

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ КУТОМІРНИХ СИСТЕМ

Національний авіаційний університет

Розглянуто задачу підвищення точності навігації й літаководіння шляхом застосування методів, що підвищують точність визначення параметрів траєкторій польоту повітряних суден за результатами вимірів у багатопозиційних радіонавігаційних системах. Використовуючи методи оптимальної нелінійної фільтрації, дається розв'язання поставленої задачі. Наводяться результати комп'ютерного моделювання та дається порівняльна оцінка точності

Вступ та постановка задачі

Сучасний розвиток авіації ставить задачу розробки таких засобів керування й навігації, які мали б високу точність, надійність і завадозахищеність роботи систем для забезпечення вимоги безпечного літаководіння в умовах високої інтенсивності повітряного руху й скороченому складі льотного екіпажа. Для рішення цієї задачі створюються інтегровані наземні й бортові навігаційні комплекси з обчислювальною системою літаководіння, у яких здійснюється комплексування інформації, автоматизація й централізація процесів керування, а також контроль взаємодіючого устаткування.

Аеронавігація літака є складовою процесу літаководіння, під яким розуміється сукупність дій, які виконуються екіпажем у результаті сприйняття інформації від систем бортового устаткування й органу керування повітряним рухом, спрямованих на забезпечення руху літака по заданій траєкторії з метою його прибуття до аеропорту призначення в заданий час.

Під навігаційним комплексом розуміється сукупність бортового авіаційного й радіоелектронного устаткування літака, застосовуваного навігатором (екіпажем) для визначення, контролю, корекції й узгодження з органом керування повітряним рухом безпечної просторово-часової траєкторії польоту.

Обчислювальна система літаководіння, забезпечує рішення наступних основних завдань:

- безперервне автоматичне визначення й індикацію поточних координат місця знаходження повітряного судна (ПС), курсу й швидкості польоту в режимі комплексної обробки інформації з даних інерційної системи, супутникової навігаційної системи, інформаційного комплексу висотно-швидкісних параметрів, кутомірної системи *VOR*, далекомірної системи *DME* з урахуванням стану систем та наземного і космічного забезпечення на всіх етапах польоту;

- маневрування в зоні аеродрому відповідно схемам *SID/STAR/APPROACH*;

- забезпечення обміну регламентованими форматами повідомлень із радіозв'язковим устаткуванням для наступної їхньої ретрансляції на землю по каналах *ACARS*;

- введення й зберігання стандартної всесвітньої аеронавігаційної бази даних;

- формування й видача керуючих сигналів у систему автоматичного керування та інформаційних сигналів на систему електронної індексації та сигналізації для забезпечення літаководіння у горизонтальній і вертикальній площинах на всіх етапах польоту.

Одним з варіантів забезпечення навігації, літаководіння й керування повітряним рухом є використання багатопозиційних радіонавігаційних систем (БПРС)

– сукупність рознесених пунктів випромінювання, прийому й обробки радіосигналів, функціонально зв'язаних між собою для визначення (оцінки) параметрів об'єктів різної фізичної природи.

У таких системах в основі визначення координат місця розташування ПС лежать або триангуляційні методи розрахунку, або гіперболічні методи, або їхнє поєднання.

До основних характеристик багато-позиційних радіосистем відносять: робочу зону, точність, тип вимірюваних первинних параметрів радіосигналів і т.д. Головною характеристикою є точність визначення координат місця розташування об'єкта.

В теорії радіонавігації [1] існує розроблена теорія помилок виміру місця розташування об'єкта. Відповідно до цієї теорії вводиться поняття «лінія положення», місце перетинання ліній положення приймається за місце розташування об'єкта. Кожна лінія положення визначається шляхом виміру первинного геометричного параметра. Середньоквадратичні похибки визначення ліній положення зв'язані зі середньоквадратичними похибками первинних вимірів прямо пропорційною залежністю.

Точність визначення параметрів траєкторій руху ПС при використанні інформації багато-позиційних систем може бути істотно підвищена шляхом застосування алгоритмів оптимальної статистичної обробки вимірів. Для оптимізації алгоритмів обчислювачів координат, які використовуються у сучасних радіосистемах різного призначення, широко використовують метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності, нелінійної фільтрації сигналів.

У даній роботі розглядаються методи підвищення точності визначення параметрів траєкторії польоту ПС за результатами вимірів у багато-позиційних кутомірних системах. Багато-позиційна радіонавігаційна система розглядається як багато-мірна нелінійна динамічна система зі змінними параметрами. Використовуючи

методи оптимальної нелінійної фільтрації, дається розв'язок задачі синтезу БПРС. Приводяться результати розрахунків і комп'ютерного моделювання, а також дається порівняльна оцінка точності визначення місця розташування ПС.

