

Marek Malarski

Politechnika Warszawska

AUTOMATYZACJA SYSTEMU KONTROLI RUCHU LOTNICZEGO
W OBSZARZE KONTROLOWANYM KRAJU - SEKTORZE CTA.

Streszczenie. Ruch lotniczy cywilnego lotnictwa komunikacyjnego jest organizowany i sterowany przez służby kontroli ruchu lotniczego. Przy większym natężeniu ruchu wiele kumulujących się błędów oceny sytuacji powietrznej może prowadzić do sytuacji konfliktowych. Proponowany system automatyzacji pracy stanowiska kontroli ruchu lotniczego w sektorze wykorzystuje operacje do zobrażenia sytuacji ruchowej w układzie czas*odległość. Model systemu przebadano na IBM PC/AT.

1. Wstęp

Ruch lotniczy cywilnego lotnictwa komunikacyjnego realizowany jest w ściśle zorganizowanych częściach przestrzeni powietrznych. Przestrzenie powietrzne przeznaczone dla lotnictwa cywilnego składają się ze stref i obszarów kontrolowanych lotnisk oraz sieci korytarzy lotniczych łączących te obszary pomiędzy sobą. Ruch lotniczy w tych przestrzeniach jest z wyprzedzeniem planowany i koordynowany, lecz jego realizacja podlega wielu losowym zkłóceniom. Służby kontroli ruchu lotniczego śledzą rzeczywistą realizację tego ruchu zapewniając jego bezkolizyjność. Kontrolne śledzenie rzeczywistej sytuacji powietrznej obarczone jest błędami zależnymi między innymi od technicznego wyposażenia systemu kontroli. Przy większym natężeniu ruchu kumulujące się błędy prowadzą do sytuacji powietrznych potencjalnie konfliktowych. Sytuacje te muszą być przewidywane i rozwiązywane przez kontrolera ruchu lotniczego. Proponowana do praktycznej realizacji w Centrum Kontroli Ruchu Lotniczego na lotnisku Okęcie metoda wykorzystuje operacje do zobrażenia sytuacji ruchowej w układzie czas*odległość. Algorytm wyznacza trajektorię bezkolizyjnego przelotu na skończonym ciągu węzłów kontrolnych trasz lotu. Metodę zrealizowano na IBM PC/AT.

2. Model funkcjonalny sektora CTA

Podstawową jednostką przestrzeni powietrznej jest "rejon informacji powietrznej" - FIR. Jest to wydzielony obszar, w którym określone służby "kontroli ruchu" - ATC, pełnią na prawach wyłączności kontrolę i koordynację ruchu wszystkich samolotów w nim się znajdujących. FIR obejmuje "strefy kontrolowane lotnisk" - CTR, "obszary kontrolowane lotnisk" - TMA, "obszary kontrolowane" - CTA. Obszar CTA łączy pomiędzy sobą TMA i sąsiednie FIR. Jest to sieć korytarzy powietrznych o ściśle określonej szerokości, podzielonych w płaszczyźnie pionowej na pewną ilość poziomów lotu - FL. Poziomy te, odseparowane od siebie różnicą wysokości 300 lub 600 metrów, przeznaczone są na przemian do ruchu samolotów w przeciwnych kierunkach trasy. Na drogach lotniczych nie wykonuje się zasadniczo żadnych innych manewrów poza przelotem statków powietrznych. Drogi lotnicze wytyczone są przez naziemne pomoce radionawigacyjne - punkty kontrolne. Służą one do orientacji załogi samolotu względem osi drogi lotniczej oraz kontroli położenia samolotu. Zasadniczo, wszystkie zmiany parametrów lotu mogą odbywać się wyłącznie nad punktem kontrolnym / zmiana kierunku lotu po drodze lotniczej, rozpoczęcie lub zakończenie zmiany poziomu lotu /.

Zadaniem służb kontroli ruchu lotniczego w sektorze CTA jest głównie: uzgadnianie warunków przelotu samolotów zgłaszających się do sektora kontrolowanego oraz śledzenie i ewentualne korygowanie rzeczywistej realizacji uzgodnionego planu lotów. Sprawdzanie zachowania bezpieczeństwa lotów wielu samolotów znajdujących się równocześnie w sieci dróg lotniczych obszaru kontrolowanego sprowadza się do przewidywania, a następnie kontrolowania odpowiednich separacji czasowych, odległościowych lub kątowych / pomiędzy samolotami.

