УДК 621.396.933(045)

ТОЧНІСТЬ АЛГОРИТМІВ ТРАЄКТОРНОЇ ОЦІНКИ ЗА ДАНИМИ ДАЛЕКОМІРНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ

В.М. Васильєв.[1], д.т.н., проф., К.В. Науменко[2], здобувач
[1]Національний авіаційний університет, Київ, Україна
[2]ДП «АНТОНОВ», Київ, Україна

ACCURACY OF TRAJECTORY ESTIMATION ALGORITHMS BASED ON DISTANCE- MEASURING SURVEILLANCE DATA USING DIFFERENT LINEARIZATION METHODS

V.Vasyliev[1], Doctor of Science (Technics), professor, K.Naumenko[2], applicant
[1]National Aviation University,Kyiv,Ukraine; [2]ANTONOV Company, Kyiv,Ukraine

Мета роботи

Розвиток систем спостереження і удосконалення методів обробки даних спостереження визначаються як необхідні складові у впровадженні нових глобальних міжнародних концепцій організації повітряного руху. Від достовірного і точного визначення параметрів траєкторій польоту літаків істотно залежіть безпека польотів.

У сучасних радіолокаційних й радіонавігаційних системах широко застосовуються далекомірні методи визначення координат рухомих об'єктів. Для обробки даних таких систем спостереження використовуються методи і алгоритми оптимальної оцінки параметрів траєкторій польоту повітряних суден (ПС) із застосуванням теорії статистичної оцінки.

Система спостереження, що розглядається в даній роботі, відноситься до багатопозиційних радіонавігаційних систем. Застосуванню багатопозиційних радіонавігаційних систем для визначення місцеположення об’єктів присвячено декілька робіт [1–3] та ін.

У працях [5–7] розглядається синтез статистично оптимальних алгоритмів траєкторної оцінки за даними багатопозиційних далекомірних систем спостереження й показується, що застосування синтезованих алгоритмів дає значне підвищення точності визначення положення ПС.

Математична постановка завдання тракторної оцінки за даними далекомірних систем спостереження за своєю природою є нелінійною, тому що у системах керування повітряним рухом обробка траєкторної інформації для наступного розв'язання завдань, пов'язаних з керуванням ПС, виконується в прямокутній системі координат, що функціонально зв’язані з первинними вимірами далекомірних систем спостереження нелінійними співвідношеннями.

В даній роботі надаються різні способи синтезу алгоритмів оптимальної оцінки параметрів траєкторій польоту літаків при одноетапній обробці даних багатопозиційних далекомірних систем спостереження і досліджується вплив на точність траєкторної оцінки різних способів лінеаризації, які застосовуються при синтезі цих алгоритмів.

Визначаються вирази для статистичних характеристик похибок, а також початкові значення для алгоритмів траєкторних оцінок, що дає можливість забезпечити коректність функціонування алгоритмів.

На закінчення наводяться результати комп’ютерного моделювання і дається порівняльний аналіз точності при використанні трьох різних підходів до синтезу системи траєкторної оцінки.

Постановка завдання

Традиційно математична постановка завдання оцінки параметрів траєкторії польоту за даними системи спостереження включає математичний опис оцінюваного процесу у просторі станів у загальному вигляді:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = f\,(\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{W}(t), t) \qquad (1)$$

де $\mathbf{X}$ – вектор станів; $\mathbf{U}$ – вектор керуючих сигналів; $\mathbf{W}$ – вектор збурень, і рівняння, що встановлює зв'язок оцінюваних $\mathbf{X}$ і вимірюваних $\mathbf{Z}$ параметрів:

$$\mathbf{Z}(t) = h(\mathbf{X}(t), \mathbf{V}(t), t) \qquad (2)$$

де $\mathbf{V}$ – вектор похибок вимірювань.

