію С через бічні станції L_1, L_2, L_3 ; OL_i – відстані від ДРВ до бічних станцій; CL_i – відстані від бічних до центральної станції; OC – відстань від ДРВ до центральної станції.

Виразивши співвідношення (1) в системі координат положення станцій і ДРВ, отримаємо систему нелінійних рівнянь, в якій відомі всі величини, окрім координат положення ДРВ $x = (x_1, x_2, x_3)^T$

$$\begin{aligned}F_1(x) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2 + (x_3 - x_3^1)^2} + D_1 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_1 = 0; \\ F_2(x) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2 + (x_3 - x_3^2)^2} + D_2 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_2 = 0; \\ F_3(x) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^3)^2 + (x_2 - x_2^3)^2 + (x_3 - x_3^3)^2} + D_3 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_3 = 0,\end{aligned}\tag{2}$$

де $D_i = \overline{L_i C}$, $i = 1, 2, 3$.

Вектор $x^i = (x_1^i, x_2^i, x_3^i)^T$, $i = 1, 2, 3$ визначає положення i -ої станції в тривимірному просторі R^3 .

При створенні математичного і програмного забезпечення для комплексів пасивного моніторингу також досить гостро стоїть проблема скорочення об'єму обчислювальних операцій.

У загальному випадку методів розв'язку систем нелінійних рівнянь $F(x) = 0$, що гарантують отримання прийняттого результату, не існує. За умови виконання певних вимог до властивостей нелінійних рівнянь ефективним методом рішення є ітеративний метод Ньютона.

Для реалізації методу Ньютона необхідно отримати аналітичні вирази для розрахунку матриці частинних похідних (матриці Якобі)

$$F'(x_k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_2(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де

$$\frac{\partial F_j(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_i^j}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (x_i - x_i^j)^2}} - \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 x_i^2}}, \quad i = 1..3, j = 1..3. \quad (4)$$

В області, що розглядається $\Omega \in R^3$ тривимірному просторі R^3 вектор-функція $F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x))^T$, має всі частинні похідні 1-го порядку. Обчислювальну процедуру методу Ньютона можна отримати з розкладання в ряд Тейлора в точці x^* лівих частин системи:

$$F(x^*) = F(x_k) + F'(x_k)(x^* - x_k) + R(x^* - x_k), \quad (5)$$

Вважаючи, що x^* – є рішення системи, праву частину (3) прирівняємо нулю, і, нехтуючи залишковим членом $R(x^* - x_k)$, отримаємо схему Ньютона:

$$F(x_k) + F'(x_k)(x^* - x_k) = 0. \quad (6)$$

Розв'язуючи рівняння (6) відносно нового наближення x_{k+1} , отримаємо класичне представлення методу:

$$x_{k+1} = x_k - F'(x_k)^{-1} F(x_k). \quad (7)$$

Ітерації можливі, якщо матриця частинних похідних $F'(x_k)$ – невироджена. Ефективність методу Ньютона полягає в тому, що має місце оцінка:

$$\|x_{k+1} - x^*\| \leq c \|x_k - x^*\|^2 \quad (8)$$

що показує, що близькість до точного рішення на $(k+1)$ -ій ітерації пропорційна квадрату помилки k -ої ітерації, тобто ітераційний процес (5) має квадратичну швидкість збіжності.

Включаючи в ряд Тейлора члени другого порядку, можна отримати обчислювальну схему, що володіє кубічною збіжністю:

$$x_{k+1} = x_k - \left[I - \frac{1}{2} F'(x_k)^{-1} F''(x_k) F'(x_k) F(x_k) \right]^{-1} F(x_k)^{-1} F(x_k), \quad (9)$$

Для реалізації цієї схеми потрібно знайти n^2 частинних похідних першого порядку і n^3 частинних похідних другого порядку. Крім того, виконати 2 обернення матриць. При такому об'ємі обчислювальних операцій навіть збільшення швидкості збіжності не дозволяє цій схемі конкурувати з ітераціями першого і другого порядку.

Менш витратною є схема третього порядку:

$$x_{k+1} = x_k - F'(x_k)^{-1} \left[F(x_k) + F(x_k - F'(x_k)^{-1} F(x_k)) \right], \quad (10)$$

яка фактично містить 2 кроки з однією і тією ж зворотною матрицею.

Однією з простих модифікацій методу Ньютона є наступна ітерація

$$x_{k+1} = x_k - \omega [F'(x_k) + \lambda I]^{-1} F(x_k), \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (11)$$

де ω, λ – фіксовані постійні.

У випадку $\omega = 1$ та $\lambda = 0$, то (11) зводиться до класичного методу Ньютона.

Ітерація по формулі (9) не володіє надлінійною швидкістю збіжності методу Ньютона.

Одна з вимог збіжності ітераційного процесу полягає в покроковому зменшенні деякої норми, тобто повинна виконуватися нерівність

$$\|F_{k+1}(x)\| \leq \|F(x_k)\|, \quad k = 0, 1, \dots, n. \quad (12)$$

Метод Ньютона не гарантовано задовольняє цій умові навіть в разі однієї змінної. Простою модифікацією методу Ньютона є наступна ітерація

$$x_{k+1} = x_k - \omega_k F'(x_k)^{-1} F(x_k), \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad (13)$$

для якої множник ω_k вибирається так, щоб виконувалася умова (10). Достатні умови існування таких коефіцієнтів наведено в літературі.

При поганій обумовленості матриці похідних $F'(x)$ підбором величини λ в ітерації (2.9) можна добитися невиродженості результуючої матриці $F'(x) + \lambda I$.

Таким чином, ітерації типу (9) дозволяють вирішити проблеми використання методу Ньютона, пов'язані із збіжністю методу і можливою виродженістю матриці частинних похідних $F'(x)$.

Уникнути операції обернення матриці Якобі можна, якщо ітераційний процес представити у вигляді

$$F(x^k) + F'_x(x^{k+1} - x^k) = 0 \quad (14)$$

Для знаходження x^{k+1} необхідно розв'язати систему лінійних алгебраїчних рівнянь (1), канонічний вид якої має вигляд:

$$F'_x(x^k)x^{k+1} = F'_x(x^k)x^k - F(x^k) = 0 \quad (15)$$

Для забезпечення збіжності ітерацій (1) можна ввести множник ω^k і вибрати його так, щоб забезпечити виконання умов збіжності $\|F(x^{k+1})\| \leq \|F(x^k)\|$. З врахуванням множника ω^k ітераційний процес приймає вигляд:

$$F'_x(x^k)x^{k+1} = F'_x(x^k)x^k - \omega^k F(x^k) = 0 \quad (16)$$

Вибором ω^k можна змінювати величину вектора правої частини лінійної системи рівнянь. Проте, залишається можливість виродженості матриці Якобі або близькості до виродженості (тобто $\det F'_x(x^k) \approx 0$), що знижує стійкість рішення до різних похибок.

В цьому випадку можна скористатися модифікацією матриці Якобі таким чином

$$G(x^k) = F'_x(x^k) + \lambda_k I \quad (17)$$

і підбором параметра λ_k перетворити результуючу матрицю $G(x^k)$ у діагоналедомінантну, що дозволить покращити обумовленість системи рівнянь.

Модифікація ітераційного процесу приймає вигляд:

$$[F'_x(x) + \lambda^k I]x^{k+1} = [F'_x(x^k) + \lambda I]x^k - \omega^k F(x^k), \quad (18)$$

що дозволяє гарантувати отримання прийняттого розв'язку системи (2).

Після декількох ітерацій (2.18) і входженні наближень x^{k+1} у область збіжності методу Ньютона, можна повернутися до класичної схеми (13), збільшивши тим самим швидкість збіжності до точного розв'язку вихідної системи (2.2).

Для локальної збіжності методу Ньютона достатньо, щоб спектральний радіус матриці $G = I - A^{-1}F'_x(x^*)$ був строго менше одиниці, тобто

$$R = \rho \left\{ I - [F'_x(x^*)]^{-1} F'_x(x^*) \right\} < 1. \quad (19)$$

Чим менше величина R , тим швидше збіжність ітерацій (2.13).

