

УДК 681.513

*І.Ю. ГРИШИН*, канд. техн. наук, зав. каф., РВНЗ "КГУ", Ялта

## **ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ Й ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У СТАТИСТИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ**

Розглянуто основні завдання, що стоять перед розробниками автоматизованих систем керування повітряним рухом, з точки зору забезпечення таких систем інформацією, необхідної для підвищення рівня автоматизації операцій управління повітряними судами і зниження кількості помилок диспетчерів. Запропоновано показник якості управління, здійснено формалізація завдання й запропоновано метод її розв'язання. Бібліогр.: 15 назв.

**Ключові слова:** система керування повітряним рухом, вимірювальна інформаційна система, показник якості управління.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Науково-технічний прогрес в цивільній авіації проявляється в декількох напрямках. Передусім, це відноситься як до збільшення різноманітності використовуваних типів літальних апаратів (починаючи з малої комерційної авіації і закінчуючи широкофюзеляжними аеробусами і надзвуковими повітряними лайнерами), так і до підвищення загального об'єму повітряних перевезень, що супроводжується зростанням числа трас та їх протяжності.

Три основні показники, а саме безпека, регулярність і економічність польотів, тісно пов'язані один з одним та істотно залежать від ефективності керування повітряним рухом (КПР). Радикальним методом вирішення проблем, що виникають при цьому, як було з'ясовано ще в 50-х роках ХХ століття, являється автоматизація збору, передачі і обробки інформації про повітряну обстановку.

Основним і головним складником автоматизованих систем управління повітряним рухом є засоби інформаційного забезпечення (наприклад, радіолокаційного спостереження).

Ще В.М. Кейн в роботі [1] стверджував, що вже нині існує принципова можливість побудови повністю автоматичної системи КПР, що працює без участі людини-оператора, а роль диспетчера в такій системі зводиться тільки до контролю справності системи. Втручання в її роботу потрібне лише при виникненні ситуацій, не передбачених програмою обробки інформації. Проте при реалізації такої повністю автоматичної системи виникли серйозні труднощі як технічного, так і

---

© І.Ю. Грішин, 2013

технологічного, психологічного, юридичного і іншого порядку.

Нині область забезпечення повітряного руху належить до тих небагатих галузів народного господарства України, які в умовах переходу до ринкової економіки і структурних перетворень переживають період радикального і інтенсивного технічного оновлення на основі нових інформаційних технологій. Це пояснюється рядом обставин. Незважаючи на істотне зниження об'єму внутрішніх повітряних перевезень, інтенсивність повітряного руху у ряді регіонів навіть виросла. Одна з причин полягає в більшій відкритості і, як наслідок, в збільшенні кількості трансконтинентальних трас і об'єму міжнародних перевезень. З іншого боку, міжнародний характер повітряного руху і інтеграція України у світову систему повітряного транспорту вимагають підвищення рівня аеронавігаційного обслуговування і безпеки польотів, приведення їх у відповідність з міжнародними вимогами ІКАО і Євроконтролю і новою стратегією CNS/ATM. Усе це неможливо без модернізації і корінного оновлення технічних засобів аеронавігації і управління повітряним рухом.

Створення нового покоління автоматизованих систем керування повітряним рухом (АС КПВ) і комплексів засобів автоматизації обробки інформації (КЗА) стало можливим завдяки розробці нових інформаційних технологій на базі сучасних програмних і апаратних комп'ютерних засобів. Наукову базу розробок складають методи теорії управління, спостереження і обробки інформації. Можливості сучасних комп'ютерних систем дозволяють реалізувати алгоритми і програми як застосування фундаментальних математичних теорій, які нещодавно були недоступні для використання в АС КПВ і з цієї причини (як вважали розробники інформаційних систем) зараховувалися до категорії абстрактних. Це відноситься в першу чергу до тих елементів сучасної теорії управління і обробки інформації в статистичних ВІС, що розглядаються в роботах [2 – 5].