Для застосування лінійних дискретних методів оптимальної оцінки рівняння оцінюваного процесу і рівняння вимірів мають бути представлені в лінійному вигляді:

$$\mathbf{X}(t_i) = \mathbf{\Phi}\,\mathbf{X}(t_{i-1}) + \mathbf{BU}(t_{i-1}) + \mathbf{GW}(t_{i-1}) \qquad (3)$$

$$\mathbf{Z}(t_i) = \mathbf{HX}(t_i) + \mathbf{V}(t_i) \qquad (4)$$

де $\mathbf{\Phi}$ – перехідна матриця.

Для задачі супроводу ПС за даними системи спостереження опис руху провадиться в прямокутній системі координат x, y. При математичному описі процесу польоту необхідно приймати до уваги той факт, що надмірна детальність опису, як правило, призводить до невиправданого ускладнення алгоритму оцінки й до проблеми щодо його реалізації. Відзначимо, що на більшій частині маршруту ПС здійснюють польоти по прямої лінії з постійною швидкістю.

З огляду на вищесказане, модель прямолінійного руху ПС із постійною швидкістю в прямокутній системі координат x,y у рекурентній формі в просторі станів запишеться:

$$\mathbf{X}(t_i) = \mathbf{\Phi}\,\mathbf{X}(t_{i-1}) \qquad (5)$$

де $\mathbf{X} = [x, y, V_x, V_y]^{\mathrm{T}}$; V_x, V_y – складові швидкості по відповідних координатах. Перехідна матриця за прийнятих умов має вигляд:

$$\mathbf{\Phi}=\begin{bmatrix}1 & 0 & T & 0\\ 0 & 1 & 0 & T\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad (6)$$

де $T=t_i-t_{i-1}$ – крок дискретизації, якій приймемо рівним періоду надходження траєкторних вимірів.

У статті розглядається оцінка траєкторії польоту ПС за даними двопозиційної системи спостереження, що складається із двох далекомірних радіонавігаційних станцій, розміщених на видаленні d друг від друга, кожна з яких вимірює дальність r_1 і r_2 до літака (рис.1).

Завдання полягає в аналізі різних видів математичного опису зв'язку між вимірами далекомірних систем і складовими оцінюваного вектора станів процесу польоту ПС із наступною лінеаризацією, і дослідженні впливу лінеаризації на точність тракторної оцінки.

Перший спосіб лінеаризації

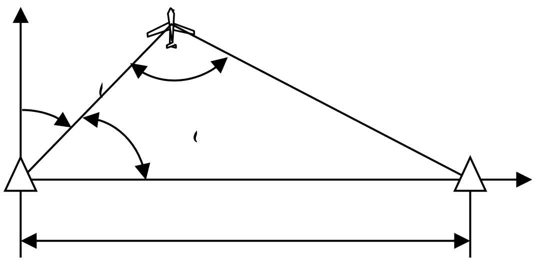

Рис. 1. Взаємне положення ПС і радіодалекомірних систем

За першим способом синтезується алгоритм оптимальної оцінки параметрів траєкторії руху ПС у прямокутній системі координат за даними вимірів двопозиційної далекомірної системи спостереження за умови, що виміри дальностей попередньо перераховуються також у прямокутну систему.

В цьому випадку функціональний зв'язок між виміряними значеннями дальностей r_1, r_2 і координатами місцезнаходження ПС у прямокутній системі координат x, y записується у вигляді нелінійних функцій: $x=f_1(r_1,r_2)$, $y=f_2(r_1,r_2)$, а саме:

$$x=f_1(r_1,r_2)=\frac{r_1^2-r_2^2+d^2}{2d} \qquad (7)$$

$$y=f_2(r_1,r_2)=\frac{1}{2d}\left(2r_1^2d^2-r_1^4+2r_1^2r_2^2-r_2^4+2r_2^2d^2-d^4\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{2d}\sqrt{A} \qquad (8)$$

Знайдемо лінеаризоване рівняння спостереження у вигляді (4). Представимо перераховані в прямокутну систему координат виміри далекомірів у вигляді:

$$x^*(i)\cong x(i)+v_x(i) \qquad (9)$$

$$y^*(i)\cong y(i)+v_y(i) \qquad (10)$$

де v_x , v_y – випадкові похибки визначення відповідних прямокутних координат.