Нехай $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – власні значення матриці

$$G = I - [F'_x(x^*)]^{-1} F'_x(x^*). \quad (20)$$

Спектральний радіус матриці G визначимо як $\rho = \max_i \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$

$$\rho = \max_i \{ \operatorname{Re} \lambda_1, \dots, \operatorname{Re} \lambda_n \}, \quad (21)$$

де $\operatorname{Re} \lambda_i$ – дійсна частина власного значення λ_i , $i = \overline{1, n}$.

При розв'язанні координатно-трассової задачі зменшення обчислювальних операцій досягається наступними шляхами:

– використанням модифікованого методу Ньютона, пов'язаного із зменшенням кількості разів перерахунку матриці частинних похідних;

– виключенням з ітеративного процесу одного з рівнянь системи (1) у випадку, якщо одна з координат ДРВ не змінюється (наприклад, висота польоту), а також при досягненні заданої точності будь-якої з координат положення ДРВ.

Розв'язок системи рівнянь (2) методом Ньютона було проведено в середовищі комп'ютерного моделювання MathCAD, в результаті якого були отримані координати траси на основі експериментальних даних виміру затримок часу приходу сигналу на приймальні пункти комплексу пасивної радіолокації. Траса, наведена на рис. 1, побудована при розрахунку матриці частинних похідних на кожному кроці ітерації.

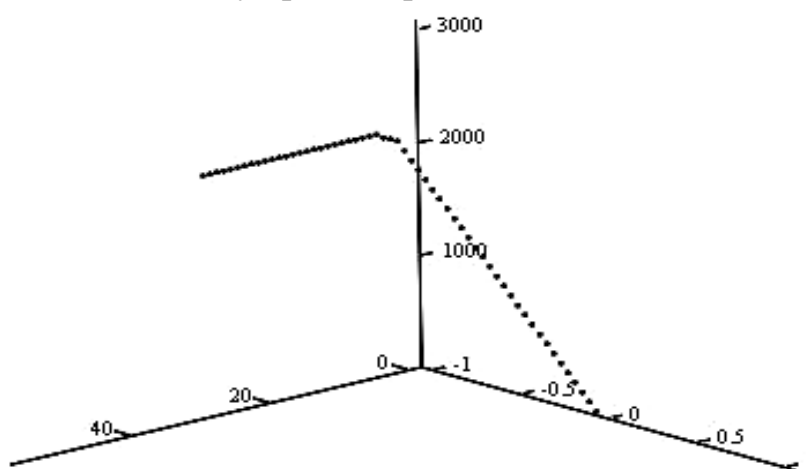


Рис. 1. Траса ДРВ, побудована при розрахунку матриці частинних похідних на кожному кроці ітерації

Крім того, був проведений аналіз можливості скорочення часу розрахунків за рахунок використання матриці (3) без її перерахунку на кожному ітеративному кроці, внаслідок чого було встановлено, що можливе використання однієї і тієї ж матриці для декількох кроків ітерації без істотного погіршення точності для фіксованої кількості ітерацій. Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Залежність точності визначення координат ДРВ від кількості ітерацій при перерахунку матриці Якобі

$\varepsilon = x_{k+1} - x_k$, М	Кількість ітерацій при перерахунку матриці Якобі на кожному кроці ітерації	Кількість ітерацій при перерахунку матриці Якобі на перших двох кроках ітерації
10	2	2
0,001	3	3
0,000001	4	4
0,0000001	4	5

Таким чином, показана доцільність використання одного і того ж визначника матриці частинних похідних для двох-трьох кроків ітерації, що

дозволяє у 2-3 рази скоротити час розрахунку при повністю задовільній точності обчислень.

За умови точного виміру часу $\bar{\tau}_0$, отримаємо точне вирішення системи (2) \bar{x}_0 . Необхідно одержати оцінку координат ИРИ при помилкових величинах компонент вектора $\bar{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$, де $\tau_1 = \tau_{L_1}$, $\tau_2 = \tau_{L_2}$, $\tau_3 = \tau_{L_3}$. З цією метою розкладемо вектор \bar{x} у ряд Тейлора в околиці точних координат ДРВ \bar{x}_0 , обмежуючись його лінійною частиною:

$$\bar{x}(\tau_0 + \Delta\tau) = \bar{x}(\tau_0) + \left. \frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} (\Delta\tau), \quad (22)$$

або

$$\bar{x}(\tau_0 + \Delta\tau) - \bar{x}(\tau_0) = \left. \frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} (\Delta\tau). \quad (23)$$

Величина зсуву Δx що викликана похибкою виміру часу затримки на величину $\Delta\tau$ визначається через коефіцієнти чутливості наступним співвідношенням:

$$\Delta \bar{x}(\tau_0 + \Delta\tau) = \left. \frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} (\Delta\tau) \quad (24)$$

де

$$\left. \frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \tau_1} & \frac{\partial x_1}{\partial \tau_2} & \frac{\partial x_1}{\partial \tau_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \tau_1} & \frac{\partial x_2}{\partial \tau_2} & \frac{\partial x_2}{\partial \tau_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial \tau_1} & \frac{\partial x_3}{\partial \tau_2} & \frac{\partial x_3}{\partial \tau_3} \end{bmatrix} \quad (25)$$

матриця перших похідних координат ДРВ по часовим затримкам (матриця Якобі), $\bar{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$.

Кожна координата x_i вектора \bar{x} отримає відповідне відхилення у зв'язку з похибками виміру часу затримки:

$$x_i(t_0 + \Delta\tau) = x_i(t_0) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial x_i}{\partial \tau_j} \Delta\tau_j, \quad i=1...3 \quad (26)$$

Співвідношення (26) містить похибку вимірювання координати ДРВ, пропорційну похибці виміру часу затримки $\Delta\tau_j$, коефіцієнтом пропорційності при цьому є функція чутливості $\frac{\partial x_i}{\partial \tau_j}$ координати x_i до зміни часу затримки.

Знаючи функцію чутливості і виміряну часову затримку, можна знайти значення абсолютної похибки обчислюваної координати.

Розглянемо варіант симетричного розташування станцій і джерела радіовипромінювання, що рухається уздовж траси (рис. 2).

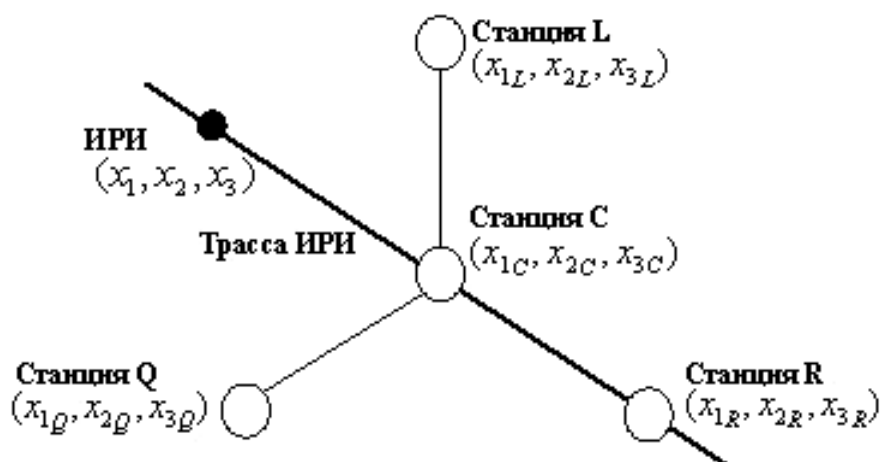


Рис. 2. Симетричне розташування станцій з трасою джерела радіовипромінювання

Розрахуємо матриці Якобі при $\delta\tau_i = 15\%$, $i = \overline{1,3}$ при розташуванні ДРВ над станціями L, Q, R , а також над станцією C і за станцією C симетрично станції R (як наведено на рис. 2). Результати розрахунку приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Матриці Якобі при положенні ДРВ над станціями L, Q, R , а також над станцією C і за станцією C симетрично станції R , $\delta\tau_i = 15\%$, $i = \overline{1,3}$

