

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Закора Севастян Анатолійович

УДК 656.7.052.001.57 (045)

**РОЗВ'ЯЗАННЯ ГРУПОВИХ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ НА
ДОВІЛЬНИХ МАРШРУТАХ В УМОВАХ ГАРАНТОВАНОГО РІВНЯ
БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ**

05.22.13 — Навігація та управління повітряним рухом

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному авіаційному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
Харченко Володимир Петрович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри аеронавігаційних систем,
проректор з наукової роботи НАУ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Рева Олексій Миколайович,
Міжнародна акціонерна авіакомпанія „УРГА”,
директор навчально-льотного центру

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Сніцаренко Петро Миколайович,
Національний науково-дослідний центр оборонних технологій і воєнної безпеки України,
начальник НДУ проблем інформаційних технологій оборонного призначення.

Провідна установа: Авіаційний науково-технічний комплекс
ім. О.К. Антонова Міністерства промислової політики України, м. Київ.

Захист відбудеться “ 30 ” січня 2007 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий “ 8 ” грудня 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,

к.т.н., доц., с.н.с. _____ С.В. Павлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значне зростання кількості авіаційних перевезень в Європейському повітряному просторі за останні десятиліття тісно пов'язане з необхідністю удосконалення існуючих систем управління повітряним рухом (УПР). Підвищення інтенсивності руху в європейській мережі повітряних маршрутів безпосередньо впливає на збільшення кількості потенційних конфліктних ситуацій (КС), про що свідчать статистичні дані. Як наслідок, наземні диспетчерські центри, зазнають значних перевантажень при регулюванні потоків повітряного руху.

Однією з перспективних спроб, покликаних одночасно підвищити ефективність виконання польотів згідно потреб авіакомпаній та забезпечити необхідний рівень безпеки польотів в системі організації повітряного руху (ОПР), є концепція вільного польоту або Free Flight. Ця концепція спрямована на надання можливості повітряним кораблям (ПК) виконувати польоти в межах спеціально виділеного повітряного простору за довільними маршрутами, що на відміну від традиційних польотів в межах заданої повітряної траси або коридору дозволяє відхилятися від початкової траєкторії, змінюючи план польоту безпосередньо в процесі його виконання. Реалізація такої концепції планується багатьма країнами вже в найближчі 10-15 років. Однак задоволення потреб авіакомпаній через надання їм певної свободи в плануванні траєкторій руху ПК несе в собі додаткові труднощі при забезпеченні необхідного рівня безпеки польотів, які полягають, зокрема, у підвищенні складності конфліктних ситуацій між ПК.

В умовах польотів за довільними маршрутами своєчасне та надійне розв'язання потенційних КС значно ускладнено, оскільки спектр можливих ситуацій повітряного руху в цьому разі є набагато ширшим, ніж за умов традиційних трасових польотів. Найбільш характерною відмінністю є виникнення групових конфліктних ситуацій (за участю більш ніж двох ПК), прогнозування та розв'язання яких потребує врахування багатьох факторів.

Питанням попередження зіткнень ПК і уникнення конфліктних ситуацій присвячено ряд робіт як у нашій країні, так і за її межами, де в основному розглядаються парні конфлікти (за участю двох ПК), а в роботах, що стосуються розв'язання групових конфліктних ситуацій, не приділяється достатньої уваги неточності навігаційних систем ПК, яку можна врахувати, зокрема, через застосування моделей невизначеності прогнозованого положення ПК. Отже постає актуальна науково-практична задача розробки і застосування нових методів та алгоритмів розв'язання КС, що дозволять в реальному масштабі часу виконувати розв'язання групових конфліктних ситуацій в умовах гарантованого рівня безпеки польотів за довільними маршрутами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження виконані в рамках фундаментальних держбюджетних науково-дослідних робіт: шифр 147ДБ-04 – тема “Розробка методів та алгоритмів розпізнавання конфліктних ситуацій у розподілених системах управління динамічними об’єктами” (НДР 010104U003744), шифр 009ДБ-01 – тема “Розробка методів і комп’ютеризованих засобів багатоальтернативного виявлення та розв’язання конфліктних ситуацій в соціотехнічних системах” (НДР 0101U002726), шифр 814ДБ-98 – тема “Розробка принципів побудови і моделювання на основі інтелектуальних систем із базою знань і розпізнаванням критичних ситуацій ефективної полієргатичної системи” (НДР 0198U000704), шифр 372-01/042-X01/40 – тема “Розробка науково-технічних аспектів впровадження системи CNS/ATM та визначення критеріїв впровадження і економічної доцільності” (НДР 0101U007420), а також госпдоговірної НДР шифр 15-KO/053-X01 – тема “Автоматизована інтелектуальна (експертна) система підтримки рішень оптимізації судопотоку в системах регулювання руху суден” (НДР 0103U003306).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методу розв’язання групових конфліктних ситуацій на довільних маршрутах за умови гарантованого рівня безпеки польотів.

Для досягнення мети роботи поставлено та вирішено наступні задачі:

- аналіз існуючих методів розв’язання КС та особливостей виникнення КС в умовах польотів за довільними маршрутами, а також формулювання завдання розв’язання групових КС в умовах таких польотів;

- розробка методу розв’язання групових КС при польоті за довільними маршрутами в умовах невизначеності, який дозволяє здійснювати пошук оптимального варіанта розв’язання конфлікту;

- розробка алгоритмів розв’язання групових КС та програмного комплексу для моделювання процесів виникнення та розв’язання КС;

- верифікація розроблених алгоритмів шляхом проведення комп’ютерного моделювання процесів виникнення та розв’язання типових конфліктних ситуацій.

Об’єкт дослідження – процес розв’язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями.

Предмет дослідження – методи розв’язання групових конфліктних ситуацій в умовах гарантованого рівня безпеки польотів за довільними маршрутами.

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на методах математичного аналізу, комбінаторної оптимізації, теорії ймовірності, статистичного та імітаційного моделювання з використанням сучасних програмних комплексів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тім, що:

- розроблено метод розв'язання групових КС на основі оптимального каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК, який відрізняється тим, що дозволяє для умов польоту за довільними маршрутами мінімізувати сумарні відхилення сукупності ПК від початкових планів польоту з урахуванням невизначеності прогнозованого положення ПК;

- запропоновано і обґрунтовано критерій оптимізації каскадного розв'язання групових КС у вигляді інтегрального нормованого функціонала, до складу якого входять змінні, що характеризують площу маневру, складність маневру і часове відхилення від початкової траєкторії.