**Аналіз літератури.** У області теорії і практики автоматизації процесів КПВ, розробки і експлуатації систем спостереження і аеронавігаційного забезпечення відомі роботи [6 – 8] Т.Г. Анодіної, А.А. Кузнецова, Е.Д. Марковича, В.М. Кейна, Г.А. Крижановського, В.І. Мокшанова, П.В. Олянюка, В.И. Савицького та ін. Чималий вклад в загальну ідеологію побудови авіаційних систем управління, навігації, спостереження і зв'язку зроблений Є.А. Федосовим [9]. Основою розробки алгоритмічного і програмного забезпечення АС КПВ являються роботи В.А. Ліхарева, С.З. Кузьміна, Р. Сінгера та інших авторів [2, 10 – 12].

Алгоритми первинної і вторинної обробки радіолокаційної інформації, що реалізовані в раніше розроблених АС КПП, засновані на спектрально-кореляційних методах фільтрації і оцінювання (зокрема, що використовують критерій Неймана-Пірсона).

В той же час в радіонавігаційних і радіолокаційних системах при виявленні і вимірі сигналів стали застосовуватися більш ефективні процедури, що засновані на теорії статистичних рішень і перевірці гіпотез (П.А. Бакут, І.А. Большаков, Ю.Г. Сосулін, А.Г. Тартаковський, М.М. Фишман, М.С. Ярликов та ін.).

Нові результати в розробці методів і алгоритмів обробки інформації, що отримані в роботі [3], можуть стати основою для синтезу сучасних алгоритмів обробки інформації в АС КПП.

Методи синтезу алгоритмів управління, що отримані в [3 – 5], можуть бути покладені в основу сучасної теорії управління інформаційними засобами АС КПП.

Методологічну основу створення сучасних систем КПП складають нові інформаційні технології.

**Мета статті** полягає в розробці методів вдосконалення інформаційного забезпечення системи керування повітряним рухом для підвищення якості виконання завдань оперативного управління повітряним рухом.

**Постановка задачі підвищення ефективності інформаційного забезпечення системи управління повітряним рухом.** Оперативне управління повітряним рухом може здійснюватися двома основними методами: по траєкторії поточного плану і з екстраполяцією за даними радіолокаційних вимірювань. Вибір методу управління залежить від того, в якій зоні виконується політ, і визначається специфікою польотів в цих зонах. Зі всіх видів діяльності служби руху найбільш складним є оперативне управління, оскільки, по-перше, саме в нім відбиваються специфічні особливості повітряного руху – динамічність процесів і неможливість їх припинення, і, по-друге, інтенсифікація процесів управління, неминуча при збільшенні щільності руху, обмежується можливостями диспетчера.

У роботах [6, 7] показано, що якість виконання завдань оперативного управління диспетчером функціонально залежить від погрешностей визначення параметрів траєкторій повітряних суден (ПС) радіолокаційними засобами, що можна представити у вигляді виразу

$$K_D = f \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M h_{ij} \sigma_{ij}^2 \right) = f \left( \sum_{i=1}^N \text{tr} \left( \mathbf{h}_i^T \mathbf{\Psi}_i \right) \right), \quad (1)$$

де  $K_D$  – показник якості роботи диспетчера;  $N$  – кількість ПС, які обслуговуються диспетчером;  $M$  – кількість параметрів траєкторій, необхідних для характеристики руху ПС;  $\sigma_{ij}^2$  – дисперсії погрішностей оцінок відповідних параметрів траєкторій ПС;  $tr(\mathbf{h}_j^T \Psi_j)$  – зважений слід коваріаційної матриці погрішностей оцінок параметрів траєкторії  $j$ -го ПС;  $\mathbf{h}_j$  – матриця вагових коефіцієнтів для обліку важливості точності оцінок окремих параметрів траєкторії  $j$ -го ПС;  $\Psi_j$  – коваріаційна матриця похибок оцінок параметрів траєкторії  $j$ -го ПС

Відомо [10, 11], що функція  $f(\cdot)$  найчастіше має вигляд  $f(\cdot) = \exp(\cdot)$ , отже

$$K_D = \exp \left[ - \left( \sum_{i=1}^N tr(\mathbf{h}_i^T \Psi_i) \right) \right]. \quad (2)$$

Таким чином, для підвищення якості роботи диспетчерів по управлінню потоком ПС необхідно забезпечити мінімізацію погрішностей оцінок параметрів їх траєкторій, що отримуються за даними радіолокаційних вимірювань.