Позначимо $\mathbf{Z} = [x^*, y^*]^{\mathrm{T}}$ – вектор перерахованих у прямокутну систему координат вимірів дальностей і $\mathbf{V} = [v_x, v_y]^{\mathrm{T}}$– вектор похибок визначення відповідних прямокутних координат, тоді модель вимірів записується в просторі станів у лінійному вигляді (4), де $\mathbf{H}$ – прямокутна матриця спостережень, структура якої має вигляд:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Знайдемо статистичні характеристики лінеаризованої моделі вимірів (9), (10).

Лінеаризація виразу (7) дає вираз для похибки v_x визначення координати x за даними вимірів дальностей r_1, r_2:

$$v_x = \Delta x = \frac{\partial f_1}{\partial r_1}\Delta r_1 + \frac{\partial f_1}{\partial r_2}\Delta r_2 \tag{12}$$

де $\Delta r_1 = v_{r1}$; $\Delta r_2 = v_{r2}$ – похибки вимірів відповідних далекомірів;

$$\frac{\partial f_1}{\partial r_1} = \frac{r_1}{d}; \quad \frac{\partial f_1}{\partial r_2} = -\frac{r_2}{d}.$$

Аналогічно для похибки v_y визначення координати y після лінеаризації виразу (8) одержимо:

$$v_y = \Delta y = \frac{\partial f_2}{\partial r_1}\Delta r_1 + \frac{\partial f_2}{\partial r_2}\Delta r_2 \tag{13}$$

де
$$\frac{\partial f_2}{\partial r_1} = \frac{1}{d\sqrt{A}}\left(d^2 r_1 - r_1^3 + r_1 r_2^2\right), \quad \frac{\partial f_2}{\partial r_2} = \frac{1}{d\sqrt{A}}\left(d^2 r_2 - r_2^3 + r_1^2 r_2\right).$$

На підставі отриманих виразів (12), (13) для похибок визначення координат визначимо дисперсії похибок розрахунку прямокутних координат за результатами вимірів далекомірів.

Для координати x:

$$\sigma_x^2 = M\{v_x^2\} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial r_1}\right)^2 \sigma_{r1}^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial r_2}\right)^2 \sigma_{r2}^2 = \frac{1}{d^2}\left(r_1^2\sigma_{r1}^2 + r_2^2\sigma_{r2}^2\right) \tag{14}$$

Для координати y:

$$\sigma_y^2 = M\{v_y^2\} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial r_1}\right)^2 \sigma_{r1}^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial r_2}\right)^2 \sigma_{r2}^2 \, \frac{1}{d^2 A}\Big[\left(d^2 r_1 - r_1^3 + r_1 r_2^2\right)^2 \sigma_{r1}^2 + \\ + \left(d^2 r_2 - r_2^3 + r_1^2 r_2\right)^2 \sigma_{r2}^2\Big] \tag{15}$$

Знайдемо взаємну кореляцію похибок обчислених прямокутних координат v_x й v_y:

$$\sigma_{xy}^2 = M\{v_x v_y\} = \frac{\partial f_1}{\partial r_1}\frac{\partial f_2}{\partial r_1}\sigma_{r1}^2 + \frac{\partial f_1}{\partial r_2}\frac{\partial f_2}{\partial r_2}\sigma_{r2}^2 \tag{16}$$

У результаті для лінеаризованої моделі вимірів (9), (10) і виразів (14), (15), (16) статистичні характеристики перерахованих у прямокутну систему координат вимірів далекомірів визначаються матрицею дисперсій похибок вимірів:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \qquad (17)$$

де $r_{11} = \sigma_x^2, \quad r_{22} = \sigma_y^2, \quad r_{11} = r_{21} = \sigma_{xy}^2$.

Не рівні нулю значення недіагональних елементів матриці $\mathbf{R}$ свідчить про те, що погрішності визначення перерахованих координат корельовані.

Після лінеаризації статистичні характеристики стають нестаціонарними і залежать від положення літака, що призводить до необхідності їх обчислення на кожному кроку дискретизації.