Практичне значення отриманих результатів. Реалізація теоретичних рішень, одержаних при виконанні дисертаційної роботи, та результати моделювання, проведеного за допомогою розробленого програмного комплексу, дозволять вдосконалити алгоритмічне забезпечення бортових систем безпечного ешелонування ASAS (Airborne Separation Assurance System) та автоматизованих систем УПР при переході до нових концепцій організації повітряного руху, таких як Free Flight. При цьому розроблені метод та алгоритми дозволяють:

- здійснювати розв'язання групових КС, які є характерними для умов виконання польотів за довільними маршрутами, в реальному масштабі часу;

- здійснювати пошук оптимальних варіантів розв'язання КС, що дозволяє знизити сумарні відхилення ПК від початкових траєкторій при маневруванні;

- уникати „ефекту доміно”, який проявляється у циклічному виникненні конфліктів;

- в цілому забезпечити необхідний рівень безпеки польотів.

Практичне значення розробленого програмного комплексу для моделювання процесів виникнення та розв'язання КС полягає в тім, що він може бути застосований для:

- верифікації різних алгоритмів розв'язання конфліктних ситуацій в повітряному просторі з різною організацією повітряного руху;

- дослідження процесів виникнення та розвитку конфліктних ситуацій за заданими сценаріями, у тому числі відтворення та аналіз реальних авіаційних пригод.

Розроблені алгоритми розв'язання КС були реалізовані в Автоматизованій Інтелектуальній Системі Підтримки Рішень [7], що входить до складу програмного комплексу „Лиман” та експлуатується в регіональному координаційному центрі регулювання руху суден у Бузько-Дніпровсько-Лиманському Каналі і Херсонському Морському Каналі.

Результати досліджень також впроваджені в Державній службі України з нагляду за забезпеченням безпеки авіації, Державному

підприємстві „Дельта-Лощман” Міністерства транспорту та зв'язку України та навчальному процесі Національного авіаційного університету.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У працях, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: у праці [8] - розробка архітектури та діючого екземпляру програмного моделюючого комплексу для дослідження процесів розв'язання конфліктних ситуацій; у праці [6] - моделювання спектру ситуацій повітряного руху; у праці [5] - розробка об'єктної моделі взаємодії ПК в групі при розв'язанні конфліктів; у працях [7] – розробка підсистеми інтелектуальної підтримки, інформаційно-планової підсистеми, маршрутизатора та програмна реалізація Автоматизованої Інтелектуальної Системи Підтримки Рішень.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень випробувані на 5-й Міжнародній конференції „Авиация и космонавтика” (Москва, МАІ, 2006), Міжнародній науково-технічній конференції „Авіа-2006” (Київ, НАУ, 2006), XV Науково-технічній конференції „Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційно-вимірювальних систем космічного і наземного базування” (Житомир, ЖВІРЕ, 2006), Науково-практичній конференції „Проблеми підтримки та контролю державою експорту продукції наукоємного виробництва” (Авіасалон Авіасвіт-XXI, 2006), II Всесвітньому конгресі з безпеки авіації „Aviation in The XXI-st Century/Safety in Aviation” (Київ, НАУ, 2005), V Міжнародній науково-практичній конференції „Штучний інтелект” (АР Крим, 2004), наукових конференціях молодих вчених „Політ-2006”, „Політ-2004”, „Політ-2003” (Київ, НАУ).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 11 друкованих роботах: в 6 статтях у фахових наукових виданнях, 3 матеріалах та 1 тезах доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, та захищено 1 авторським свідоцтвом Російської Федерації.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів та висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 125 сторінок, у тому числі 65 рисунків, 5 таблиць. Список використаних джерел містить 111 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ до дисертації містить обґрунтування актуальності теми досліджень, формулювання мети та завдань дисертаційної роботи, визначення об'єкта та предмета дослідження, методологічну основу досліджень, опис основних наукових результатів, їхньої новизни та практичної цінності, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, а також відомості про публікації, апробацію та структуру роботи.

У першому розділі розглянуто очікувані переваги і особливості впровадження концепції вільного польоту (Free Flight), головною ідеєю якої є надання екіпажу ПК можливості вільно обирати траєкторію польоту за маршрутом в межах встановленого повітряного простору з метою підвищити ефективність виконання польотів за критеріями користувачів аеронавігаційних послуг. Також наведено класифікацію повітряних маршрутів і виділено основні принципи організації областей повітряного простору типу Free Flight Airspace (FFAs) та Free Route Airspace (FRAs), в межах яких можливе виконання польотів за довільними маршрутами.

Реалізація концепції Free Flight стає можливою завдяки використанню нових систем зв'язку, навігації та спостереження (CNS), таких як глобальна супутникова система GNSS, автоматичне залежне спостереження в режимі широкозонного мовлення ADS-B, системи попередження зіткнень ACAS/TCAS і безпечного розділення літаків ASAS з використанням багатофункціонального бортового індикатора повітряної обстановки CDTI, система попередження зіткнень з наземними перешкодами EGPWS і цифровий канал передачі повідомлень „пілот-диспетчер” CPDLC. Зазначений склад бортового обладнання значною мірою вже реалізований в таких фірмах-виробниках як Rockwell Collins, Honeywell, Sensis Corporation, Transas, AlliedSignal, Thales, КБ „Буран-Титан” і т.і. Проте основні труднощі виникають при розробці алгоритмічного забезпечення систем типу ASAS, правила функціонування яких в загальному вигляді поки що не відображені в офіційних стандартах.

Задача бортового обладнання за умов Free Flight полягає в наданні пілоту такої повноти інформації про повітряну обстановку в оточуючому просторі, яку має диспетчер, спостерігаючи за ПК. В той же час диспетчер на землі виконує спостережно-консультативні функції, але при ускладненні повітряної обстановки він може втручатися в процес встановлення безпечного розділення (ешелонування) ПК. Для цього наземні органи УПР повинні мати вдосконалені засоби контролю повітряного руху, прогнозування та розв'язання КС.

В графічному вигляді ешелонування на довільних маршрутах представляється як забезпечення відсутності перетинів просторових захисних зон циліндричної форми, умовно окреслених навколо ПК. Це забезпечує підтримання гарантованого рівня безпеки польотів. Відповідно, конфліктні ситуації між ПК полягають у прогнозованому або фактично спостережуваному порушенні норм безпечного ешелонування між ними.