Завдання полягає у формалізації задачі оптимального управління радіолокаційними засобами системи УПР, що враховує властиві цій системі обмеження.

Використовуючи відомі методи координації багаторівневих ієрархічних систем, можна легко показати, що показник якості управління етапу супроводження ПС, узгоджений з показником ефективності системи вищестоячого рівня, має наступний вигляд [3]:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T tr \left[ \mathbf{h}_i^T(t) \Psi_i(t) \right]. \quad (3)$$

Тут  $tr[\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)] = \sum_{l=1}^k h_i^{ll}(t) \Psi_i^{ll}(t)$  – слід добутку матриць  $\mathbf{h}_i(t)$  і

$\Psi_i(t)$ , що характеризує зважену величину погрішності фільтрації координат  $i$ -го об'єкту. При цьому вагова матриця  $\mathbf{h}_i(t)$  визначається залежно від способу супроводження і допошуку ПС в процесі супроводження, а також від способу прийняття рішення на управління повітряним рухом.

Структура матриць  $\Psi_i(t)$  і  $\mathbf{h}_i(t)$  у разі оцінки параметрів траєкторій ПС в прямокутній системі координат і некорельованості оцінок координат і їх похідних може мати наступний вигляд

$$\Psi_i(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{x_i}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\dot{x}_i}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_i}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{y}_i}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{z_i}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{z}_i}^2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{h}_i(t) = \begin{pmatrix} h_{x_i}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{\dot{x}_i}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_{y_i}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{\dot{y}_i}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{z_i}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{\dot{z}_i}^2 \end{pmatrix}.$$

При цьому у разі вирішення задачі оперативного управління повітряним рухом по траєкторіях поточних планів величини  $h_{x_i}^2, h_{y_i}^2 > w_i (0 \leq w_i \leq 1)$ , а  $h_{\dot{x}_i}^2, h_{\dot{y}_i}^2, h_{z_i}^2$  рівні нулю. Якщо ж вирішується завдання оперативного управління повітряним рухом по траєкторіях поточних планів з екстраполяцією, то  $h_{x_i}^2, h_{y_i}^2, h_{z_i}^2$  приймають значення більше одиниці пропорційно інтервалу часу екстраполяції, оскільки екстрапольоване значення координати у разі лінійної моделі руху ПС обчислюється відповідно до виразів

$$\begin{aligned} x_i(t+t_3) &= x_i(t) + \dot{x}_i(t)t_3; \\ y_i(t+t_3) &= y_i(t) + \dot{y}_i(t)t_3; \\ z_i(t+t_3) &= z_i(t) + \dot{z}_i(t)t_3, \end{aligned}$$

де  $t_3$  – часовий інтервал екстраполяції положення ПС для прийняття рішення на управління повітряним рухом.

Управління процесом вимірювання координат при розв'язанні задачі оцінювання параметрів траєкторій ПС. Завдання оптимальної фільтрації частково спостережуваної послідовності  $\{\mathbf{v}_i(t), \mathbf{Y}_i(t)\}$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $t=1, 2, \dots, T-1$ , полягає в побудові оптимальних (у середньоквадратичному сенсі) оцінок неспостережених значень векторів  $\mathbf{v}_i(t)$  за спостереженнями  $(\mathbf{Y}_i)_0^t = \{\mathbf{Y}_i(0), \mathbf{Y}_i(1), \dots, \mathbf{Y}_i(t)\}$ ,  $t=1, 2, \dots, T-1$ .