Над станцією L (вимір τ_1)			Над станцією Q (вимір τ_2)			Над станцією R (вимір τ_3)			
	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$
x_1	$5,676 \cdot 10^3$	$5,482 \cdot 10^5$	$2,309 \cdot 10^5$	$2,107 \cdot 10^4$	$6,424 \cdot 10^4$	$2,088 \cdot 10^5$	$3,093 \cdot 10^5$	$4,167 \cdot 10^5$	$1,316 \cdot 10^4$
x_2	$1,703 \cdot 10^4$	$1,76 \cdot 10^6$	$2,353 \cdot 10^5$	$2,661 \cdot 10^5$	$2,452 \cdot 10^5$	$1,567 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$2,17 \cdot 10^5$	$1,236 \cdot 10^4$
x_3	$3,867 \cdot 10^5$	$3,002 \cdot 10^6$	$5,212 \cdot 10^4$	$3,184 \cdot 10^5$	$1,116 \cdot 10^5$	$1,497 \cdot 10^4$	$5,852 \cdot 10^5$	$3,89 \cdot 10^5$	$3,07 \cdot 10^5$
Над станцією C			Симетрично станції R відносно станції C						
	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$			
x_1	$4,218 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^3$	$1,705 \cdot 10^5$	$8,495 \cdot 10^4$	$6,398 \cdot 10^4$	$2,316 \cdot 10^5$			
x_2	$1,593 \cdot 10^4$	$2,201 \cdot 10^5$	$1,075 \cdot 10^5$	$2,04 \cdot 10^5$	$2,828 \cdot 10^5$	$1,699 \cdot 10^5$			
x_3	$5,223 \cdot 10^5$	$5,523 \cdot 10^4$	$8,116 \cdot 10^4$	$7,131 \cdot 10^5$	$7,628 \cdot 10^5$	$9,04 \cdot 10^5$			

Видно, що найменші значення коефіцієнти чутливості мають при знаходженні ДРВ над станцією C , тобто в центрі системи. У всіх останніх випадках коефіцієнти чутливості мають більш великі значення, і це виявлятиметься тим сильніше, чим більше ДРВ буде віддалятися від станцій комплексу. Крім того, з таблиці видно, що при знаходженні ДРВ безпосередньо над станціями L, Q, R коефіцієнти чутливості мають мінімальне значення по тій тимчасовій затримці, яка визначається даною станцією. Це можна пояснити тим, що помилка, що вноситься до розрахунку координат при зміні відповідної часової

затримки, буде мала при знаходженні ДРВ над відповідною станцією в порівнянні з помилкою, що вноситься, в розрахунок координат іншими станціями.

Відповідні випадку розташування станцій комплексу і траси як показано на рис. 2, функції чутливості K_x, K_y , [км/с] залежно від координат і відносної похибки виміру часу затримки приходу сигналу, $\delta\tau_i = 15\%$, наведені на рис. 3 и рис. 4.

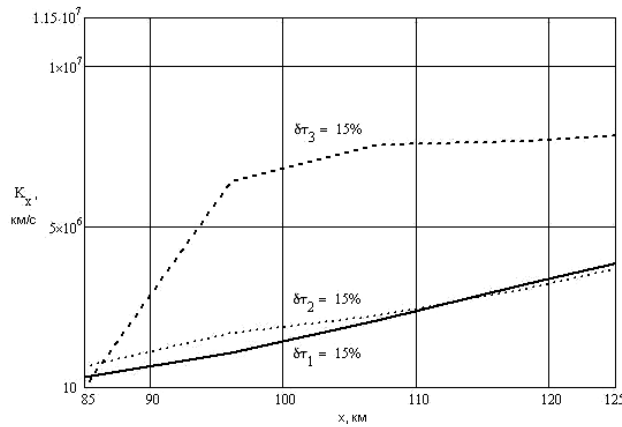


Рис. 3. Функції чутливості K_x координати x при русі по трасі при $\delta\tau_{1,2,3}=15\%$ (функції чутливості для $\delta\tau_3$ для поєднання графіків помножені на коефіцієнт 0,05)

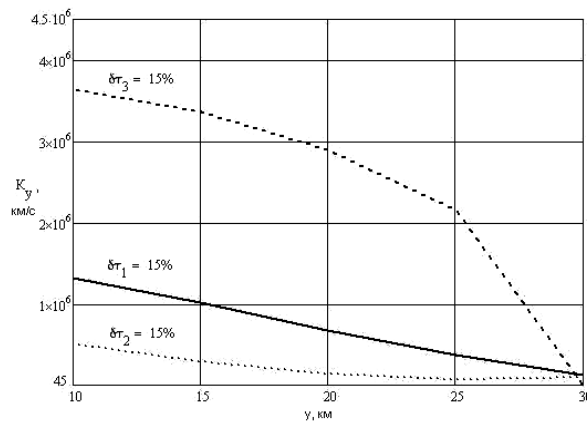


Рис. 4. Функції чутливості K_y координати y при русі по трасі при $\delta\tau_{1,2,3}=15\%$ (функції чутливості для $\delta\tau_3$ для поєднання графіків помножені на коефіцієнт 0,2)

Поведінка функцій чутливості свідчить про те, що відносно невеликі зміни значень часових затримок приводять до значних змін обчислюваних координат, тобто виникненню значних погрешностей обчислення координат. Звідси витікає вимога максимально точного виміру затримок часу приходу сигналу на станції комплексу. Крім того, аналіз цих залежностей дозволяє зробити висновок про існування поблизу станцій комплексу певної зони, коефіцієнти чутливості в якій мають найменше значення і зміна їх в цій зоні є незначною. За межами цієї зони функції чутливості мають зростання, що збільшується по мірі віддалення від місцерозташування станцій.

Крім того, у **другому розділі** розглянуті питання, пов'язані з екстремальною постановкою РДМ, яка дозволяє урахувати похибку виміру часової затримки приходу сигналу кожної зі станцій. Для цього задачу знаходження координат на основі РДМ у вигляді розв'язку системи рівнянь (2) можна переформулювати, замінивши її еквівалентним завданням про знаходження мінімуму квадратичного функціоналу, точка мінімуму, яка буде співпадати з рішенням системи (2).

Приймаючи $\tau_1 = \tau_{L_1}$, $\tau_2 = \tau_{L_2}$, $\tau_3 = \tau_{L_3}$, $\vec{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$, $\vec{x} = [x_1, x_2, x_3]$, тоді квадратичний функціонал, що оцінює величину сумарної помилки системи рівнянь (2), можна записати у вигляді:

$$\min J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^i)^2 + (x_2 - x_2^i)^2 + (x_3 - x_3^i)^2} + D_i - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_i \right]^2 \rho_i \quad (27)$$

x_1^i, x_2^i, x_3^i – відповідні координати станцій.

Користуючись позначеннями системи (2), перепишемо квадратичний функціонал (27) в більш компактному вигляді:

$$\min J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 \rho_i F_i^2. \quad (28)$$

Функціонал $J(x_1, x_2, x_3)$ складається з суми зважених квадратичних функцій з ваговими коефіцієнтами ρ_i , які дозволяють врахувати вплив реальних похибок виміру затримок часу приходу сигналу кожною зі станцій комплексу, на точність визначення координат ДРВ.