Для вивчення особливостей виникнення КС в умовах польоту за довільними маршрутами проведено класифікацію основних можливих типів КС, серед яких найбільший інтерес представляють групові конфліктні ситуації, що в загальному випадку об'єднують поняття парних конфліктів та конфліктів-кластерів. До складу конфліктів-кластерів можуть входити учасники парних конфліктів, процеси розв'язання яких

накладаються у просторі і у часі, а також ПК, що створюють обмеження для цих процесів. При послідовному попарному розв'язанні таких КС можуть виникати циклічні конфлікти, які утворюють „ефект доміно”.

Для аналізу сучасних досягнень в області розв'язання конфліктів між ПК розглянуто класифікацію існуючих методів та алгоритмів розв'язання КС за такими ознаками: розмірність простору для виявлення КС, геометрія КС; спосіб прогнозування положення ПК; спосіб аналізу ступеня небезпеки ситуації; спосіб розрахунку безпечного маневру; типи можливих маневрів та їх керовані параметри; стратегія розв'язання конфліктів. Запропоновано також розширення класифікації за наступними ознаками: спосіб розподілу відповідальності за розв'язання КС; область застосування (можливі типи повітряних маршрутів); тип часового діапазону визначення конфліктів (відносно залишку часу до небезпечного зближення); типи перешкод, що враховуються.

Проведений аналіз показує, що значна частина методів та алгоритмів розв'язання конфліктів розрахована на ситуації за участю двох ПК, а для більш складних випадків використовується стратегія попарного перебору. При цьому не враховується поява вторинних конфліктів і „ефекту доміно”, які можливі при підвищеній щільності польотів за довільними маршрутами. Для забезпечення гарантованого рівня безпеки польотів слід застосовувати моделі прогнозування стану ПК з урахуванням невизначеності його положення, яка викликана, зокрема, неточністю навігаційних систем. При цьому процес розв'язання КС повинен бути спрямований на мінімізацію витрат групи ПК на маневрування, що має відповідати одному з основних принципів концепції Free Flight – оптимальному розв'язанню КС. Оскільки для групових КС кількість можливих варіантів розв'язку може бути достатньо високою, доцільно застосовувати методи комбінаторної оптимізації.

Виходячи з викладеного вище, виникає задача розробки методу розв'язання групових конфліктних ситуацій на довільних маршрутах, що дозволить розв'язувати як групові, так і парні конфліктні ситуації в умовах гарантованого рівня безпеки польотів. Для цього необхідно:

- вирішити завдання розв'язання групових конфліктних ситуацій з урахуванням невизначеності прогнозованого положення ПК в умовах польотів за довільними маршрутами, а також вирішити завдання пошуку оптимального варіанта розв'язання таких КС;
- використовуючи отримані теоретичні результати, розробити алгоритмічне забезпечення та програмний моделюючий комплекс для вирішення задачі розв'язання групових конфліктних ситуацій між ПК в умовах польотів за довільними маршрутами;
- провести верифікацію розроблених алгоритмів на типових конфліктних ситуаціях з використанням програмного моделюючого комплексу дослідження процесів розв'язання конфліктних ситуацій.

Другий розділ присвячено розробці методу розв'язання групових конфліктних ситуацій в умовах довільних маршрутів.

Групову КС можна представити у вигляді сукупності ПК з незмінною чисельністю n

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\},$$

що знаходяться в обмеженій області повітряного простору (зоні вільного польоту), серед яких існують явні конфліктні пари (A_i, A_j) , для котрих не виконується умова безпечного ешелонування

$$d(A_i, A_j, t) \geq d_s, \quad t \in (t_a; t_F), \quad (1)$$

де $d(A_i, A_j, t)$ - відстань між ПК A_i та A_j в момент часу t ; d_s - норма безпечного ешелонування ПК; t_a - запас часу для пошуку та початку реалізації запобіжного маневру; t_F - граничний момент часу, на який прогноуються траєкторії усіх ПК.

Вважається, що алгоритм виявлення конфліктних пар є відомим, а їх попарне розв'язання створює небезпеку виникнення нових конфліктних пар внаслідок підвищеної щільності польотів в зоні вільного польоту („ефект доміно“).

Для уникнення цього ефекту пропонується використовувати впорядковане (каскадне) розв'язання групової КС, при якому ПК планують свої маневри у відповідності до визначеної черги

$$p = (i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_n),$$

де i_k - номер ПК, що знаходиться на k -й позиції в черзі p .

Процес каскадного розв'язання полягає у плануванні безконфліктних траєкторій і виглядає наступним чином (рис. 1). Спочатку ПК з номером i_2 планує безконфліктний маневр відносно ПК з номером i_1 (рис. 1, а), яке не змінює при цьому своєї траєкторії, або інший варіант - ПК i_1 та i_2 вирішують конфлікт сумісно (рис.1, б). Після цього ПК з номером i_3 планує свою траєкторію так, щоб не порушити інтервал безпечного ешелонування з ПК i_1 та i_2 . Аналогічно виконується побудова безконфліктних траєкторій для наступних ПК відповідно до порядку черги, поки для ПК з номером i_n не буде побудовано безконфліктну траєкторію (рис. 1, в). Для реалізації такої процедури бажано, щоб координація дій виконувалась через надійний канал зв'язку централізовано одним з ПК або в наземному центрі УПР.

При каскадному плануванні траєкторій будь-яку чергу або порядок ПК можна представити перестановкою p їх номерів, а множину всіх можливих порядків - простором перестановок Π .

Якщо ввести деякий функціонал $f(p)$, заданий на множині перестановок Π , який буде відображати ефективність розв'язання конфлікту для кожної перестановки p , то виникає задача відшукування такої перестановки p_0 серед усіх можливих перестановок $p \in \Pi$, при якій

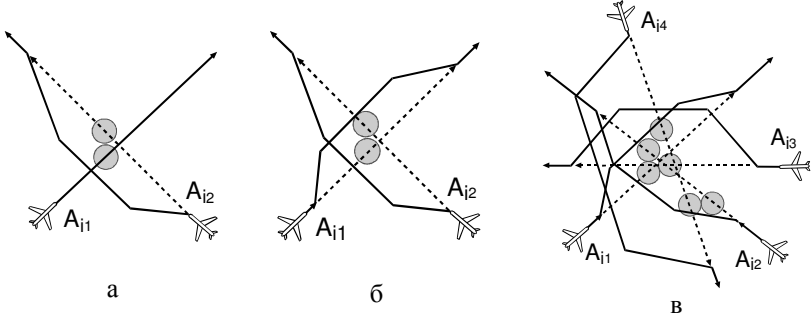


Рис. 1. Каскадне планування траєкторій.