Другий спосіб лінеаризації

За другим способом математична модель вимірювань дальностей r_1, r_2 записується як система нелінійних функцій від компонентів вектора станів в прямокутній системі координат: $r_1 = h_1(x,y), \quad r_2 = h_2(x,y)$. При цьому приймається, що похибки v_{r1}, v_{r2} вимірювання дальностей є адитивними випадковими величинами типу «білий шум»:

$$\begin{aligned} r_1^* &= h_1(x,y) + v_{r1} \\ r_2^* &= h_2(x,y) + v_{r2} \end{aligned} \qquad (18)$$

з інтенсивностями, що дорівнюють σ_{r1}^2 і σ_{r2}^2 відповідно для першого і другого далекоміра.

Запишемо рівняння, що встановлюють зв'язок між вимірюваними $\mathbf{Z} = [r_1^*, r_2^*]^T$ (18) й складовими x,y вектора оцінюваних станів $\mathbf{X}$:

$$r_1^* = \sqrt{(x+d)^2 + y^2} + v_{r1} \qquad (19)$$

$$r_2^* = \sqrt{(d-x)^2 + y^2} + v_{r2} \qquad (20)$$

Таким чином початкова математична модель вимірювань являє собою нелінійну функцію від компонентів вектора станів:

$$\mathbf{Z}(t_i) = h(\mathbf{X}(t_i)) + \mathbf{V}(t_i) \qquad (21)$$

де $\mathbf{X} = [x, y, V_x, V_y]^T$; $\mathbf{V} = [v_{r1}, v_{r2}]^T$.

Виконаємо лінеаризацію рівнянь вимірювань (19), (20) шляхом розкладання в ряд Тейлора щодо оцінок складових вектора станів $\hat{\mathbf{X}}$.

Лінеаризована матриця спостереження приймає вигляд:

$$\mathbf{H} = \frac{\partial h}{\partial \vec{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_1}{\partial y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_2}{\partial x} & \frac{\partial h_2}{\partial y} & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (22)$$

де

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \ , \quad \frac{\partial h_1}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \, , \frac{\partial h_2}{\partial x} = -\frac{(d-x)}{\sqrt{(d-x)^2+y^2}} \, , \frac{\partial h_2}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{(d-x)^2+y^2}} \, .$$

У результаті отримуємо лінеаризовану математичну модель вимірів

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\Delta\mathbf{X} + \mathbf{V} \tag{23}$$

де $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}$.

Для моделі вимірника (21), (23) матриця квадратів середньоквадратичних похибок вимірювань має вигляд:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{r1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{r2}^2 \end{bmatrix} \tag{24}$$

Нульові значення недіагональних елементів матриці $\mathbf{R}$ свідчать про те, що вимірювання далекомірів є некорельовані, тобто незалежні.

Третій спосіб лінеаризації

За цім способом система з двох далекомірних станцій представляється як деякий («віртуальний») далекомірно-кутомірний вимірник $r-\alpha$, розташований в точці місцезнаходження однієї зі станцій (наприклад, це буде перший далекомір (див. рис.1)), який вимірює дальність до ПС r_1^* – результат вимірювання першого далекоміра, й азимут α_1^*, який обчислюється за результатами вимірювань r_1^* і r_2^* обох далекомірів з використанням теореми косинусів

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2r_1 d}\right) \tag{25}$$

де d – відстань між далекомірними станціями.

Приймемо таку математичну модель вимірника з адитивними похибками вимірів:

$$r_1^* = r_1 + v_{r1} \tag{26}$$

$$\alpha_1^* = \alpha_1 + v_{\alpha 1} \tag{27}$$

де v_{r1} – похибка вимірювання дальності першого далекоміра; $v_{\alpha 1}$ – похибка визначення кута α_1 за даними вимірювань дальності r_1 і r_2.

Щоб запис математичної моделі віртуального вимірювача (27) була коректною, виконуємо лінеаризацію шляхом розкладання виразу (25) в ряд Тейлора щодо значень дальності, які відповідають місцеположенню ПС на траєкторії його польоту, залишаючи елементи розкладу тільки першого порядку.