Сформулюємо необхідні умови визначення мінімуму функціонала (28) в покомпонентному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

де

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x) \cdot \rho_j \cdot \frac{\partial F_j(x)}{\partial x_i} \right\} = 0 \quad i=1..3 \quad (30)$$

або

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = & 2 \left(\left(\frac{1}{c} \cdot \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2 + (x_3 - x_3^1)^2} + D_1 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_1 \right) \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_i} \right) + \\ & + \left(\frac{1}{c} \cdot \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2 + (x_3 - x_3^2)^2} + D_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_2 \right) \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial F_2(x)}{\partial x_i} + \\ & + \left(\frac{1}{c} \cdot \sqrt{(x_1 - x_1^3)^2 + (x_2 - x_2^3)^2 + (x_3 - x_3^3)^2} + D_3 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_3 \right) \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial F_3(x)}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (31)$$

$i=1..3$

Розрахунки були проведені для двох випадків: коли одна із станцій має похибку виміру затримки часу приходу сигналу більшу, ніж інші, і коли дві станції одночасно мають похибку виміру затримки часу приходу сигналу. Взаємне розташування станцій і ДРВ для першого варіанту наведено на рис. 5, а для другого варіанту на рис. 6.

В результаті проведеного обчислювального експерименту встановлено, що при досить високих похибках (5 % і вище) визначення часу затримки приходу сигналу розраховані координати і дальність методом мінімізації квадратичного функціонала значно ближче до своїх дійсних значень порівняно з розрахунком класичним РДМ.

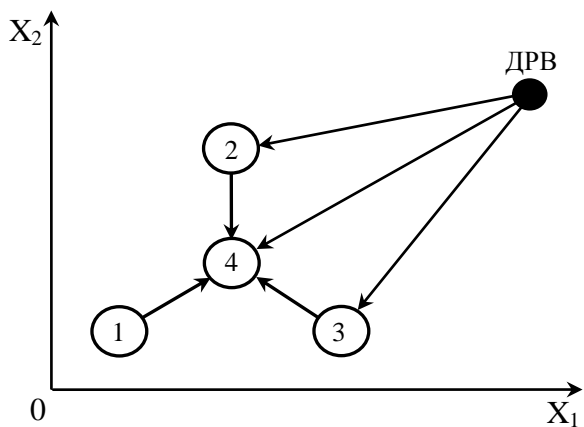


Рис. 5. Взаємне розташування станцій і ДРВ для першого варіанту

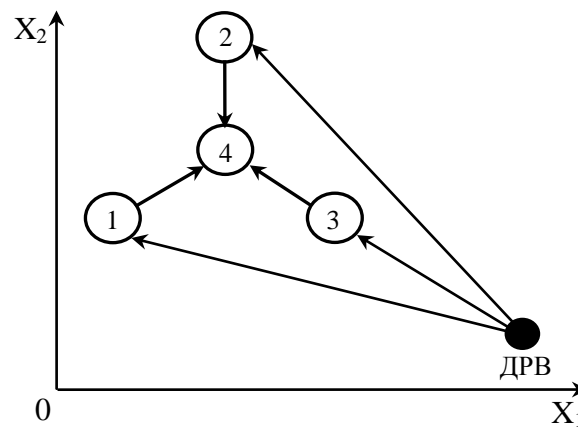


Рис. 6. Взаємне розташування станцій і ДРВ для другого варіанту

Таким чином, за допомогою введення вагового коефіцієнта перед відповідною квадратичною функцією, можна в значній мірі компенсувати похибку виміру тимчасової затримки приходу сигналу і, на відміну від класичного РДМ, отримати прийнятні результати, придатні для визначення місця розташування ДРВ.

В разі зменшення погрішності виміру затримки часу приходу сигналу до 1 % точність розрахунку методом мінімізації квадратичного функціонала і класичним РДМ розрізняються трохи і, в даному випадку, різниця використання того або іншого методу відсутня. Для скорочення часу обчислень класичний РДМ в цьому випадку є навіть переважнішим.

У **третьому розділі** розглянута робота автоматизованої комплексної інформаційної системи на основі комплексування каналів активних і пасивних засобів радіолокації, яка дозволяє забезпечити завадостійкість, збільшити точність визначення координат ДРВ, зменшити часові витрати на наведення засобів стрільби в умовах постановки активних завдань за рахунок нових системних ефектів. Комплексування засобів пасивної багатопозиційної радіолокації з інформаційними каналами від активних РЛС виправдано рядом важливих властивостей:

- системи пасивної радіолокації дозволяють отримувати інформацію скритно, тобто без використання додаткових засобів активної радіолокації;
- в результаті обробки даних системою пасивної радіолокації може бути отримана не лише координатна, але і інша додаткова інформація: тип РЛС, кількісний склад групи ДРВ і т.д;
- засоби пасивної радіолокації, як елементи радіотехнічної розвідки, компенсують, принаймні частково, зниження ефективності роботи системи радіолокації в умовах радіоелектронної протидії.

Відмічені переваги є вагомим аргументом на користь спільного використання активних і пасивних засобів радіолокації для виявлення ДРВ та розрахунку їх координат. В той же час, пасивна система радіолокації, зважаючи на залежність від випромінювання ДРВ, як правило, не може претендувати на роль основної інформаційної системи і розглядається як рівноправна підсистема, що тісно взаємодіє з активною системою.

Спільне використання активних і пасивних засобів радіолокації дозволяє отримати інтегровану систему, що володіє інформативною надмірністю.

Для оцінки впливу інформативної надмірності такої системи на точність визначення координат ДРВ, розглянемо комплекс, до складу якого входять чотири просторово-рознесені станції C, R, L і Q та висотомір V (рис. 7).

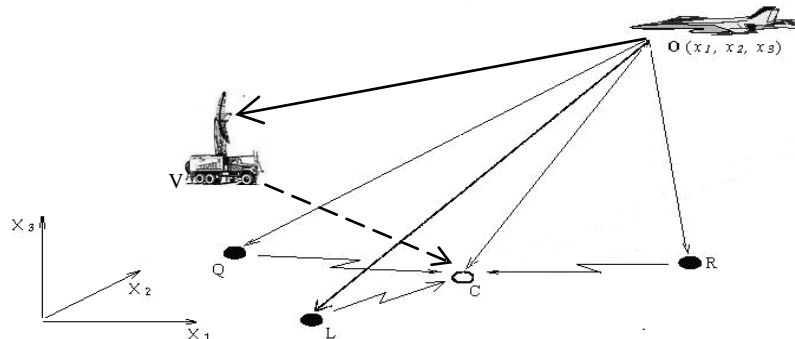


Рис. 7. Система: КПРМ – радіовисотомір

Квадратичний функціонал, що оцінює величину сумарної помилки системи, яка складається з КПРМ і радіовисотоміра, можна записати у вигляді:

$$J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{j=1}^3 \left[\left(\sqrt{(x_1 - x_1^j)^2 + (x_2 - x_2^j)^2 + (x_3 - x_3^j)^2} + D_j - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_{j \cdot c} \right]^2 + (x_3 - h)^2 \quad (32)$$

x_1^j, x_2^j, x_3^j – відповідні координати станцій, h – висота ДРВ, виміряна за допомогою радіовисотоміра.

Необхідні умови визначення мінімуму функціонала (32) в покомпонентному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0 \end{cases} \quad (33)$$

де

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x_i) \cdot \frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial (x_3 - h)^2}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1 \dots 3, \quad (34)$$

при цьому

$$\frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_i^j}{\sqrt{(x_i - x_1^j)^2 + (x_i - x_2^j)^2 + (x_i - x_3^j)^2}} - \frac{x_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}. \quad (35)$$

Розглянемо також роботу системи «КПРМ – висотомір» на основі статистичної моделі, структурна схема якої наведена на рис. 8. У обох цих випадках, визначення координат розраховуватимемо на основі пошуку мінімуму квадратичного функціонала (32) з використанням методу статистичних випробувань Монте-Карло. Результати моделювання наведені на рис. 9, 10.