Математична модель вимірів

Первісним завданням статистичного аналізу радіонавігаційного пристрою є визначення його характеристик на підставі відомих статистичних описів сигналів і завад, а також при відомому законі перетворення вхідних впливів у вихідні процеси, тобто складання математичної моделі функціонування радіонавігаційного пристрою.

Розглянемо розв'язання задачі визначення параметрів траєкторії польоту ПС за даними вимірів двох кутомірних систем. Взаємне положення ПС і кутомірних систем у прямокутній системі координат x, y з центром у місці розташування однієї з кутомірних систем показано на рис. 1, де d – відстань між вимірювачами.

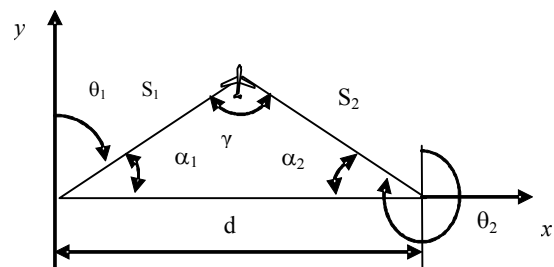


Рис. 1. Взаємне положення ПС і кутомірних систем

Прийемо наступну математичну модель вимірювача:

$$\alpha_1^* = \alpha_1 + n_{\alpha}, \quad s_1^* = s_1 + n_s, \quad (1)$$

де α_1^* – вимір першою кутомірною системою кута α_1 ; $n_{\alpha} = n_{\theta_1}$ – випадкова похибка виміру кута (пеленга θ_1) типу «білий шум» з дисперсією, яка дорівнює σ_{θ}^2 ; s_1^* – значення дальності від першої кутомірної системи, отримане в результаті перерахування за даними вимірів двох кутомірних систем; n_s – лінеаризована по-

хибка розрахованої дальності, яка дорівнює

$$n_s = -\frac{d \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin \alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} n_{\alpha_1} + \frac{d \sin \alpha_1}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} n_{\alpha_2}, \quad (2)$$

$n_{\alpha_2} = n_{\theta_2}$ – випадкова похибка виміру другої кутимірної системи (пеленга θ_2) також типу «білий шум» з дисперсією, яка дорівнює σ_θ^2 .

Дисперсія $\sigma_{s_1}^2$ похибками виміру дальності s_1 визначається на підставі отриманого виразу для лінеаризованої похибки (2) і дорівнює:

$$\sigma_{s_1}^2 = \frac{d^2 \sigma_\theta^2}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} (\cos^2(\alpha_1 + \alpha_2) \sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_1). \quad (3)$$

Метод оптимальної статистичної оцінки

Найбільш повно врахувати випадкові впливи дозволяють статистичні методи синтезу й аналізу радіотехнічних систем передачі інформації. Серед методів синтезу найбільш ефективними є методи марковської теорії оптимальної нелінійної фільтрації [2]. Методи марковської теорії оптимальної нелінійної фільтрації дозволяє визначати оптимальні алгоритми обробки сигналів, коли останні нелінійно залежать від переданих повідомлень.

Основною перевагою марковської теорії оптимальної нелінійної фільтрації стосовно аналізу БПРС – можливість за допомогою синтезованих нелінійних фільтрів обробляти спостережувані сигнали в міру їхнього надходження в реальному масштабі часу. Окремий випадок, коли навігаційні параметри, що визначають вектор стану X , [2], – гауссові процеси, а спостережувані сигнали – лінійні функції від вектора станів. Тоді рівняння марковської теорії оптимальної нелінійної фільтрації вироджується у відповідні рівняння оптимальної лінійної фільтрації Калмана-Бьюсі [3].

Як відомо, при застосуванні марковської теорії оптимальної нелінійної фільтрації до завдань аналізу й синтезу БПРС, стан об'єкта навігації (повітряного судна)

описується в термінах простору станів. При цьому змінними стану є координати об'єкта, параметри, що характеризують дальність, кутові координати об'єкта в просторі, і т.д.

