УДК 656.7.052.071.13(022)

ТЕЛЕНИК С.Ф.,
ГРІШИН І.Ю.

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

У роботі проведений аналіз системи управління повітряним рухом як багаторівневої ієрархічної системи. Показано, що для підвищення якості оперативного управління, як найбільш складного і відповідального етапу, потрібно мінімізувати помилки оцінок параметрів траєкторій повітряних суден. Запропонований алгоритм оптимального управління інформаційними вимірювальними засобами.

The air-traffic control system analysis as multilevel hierarchical system is in-process carried out. It is shown, that for on-line control improvement of quality as the most difficult and responsible stage, it is necessary to minimise errors of parametres paths estimations of air courts. The algorithm of optimum control is offered by the informational measuring means.

Вступ

На сьогодні галузь автоматизації процесів діяльності служби управління повітряним рухом (УПР) швидко розвивається. Серед важливих чинників впливу варто виділити необхідність дотримання вимог безпеки, досягнення регулярності польотів, економічність, висока динаміка процесів. Ефективне УПР неможливе без АСУ повітряним рухом (ПР).

В цих системах підсистема оперативного управління посідає особливе місце, оскільки тут зазначені чинники виявляються найповніше. Відомо, що можливості АСУ ПР, як людино-машинних систем, обмежуються можливостями диспетчерів. Одним із напрямів зменшення впливу зазначених обмежень є удосконалення інформаційної підтримки роботи диспетчерів, забезпечення їх не надлишковою, точною і адекватною тим задачам, які вони вирішують, інформацією. Тому проблеми підвищення ефективності інформаційного забезпечення АСУ ПР є дуже актуальними.

В статті розглядається спосіб підвищення ефективності інформаційного забезпечення АСУ ПР при управлінні потоком повітряних суден (ПС) за рахунок мінімізації помилок оцінок параметрів їх траєкторій, що отримуються за даними радіолокаційних систем (РЛС).

Особливості управління РЛС в службах повітряного руху

Завданнями служби УПР є встановлення і підтримки порядку в повітряному русі, попередження небезпечних зближень і зіткнень ПС одне з іншим і з наземними перешкодами, забезпечення інформацією і консультаціями, необхідними для безпечного виконання польотів і повідомлення відповідних органів про ПС, що потребують порятунку, і надання їм необхідної допомоги [1].

Служба руху має трирівневу ієрархічну організаційну структуру, для підтримки процесів її діяльності створені АСУ ПР, типова функціональна структура яких наведена на рисунку 1. На вищому рівні управління вирішуються завдання організації повітряного руху і забезпечення польотів на всіх етапах руху ПС, побудови органів управління, а також взаємодії між центрами УПР різних відомств і службами забезпечення польотів. На середньому рівні вирішуються завдання довгострокового і попереднього планування повітряного руху і безпосереднього забезпечення виконання цього плану. На нижньому рівні вирішуються завдання оперативного управління повітряним рухом на всіх етапах польотів ПС.

Рис. 1. Функціональна структура АСУ ПР

Оперативне управління повітряним рухом призначене для забезпечення руху кожного ПС відповідно до прийнятого плану його польоту, критеріїв безпеки, регулярності і економічності, а також для забезпечення безпеки польотів сукупності ПС, тобто недопущення їх зближення до інтервалів, менших ніж задані критеріями безпеки, на всіх етапах польоту ПС шляхом контролю управління рухом. У зонах з великою щільністю повітряного руху до системи оперативного УПР висовуються жорсткі вимоги до точності дотримання визначених інтервалів проходження ПС.

Точна витримка інтервалів, яка заснована на своєчасному отриманні достовірної інформації про місцеположення ПС, є основою безпеки руху.