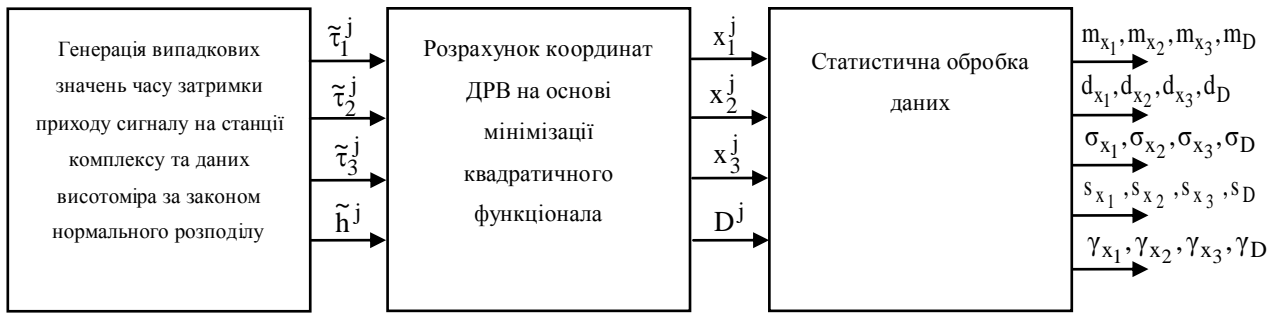


Рис. 8. Функціональна схема статистичного моделювання обчислення координат ДРВ методом Монте-Карло

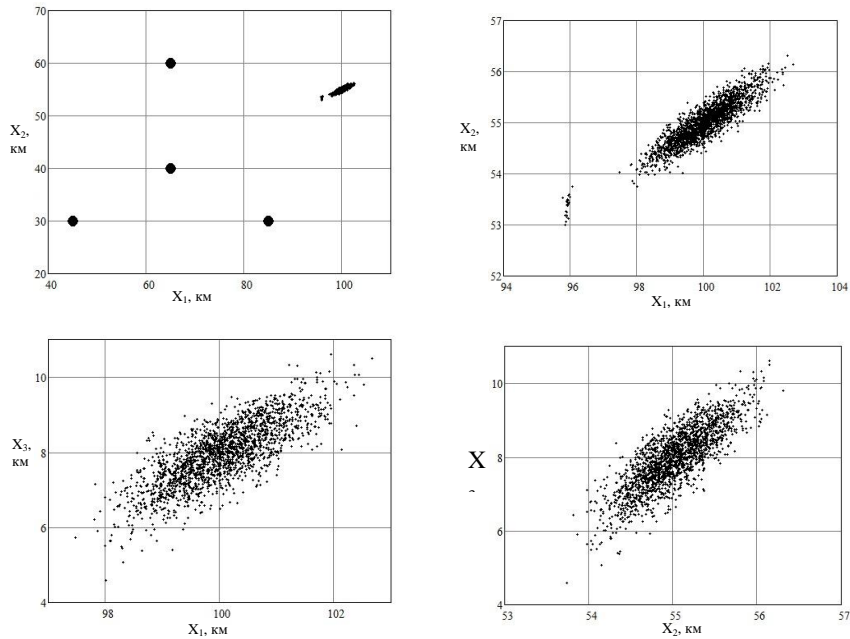


Рис. 9. Еліпс помилок КПРМ

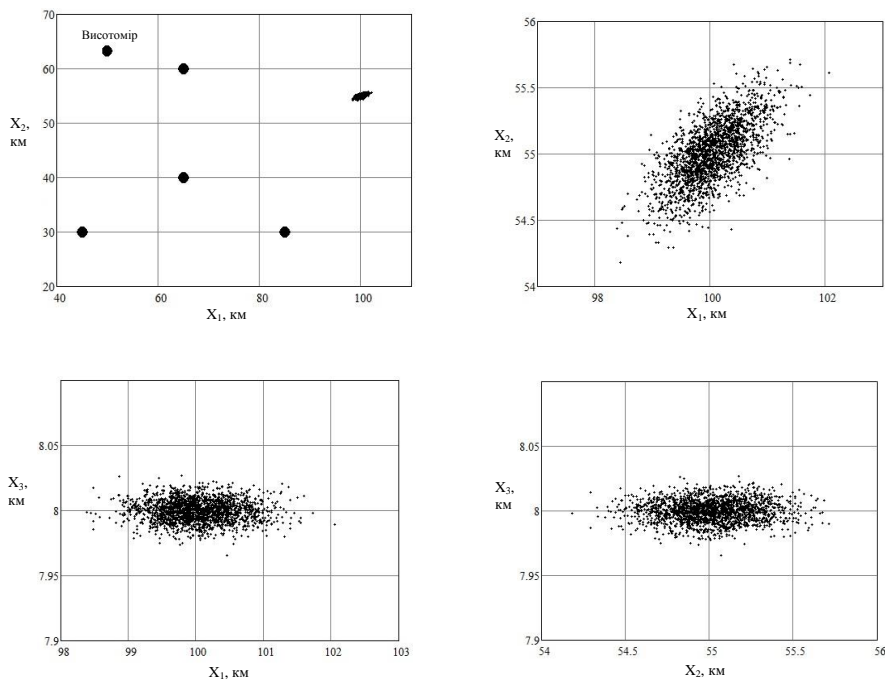


Рис. 10 Еліпс помилок комплексу пасивної радіолокації при спільній роботі з висотоміром ($\sigma h = 0,1\%$)

Для оцінки впливу інформативної надмірності системи «КПРМ – активна РЛС» на точність визначення координат ДРВ, розглядається комплекс, до складу якого входять чотири просторово-рознесені станції C, R, L і Q і активна станція радіолокації S (рис. 11).

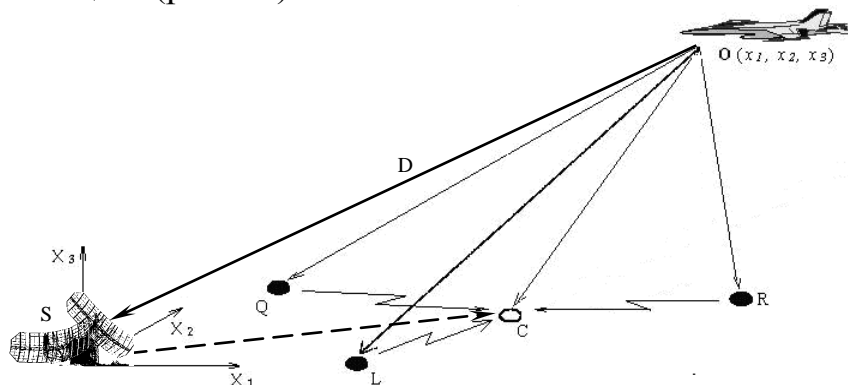


Рис. 11. Система «КПРМ – активна РЛС»

Квадратичний функціонал, що оцінює величину сумарної помилки системи, що складається з КПРМ і активної РЛС, можна записати у вигляді:

$$J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{j=1}^3 (F_j^2 + \tilde{D}_j^2) \quad (36)$$

де

$$F_j = \sqrt{(x_1 - x_1^j)^2 + (x_2 - x_2^j)^2 + (x_3 - x_3^j)^2} + D_j - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_j \cdot c$$

$$\tilde{D}_1 = x_1 - \tilde{D} \cos \alpha \sin \beta = x_1 - \tilde{x}_1$$

$$\tilde{D}_2 = x_2 - \tilde{D} \cos \alpha \cos \beta = x_2 - \tilde{x}_2$$

$$\tilde{D}_3 = x_3 - \tilde{D} \sin \alpha = x_3 - \tilde{x}_3$$

при цьому прийняті позначення: x_1^j, x_2^j, x_3^j – відповідні координати станцій, \tilde{D} – дальність від ДРВ до активної РЛС, що знаходиться на початку координат (рис. 12), $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ – координати ДРВ, виміряні за допомогою активної РЛС.