досягається мінімум критерію $f(p)$, тобто:

$$p_0 = \arg \min_{p \in \Pi} f(p). \quad (2)$$

Така перестановка p_0 буде відповідати оптимальному варіанту каскадного розв'язання групового конфлікту, а її відшукування відноситься до задачі мінімізації функціоналів, заданих на перестановках.

Для визначення ефективності розв'язання КС за перестановкою p для всієї сукупності ПК пропонується використовувати функціонал наступного вигляду

$$f(p) = f((S_1, S_2, \dots, S_n), (\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_n), (N_1, N_2, \dots, N_n), Q_\Sigma) = \begin{cases} \frac{1}{2n(m_s + m_\tau + m_N)} \sum_{i=1}^n \left(m_s \frac{S_i}{S_{\max i}} + m_\tau \frac{\Delta\tau_i}{\Delta\tau_{\max i}} + m_N \frac{N_i - 1}{N_{\max i} - 1} \right), & \text{якщо } Q_\Sigma = 0, \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_\Sigma}{Q_\Sigma + 1}, & \text{якщо } Q_\Sigma \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

де S_i – площа маневру i -го ПК; $\Delta\tau_i$ – відхилення від планової траєкторії за часом в кінцевій точці маневру; N_i – загальна кількість ділянок маневру ($\min N_i = 1$); $S_{\max i}$, $\Delta\tau_{\max i}$, $N_{\max i}$ – відповідні нормуючі величини, які можуть відрізнятися для різних типів ПК; m_s , m_N , m_τ – вагові коефіцієнти; Q_Σ – кількість пар ПК, для яких побудова безконфліктних траєкторій буде неможлива через обмеження на керуючі параметри при маневруванні.

Каскадне планування безконфліктних траєкторій ПК за заданою перестановкою їх номерів p пропонується виконувати в просторово-часовій системі координат $\mathbf{R}^2 \times \mathbf{T}$. Розглянуто випадок розв'язання конфліктів в горизонтальній площині шляхом відвороту за курсовим кутом ψ . Для цього в просторово-часовій системі координат для кожного ПК виконується побудова поверхні планового положення $\bar{\mathbf{X}}$, що утворюється множиною траєкторій ПК при польоті з заданої точки за всіма допустимими курсовими кутами, а також побудова зовнішньої Φ^0 та

внутрішньої Φ^1 обмежувачих поверхонь допустимих траєкторій (рис. 2), які пов'язані векторним параметричним рівнянням

$$\mathbf{\Phi}^u(t, \psi) = \bar{\mathbf{X}}(t, \psi) + (-1)^u \cdot \boldsymbol{\delta}(t, \psi), \quad u = \overline{0, 1}, \quad (4)$$

де $u = 0$ - для зовнішньої та $u = 1$ - для внутрішньої обмежуючих поверхонь допустимих траєкторій; t, ψ - параметри часу та курсового кута; $\delta(t, \psi)$ - розміри захисної зони ПК, що враховує встановлені норми безпечного ешелонування та невизначеність прогнозованого стану ПК.

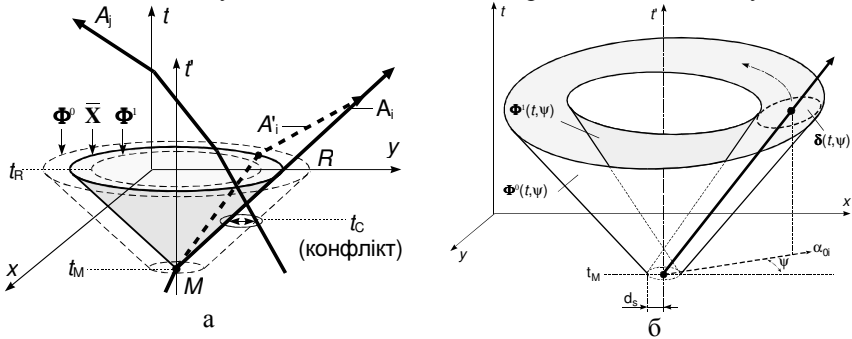


Рис. 2. Просторово-часова система координат: а - розв'язання конфлікту за курсом; б – формування обмежуючих поверхонь допустимих траєкторій.

Для складових рівняння (4) були отримані аналітичні вирази. Так рівняння поверхні планового положення $\bar{X}(t, \psi)$ для моделі руху ПК з керованим поворотом враховує параметри кута крену та планової швидкості ПК. Сумарна захисна зона $\delta(t, \psi)$ враховує встановлені норми горизонтального ешелонування d_s та невизначеність прогнозованого положення ПК у вигляді зон еліптичної форми і визначається для A_i по відношенню до кожного ПК з підмножини $\{A_j\}_{j=1, i-1}^{\infty}$ за виразом:

$$\delta(t, \psi) = \begin{bmatrix} x_\delta(\sigma_x, \sigma_y, \rho_{xy}, k_{XY}) \pm d_S \cdot (1 + 1/k_{XY}^2)^{-\frac{1}{2}} \\ y_\delta(\sigma_x, \sigma_y, \rho_{xy}, k_{XY}) \pm d_S \cdot (1 + k_{XY}^2)^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\sigma_x = \sigma_x(t, \psi), \sigma_y = \sigma_y(t, \psi), \rho_{xy} = \rho_{xy}(t, \psi), k_{XY} = k_{XY}(t, \psi)$$

де $x_\delta(\cdot)$, $y_\delta(\cdot)$ - складові, що враховують невизначеність прогнозованого положення ПК; $k_{xy}(t, \psi)$ - тангенс кута нахилу дотичної до поверхні $\overline{X}(t, \psi)$ в горизонтальному перерізі в точці з параметрами (t, ψ) ; $\sigma_x(t, \psi)$, $\sigma_y(t, \psi)$, $\rho_{xy}(t, \psi)$ - параметри розподілу помилок прогнозування відносного положення A_i та A_j в горизонтальній площині:

$$\sigma_x(t, \psi) = \sqrt{\mathbf{M}(t, \psi)_{11}}, \quad \sigma_y(t, \psi) = \sqrt{\mathbf{M}(t, \psi)_{22}}, \quad \rho_{xy}(t, \psi) = \frac{\mathbf{M}(t, \psi)_{12}}{\sigma_x(t, \psi)\sigma_y(t, \psi)},$$

де $\mathbf{M}(t, \psi)$ - коваріаційна матриця невизначеності відносного положення A_i та A_j в горизонтальній площині.