Модифікований вираз рекурентній фільтрації з урахуванням керованих спостережень за цілями для оптимальних оцінок  $\hat{\mathbf{v}}_i(t)$  і коваріаційних матриць  $\Psi_i(t)$  має наступний вигляд [3, 5]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{v}}_{\alpha_i}(t+1) &= \Phi_i(t)\hat{\mathbf{v}}_i(t); \\ \Psi_{\alpha_i}(t+1) &= \Phi_i(t)\Psi_{\alpha_i}(t)\Phi_i^T(t); \\ \mathbf{K}_i(t+1) &= \Psi_{\alpha_i}(t+1)\mathbf{H}_i^T(t, \alpha(t)) \times \\ &\times (\mathbf{H}_i(t, \alpha(t))\Psi_{\alpha_i}(t+1)\mathbf{H}_i^T(t, \alpha(t)) + \mathbf{b}_i(t)\mathbf{b}_i^T(t)); \\ \hat{\mathbf{v}}_i(t+1) &= \hat{\mathbf{v}}_{\alpha_i}(t+1) + \mathbf{K}_i(t+1) \times \\ &\times (\mathbf{Y}_i(t+1) - \mathbf{H}_i(t, \alpha(t))\hat{\mathbf{v}}_{\alpha_i}(t+1)); \\ \Psi_i(t+1) &= \Psi_{\alpha_i}(t+1) + \mathbf{b}_i(t)\mathbf{b}_i^T(t) - \\ &- \mathbf{K}_i(t+1)\mathbf{H}_i(t, \alpha(t))\Psi_{\alpha_i}(t+1), \\ \Psi_i(0) &= \Psi_{i0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут  $\hat{\mathbf{v}}_{\alpha_i}$  – екстрапольована оцінка параметрів руху  $i$ -го ПС;  $\hat{\mathbf{v}}_i$  – оцінка параметрів руху  $i$ -го ПС;  $\Psi_{\alpha_i}$  – екстрапольована коваріаційна матриця похибок оцінок параметрів траєкторії  $i$ -го ПС;  $\mathbf{K}_i$  – коефіцієнт підсилення рекурентного фільтра;  $\mathbf{b}_i$  – вектор похибок вимірювання параметрів  $i$ -го ПС;  $\Phi_i$  – матриця екстраполяції параметрів з моменту часу  $t$  на момент  $t-1$ ;  $\mathbf{H}_i$  – керована матриця спостереження.

Логічно припустити, що до початку спостережень всі управління рівні нулю ( $\alpha(-1)=0$ ). Врахуємо при цьому "вартості" проведення вимірювання, а також перемикання каналів. Тоді якість управління спостереженнями в завданні фільтрації можна охарактеризувати наступним функціоналом [3]:

$$J = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{t=1}^T \text{tr}(\mathbf{h}_i^T(t) \Psi_i(t)) + \sum_{j=1}^M \sum_{t=0}^T [\alpha^{ij}(t) \Gamma_j(t) + \alpha^{ij}(t)(1 - \alpha^{ij}(t-1)) \gamma_j(t)] \right\}. \quad (5)$$

Тут  $\Psi_i(t)$  – кореляційна матриця похибок оцінювання координат  $i$ -го ПС в  $t$ -й момент часу; елемент матриці управління  $\alpha^{ij}(t) \in \{0, 1\}$ , 1 – здійснюється вимірювання параметрів  $i$ -го об'єкту  $j$ -м каналом в  $t$ -й момент часу;  $\Gamma_j(t)$ ,  $\gamma_j(t)$  – параметри, що характеризують відповідно "вартість" здійснення вимірювання и переключення  $j$ -го каналу в  $t$ -й момент часу.

Таким чином, завдання управління спостереженнями системою РЛС УПР при супроводі ПС полягає в знаходженні параметрів процесу

$$\alpha(0), \alpha(1), \dots, \alpha(T-1); \quad (6)$$

$$\Psi_i(0), \Psi_i(1), \dots, \Psi_i(T-1), \Psi_i(T), \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

що задовольняє заданим обмеженням, для яких виконана початкова умова  $\Psi_i(0) = \Psi_{i0}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , і при цьому функціонал (5) приймає найменше можливе значення.

Для будь-якого  $T < \infty$  безліч різних значень, які може приймати функціонал (5), кінцеве і не перевищує величину  $M^T \times (N+1)^T$  [3]. Тому розв'язання поставленої задачі завжди існує.

Після знаходження процесу (6) його слід підставити в систему рекурентних рівнянь (4). В результаті отримуємо систему для знаходження оцінок  $\hat{\mathbf{v}}_i(t)$  неспостереженого вектора процесу  $\mathbf{v}_i(t)$ ,  $t = 0, 1, \dots, T$  (для кожного  $i = 1, 2, \dots, N$ ) при оптимальному в сенсі критерію (5) управлінні процесом спостереження.