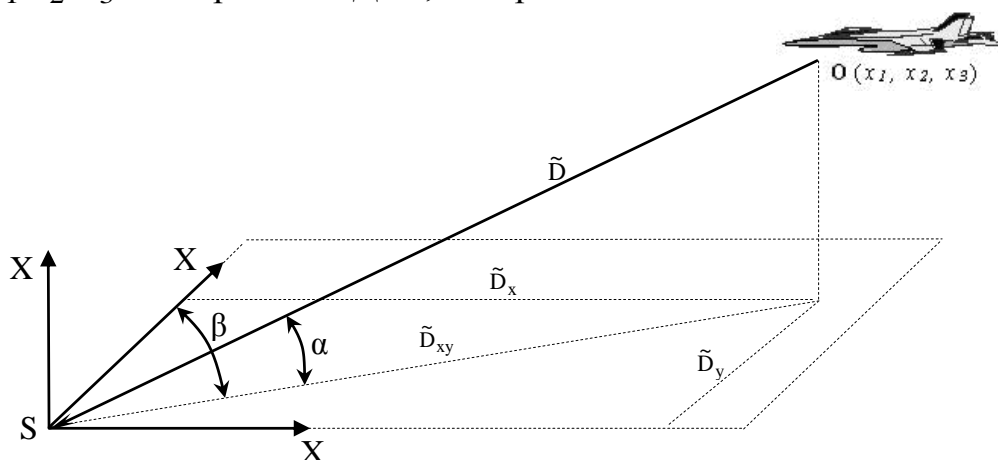


Рис. 12. Розташування ДРВ та активної РЛС в прийнятій системі координат

Необхідні умови визначення мінімуму функціонала (36) в покомпонентному вигляді наведені в (33), де:

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x_i) \cdot \frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial D_1^2}{\partial x_i} + \frac{\partial D_2^2}{\partial x_i} + \frac{\partial D_3^2}{\partial x_i} = 0 \quad i=1...3, \quad (37)$$

при цьому

$$\frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_i^j}{\sqrt{(x_i - x_1^j)^2 + (x_i - x_2^j)^2 + (x_i - x_3^j)^2}} - \frac{x_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}, \quad (38)$$

$$\frac{\partial D_j^2(x_i)}{\partial x_i} = 2(x_i - \tilde{x}_i). \quad (39)$$

Розглянемо також роботу системи «КПРМ – активна РЛС» на основі статистичної моделі, структурна схема якої наведена на рис. 8. Визначення координат розраховуватимемо на основі пошуку мінімуму квадратичного функціонала (36) з використанням методу статистичних випробувань Монте-Карло. Результати моделювання наведені на рис. 13.

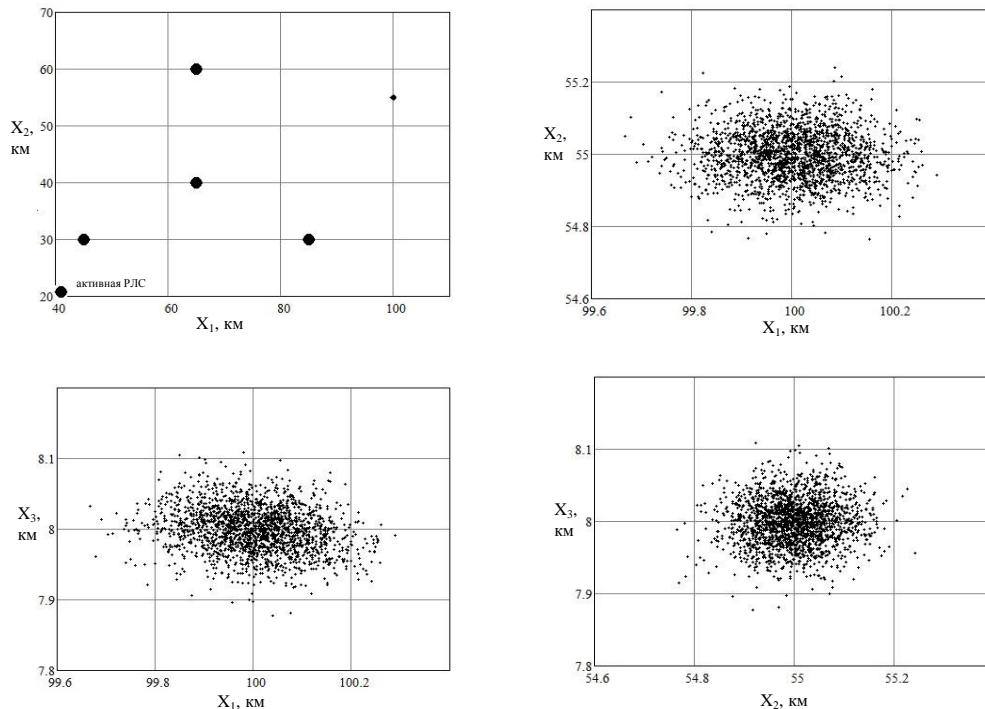


Рис. 13. Еліпс помилок КПРМ при спільній роботі з активною РЛС
($\sigma_{\bar{x}_1}, \sigma_{\bar{x}_2}, \sigma_{\bar{x}_3} = 0,1 \%$)

На основі отриманих результатів було зроблено висновок, що сумісне використання засобів активної та пасивної радіолокації дає змогу зменшити СКВ помилки визначення координат на 50 % у разі сумісної роботи з висотоміром, та на 50–60 % – з активною РЛС. Крім того, використання інформації висотоміра дозволило зменшити похибку визначення двох інших координат та відстані до джерела радіовипромінювання на 50 %.

У **четвертому розділі** розглядається побудова практичних рішень та рекомендацій, пов'язаних із створенням програмної реалізації запропонованих методів визначення координат цілі, а також експериментальне дослідження впливу сумісного використання активних та пасивних засобів радіолокації на точність визначення координат.

Базовими складовими алгоритму є розроблені математичні методи, засновані на використанні надлишкової інформації про місцезнаходження цілі.

Архітектура програмного комплексу, яка наведена на рис. 14, являє собою набір окремих модулів та блоків, програмні алгоритми яких можуть підлягати заміні в процесі роботи технічного комплексу. Це означає, що при одержанні надлишкових даних про місцезнаходження цілі, автоматично для розрахунку координат цілі починають виконуватись методи, запропоновані в цій роботі. Зв'язок між окремими блоками системи забезпечується стандартизованим інтерфейсом. Таким чином, загальна архітектура, наведена на рис. 14, забезпечує впровадження будь-якого компоненту, підсистеми або модуля.