Після формування поверхонь Φ'' для ПК A_i з черги p виконується пошук перетинів Φ'' з траєкторіями ПК з множини $\{A_j\}_{j=\overline{1, i-1}}$, який полягає у розв'язанні для кожної пари ПК (A_i, A_j) рівняння

$$\Phi''(t, \psi) - \mathbf{f}(t) = 0, \quad t \in (t_M; t_R), \quad i = \overline{0, 1}, \quad (6)$$

де $\mathbf{f}(t)$ - траєкторія A_j у власній просторово-часовій системі координат ПК A_i в момент початку маневрування t_M ; t_R - момент часу, коли для A_i конфлікт можна вважати розв'язаним.

Розв'язки рівняння (6) визначають конфліктну область на поверхні планового положення ПК A_i по відношенню до A_j , а сукупність таких областей по відношенню до кожного A_j дає змогу провести вибір нового безконфліктного курсу для здійснення запобіжного маневру A_i .

Третій розділ присвячено розробці алгоритмічного забезпечення для розв'язання групових конфліктних ситуацій, а саме розглянуто:

- алгоритм пошуку оптимального каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК;
- алгоритм каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК;
- алгоритм знаходження конфліктних областей для пари ПК;
- правило вибору безконфліктного курсу ПК.

Вхідними даними для алгоритму пошуку оптимального каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК є сукупність початкових планів множини ПК $\{A_i\}_{i=\overline{1, n}}$. На виході алгоритму формується перестановка номерів ПК (2), що відповідає мінімальному значенню функціонала (3) для сукупності ПК. Для пошуку оптимальної перестановки в алгоритмі використано метод звужуваних околів, що дозволяє суттєво скоротити час пошуку при великій кількості ПК.

Алгоритм каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК використовує за вхідні дані задану перестановку номерів ПК $p = (i_1, i_2, \dots, i_n)$, у відповідності до якої виконує планування нових траєкторій ПК (рис. 3). В процесі роботи алгоритму для кожної ділянки плану i -го ПК по відношенню до кожного ПК з підмножини $\{A_j\}_{j=\overline{1, i-1}}$

виконуються наступні операції: перевірка наявності конфліктів при початковому плані; вибір моменту початку маневру; вибір нового безконфліктного курсу; розрахунок тривалості польоту за новим курсом; розрахунок маневру повернення до початкового плану польоту.

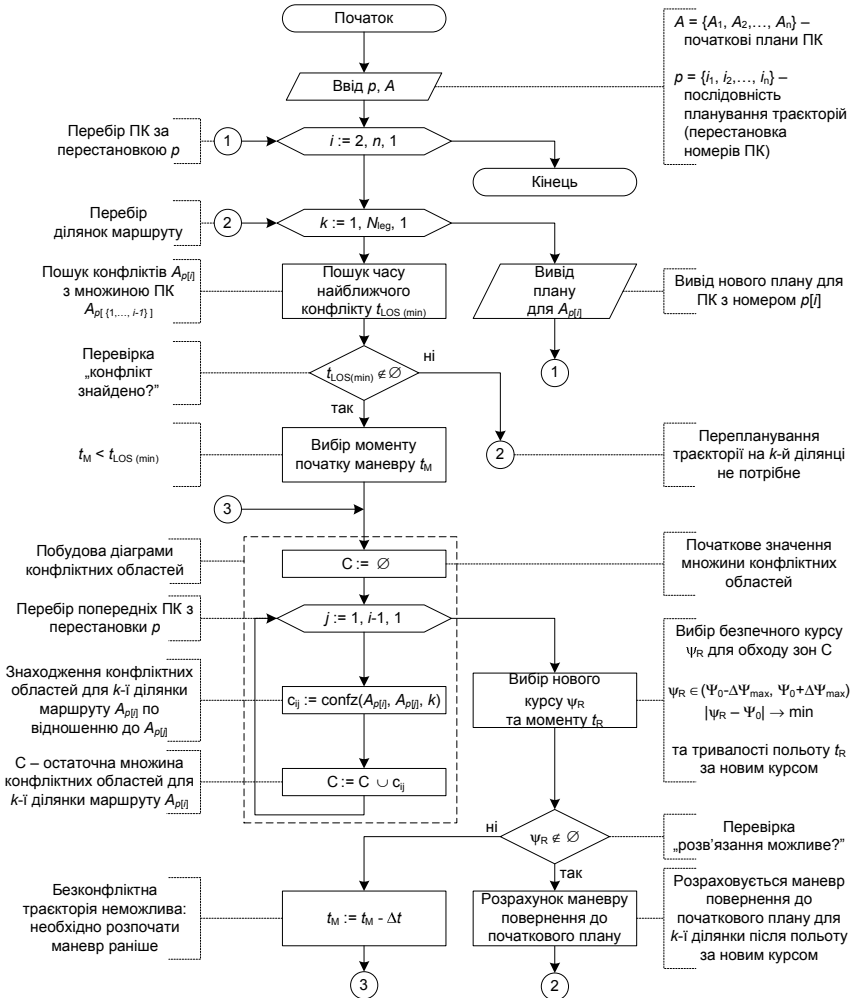


Рис.3. Блок-схема алгоритму каскадного планування безконфліктних траєкторій.

Алгоритм знаходження конфліктних областей використовується для побудови діаграм конфліктних областей для кожного ПК, які визначають діапазони конфліктних курсів при маневруванні.

Для верифікації алгоритмів розв’язання КС розроблено програмний моделюючий комплекс, який забезпечує єдине уніфіковане програмне середовище для вивчення процесів виникнення та розв’язання конфліктів між ПК, гнучкість налаштування умов експерименту, наочність представлення результатів та можливість підключення різних реалізацій

інших алгоритмів і моделей для їх подальшої верифікації [8]. Комплекс дозволяє виконувати комп'ютерне моделювання умов польоту за довільними маршрутами та процесів розв'язання групових КС як у реальному, так і у прискореному масштабах часу. Крім того, він може бути корисним для вивчення впливу різних факторів на процес розв'язання конфліктів, таких як відмова зв'язку між ПК або поява небезпечних метеорологічних явищ протягом польоту. Для створення необхідних умов моделювання в комплексі реалізовано завантаження сценаріїв розвитку КС із зовнішніх файлів, що дозволяє відтворювати ситуації повітряного руху, які відповідають реальним авіаційним пригодам (рис. 4).