Для розв'язання задачі автоматизації процесів обробки й відображення траєкторій інформації перевагу варто віддати рекурентним алгоритмам траєкторної оцінки як найбільш швидкодіючим і економічним за обсягом потрібної пам'яті комп'ютера. Відповідно до теорії оптимальної фільтрації [3] вектор згладжених значень параметрів за результатами вимірів координат знаходиться як сума вектора екстрапольованих на момент n -го виміру параметрів і зваженого з деяким коефіцієнтом згладжування розбіжності між вимірними й екстрапольованими значеннями координат. Основні співвідношення оптимального алгоритму послідовного згладжування параметрів траєкторії записані в порядку виконання операцій:

– прогноз на крок дискретизації

$$X_{ne} = \Phi X_{n-1}, \quad (4)$$

$$\Psi_{ne} = \Phi \Psi_{n-1} \Phi^T, \quad (5)$$

– оцінка (корекція прогнозу)

$$K = \Psi_{ne} H^T (H \Psi_{ne} H^T + R)^{-1},$$

$$X_n = X_{ne} + K (Z_n - H X_{ne}), \quad (6)$$

$$\Psi_n = \Psi_{ne} - K H \Psi_{ne}, \quad (7)$$

де Φ – перехідна матриця; Ψ – матриця дисперсій похибки оцінки; R – матриця дисперсій похибок вимірів; H – матриця спостережень; Z – вектор вимірювання параметрів; e – індекс, що означає екстрапольоване значення.

Модельовання та аналіз результатів

Для використання рівнянь оптимальної оцінки (4) - (7) визначимо перехідну матрицю процесу, що описує рух ПС, параметри траєкторії якого оцінюються за даними двох кутимірних систем. Приймемо, що на обмеженій ділянці спостереження ПС виконує політ з постійною швидкістю й постійним курсом. Прийме-

мо в якості вектора станів вектор $X = [\alpha, s, \dot{\alpha}, \dot{s}]^T$, тоді перехідна матриця Φ процесу X , що описує рух ПС, буде складатися з наступних елементів

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де T – період надходження вимірів.

Для моделі вимірювача (1) і прийнятого вектора станів при зазначених вище припущеннях матриця спостережень має вигляд

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

а матриця дисперсій похибок вимірів R містить наступні елементи

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$r_{11} = \sigma_\theta^2; \quad r_{22} = \sigma_{s1}^2,$$

$$r_{12} = r_{21} = -\frac{d\sigma_\theta^2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin \alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (11)$$

Моделювання оптимальної оцінки параметрів траєкторії польоту ПС за результатами вимірів двох кутомірних систем проводилося з використанням програмного пакета *MatLab*. Відомо, що потенційна точність, з якої може бути зроблена оцінка траєкторних параметрів, визначається розв'язком рівняння Ріккати (6), що описує розвиток дисперсій похибок оцінки.

На рис. 2 показані криві зміни середньоквадратичного значення радіальної похибки визначення місця розташування ПС у залежності від віддалення ПС від бази $d = 50$ км для заданої похибки виміру пеленга $\sigma_\theta = 0,25^\circ$. Крива 1 – результат розв'язку рівняння Ріккати. Для порівняння (крива 2) показана зміна радіальної похибки розрахунку положення ПС за даними вимірів двох кутомірних систем без оптимальної обробки, значення якої визначається виразом [1]

$$\sigma_r = \sigma_\theta \operatorname{cosec} \gamma \sqrt{s_1^2 + s_2^2}.$$

σ_r , км

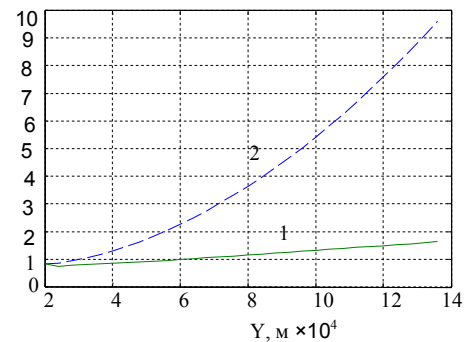


Рис. 2. Середньоквадратична похибка визначення місця розташування

Висновки

Розглянутий підхід дозволив одержати конструктивний розв'язок задачі підвищення точності траєкторної оцінки при використанні оптимальної фільтрації в багатопозиційних системах спостереження.

Запропоноване рішення серед всіх оптимальних лінійних і нелінійних фільтрів, що оцінюють сигнали з нескінченним числом станів, має найпростішу структуру й допускає лінійне рішення. Отримані результати моделювання показують істотне підвищення точності визначення місця розташування літака при застосуванні запропонованого методу оптимальної обробки даних вимірів багатопозиційних кутомірних систем спостереження, що дає передумову його практичного впровадження.

Список літератури

1. Кондратьев В.С. і ін. Багатопозиційні радіотехнічні системи. – М.: Радіо й зв'язок, 1986. – 264 с.
2. Радіоелектронні системи, основи побудови й теорія. Довідник / Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.И. і ін. / під ред. Ширмана Я.Д. – М.: ЗАТ «Маквис», 1998. – 828 с.
3. Балакришнан А.В. Теорія фільтрації Калмана. – М.: Мир, 1988. – 200 с.

Подано до редакції 27.04.10