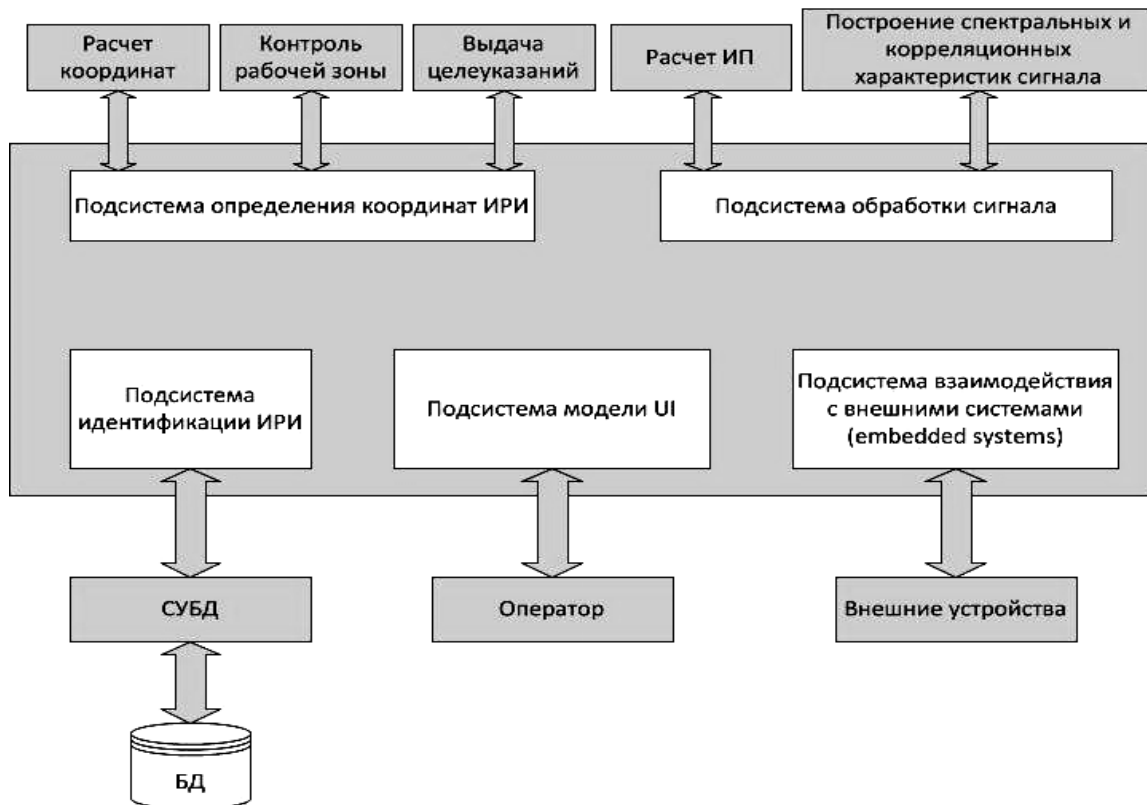


Рис. 14. Архітектура програмного комплексу

При цьому формується єдине середовище для: загального управління комплексом, підтримки діяльності операторів станцій, їх координації та обміну інформації між опорними пунктами технічної системи.

Порядок роботи системи складається з наступних етапів. Здійснюється опитування фізичних пристроїв (embedded systems) за допомогою наданого інтерфейсу. Вхідним параметром є сигнал від цілі, попередньо оброблений всередині фізичних пристроїв. Далі, в залежності від характеру сигналу (імпульсний або безперервний), вибирається метод визначення вхідних параметрів для методу визначення координат цілі. На основі розрахованих параметрів, а також надлишкової інформації про об'єкт, виконується запис і рішення системи рівнянь. Рішення цієї системи є координати цілі. Дослідження методу підтвердили можливість виконання розрахунків згідно із запропонованими методами в режимі реального часу.

Основним завданням програмного комплексу є визначення координат цілі. Особливістю розроблених методів є те, що вони інтегрується до складу існуючого програмного забезпечення і використовуються тільки при наявності надлишкової інформації про місцезнаходження цілі. Вибір кінцевого методу для розрахунку координат може бути заданий оператором або автоматично. Інформаційна система БПК пасивного комплексу побудована на базі Windows з використанням Delphi.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне завдання підвищення точності визначення координат ДРВ інтегрованими багатопозиційними комплексами радіомоніторингу.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. В розробленому методі визначення координат ДРВ за даними КПРМ здійснюється вирішення системи нелінійних рівнянь, що описують похибки вимірювань, за критерієм найменших квадратів. Він дозволяє врахувати похибку виміру затримки часу приходу сигналу на кожен із станцій окремо за рахунок введення вагових коефіцієнтів.

2. В розроблених методах сумісної обробки інформації від КПРМ та висотоміра, а також КПРМ та активної РЛС, визначення координат ДРВ відбувається шляхом вирішення перевизначеної системи нелінійних рівнянь, що описують похибки вимірювань, за критерієм найменших квадратів.

3. В результаті проведеного аналізу спільної роботи КПРМ із засобами активного радіомоніторингу: висотоміром і активною РЛС з використанням методу статистичних випробувань Монте-Карло встановлено, що інформаційна надмірність підвищує точність визначення координат ДРВ на 50%-60%.

4. Вдосконалений метод визначення координат ДРВ на основі модифікації методу Ньютона дозволяє значно зменшити час розрахунку координат ДРВ при неістотному погіршенні точності розрахунку, що є важливим при великій кількості ДРВ.

5. Отримано методику, що дозволяє компенсувати високу похибку виміру затримки часу приходу сигналу кожної із станцій КПРМ окремо за рахунок введення відповідних коефіцієнтів для складових квадратичного функціонала.

6. Розроблений за допомогою теорії параметричної чутливості спосіб визначення станції, що вносить найбільшу похибку, дозволяє виключити її з розрахунків у випадку, якщо одна з координат ДРВ залишається незмінною.

7. Розглянуті рекомендації стосовно впровадження і використання розроблених методів у складі інтегрованого комплексу радіомоніторингу. Детально розглянута структура і алгоритми управління інтегрованим комплексом.

Результати дисертаційних досліджень були впроваджені в комплекс пасивної локації виробництва ПАТ «Топаз».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пантеев Р. Л. Модифікація методу Ньютона стосовно вирішення координатно-трасових задач пасивними автоматичними комплексами супроводження воздушних цілей / Ткаченко В. М., Коротков В. В., Пантеев Р. Л. // Журнал «Радіотехніка». – 2012. – № 170. – С. 157–161.

2. Пантєєв Р. Л. Параметризація задачі визначення координат джерела радіовипромінювання комплексами пасивної радіолокації / Ткаченко В. М., Мануйленко Р. І., Хашан Р. І., Пантєєв Р. Л. // Журнал «Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України». – 2012. – № 3(9). – С. 84–88.

3. Пантєєв Р. Л. Дослідження просторово-часових моделей пасивної пеленгації джерела радіовипромінювань / Ткаченко В. М., Мануйленко Р. І., Хашан Т. С., Пантєєв Р. Л. // Журнал «Праці Східно-українського університету». – 2012. – № 2. – С. 52–59.

4. Пантєєв Р. Л. Використання методів теорії чутливості для оптимізації процедур розрахунку та визначення похибки розрахунку координат пасивними системами радіолокації / Ткаченко В. М., Коротков В. В., Пантєєв Р. Л., Известия юго-западного государственного университета. – 2014. – № 3. – С. 35–41 (іноземне видання, індексоване рейтингом РІНЦ).

5. Пантєєв Р. Л. Екстремальна постановка і аналіз задачі визначення координат джерел радіовипромінювання різницево-далекомірним методом / Ткаченко В. М., Коротков В. В., Пантєєв Р. Л. // Журнал «Системи обробки інформації». – 2014. – № 4(120). – С. 64–68.

6. Пантєєв Р. Л. Аналіз точності визначення координат джерел радіовипромінювання при сумісній роботі системи пасивної радіолокації та висотоміра / Ткаченко В. М., Коротков В. В., Пантєєв Р. Л. // Журнал «Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил». – 2014. – № 2(39). – С. 109–114.

7. Пантєєв Р. Л. Аналіз точності визначення координат джерел радіовипромінювання при сумісній роботі системи пасивної радіолокації та активної радіолокаційної станції / Ткаченко В. М., Коротков В. В., Пантєєв Р. Л. // Журнал «Системи обробки інформації», 2014. – № 6(122). – С. 90–95.

8. Pantyeyev R. L. UAV detection accuracy and coordinates calculation improvement by means of active and passive radar-location systems / V. M. Sineglazov, R. L. Pantyeyev, V. N. Tkachenko // IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). – Kyiv, 2015. – P. 206–209. (праці міжнародної конференції, індексовані рейтингом SCOPUS).

9. Pantyeyev R. L. Special features of the passive and active radar systems multiplexing / V. M. Sineglazov, R. L. Pantyeyev, V. N. Tkachenko // Electronics and Control Systems, 2015. – № 3(45). – С. 33–39.

10. Пантєєв Р. Л. Обробка результатів вимірювань пасивними системами радіолокації для рішення координатно-трасової задачі. / Р. Л. Пантєєв // Збірка тез докладів IV науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». – Київ, 2011. – С. 39.

11. Пантєєв Р. Л. Аналіз можливості поекземплярного розпізнавання однотипних РЛС для багатопозиційних пасивних систем моніторингу повітряного простору / Є. К. Поздняков, Р. Л. Пантєєв, В. В. Коротков, В. М. Ткаченко // 4-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2011). Конференція «Інтегровані інформаційні радіоелектронні системи і технології». – Харків, 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 158–161.