Opis formalny systemu CTA wymaga zdefiniowania kilku podstawowych pojęć z zakresu ruchu lotniczego.

Punkt kontrolny V_j - jest to punkt o określonych współrzędnych geograficznych w sieci korytarzy lotniczych, w którym ze względów ruchowych wskazana jest kontrola położenia przelatującego samolotu. Punkty kontrolne określane są przy organizacji przestrzeni powietrznej kontrolowanej i z reguły wyposażone są w pomoce radionawigacyjne. Możliwe jest zdefiniowanie punktów kontrolnych nie wyposażonych w pomoce nawigacyjne, jeżeli określają to inne wymagania.

Węzeł $W_i^{h_i}$ jest to i -ty punkt kontrolny na poziomie lotu h_i .

Punkt wejściowy We_i - punkt kontrolny na granicy sektora lub lotnisko startu.

Punkt wyjściowy Wy_i - punkt kontrolny na granicy sektora lub lotnisko lądowania.

Węzeł wejściowy $We_i^{h_i}$ jest to i -ty punkt wejściowy na poziomie lotu h_i .

Węzeł wyjściowy $Wy_i^{h_i}$ jest to i -ty punkt wyjściowy na poziomie lotu h_i .

Marszruta lotu

$$M_k = \{WE_n, \dots, W_i, \dots, WY_m\}$$

jest to ciąg punktów kontrolnych W_i na drodze przelotu samolotu pomiędzy punktem wejściowym w sektor a punktem wyjściowym.

Trasa lotu

$$T_k = \{WE_n^{h_n}, \dots, W_i^{h_i}, \dots, WY_m^{h_m}\}$$

jest to marszruta lotu z przyporządkowaną każdemu punktowi kontrolnemu wysokością lotu, tzn. jest to ciąg węzłów na drodze przelotu.

Sieć tras T_k tworzących dyskretny model kontrolowanego sektora, w pełni opisuje sektor CTA z punktu widzenia operacji w nim wykonywanych. Przy normalnych prędkościach lotu samolotów komunikacyjnych można przyjąć założenie, że wszystkie zmiany nastaw lotu (sterowań) występują wyłącznie w węzłach. Pozwala to na budowę efektywnych numerycznie algorytmów wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii lotu. Liczba węzłów trasy lotu w obrębie FIR Warszawa /terytorium polski/ nie przekracza 7-8. (w sektorze CTA - odpowiednio 6-8).

3. Model operacyjny sektora CTA

Opis zajętości odcinka trasy lotniczej przez przelatujący samolot można sprowadzić do zapisu zajętości odpowiednich węzłów trasy w określonym przedziale czasu. Prowadzi to do określenia odpowiednich okien czasowych, dostępnych i okien czasowych zajętych w węzłach trasy.

Okno dostępne (i -te okno czasowe dostępne w węzle n)

$$Od_i^n = \langle a_i^n, b_i^n \rangle$$

jest to przedział czasu pomiędzy najwcześniejszą chwilą bezkolizyjnego przelotu węzła n - chwila a_i^n , a najpóźniejszą odpowiednio chwilą b_i^n - bezkolizyjnego przelotu tego węzła.

Okno zajęte

$$Oz_i^n(nr) = \langle b_i^n, a_{i+1}^n \rangle$$

gdzie: nr - numer lotu na planie lotów,

jest to przedział czasu zabronionego do przelotu przez n-ty węzeł trasy /a więc na określonym poziomie - FL / . Zajętość ta wynika z planowanego przelotu innego samolotu przez dany węzeł lub z innych przyczyn. Przelot samolotu przez odcinek międzywęzłowy reprezentowany jest przez odpowiednie okna zajęte w węzłach krańcowych odcinka

$$\{ Oz_i^n(nr), Oz_j^m(nr) \}$$

Przelot samolotu przez odcinek międzywęzłowy na danym poziomie - FL. odbywać się może wyłącznie w jednym kierunku. Można dowiedzieć, że dla wszystkich odcinków międzywęzłowych w FIR Warszawa i dla wszystkich typów samolotów komunikacyjnych eksploatowanych nad terytorium Polski w warunkach typowych bezkolizyjność przelotu samolotu przez odcinek bez zmiany poziomu lotu można kontrolować analizując Od_i^n / o odpowiedniej "szerokości" / . Trudniejszym przypadkiem elementarnym jest tu przelot odcinka międzywęzłowego ze zmianą poziomu lotu przynajmniej na sąsiedni dopuszczalny. Manewr taki wiąże się z koniecznością przejściowego zajęcia przynajmniej jednego poziomu / FL / dostępnego dla lotów w kierunkach przeciwnych. Dokument [9] przewiduje w takiej sytuacji odpowiednio większe separacje czasowe /rys.1./.