Управління може здійснюватися за допомогою одного з двох основних методів: за траєкторією поточного плану або з екстраполяцією за даними радіолокаційних вимірювань. Вибір методу управління залежить від того, в якій зоні виконується політ, і визначається специфікою польотів в цих зонах. З усіх видів діяльності служби руху найбільш складним є оперативне управління, оскільки, по-перше, саме тут найповніше виявляються 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 [2, 4] показано, що якість виконання диспетчером завдань оперативного управління функціонально залежить від похибок визначення параметрів траєкторій ПС радіолокаційними засобами, що можна представити у вигляді виразу

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

де N – кількість ПС, які обслуговуються диспетчером; M – кількість параметрів траєкторій, необхідних для характеризації руху ПС; σ_{ij}^2 – дисперсії помилок оцінок відповідних параметрів траєкторій ПС; $tr\left(\mathbf{h}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Psi}_j\right)$ – зважений слід коваріаційної матриці помилок оцінок параметрів траєкторії j-го ПС; h_j – матриця вагових коефіцієнтів для обліку важливості точності оцінок окремих параметрів траєкторії j - го ПС.

Відомо [3], що функція $f(\bullet)$ найчастіше має такий вигляд

$$K_D = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^{N} tr\left(\mathbf{h}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Psi}_j\right)\right)\right] \quad (2)$$

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

Огляд існуючих рішень

У праці [5] вперше в АСУ ПР задача управління РЛС була розглянута з системних позицій, було обґрунтовано необхідність узгодження критерію якості управління РЛС з критерієм системи більш високого рівня. Для синтезу алгоритмів управління було запропоновано використовувати інформаційний підхід, за яким головним критерієм є ентропія інформації про цілі на різних етапах роботи РЛС.

Проте такий підхід, враховуючи сучасний стан теорії оптимального управління, не дозволяє отримати ефективних рішень для РЛС УПР в умовах складної повітряної обстановки. У праці [6] розглянуті підходи до управління РЛС, засновані на вирішенні поточних завдань управління. Але вони не враховують специфіку УПР і ефективність за достатньо тривалий проміжок часу.

У роботі [7] запропонований підхід до оптимізації роботи РЛС зенітних ракетних систем, проте не врахована специфіка роботи УПР.

Постановка проблеми

Нехай для підсистеми оперативного управління АСУ ПР визначені основні методи управління. Диспетчери управляють щільним потоком ПС, що визначає суттєвий вплив можливих помилок оцінок параметрів траєкторій ПС, які одержуються за даними радіолокаційних вимірювань, на якість прийнятих диспетчерами рішень.

Необхідно розробити метод оптимального управління РЛС АСУ ПР, що враховує особливості цієї системи та властиві їй обмеження.

Розробка методу управління РЛС АСУ ПР

Будемо дотримуватися такого плану досліджень: спочатку визначимо показник якості управління, а потім перейдемо до управління процесом вимірювання координат при вирішенні задачі оцінювання параметрів траєкторій ПС.

Розпочнемо з визначення показника якості управління. Використовуючи відомі методи координації багаторівневих ієрархічних систем, не важко довести, що показник якості управління етапу супроводження ПС, узгоджений з показником ефективності системи наступного за ієрархією рівня, має такий вигляд [8]:

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

Тут $tr\left[\mathbf{h}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Psi}(t)\quad{}_i(t)\right] = \sum_{l=1}^{k} h_i^{ll}(t)\Psi_i^{ll}(t)$ – слід твору матриць $\mathbf{h}_i(t)$ і $\boldsymbol{\Psi}_i(t)$, що характеризує зважену величину похибки фільтрації координат i-го об'єкту. При цьому вагова матриця $\mathbf{h}_i(t)$ визначається залежно від способу супроводу і допошуку ПС в процесі супроводу, а також від способу прийняття рішення на управління повітряним рухом.

Структура матриць $\boldsymbol{\Psi}_i(t)$ і $\mathbf{h}_i(t)$ у разі оцінки параметрів траєкторій ПС в прямокутній системі координат, оцінок координат і їх похідних, що є взаємно некорельованими, може бути такою:

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

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

При цьому у разі вирішення задачі оперативного управління повітряним рухом за траєкторіями поточних планів необхідно мінімізувати поточну кульову помилку оцінки параметрів траєкторії $\sigma^2_{ш}=h^2_{x_i}\sigma^2_{x_i}+h^2_{y_i}\sigma^2_{y_i}+h^2_{z_i}\sigma^2_{z_i}$, тому величини $h^2_{x_i}$, $h^2_{y_i}$, $h^2_{z_i}$ повинні приймати значення $w_i\,(0\le w_i\le 1)$ залежно від важливості величини помилки по конкретних координатах, а величини $h^2_{\dot{x}_i}$, $h^2_{\dot{y}_i}$, $h^2_{\dot{z}_i}$ дорівнюють нулю. Якщо ж вирішується задача оперативного управління повітряним рухом за траєкторіями поточних планів з екстраполяцією, то величини $h^2_{\dot{x}_i}$, $h^2_{\dot{y}_i}$, $h^2_{\dot{z}_i}$ набувають значення пропорційно інтервалу часу екстраполяції, оскільки екстрапольоване значення координати у разі лінійної моделі руху ПС обчислюється відповідно до виразів