12. Пантєєв Р. Л. Розробка алгоритму рішення координатно-трасової задачі для багатопозиційних пасивних систем моніторингу повітряного

простору / Є. К. Поздняков, Р. Л. Пантєєв, В. В. Коротков, В. М. Ткаченко // 4-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2011). Конференція «Інтегровані інформаційні радіоелектронні системи і технології». – Харків, 2011. – Т. 1, ч.2. – С. 198–200.

13. Пантєєв Р. Л. Алгоритм розрахунку координат цілі на основі вимірювання періоду обертання антенно-фідерної системи радіолокаційної станції / Є. К. Поздняков, Р. Л. Пантєєв, В. В. Коротков, В. М. Ткаченко // Матеріали 16-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 2012. – Т. 3. – С. 134–135.

14. Пантєєв Р. Л. Використання функцій чутливості при оцінці похибки вимірювання координат різницево-далекомірним методом / Є. К. Поздняков, Р. Л. Пантєєв, В. В. Коротков, В. М. Ткаченко // Збірка статей VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів, студентів «Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія». – Донецьк, 2012. – С. 274–278.

15. Пантєєв Р. Л. Модифікований метод Ньютона для рішення координатно-трасової задачі на основі ДРВницево-далекомірного методу в системах пасивної радіолокації / Є. К. Поздняков, Р. Л. Пантєєв, В. В. Коротков, В. М. Ткаченко // Матеріали XIX Міжнародної конференції з автоматичного управління «АВТОМАТИКА/AUTOMATICS – 2012». – Київ, 2012. – С. 427–428.

16. Пантєєв Р. Л. Використання коефіцієнтів чутливості для визначення точності розрахунку координат пасивними системами радіолокації / Р. Л. Пантєєв, В. Н. Ткаченко, В. В. Коротков // Збірка статей 22-ї кримської конференції «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології». – Севастополь, 2012. – С. 1027–1028.

АНОТАЦІЯ

Пантєєв Р. Л. Способи підвищення точності визначення координат інтегрованими багатопозиційними комплексами радіомоніторингу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний авіаційний університет, Київ, 2016 р.

Дисертаційна робота присвячена розробці способів підвищення точності визначення координат інтегрованими багатопозиційними комплексами радіомоніторингу. Основною ідеєю роботи є використання надлишкової інформації про місцезнаходження джерела радіовипромінювання для підвищення точності визначення координат цілі. У даній роботі в якості надлишкової інформації використовуються дані активних засобів радіомоніторингу – висотоміра та активної РЛС. Для компенсації високої похибки визначення координат пасивними системами радіомоніторингу використовується екстремальна постановка різницево-далекомірного методу з використанням вагових коефіцієнтів, які також дозволяють провести облік різної точності приймаючих станцій комплексу. В роботі запропоновано використання модифікованого методу Ньютона, що дозволяє суттєво зменшити час визначення координат при несуттєвому погіршенні точності їх визначення. Крім того, визначена можливість зменшення кількості станцій багатопозиційного пасивного комплексу при незмінній висоті джерела радіовипромінювання з використанням методу параметричної чутливості. З

використанням цього методу показано, яка саме із станцій в цьому випадку може бути виключена з розрахунків на підставі того, що похибка виміру нею затримки часу приходу сигналу буде найбільшою. За результатами імітаційного моделювання був зроблений висновок про зменшення СКВ результатів визначення координат цілі при використанні розроблених методів. На основі отриманих результатів було зроблено побудову алгоритму, що дає змогу зменшити СКВ помилки визначення координат на 50 % у разі сумісної роботи з висотоміром, та на 50–60 % – з активною РЛС. Крім того, використання інформації висотоміра дозволило зменшити похибку визначення двох інших координат та відстані до джерела радіовипромінювання на 50 %.

Розроблений алгоритм було впроваджено в пасивні радіолокаційні комплекси виробництва ПАТ «Топаз».

Ключові слова: пасивний радіомоніторинг, активний радіомоніторинг, модифікований метод Ньютона, метод Монте-Карло, параметрична чутливість, екстремальна постановка, надмірність, статистичні характеристики, система нелінійних рівнянь.

АННОТАЦІЯ

Пантеев Р. Л. Способы повышения точности определения координат интегрированными многопозиционными комплексами радиомониторинга. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный авиационный университет, Киев, 2016 г.

Диссертация посвящена разработке способов повышения точности определения координат интегрированными многопозиционными комплексами радиомониторинга. Основной идеей работы является использование избыточной информации о местонахождении источника радиоизлучения для повышения точности определения координат цели. В данной работе в качестве избыточной информации используются данные активных средств радиомониторинга – висотомера и активной РЛС. Для компенсации высокой погрешности определения координат пассивными системами радиомониторинга используется экстремальная постановка разностно-дальномерного метода с использованием весовых коэффициентов, которые также позволяют провести учет различной точности принимающих станций комплекса. В работе предложено использование модифицированного метода Ньютона, что позволяет существенно уменьшить время определения координат при несущественном ухудшении точности их определения. Кроме того, определена возможность уменьшения количества станций многопозиционного пассивного комплекса при неизменной высоте источника радиоизлучения с использованием метода параметрической чувствительности. С использованием этого метода показано, какая именно из станций в этом случае может быть исключена из расчетов на основании того, что погрешность измерения ею задержки времени прихода сигнала будет наибольшей. По результатам имитационного моделирования был сделан вывод об уменьшении СКО результатов определения координат цели при использовании разработанных

методов. На основе полученных результатов было произведено построение алгоритма, который позволяет уменьшить СКО ошибки определения координат на 50 % в случае совместной работы с высотомером, и на 50–60 % – с активной РЛС. Кроме того, использование информации от высотомера позволило уменьшить погрешность определения двух других координат и расстояния до источника радиоизлучения на 50 %.

Разработанный алгоритм был внедрен в пассивные радиолокационные комплексы производства ПАО «Топаз».

Ключевые слова: пассивный радиомониторинг, активный радиомониторинг, модифицированный метод Ньютона, метод Монте-Карло, параметрическая чувствительность, экстремальная постановка, избыточность, статистические характеристики, система нелинейных уравнений.

ABSTRACT

Pantyeyev R. L. Methods of improving of the coordinates determination accuracy by the mutiposition integrated complexes of radio monitoring. – Manuscript.

Thesis in candidacy for a degree of candidate of engineering science in the specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. – National Aviation University, Kiev, 2016.

The thesis is devoted to the development of the new methods to improve the coordinates determination accuracy of the multi position integrated complexes of radio monitoring. The basic idea is using of the redundant information about the radio source location with the purpose of the target coordinates determination accuracy improvement. In this work, the active means of radio monitoring data are used as redundant information – information from the altimeter and active radar. Passive systems of radio monitoring use extreme form of the time difference arrival method (TDOA) for the high error compensation of coordinates determination with the implemented weight coefficients which also allow considering the various accuracy of the accepting stations of the complex. The paper proposed the modified Newton's method using, which allow significantly decrease of the coordinates determination time by the accuracy insignificant deterioration. By using this method it is shown which of the stations, in this case, may be omitted from calculations, based on the fact that the measurement error of its signal arrival time delay will be the greatest. According to the simulation results, it was concluded about the RMS error decrease of the target coordinates determination results by the developed methods using. On the basis of the obtained results the algorithm was made, which is able to reduce the RMS error of the coordinates determination for 50 % in the case of working with altimeter, and for 50–60 % – with the active radar. In addition, the use of information from the altimeter has reduced the error of the other two coordinates determination and the distance to the radio emission source for 50 %.

The algorithm was implemented in passive radar systems of PJSC "Topaz" production.

Keywords: passive radio monitoring, active radio monitoring, modified Newton's method, Monte Carlo method, parametric sensitivity, extreme form, redundancy, statistical characteristics, nonlinear equations system.

Підп. до друку 07.09.2016. Формат 60×84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,4. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 114-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680, Київ–58, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру серія ДК № 977 від 05.07.2002