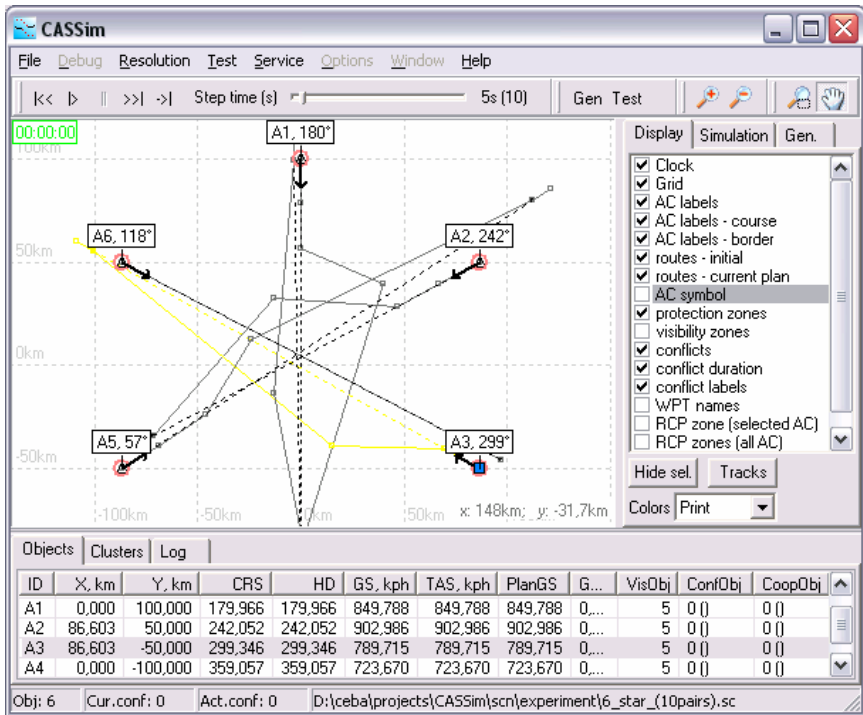


Рис. 4. Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу програмного комплексу.

В четвертому розділі виконано моделювання процесів виникнення та розв'язання КС. Проведено верифікацію розроблених методу та алгоритмів розв'язання групових КС. Наведено результати моделювання поверхонь \bar{X} та Φ'' . На рис.5 представлено зовнішній вигляд поверхонь та їх горизонтальні перерізи на рівні 1-ї, 3-ї та 6-ї хвилин польоту після моменту $t_M = 0$ для стохастичної моделі руху ПК. При цьому були використані наступні вихідні дані:

- діапазон допустимих курсових кутів відвороту $\psi = -90^\circ \dots 90^\circ$;
- часовий інтервал (відносно моменту t_M) $t = 0 \dots 3$ хв;
- шляхова швидкість польоту $V = 900$ км/год;
- кут крену при повороті $\gamma = 20^\circ$;
- стаціонарне бічне відхилення з дисперсією $\sigma_L^2 = 1$ км²;
- закон зміни дисперсії поздовжнього відхилення $\sigma_L^2(t) = at^3 + bt^2$.

Як видно з рис. 5 б, побудовані за отриманими аналітичними виразами обмежуючі поверхні допустимих траєкторій Φ'' в горизонтальних перерізах дійсно є обвідними для сім'ї зон невизначеності прогнозованого положення ПК.

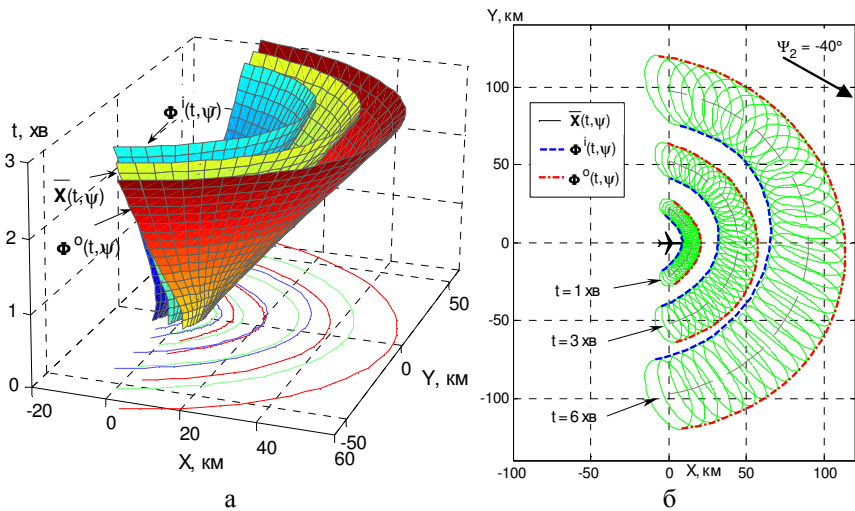


Рис. 5. Обмежуючі поверхні допустимих траєкторій: а – просторово-часова система координат; б – горизонтальні перерізи.

Верифікацію алгоритмів розв'язання групових КС було проведено на типових сценаріях групових та парних конфліктних ситуацій. Побудовані для кожної пари ПК графіки відносних відстаней $d(A_i, A_j, t)$ порівнювалися з заданим мінімумом горизонтального ешелонування $d_S = 9260$ м (5 морських миль). На рис. 6 представлено умови виникнення та процес розв'язання групової конфліктної ситуації типу „Зірка” за участю 6 ПК.

Зміна відносної відстані у часі показує, що після застосування до даного сценарію алгоритму каскадного планування безконфліктних траєкторій за перестановкою $(A1, A2, A3, A4, A5, A6)$ для жодної пари ПК не було порушено мінімум горизонтального ешелонування.