В результаті отримаємо

$$v_{\alpha 1} = -\frac{1}{r_1 d\sqrt{1-z^2}}\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1} v_{r1} + r_2 v_{r2}\right) \tag{28}$$

де $z = \dfrac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2r_1 d}$.

Визначимо дисперсію лінеаризованої похибки обчисленого кута α_1

$$\sigma_{\alpha 1}^2 = M[v_{\alpha 1}^2] = \frac{1}{r_1^2 d^2 (1-z^2)} \times \left(\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1} \right)^2 \sigma_{r1}^2 + r_2^2 \sigma_{r2}^2 \right) \tag{29}$$

Визначимо взаємну кореляцію для виміряної дальності r_1 та обчисленого кута α_1

$$r_{r1\alpha 1} = M[v_{r1} v_{\alpha 1}] = -\frac{1}{\sqrt{1-z^2}} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1^2 d} \right) \sigma_{r1}^2 \tag{30}$$

В результаті запишемо матрицю дисперсій похибок вимірювань як

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \tag{31}$$

де $r_{11} = \sigma_{r1}^2$, $r_{22} = \sigma_{\alpha 1}^2$, $r_{12} = r_{21} = r_{r1\alpha 1}$, що обчислюються за виразами (29), (30).

Матриця дисперсій похибок вимірювань нестаціонарна і свідчить про те, що похибки «віртуального» вимірювача взаємно корельовані.

Для розглянутого способу необхідно відзначити, що виміри «віртуального» далекомірно-кутомірного вимірника $r-\alpha$ зв'язані з прямокутними координатами нелінійно. Для того, щоб використати лінійний метод траєкторної оцінки, слід взяти в якості вектора станів вектор $\mathbf{X} = [r, \alpha, \dot{r}, \dot{\alpha}]^T$ за тих самих умов рівномірного і прямолінійного польоту, тобто при тій же перехідній матриці $\mathbf{\Phi}$ (6), і виконувати оцінку заданого вектора станів з наступним перерахуванням оцінених значень r і α в прямокутну систему координат x, y.

При зазначених вище припущеннях матриця спостережень $\mathbf{H}$ має таку ж саму просту структуру як і у виразі (11).

Комп'ютерне моделювання і порівняльна оцінка точності оптимального оброблення вимірювань

У якості оптимального лінійного методу траєкторної оцінки приймемо широко використовуваний у навігаційних системах і системах керування повітряним рухом рекурентний лінійний фільтр Калмана [4].

Основні рівняння фільтра стосовно до даної постановки задачі й прийнятих умов у дискретному вигляді записуються й виконуються послідовно в такий спосіб:

– прогноз на крок дискретизації

$$\mathbf{X}_{ie} = \mathbf{\Phi} \hat{\mathbf{X}}_{i-1} \tag{32}$$

$$\mathbf{P}_{ie} = \mathbf{\Phi} \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}} \tag{33}$$

– оцінка (корекція прогнозу)

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_{ie} \mathbf{H}^{\mathrm{T}} (\mathbf{H} \mathbf{P}_{ie} \mathbf{H}^{\mathrm{T}} + \mathbf{R}_i)^{-1} \tag{34}$$

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{X}_{ie} + \mathbf{K}_i (\mathbf{Z}_i - \mathbf{H} \mathbf{X}_{ie}) \tag{35}$$

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{ie} - \mathbf{K}_i \mathbf{H} \mathbf{P}_{ie} \tag{36}$$

де $\mathbf{P}$ – матриця дисперсій похибки оцінки (матриця коваріацій); $\mathbf{K}$ – матриця коефіцієнтів корекції фільтра; i – поточний момент часу; e – індекс, що означає екстрапольоване значення.

Для реалізації оптимальної обробки даних із застосуванням фільтра Калмана необхідно задати початкові дані для матриці коваріацій $\mathbf{P}(0)$, матриці дисперсій похибок перерахованих вимірів $\mathbf{R}(0)$ і вектора станів $\mathbf{X}(0)$.