$$x_i(t+t_э)=x_i(t)+\dot{x}_i(t)t_э;$$

$$y_i(t+t_э)=y_i(t)+\dot{y}_i(t)t_э;$$

$$z_i(t+t_э)=z_i(t)+\dot{z}_i(t)t_э,$$

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

Величина квадрата кульової помилки в екстрапольованій точці дорівнює $\sigma^2_{шэ}=\sigma^2_{x_{i-1}}+\sigma^2_{\dot{x}_{i-1}}t^2_э+\sigma^2_{y_{i-1}}+\sigma^2_{\dot{y}_{i-1}}t^2_э+$ $+\sigma^2_{z_{i-1}}+\sigma^2_{\dot{z}_{i-1}}t^2$

Таким чином, $h^2_{x_i}$, $h^2_{y_i}$, $h^2_{z_i}$ набувають значення рівні одиниці, а $h^2_{\dot{x}_i}$, $h^2_{\dot{y}_i}$, $h^2_{\dot{z}_i}$ дорівнюють $t^2_э$.

Тепер зосередимося на управлінні процесом вимірювання координат при вирішенні задачі оцінювання параметрів траєкторій ПС. Задача оптимальної фільтрації частково спостережуваної послідовності $\{\boldsymbol{\upsilon}_i(t),\ \mathbf{Y}_i(t)\}$, $i=1,\ 2,\ldots,N;\ t=1,\ 2,\ldots,T-1$, полягає у побудові оптимальних (у середньоквадратичному сенсі) оцінок неспостережних значень векторів $\upsilon_i(t)$ за спостереженнями

$$(\mathbf{Y}_i)^t_0=\{\mathbf{Y}_i(0),\ \mathbf{Y}_i(1),\ldots,\ \mathbf{Y}_i(t)\},$$
$$t=1,\ 2,\ldots,T-1.$$

Модифікований вираз рекурентної фільтрації з урахуванням керованих спостережень за цілями для оптимальних оцінок $\hat{\boldsymbol{\upsilon}}_i(t)$ і коваріаційних матриць $\mathbf{\Psi}_i(t)$ має такий вигляд [8]:

$$\begin{aligned}
&\hat{\upsilon}_{эi}(t+1)=\mathbf{\Phi}_i(t)\hat{\upsilon}_i(t);\\
&\mathbf{\Psi}_{эi}(t+1)=\mathbf{\Phi}_i(t)\mathbf{\Psi}_{i0}(t-1)\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}_i(t);\\
&\mathbf{K}_{i0}(t+1)=\mathbf{H}_i(t+1)\mathbf{\Psi}_{эi}^{\mathrm{T}}(t,\alpha(t))\times\\
&\times\left(\mathbf{H}_i(t,\alpha(t))\mathbf{\Psi}_{эi}(t,\alpha(t))\mathbf{H}_i^{\mathrm{T}}(t+1)+\mathbf{B}(t,\alpha(t))\mathbf{B}^{\mathrm{T}}(t)\right);\\
&\hat{\upsilon}_i(t_{эi}+1)=\mathbf{C}_i(t_i)+\hat{\upsilon}_{эi}(t+1)+\mathbf{K}_{i0}(t+1)\times\\
&\times\left(\mathbf{Y}_i(t_{эi}+1)-\mathbf{C}_i(t,\alpha(t))-\mathbf{H}_i(t,\alpha(t))\hat{\upsilon}_{эi}(t+1)\right);\\
&\mathbf{\Psi}_{i0}(t+1)=\mathbf{\Psi}_{эi}(t+1)+\mathbf{b}_i(t)\mathbf{b}_i^{\mathrm{T}}(t)-\\
&-\mathbf{K}_{i0}(t+1)\mathbf{H}_i(t,\alpha(t))\mathbf{\Psi}_{эi}(t+1),\\
&\mathbf{\Psi}_i(0)=\mathbf{\Psi}_{i0}.
\end{aligned}\qquad(4)$$