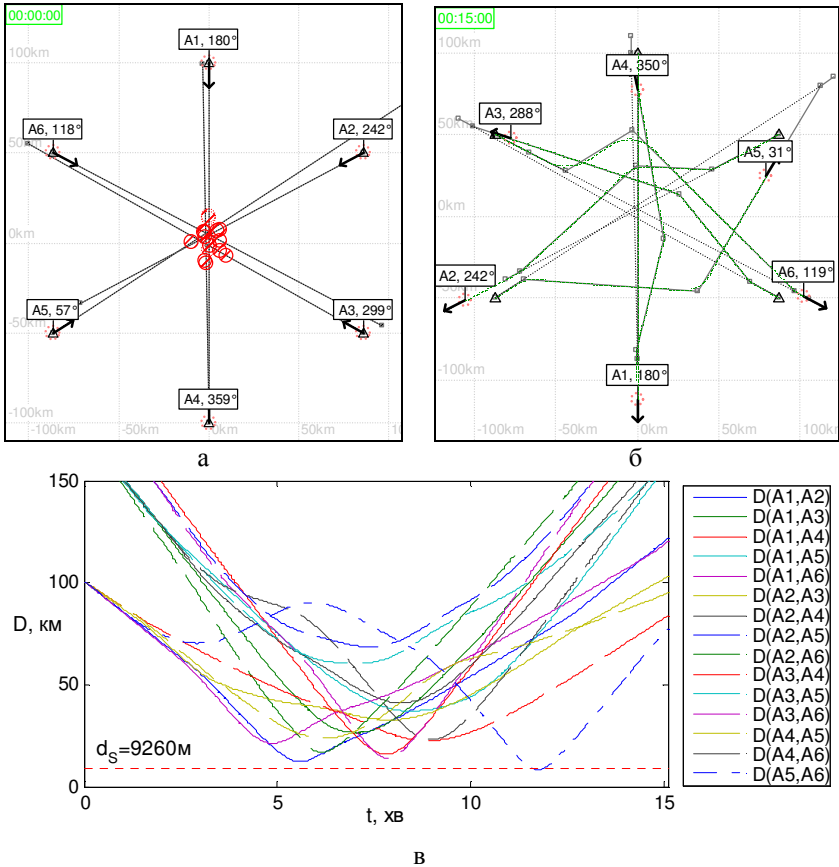


Рис. 6. Сценарій „Зірка” (6 ПК): а – початковий момент; б – розв’язання (горизонтальний вигляд); в - зміна відносної відстані з часом.

Розглянутий сценарій групової КС було взято за основу при верифікації алгоритму пошуку оптимального каскадного планування безконфліктних траєкторій. При цьому були отримані значення функціонала (3) на всій множині перестановок (всього $6!=720$ можливих перестановок). В результаті застосування алгоритму кількість оцінених перестановок, необхідна для виходу на оптимальну перестановку p_0 , в середньому для всіх проведених випробувань становила 56, що в 13 разів менше за загальну кількість перестановок (720). Практично це означає, що для отримання варіанта каскадного планування траєкторій, який би гарантував відсутність конфліктів та порівняно малі витрати сукупності ПК на маневрування, доцільним є знаходження псевдооптимального значення функціонала (3) замість глобального мінімуму.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове вирішення важливого науково-технічного завдання - розроблено метод розв'язання групових конфліктних ситуацій між ПК при гарантованому рівні безпеки польотів в умовах довільних маршрутів, необхідність впровадження яких обумовлюється стратегічними міжнародними планами розвитку аеронавігації. Також розроблено відповідні алгоритми розв'язання групових КС і програмний моделюючий комплекс для дослідження процесів виникнення та розв'язання КС між ПК.

При цьому отримані такі результати:

1. Запропоновано розширену класифікацію методів та алгоритмів розв'язання конфліктних ситуацій між ПК, в якій було використано нові класифікаційні ознаки, а саме спосіб розподілу відповідальності за розв'язання КС, тип маршрутів повітряного руху, тип часового діапазону визначення КС та тип перешкод.

2. Розроблено метод розв'язання групових КС для умов польоту за довільними маршрутами на основі оптимального каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК, який дозволяє уникати появи вторинних конфліктів та „ефекту доміно”, може бути застосований для різних стратегій маневрування, а також враховує невизначеність прогнозованого положення ПК, що дозволяє в цілому підтримувати заданий рівень безпеки польотів.

В рамках розробленого методу:

- запропоновано і обґрунтовано критерій оптимізації каскадного розв'язання групових КС у вигляді інтегрального нормованого функціонала, до складу якого входять змінні, що характеризують площу маневру, складність маневру і часове відхилення від початкової траєкторії;

- з урахуванням запропонованого інтегрального нормованого функціонала вирішено завдання пошуку оптимального варіанта каскадного планування безконфліктних траєкторій, що дозволить мінімізувати просторові і часові відхилення групи ПК від початкових планів польотів при маневруванні. При цьому завдання представлено у комбінаторному вигляді, а для його вирішення запропоновано та обґрунтовано використання методу звужуваних околів, що дає можливість скоротити час пошуку оптимального варіанта розв'язання КС.

3. Розроблено комплекс алгоритмів розв'язання групових КС, що дозволяють виконувати оптимальне каскадне планування безконфліктних траєкторій в умовах польотів за довільними маршрутами. Розроблені алгоритми можуть бути застосовані як в бортових системах безпечного ешелонування типу ASAS, так і в перспективних наземних автоматизованих системах УПР.

4. Розроблено програмний моделюючий комплекс для верифікації різних алгоритмів розв'язання конфліктних ситуацій між ПК. Архітектура комплексу дозволяє проводити моделювання ситуацій повітряного руху за заданими сценаріями в умовах польоту за довільними маршрутами та традиційними встановленими маршрутами. Комплекс може бути застосований для відтворення ситуацій повітряного руху, які відповідають реальним авіаційним пригодам. В основу комплексу було покладено структуру та алгоритми автоматизованої інтелектуальної (експертної) системи підтримки рішень, в розробці якої автор брав безпосередню участь.

5. Проведено верифікацію розроблених методу та алгоритмів, яка показала можливість їх застосування до типових сценаріїв групових та парних КС, а також можливість зменшення обчислювальних витрат при пошуку оптимального варіанта розв'язання КС. Дослідження проводились за допомогою розробленого програмного моделюючого комплексу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Загора С.А. Урахування невизначеності прогнозованого положення літаків при послідовному розв'язанні конфліктних ситуацій // Вісник НАУ. – 2006. – №2. – С.51-56.
2. Загора С.А. Пошук оптимальної послідовності розв'язання конфліктних ситуацій для сукупності повітряних суден // Вісник ЖДТУ. – 2006. – №2 (37). – С.126-131.
3. Загора С.А. Послідовне розв'язання конфліктних ситуацій для сукупності літаків за рахунок відхилення за курсовим кутом // Вісник НАУ. – 2006. – №1. – С.57-63.
4. Загора С.А. Аналіз методів розв'язання конфліктних ситуацій в умовах вільного польоту // Вісник НАУ. – 2005. – №1. – С.42-47.
5. Харченко В. П., Загора С. А. Применение принципов распределенного кооперативного решения конфликтных ситуаций в условиях концепции Free Flight // Журнал „Искусственный интеллект”, Донецк, ДонГИИИ. - 2004. - №3. - С.385-391.
6. Харченко В.П., Кукуш О.Г., Бабак Є.А., Загора С.А. Класифікація конфліктних ситуацій між літальними апаратами та вибір зон небезпеки // Вісник НАУ. – 2002. – №3. – С.79-88.
7. Програмный комплекс „Автоматизированная интеллектуальная (экспертная) система поддержки решений «АИСРП» по оптимизации судопотока в системах регулирования движения судов”: А. с. №2003610281. Роспатент / Харченко В.П., Латыпов В.С., Васильев В.Н., Загора С.А., Алексеев В.Н. - №2002612122; Заявлено 28.11.2002; Оpubл. 28.01.2003.