Таким чином, проведена математична формалізація даного завдання оптимального управління системою РЛС УВС, показано, що рішення такої задачі існує. Метод й алгоритм розв'язання подібної оптимізаційної задачі розроблений в [5].

**Результати моделювання.** Моделювання проводилося з метою оцінки ефективності розробленого методу і алгоритму оптимального управління системою РЛС УПР в режимі супроводу ПС. Як базовий метод, використаний для порівняння, застосований метод рівномірного зондування (розподілу енергетичних ресурсів) РЛС, який в даний час є

основним в реальних радіолокаційних комплексах в умовах складної повітряної обстановки.

При застосуванні розробленого методу для РЛС УПР вигреш в точності оцінки параметрів супроводжуваних об'єктів в порівнянні з базовим методом склав 17 – 51 %. Оптимальні плани супроводження ПС відрізняються істотною нерівномірністю.

**Висновки.** Таким чином, проведена математична формалізація задачі оптимального управління системою інформаційного забезпечення керування повітряним рухом.

В результаті виконаної роботи розроблений новий метод оптимального управління системою РЛС КПП, що відрізняється від відомих високою ефективністю. В ході подальшої роботи запропонований метод повинен бути вдосконалений для урахування специфіки супроводження ПС різного класу і конкретних АСУ.

**Список літератури:** 1. Кейн В.М. Радиотехнические средства управления воздушным движением. Учебное пособие для вузов гражданской авиации / В.В. Грачев, В.М. Кейн. – М.: Транспорт, 1975. – 344 с. 2. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с. 3. Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах / И.Ю. Гришин. – Ялта: РИО КГУ, 2010. – 226 с. 4. Гришин И.Ю. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами / И.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.М. Решетник // Наука і оборона. – 1994. – Вип. 3. – С. 16 – 22. 5. Гришин И.Ю. Основанный на принципе максимума метод решения задачи нелинейного бинарного программирования / И.Ю. Гришин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62. – С. 46 – 51. 6. Анодина Т.Г. Автоматизация и управление воздушным движением / Т.Г. Анодина, А.А. Кузнецов, Е.Д. Маркович. – М.: Транспорт, 1992. – 279 с. 7. Федосов Е.А. Динамическое проектирование систем управления автоматических маневренных летательных аппаратов. Учеб. пособие / Е.А. Федосов, В.Т. Бобронников, М.Н. Красильщиков, В.И. Кухтенко и др.; Под ред. Е.А. Федосова. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с. 8. Крыжановский Г.А. Введение в прикладную теорию управления воздушным движением / Г.А. Крыжановский. – М.: Машиностроение, 1984. – 242 с. 9. Автоматизированные системы управления воздушным движением / Справочник под ред. В.И. Савицкого. – М.: Транспорт, 1986. – 322 с. 10. Дубровский В.И. Организация радиотехнического обеспечения в системе УВД / В.И. Дубровский, Г.А. Крыжановский, В.А. Солодунин. – М.: Транспорт, 1985. – 124 с.

Надійшла до редакції 25.03.2013

Після доробки 03.05.2013

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Іванов П.І.

УДК 681.513

Прикладные аспекты методов оптимизации управления и обработки информации в статистических измерительных информационных системах автоматизированных систем управления воздушным движением / Гришин И.Ю.



// Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 39 (1012). – С. 48 – 56.

Рассмотрены основные задачи, которые стоят перед разработчиками автоматизированных систем управления воздушным движением, с точки зрения обеспечения таких систем информацией качества, необходимого для повышения уровня автоматизации операций управления воздушными судами и снижения количества ошибок диспетчеров. Предложен показатель качества управления, осуществлена формализация задачи и предложен метод ее решения. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** система управления воздушным движением, измерительная информационная система, показатель качества управления.

UDK 681.513

**The applied aspects of control optimization methods and information treatment in the statistical measuring informative systems of air traffic control CASS / Grishin I.Y.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2013. – №. 39 (1012). – P. 48 – 56.

Basic tasks which stand before the developers of CASS of air traffic control are considered, from the point of such providing view systems information of quality, necessary for the increase of level of automation of operations of control and decline of errors amount of controllers air courts. The index of control quality is offered, formalization of task is carried out and the method of her decision is offered. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** control system by air motion, measuring informative system, index of control quality.