ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 58 Nr kol. 1688

Marcin PIĄTEK[1], Marek MALARSKI[2]

MODEL BEZKOLIZYJNEJ TRAJEKTORII LOTU NIETRASOWEGO W PRZESTRZENI KONTROLOWANEJ

Streszczenie. W artykule zaprezentowano koncepcję modelowania bezkolizyjnych trajektorii lotów nietrasowych statków powietrznych w przestrzeni kontrolowanej. Przedstawiona koncepcja ma na celu wykorzystanie wolnych zasobów przestrzeni kontrolowanej do ekonomicznej i bezkolizyjnej realizacji w obecnych i przyszłych strukturach przestrzeni powietrznej. Zaproponowane zostały metody komputerowego modelowania trajektorii oraz graficzne zobrazowanie wyników obliczeń.

MODEL OF SEPARATED FREE ROUTES TRAJECTORY IN CONTROLLED AIRSPACE

Summary. This paper introduces separated direct routes trajectory modeling concept in controlled airspace. Described model will be used for safe and effective flight trajectory prediction in future or contemporary controlled airspace structures. Presented methods of computer modeling were used to resolve one hour of simulated traffic. Graphical resolution presentation was proposed.

1. WPROWADZENIE

W roku 1990 Europejska Konferencja Lotnictwa Cywilnego (ECAC- European Civil Aviation Conference) przyjęła Strategię Obszarową, której głównym zadaniem jest harmonizacja europejskich systemów kontroli ruchu lotniczego, a następnie – do pierwszych lat wieku XXI - ich zintegrowanie. Dla realizacji celów tej strategii został opracowany i zaakceptowany Europejski Program Harmonizacji i Integracji Kontroli Ruchu Lotniczego (EATCHIP - European Air Traffic Control Harmonization and Integration Programme).

Realizacja Koncepcji Elastycznego Użytkowania Przestrzeni Powietrznej (FUA - Flexible Use of Airspace) w Polsce doprowadziła do opracowania systemu zarządzania przestrzenią powietrzną. Przyjęty w Polsce system jest jednolity (narodowy zamiast cywilnego i wojskowego)

W celu zlikwidowania cywilno-wojskowej koordynacji w stosunku do lotów w przestrzeni kontrolowanej poza stałymi trasami lotniczymi wprowadzono procedurę RCA - Reduced Coordination Area. Procedura ta jest stosowana w ściśle określonych rejonach

[1] Wydział Transportu, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel/fax (+48 22) 660 7339
[2] Wydział Transportu, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel/fax (+48 22) 660 7339

przestrzeni powietrznej w okresie zmniejszonej aktywności ruchu wojskowych statków powietrznych. Loty statków powietrznych w kontrolowanym ruchu nietrasowym mogą być obecnie wykonywane w obrębie elastycznych struktur przestrzeni – RCA. W polskiej przestrzeni powietrznej zostało wydzielonych osiem takich stref. Granice strefy RCA01 obejmują całe terytorium Polski, a pozostałych siedem stref dzieli obszar Polski na siedem części.

Kolejnym, długoterminowym skutkiem realizacji Koncepcji Elastycznego Użytkowania Przestrzeni Powietrznej będzie przejście do modelu nietrasowego ruchu lotniczego na terenie wszystkich państw członkowskich EUROCONTROL. Program ten nosi nazwę „Free Routes Airspace" (FRA), a jego wdrożenie planowane jest na lata 2015 - 2020.