W metodzie przyjęto, że przelot samolotu przez odcinek międzywęzłowy ze zmianą poziomu lotu na sąsiedni dopuszczalny, reprezentowany jest w punktach krańcowych odcinka na obu zajętych wysokościach:

$$\{ Oz_i^n(nr), Oz_j^m(nr), Oz_k^{ns}(nr), Oz_l^{ms}(nr) \}$$

gdzie: ns, ms - numery węzłów na sąsiednich, "przecinanych" poziomach lotu w punktach n i m trasy

$$Oz_i^n(nr) = \langle b_i^n, a_{i+1}^n \rangle \Rightarrow Oz_k^{ns}(nr) = \langle b_k^{ns}, a_{i+1}^n + \Delta t \rangle$$

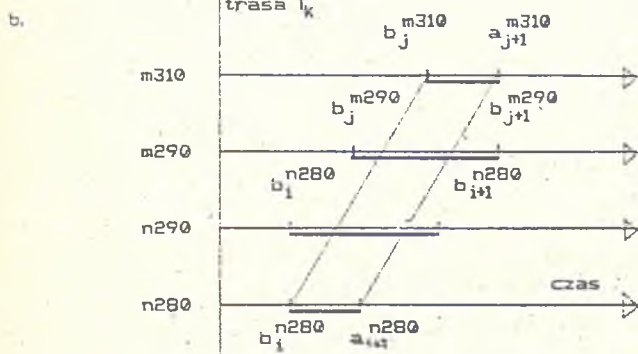
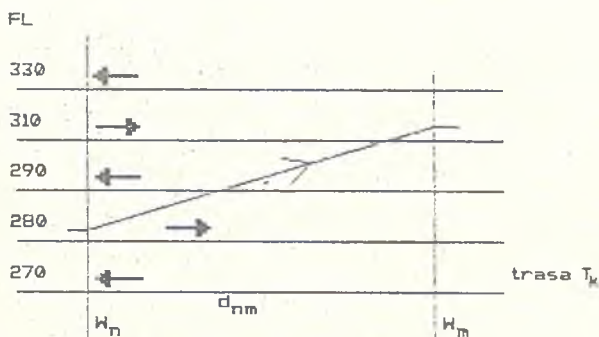
$$Oz_j^m(nr) = \langle b_j^m, a_{j+1}^m \rangle \Rightarrow Oz_l^{ms}(nr) = \langle b_l^{ms} - \Delta t, a_{j+1}^m \rangle$$

$$\text{gdzie: } \Delta t = b_j^m - \frac{b_i^n + a_{i+1}^n}{2}$$

Pełne zobrazowanie sytuacji ruchowej w węzle opisane jest przez siatkę zajętości węzła

$$S_w^n = \bigcup_j \{ Od_j^n, Oz_j^n(nr) \}$$

Pełne zobrazowanie sytuacji ruchowej na trasie lotu określone jest przez siatkę zajętości trasy



Rys.1. Przykładowe zobrazowanie sytuacji ruchowej dla zmiany poziomu lotu na sąsiedni dopuszczalny, na odcinku międzywęzłowym:

a. w układzie odległość * wysokość

b. w układzie czas * odległość

Fig.1. Exemplary illustration of traffic situation for the changes of flight level for neighbouring admissible one in the internode interval

Siatka zajętości trasy

$$Sz_{T_k} = \bigcup_{W_D \in T_k} \bigcup_i Oz_i^n$$

jest to złożenie okien zajętych dla wszystkich węzłów trasy T_k w rozpatrywanym horyzoncie czasowym.

Odpowiednia siatka dostępności trasy

$$Sd_{T_k} = \bigcup_{W_n \in T_k} \bigcup_i Od_i^n$$

zdefiniowana odpowiednio analogicznie.