Логічно припустити, що до початку спостережень всі управління дорівнюють нулю ($\alpha(-1)=0$). Врахуємо при цьому «вартості» проведення вимірювання, а також перемикання каналів. Тоді якість управління спостереженнями в задачі фільтрації можна охарактеризувати таким функціоналом [7]:

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

Тут $tr\left(\mathbf{h}_i^{\mathrm{T}}\Psi(t)\quad {}_i(t)\right) = \sum_{\nu=1}^{k} h_i^{\nu\nu}(t)\Psi_i^{\nu\nu}(t)$ характеризує зважену величину похибок фільтрації координат i-го об'єкту, причому можливість зміни елементів діагональних матриць $h_i(t)$ дозволяє виділяти ті координати, точність оцінювання яких бажано підвищити. Решта членів у виразі (5) враховують «вартість» спостережень і перемикання каналів.

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

$$\begin{aligned}&\alpha(0),\ \alpha(1),\ \ldots,\ \alpha(T-1);\\ &\Psi_i(0),\ \Psi_i(1),\ \ldots,\ \Psi_i(T-1),\\ &\Psi_i(T),\ i=1,\ 2,\ldots,\ N,\end{aligned} \tag{6}$$

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

Для будь-якого $T < \infty$ множина різних значень, які може набувати функціонал (5), скінчена і не перевищує величину

$M^T \times (N+1)^T$ [8].

Тому рішення поставленої задачі завжди існує.

Після знаходження параметрів процесу (6) необхідно здійснити відповідні підстановки в системі рекурентних рівнянь (4). В результаті отримаємо систему для знаходження оцінок $\hat{\upsilon}_i(t)$ неспостереженого вектора процесу $\upsilon_i(t),\ t = 0,\ 1,\ldots,\ T$ (для кожного $i = 1,2,\ldots,\ N$) при оптимальному в сенсі критерію (5) управлінні процесом спостереження.

Отже, нами виконані математичні побудови для формалізації задачі оптимального управління системою РЛС УПР і встановлено, що рішення задачі у наведеній постановці завжди існує. Для практичної реалізації наведених побудов можна застосувати алгоритм вирішення одержаної оптимізаційної задачі, наведений в праці [8].

Результати моделювання

Моделювання проводилося з метою оцінки ефективності розробленого методу і алгоритму оптимального управління системою РЛС УПР в режимі супроводження ПС. У якості базового методу, використаного для порівняння, був застосований метод рівномірного зондування (розподілу енергетичних ресурсів) РЛС, який на сьогодні є основним в реальних радіолокаційних комплексах в умовах складної повітряної обстановки.

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

Висновки

В результаті виконаної роботи розроблений новий спосіб підвищення ефективності інформаційного забезпечення АСУ ПР за рахунок оптимального управління системою РЛС УПР. Запропонований метод оптимального управління системою РЛС УПР відрізняється від відомих високою ефективністю.

В ході подальшої роботи запропонований спосіб буде вдосконалений для урахування специфіки супроводження ПС різного класу і конкретних АСУ ПР.

Список посилань

1. Управление воздушным движением / Т.Г. Анодина, С.В. Володин, В.П. Куранов, В.И. Мокшанов. – М.: Транспорт, 1988. – 228 с.
2. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением. М. : Транспорт, 1992. – 279 с.
3. Автоматизированные системы УВД: Справочник / В.И. Савицкий, В.А. Василенко, Ю.А. Владимиров, В.В. Тагилов. М.: Транспорт , 1986. – 412 с.
4. Дубровский В.И., Крыжановский Г.А., Солодухин В.А. Организация радиотехнического обеспечения в системе УВД. М.: Транспорт, 1985. – 164 с.

5. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. – М.: Сов. радио, 1971. – 368 с.
6. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
7. Гришин И.Ю., Можар М.К., Решетник В.М. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами // Наука і оборона, - 1994, вип. 3. с. 27-32.
8. Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах. – Ялта: РИО КГУ, 2009. – 286 с.

Поступила в редакцию 25.09.2009