Przestrzeń powietrzna kontrolowana, w której odbywa się ruch statków powietrznych objętych analizą, została wydzielona dla potrzeb lotnictwa komunikacyjnego. Ruch statków powietrznych w przestrzeni kontrolowanej odbywa się pod nadzorem naziemnych służb ruchu lotniczego. Służby te sprawują kontrolę nad bezpieczeństwem wykonywania lotów. Przelot statku powietrznego w przestrzeni kontrolowanej poprzedzony jest zgłoszeniem skierowanym do służb naziemnych. Każdy manewr statku powietrznego wykonywany jest na polecenie lub za zgodą kontrolera ruchu lotniczego, który na podstawie posiadanych informacji o wzajemnej bieżącej konfiguracji statków powietrznych zapewnia, by ruch lotniczy odbywał się zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Stosowane są dwie metody sprawowania kontroli ruchu lotniczego:

- radarowa – wykorzystująca urządzenia radiolokacyjne oraz systemy informatyczne na potrzeby płynnego zarządzania ruchem lotniczym,
- proceduralna – oparta na rejestracji przebiegu lotu na podstawie meldunków składanych drogą radiową przez pilota – obecnie wykorzystywana awaryjnie.

Metoda operacyjnego modelowania bezkolizyjnej trajektorii lotu nietrasowego będzie miała zastosowanie podczas sprawowania kontroli radarowej. Bezpieczeństwo ruchu zapewniane jest wówczas poprzez zachowanie odpowiednich separacji pomiędzy jego uczestnikami, które podzielone zostały na pionowe i poziome. Ich wartości uzależnione są od: klasy turbulencji w śladzie aerodynamicznym statków powietrznych, wykonywanych manewrów, klasy przestrzeni powietrznej, warunków meteorologicznych oraz ogólnej sytuacji ruchowej.

Separację pionową uzyskuje się nakazując wykonywanie lotów na określonych w przepisach poziomach lotu (FL - Flight Level) w zależności od magnetycznego kąta trajektorii. Jej wartość wynosi nominalnie: 300m (1000 stóp) dla poziomów lotu poniżej FL290 oraz 600m (2000 stóp) na tym poziomie lub powyżej.

Separacja pozioma w kontroli radarowej uzyskiwana jest poprzez utrzymywanie kierunku i prędkości lotu w taki sposób, aby obrysy lub środki obszarów przedstawiających pozycje statków powietrznych na zobrazowaniu radarowym nie zbliżyły się do siebie na określone odległości. Odległości te uzależnione są od kategorii statku powietrznego i wynoszą 4NM (7400m) dla statków powietrznych tej samej klasy. Minima te są większe dla statków powietrznych różnych kategorii turbulencji w śladzie aerodynamicznym.

Kolejne ograniczenie w ruchu lotniczym kontrolowanym nakłada pojemność sektora kontroli portu lotniczego, czyli maksymalna liczba operacji startu i lądowania, jaką port lotniczy jest w stanie obsłużyć w jednostce czasu. Ograniczenie to wynika z konfiguracji infrastruktury portu lotniczego - układu dróg startowych i dróg kołowania, liczby stanowisk postojowych, pomocy nawigacyjnych dla ruchu lotniskowego i wielu innych czynników.

Obecnie wdrożenie koncepcji „Free Routes Airspace" oraz efektywne wykorzystanie stref RCA ogranicza brak narzędzi wspomagających pracę kontrolera ruchu lotniczego, którego głównym zadaniem jest zapewnianie wymienionych separacji. Prowadzone Europie i USA prace badawcze doprowadziły do stworzenia oprogramowania wczesnego wykrywania

kolizji – MTCD (Medium Term Conflict Detection). Niemniej jednak jego funkcjonalność nie jest wystarczająca do prowadzenia ruchu nietrasowego. Narzędzia te zapewniają jedynie wykrywanie konfliktów i przydzielanie zadania ich rozwiązania odpowiednim służbom, nie pomagają ich natomiast rozwiązywać. Ponadto w Europie nie udało się do dzisiaj zakończyć fazy testów oprogramowania i rozpocząć jego pracy operacyjnej.

2. MODEL BEZKOLIZYJNEJ TRAJEKTORII LOTU NIETRASOWEGO W PRZESTRZENI KONTROLOWANEJ

Opracowany model bezkolizyjnego ruchu lotniczego w przestrzeni kontrolowanej jest próbą wyznaczenie kierunku rozwiązania koncepcji FRA.