4. Metoda wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii lotu samolotów

W określonym czasie przed wlotem w kontrolowany sektor CTA na stanowisko kontroli ATC zgłaszana jest pełna informacja o parametrach planowanego lotu. Pozwala to na wyznaczenie w siatce dostępności trasy lotu Sd_{T_k} , bezkolizyjnej trajektorii przelotu. Algorytm tego zadania polega na sekwencyjnym wyznaczaniu możliwości bezkolizyjnego przelotu przez kolejne odcinki międzywęzłowe. Jest to operacja rzutowania okna dostępnego w n -tym węzle na siatkę zajętości węzła $n+1$.

$$Od_i^n \rightarrow Rd^{n+1}(Od_i^n)$$

Operacja rzutowania odwzorowuje możliwość bezkolizyjnego przelotu odcinka międzywęzłowego, wyznaczając odpowiednie rzutowe okno dostępne

$$Rd^{n+1}(Od_i^n) = \langle Ra_i^{n+1}, Rb_i^{n+1} \rangle$$

gdzie:

$$Ra_i^{n+1} = a_i^n + \frac{l_n}{v_n} - \Delta t,$$

$$Rb_i^{n+1} = b_i^n + \frac{l_n}{v_{nr}} + \Delta t,$$

v_{nr} - prędkość samolotu nr,

l_n - odległość międzywęzłowa,

Δt - zapas bezpieczeństwa.

Złożenie operacji rzutowania dla całej trasy lotu wyznacza odpowiedni korytarz dopuszczalny

$$DK = Rd^{n_1}, \dots, Rd^{n_s}(Od_i^{n_s})$$

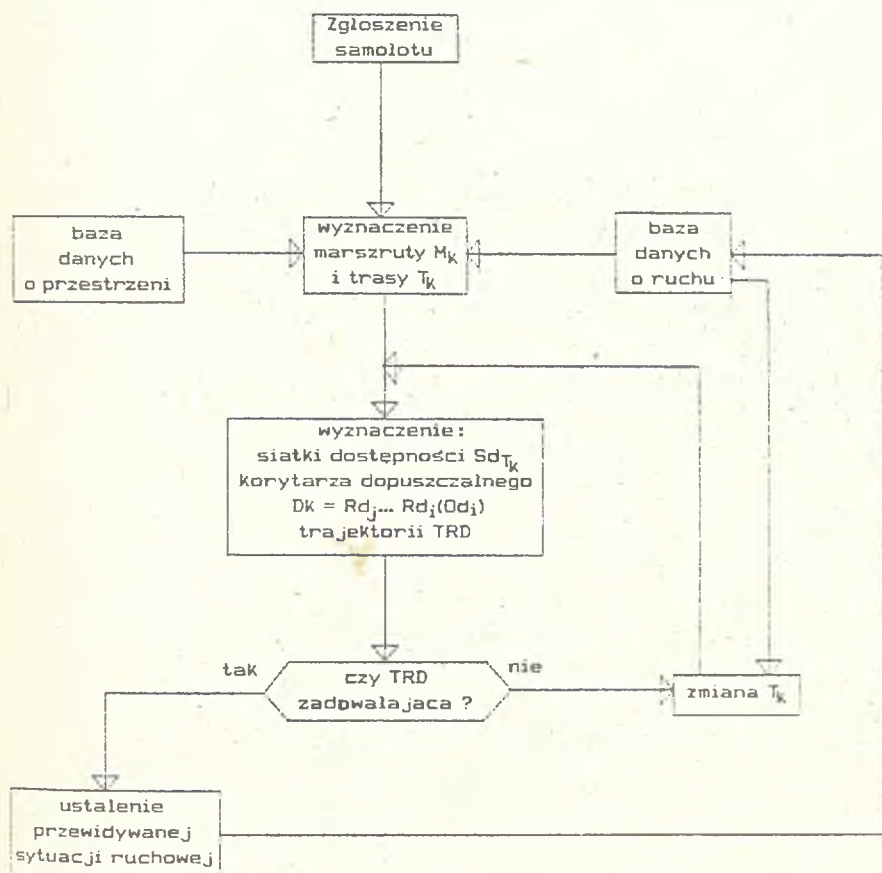
Brak DK na danej trasie lotu oznacza konieczność zmiany T_k , tzn. zmiany poziomu lotu (a więc i węzła) w punkcie kontrolnym, w którym nastąpiło "zatkanie" algorytmu. Proces wyznaczania DK należy wtedy powtórzyć od początku.