Початкові значення елементів вектора станів $\mathbf{X}(0)$ приймалися рівними відповідно початковому положенню ПС і його швидкості для модельованого польоту.

Моделювався прямолінійний політ літака з постійною швидкістю в напрямку перпендикулярному базі, що приймалася рівною $d = 50$ км. Початкове положення задавалося рівним 10 км від середини бази.

Середньоквадратичні похибки вимірів дальностей задавались рівними $\sigma_{r1} = \sigma_{r2} = \sigma_r = 100$ м.

Початкові значення матриці $\mathbf{R}(0)$ дисперсій погрішностей вимірів у лінеаризованих моделях вимірів задавалися в залежності від способу лінеаризації за відповідними виразами (17), (24) і (31).

Початкові значення для матриці коваріацій $\mathbf{P}(0)$ задавалися також в залежності від способу лінеаризації.

Для першого та для другого способів:

$p_{11}(0) = \sigma_x^2(0)$, $p_{22}(0) = \sigma_y^2(0)$, $p_{12}(0) = p_{21}(0) = \sigma_{xy}^2(0)$, $p_{33}(0) = 2\sigma_x^2(0)/T^2$, $p_{44}(0) = 2\sigma_y^2(0)/T^2$.

Для третього способу:

$p_{11}(0) = \sigma_{r1}^2$, $p_{22}(0) = \sigma_{\alpha 1}^2(0)$, $p_{12}(0) = p_{21}(0) = \sigma_{r1\alpha 1}^2(0)$, $p_{33}(0) = 2\sigma_{r1}^2/T^2$, $p_{44}(0) = 2\sigma_{\alpha 1}^2(0)/T^2$.

Для оцінки точності алгоритму можна врахувати особливість фільтра Калмана, яка полягає в тому, що рівняння для матриці коваріацій не залежать від вимірів $\mathbf{Z}$ і рівняння оцінки (35). Тому потенційна точність, з якої може бути виконана оцінка траєкторних параметрів, визначається розв'язанням рівнянь, що описують розвиток дисперсії похибки оцінки (33), (34), (36).

Реалізація алгоритму траєкторної оцінки й дослідження його точності провадилося методом комп'ютерного моделювання з використанням програмного пакету *MatLab*.

Результат комп'ютерного моделювання наведено на рис. 2 , де показані криві зміни середньоквадратичного значення радіальної похибки визначення місцеположення ПС $\sigma_\rho = \sqrt{p_{11} + p_{22}}$ у залежності від віддалення ПС (координата y) від бази.

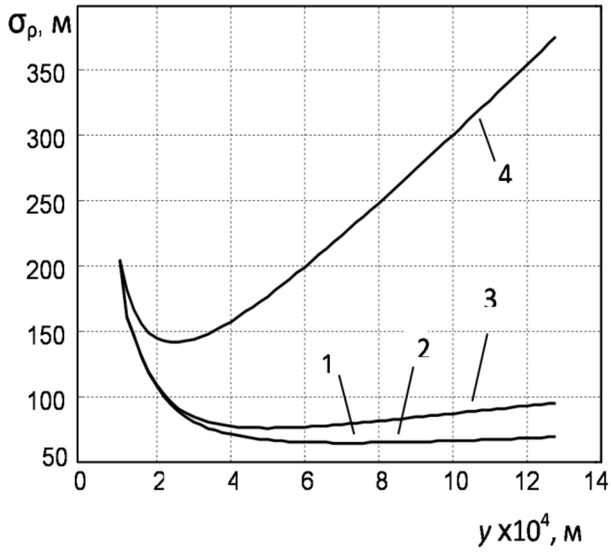

Рис. 2. Середньоквадратична радіальна похибка визначення місцеположення ПС

Крива 1 – результат, отриманий при моделюванні алгоритму, синтезованому за першим способом, крива 2 – за другим и крива 3 – за третім способом.