8. Kharchenko V.P., Zakora S.A. Software Architecture of Modeling System for Comparison of Aircraft Conflict Resolution Algorithms // The Second World Congress „Safety in Aviation”, NAU, Kyiv.– 2005.– P.3.44-3.51.

9. Загора С.А. Безконфліктне планування польотів повітряних кораблів // Аерокосмічні системи моніторингу та керування: Матеріали VII Міжнарод. наук-техн. конф. „ABIA-2006”. – К.: НАУ, 2006. – Т.1 - С.21.117-21.120.

10. Загора С.А. Использование экспертной оценки в системах составления бесконфликтных планов движения транспортных объектов // Тези доповідей Міжнародної наукової конференції студентів та молодих учених „Політ-2004”. - К.: НАУ. – 2004. – С.84.

11. Загора С.А. Принципи оцінки потенційно конфліктних ситуацій з використанням нейронної мережі // 36. наук. праць МНК „Політ-2003: Наука і молодь”. - К.: НАУ. – 2003. – С.191-194.

АНОТАЦІЯ

Загора С.А. Розв’язання групових конфліктних ситуацій на довільних маршрутах в умовах гарантованого рівня безпеки польотів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – „Навігація та управління повітряним рухом”. – Національний авіаційний університет, Київ, 2006.

Дисертацію присвячено розробці методу розв’язання групових конфліктних ситуацій між повітряними кораблями (ПК) на довільних маршрутах в умовах гарантованого рівня безпеки польотів, а також програмного моделюючого комплексу для верифікації алгоритмів розв’язання конфліктних ситуацій, що можуть бути використані для удосконалення систем управління повітряним рухом та бортових систем безпечного ешелонування ПК.

Розроблено метод розв’язання групових конфліктних ситуацій на основі оптимального каскадного планування безконфліктних траєкторій ПК, який дозволяє для умов польоту за довільними маршрутами мінімізувати сумарні відхилення сукупності ПК від початкових планів польоту з урахуванням невизначеності прогнозованого положення ПК.

Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для розв’язання групових конфліктних ситуацій між ПК.

Достовірність розроблених методу та алгоритмів була підтверджена шляхом їх верифікації в розробленому програмному комплексі на типових сценаріях групових та парних конфліктних ситуацій.

Ключові слова: управління повітряним рухом, довільні маршрути польоту, конфлікти-кластери, розв’язання групових конфліктів, каскадне планування, безпечне розділення, витрати на маневрування, комбінаторна оптимізація, моделюючий програмний комплекс.

АННОТАЦИЯ

Загора С.А. Решение групповых конфликтных ситуаций на произвольных маршрутах в условиях гарантированного уровня безопасности полетов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.13 – „Навигация и управление воздушным движением”. – Национальный авиационный университет, Киев, 2006.

Диссертационная работа посвящена разработке метода решения групповых конфликтных ситуаций между воздушными судами (ВС) на произвольных маршрутах в условиях гарантированного уровня безопасности полетов, а также программного моделирующего комплекса для верификации алгоритмов решения конфликтных ситуаций.

В работе рассмотрены особенности возникновения и развития конфликтных ситуаций в условиях полета по произвольным маршрутам, использование которых предполагается при внедрении новых принципов организации воздушного движения, таких как концепция Free Flight. Также проведен анализ современного состояния проблемы решения конфликтных ситуаций между ВС.

Разработан метод решения групповых конфликтных ситуаций на основе оптимального каскадного планирования бесконфликтных траекторий ВС, который позволяет для условий полетов по произвольным маршрутам минимизировать суммарные отклонения совокупности ВС от первоначальных планов полета с учетом неопределенности прогнозируемого положения ВС, избегать возможного возникновения вторичных конфликтов и в целом поддерживать необходимый уровень безопасности полетов.

Предложен комплекс алгоритмов решения групповых конфликтных ситуаций. Рассмотрена обобщенная архитектура построения программного моделирующего комплекса для исследования процессов возникновения и решения конфликтных ситуаций, а также разработан действующий вариант такого программного комплекса, позволяющий осуществлять верификацию различных алгоритмов решения конфликтных ситуаций и выполнять отработку заданных сценариев развития воздушной обстановки.

Разработанные метод и алгоритмы могут быть использованы для совершенствования алгоритмического обеспечения бортовых систем безопасного эшелонирования и перспективных наземных автоматизированных систем управления воздушным движением.

Достоверность предложенных метода и алгоритмов была подтверждена путем их верификации с помощью разработанного программного комплекса на типовых сценариях групповых и парных конфликтных ситуаций.

Ключевые слова: управление воздушным движением, произвольные маршруты полета, конфликты-кластеры, решение групповых конфликтов, каскадное планирование, безопасное разделение, затраты на маневрирование, комбинаторная оптимизация, моделирующий программный комплекс.

ABSTRACT

Zakora Sevastian. Multi-aircraft conflict resolution under Free Flight with the guaranteed flight safety level. – Manuscript.

The Thesis for Candidate of Technical Sciences degree on speciality 05.22.13 – Navigation and Air Traffic Control. – National Aviation University, Kiev, 2006.

The multi-aircraft conflict resolution method with guaranteed level of safety under free flight conditions is considered. The method is based on the cascade procedure of conflict-free trajectory planning taking into account aircraft trajectory uncertainty predicted during conflict resolution. The method minimizes total plan deviation for the group of aircraft, prevents initiation of secondary conflicts, and thus avoids the domino effect.

The set of conflict resolution algorithms based on the method proposed has been developed. The algorithms can be used for improvement of airborne separation assurance systems software.

The software simulation tool for verification of various conflict resolution algorithms has been developed, and the general architecture is given for its design and further augmentation. The tool can be used for simulation of prescribed traffic situation scenarios.

The proposed method and algorithms were verified via the simulation tool developed in the thesis. For this purpose a number of generic multi-aircraft and pairwise conflict scenarios have been tested.

Key words: air traffic control, free flight trajectories, cluster conflicts, multi-aircraft conflict resolution, cascade trajectory planning, safe separation, maneuvering cost, combinatorial optimization, dynamic simulation software tool.