Trajektoria dopuszczalna

$$TRD \subset DK$$

jest to bezkolizyjna trajektoria przelotu samolotu przez całą trasę lotu w CTA, w korytarzu dopuszczalnym DK. Duża losowość czynników wpływających na realizację przelotu samolotu przez trasę T_k powoduje konieczność

zdefiniowania TRD w postaci odpowiedniego "stożka bezpieczeństwa" w układzie czas*trasa. Możliwość wpisania takiego stożka zapewniona jest w algorytmie przez przyjęcie odpowiedniego Δt w operacji rzutowania. Schemat ideowy metody wspomagania kontrolowania i rozwiązania sytuacji konfliktowych przez kontrolera ruchu lotniczego przedstawia rys.2. /wykorzystano zdefiniowane pojęcia/. Algorytm metody zrealizowano numerycznie w Instytucie Transportu Politechniki Warszawskiej na mikrokomputerze IBM PC AT (z koprocesorem) [5]. Uzyskane wyniki należy uznać za zadowalające w zakresie właściwego rozwiązywania sytuacji konfliktowych.



Rys.2. Ogólny algorytm wyznaczania bezkolizyjnej trajektorii

przelotu samolotu w CTA

Fig.2. The general diagram of the collision avoidance trajectory assignment for the airplane flight in CTA

LITERATURA

- [1] Arisawa S., Elmaghraby S. "The HUB and WHEEL Scheduling Problems. Part 1. The HUB Scheduling Problem: The Myopic Case. Part 2. The HUB Operational Scheduling Problem /HOSP/: Multiperiod and Infinite horizon, and WHEEL Operation Scheduling Problem /WOP/" *Transportation Science*, Vol. 11, No 2, 1977.
- [2] Dunlay W.J., Horonjeff E. "Stochastic Properties of Enroute Air Traffic - an Empirical Investigation". *Journal of Aircraft*, Vol. 13, No 5, 1976.
- [3] Krzyzanowski G.A., Saładuchin W.A. "Metody optymalizacji procesow uprzedzenia wozdusznym dwizeniem", Transport, Moskwa 1978.
- [4] Kuźmin V.M. "Ob odnoj modeli ocenki kaczlestwa organizaczi UWD". *Metody i modeli analiza procesow UWD*, Leningrad 1981.
- [5] Malarski M. i in. "Wybrane zagadnienia analizy i rozwoju systemow sterowania ruchem i procesami transportowymi w transporcie lotniczym", opracowanie wewnetrzne Inst. Transportu Politechniki Warszawskiej 1987.
- [6] Martin R.H.G., Benoit A. "Accurate aircraft trajectory predictions applied to future en-route air traffic control". 19-th Technical Conference: Handling the air traffic of the longterm future, Dublin 1977.
- [7] Siddique W. "A mathematical model for predicting the number of potential conflict situations at intersecting air routes", *Transportation Science*, Vol. 7, No 2, 1973.
- [8] Wilhelm W.E. "A view of air traffic control in future terminal areas", *Journal of Aircraft*, Vol. 10, No 6, 1973.
- [9] Instrukcja o ruchu kontrolowanym /IL - 4444/, Ministerstwo Komunikacji 1983.

Recenzent: Dr hab.inż.F.Marecki

Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЁТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В УПРАВЛЯЕМОМ
ПРОСТРАНСТВЕ ПОЛЫНИ - СЕКТОРЕ СТА

Резюме

Движение гражданской авиации организовано и управляемо службами контроля авиодвижения. При большом потоке движения много кумулирующихся ошибок ситуации и их ошибок может приводить к конфликтной ситуации. Предлагаемая система автоматизации работы пульты управления авиодвижением в секторе использует операции представляющие ситуацию в движении в системе время - расстояние. Модель системы исследована на микрокомпьютере IBM PC/AT.

AUTOMATION OF FLIGHT TRAFFIC CONTROL SYSTEM IN THE CONTROLLED AREA
OF THE COUNTRY SECTOR STA

Summary

Flight traffic of the civil airlines is organized and controlled by the services of flight traffic control. Many cumulated estimation errors may lead to conflict situation especially in the case of increasing traffic stream. Automation system for the control of the flight traffic in the sector proposed in the paper uses operations for illustration of the traffic situation in the system time \times distance. A model of the system has been investigated on IBM Personal Computer.