Для порівняння (крива 4) показана зміна радіальної похибки розрахунку положення ПС за даними вимірів двох далекомірних систем без оптимальної обробки, значення якої визначається виразом [1] $\sigma_\rho = \sqrt{2}\,\sigma_r \operatorname{cosec}\gamma$.

Висновки

У роботі показані три способи синтезу лінеаризованих алгоритмів одноетапної оптимальної оцінки параметрів траєкторії руху літаків за результатами вимірів двопозиційної далекомірної системи спостереження.

Оцінка точності синтезованих алгоритмів шляхом комп'ютерного моделювання показала, що при синтезі алгоритму й лінеаризації по першому й другому способу графіки зміни похибки оцінки координат місцеположення ПС практично збігаються. Трохи гірше точність оцінки при застосуванні третього способу синтезу й лінеаризації.

Якщо розглядати алгоритми з погляду продуктивності, то якщо порівнювати перший і другий спосіб, то перший алгоритм містить просту матрицю спостереження $\mathbf{H}$ (11), елементи якої постійні, однак потрібно на кожному кроці дискретизації обчислювати значення елементів матриці дисперсій лінеаризованих похибок перерахованих вимірів $\mathbf{R}$ (17). Другий алгоритм, навпаки, містить постійну матрицю $\mathbf{R}$ (24), але потрібно щораз обчислювати елементи матриці $\mathbf{H}$ (22). До того ж варто помітити, що в цьому алгоритмі провадиться оцінка приросту вектора станів, а не сам вектор, і для оцінки повного вектора станів потрібні додаткові обчислювальні витрати.

У третьому алгоритмі, також як і в першому, потрібно на кожному кроці обчислювати елементи матриці $\mathbf{R}$ (31), але не всі елементи й по менш складних виразах. Однак, тому що оцінка провадиться в полярній системі координат, потрібно додаткові обчислювальні витрати на перетворення в прямокутну систему.

Проте застосування кожного з розглянутих синтезованих алгоритмів істотно підвищує точність траєкторної оцінки у порівнянні з точністю розрахунку координат без застосування оптимальних методів.

Література

1. Кондратьев В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков / под. ред. проф. В. В. Цветнова. — М. : Радио и связь, 1986.— 264 с.

2. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации / М. С. Ярлыков. — М. : Радио и связь, 1985.— 344 с.

3. Радиоэлектронные системы, основы построения и теория. Справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. И. Минервин и др. / под ред. Я. Д. Ширмана. — М. : ЗАТ «Маквис», 1998.—828 с.

4. Балакришнан А. В. Теория фильтрации Калмана / А. В. Балакришнан.— М. : Мир, 1988.— 200 с.

5. Васильєв В. М. Використання оптимальних методів оцінки траєкторних параметрів за даними радіодалекомірних систем /В. М. Васильєв, К. В. Науменко // Вісник НАУ. — 2011. — №4. — С. 20 — 24.

6. Васильєв В. М. Оцінка точності оптимального оброблення траєкторних вимірювань багатопозиційних далекомірних систем / В. М. Васильєв, К. В. Науменко // Проблеми інформатизації та управління. — 2011. — Вип. 2(30). — С. 31—35.

7. Васильєв В. М. Підвищення точності траєкторної оцінки в багатопозиційних далекомірних системах спостереження / В. М. Васильєв, К. В. Науменко // Зб. наук. праць Військового ін-ту телекомунікацій та інформатизації НТУУ «КПІ». — 2011. — Вип. 2. — С. 6 -11.

References

1. Kondratiev V. S., Kotov A. F., Markov L. M. Mnogopozitsionnie radiotehnicheskie sistemy. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 264 p.

2. Yarlikov M. S. Statisticheskaya teoria radionavigatsii. Moscow, Radio i svyaz, 1985, 344 p.

3. ShirmanYa. D., Losev U. I., Minervin N. I. i dr. Radioelektronnye sistemy, osnovy postroenia i teoria. Spravochnik. Moscow, ZAT “Makvis”, 1998, 828 p.

4. Balakrishnan A. V. Teoria filtratsii Kalmana. Moscow, Mir, 1988, 200 p.

5. Vasyliev V. M., Naumenko K. V. Vykorystannya optymalnyh metodiv otsinku traektornyh parametriv za danymy radiodalekomirnyh system. Visnyk NAU, 2011, no. 4, pp. 20-24.

6. Vasyliev V. M., Naumenko K. V. Otsinka tochnosti optymalinogo obroblennya traektornyh vymiryuvan bagatopozytsiynyh dalekomirnyh system. Problemu informatyzatsii ta upravlinnya, 2011, no. 2(30), pp. 31-35.

8. Vasyliev V. M., Naumenko K. V. Pidvyshchennya tochnosti traektornoy otsinku v bagatopozytsiynyh dalekomirnyh systemah sposterezhennya. Zb. Nauk. Prats Viyskovogo inst-tu telekomunikatsii ta informatyzatsii NTUU “KPI”, 2011, no. 2, pp.6-11.

Васильєв В.М., Науменко К.В. ***Точність алгоритмів траєкторної оцінки за даними далекомірних систем спостереження при різних способах лінеаризації.*** *Досліджується вплив на точність траєкторної оцінки різних способів лінеаризації при синтезі алгоритмів одноетапної оптимальної обробки даних вимірювань двопозиційної системи далекомірних радіонавігаційних станцій. Визначаються вирази для статистичних характеристик похибок, а також початкові значення для алгоритмів траєкторних оцінок, що дає можливість забезпечити коректність функціонування алгоритмів. Наводяться результати комп'ютерного моделювання і дається порівняльний аналіз точності при використанні трьох різних підходів до синтезу системи траєкторної оцінки.*

Ключові слова*: спостереження, далекомірна система, траєкторна оцінка, лінеаризація, точність оцінки.*

Васильев В.Н., Науменко К.В. ***Точность алгоритмов траекторной оценки по данным даль номерных систем наблюдения при разных способах линеаризации.*** *Исследуется влияние на точность траекторной оценки разных способов линеаризации при синтезе алгоритмов одноэтапной оптимальной обработки данных измерений двухпозиционной системы дальномерных радионавигационных станций. Определены уравнения для статистических характеристик погрешностей, определены начальные значения для алгоритмов траекторных оценок; это дает возможность обеспечить корректность функционирования алгоритмов. Приведены результаты компьютерного моделирования, дается сравнительный анализ точности при использовании трех разных подходов синтеза системы траекторной оценки.*

Ключевые слова: *наблюдение, дальномерная система, траекторная оценка, линеаризация.*

Vasyliev V., Naumenko K. ***Accuracy of trajectory estimation algorithms based on distance- measuring surveillance data using different linearization methods.***

Problem statement. The radar monitoring systems are used broadly for the moving object coordinates determination. Errors of the radar navigation systems are random in nature. The optimal estimation methods and algorithms of the aircraft (AC) flight trajectory parameters are used along with application of the statistical estimation theory for the data processing of such monitoring systems.

Object of the work. This article deals with AC flight trajectory estimation using the data of a two-position monitoring system with two range-finding radar navigation stations located at the distance of d between them, each of which measures the distances to the aircraft. The influence of the different linearization methods on the trajectory estimation accuracy at the algorithms synthesis of optimal one-step data processing of two-positioned distance-measuring radionavigation system is investigated. The expressions for error statistical characteristics are defined as well as initial values for trajectory estimation algorithms offering an opportunity to provide the correctness of algorithms functioning.

Conclusions. Three methods for linearized algorithms synthesis of one-step optimal estimation the aircraft movement trajectory parameters are shown in the work using the measuring results of a two-position range-finding monitoring system. Finally, results of computer modeling are presented and comparative analysis of the accuracy using three different approaches to the trajectory estimation system synthesis is performed. Simple application of each of the synthesized algorithms considered here considerably increases the trajectory evaluation accuracy as compared with the accuracy of the coordinate's calculation without using of optimal methods.

Keyword: *surveillance, two-positioned distance-measuring radionavigation system, trajectory estimation.*