Dla zadania operacyjnego wyznaczania trajektorii lotu nietrasowego zdefiniowano pojęcie sektora kontroli planowania operacyjnego. Sektor taki może obejmować Rejon Informacji Powietrznej (FIR - Flight Information Region), kilka sąsiednich FIR lub też tylko część FIR, dla którego w warunkach operacyjnych dokonywana jest kontrola ruchu lotniczego pozwalająca na prowadzenie ruchu nietrasowego (RCA).

Trasa lotu zdefiniowana jest jako ciąg punktów położenia – współrzędnych geograficznych – statku powietrznego.

Na trasie lotu wyznaczamy profil lotu. Profil lotu p-tego statku powietrznego rozumiany jest jako ciąg punktów, w których następuje zmiana jego azymutu, poziomu lotu lub prędkości przelotowej (punkty te określamy jako punkty zmiany parametrów lotu) (1).

$$\left(w(p,i), h(p,i), v(p,i), p, i\right), \tag{1}$$

gdzie: $w(p,i)$ – współrzędne geograficzne położenia p-tego statku powietrznego w przestrzeni w i-tym punkcie zmiany parametrów lotu,

$h(p,i)$ – poziom lotu p-tego statku powietrznego w i-tym punkcie zmiany parametrów lotu,

$v(p,i)$ – prędkość przelotowa p-tego statku powietrznego w i-tym punkcie zmiany parametrów lotu.

Zbiór indeksów punktów zmiany parametrów lotów definiuje (2).

$$I = \{1, 2, ..., i, ..., I\} \tag{2}$$

Na podstawie profilu lotu oraz parametrów opisujących osiągi statków powietrznych poszczególnych typów wyznaczamy trajektorię lotu. Trajektoria lotu rozumiana jest jako ciąg punktów zmiany położenia statku powietrznego w czasoprzestrzeni (3).

$$\left(w(p,t), h(p,t), v(p,t), c(p,t), p, t\right), \tag{3}$$

gdzie: $w(p,t)$ – współrzędne geograficzne położenia p-tego statku powietrznego w przestrzeni w chwili t,

$h(p,t)$ – h-ty poziom lotu p-tego statku powietrznego w przestrzeni w chwili t,

$v(p,t)$ – prędkość przelotowa p-tego statku powietrznego w chwili t,

$c(p,t)$ – prędkość wznoszenia lub zniżania p-tego statku powietrznego w chwili t.

Zbiór chwil czasu planowania operacyjnego definiuje (4).

$$T = \{1, 2, ..., t, ..., T\} \tag{4}$$

Każdemu punktowi trajektorii lotu odpowiada figura czasoprzestrzenna – „otoczenie separacji" (5).

$$O_{SEP}\left(w(p,t),h(p,t),v(p,t),c(p,t),p,t\right) \tag{5}$$

Otoczenie separacji ma kształt bryły o podstawie w postaci zbioru punktów odległych o wartość separacji poziomej dla p-tego statku powietrznego (k-tego typu) od odcinka wyznaczonego punktami (6).

$$\left[\left(w(p,t),h(p,t),p,t\right),\left(w(p,t+1),h(p,t+1),p,t+1\right)\right] \tag{6}$$

Wysokości dolnej i górnej podstawy otoczenia separacji wyznaczają granice separacji pionowej na *h-tym* poziomie lotu z uwzględnieniem manewrów wznoszenia oraz zniżania.

Zbiór indeksów stref stale zabronionych dla lotnictwa komunikacyjnego w przestrzeni sektora planowania wyznacza (7).

$$\boldsymbol{S}_S = \{1,2,...,s_S,...,S_S\} \tag{7}$$

Zbiór stref stale zabronionych o ściśle określonych współrzędnych geograficznych oznaczamy więc $\boldsymbol{O}_S$.

Zbiór indeksów stref czasowo zabronionych dla lotnictwa komunikacyjnego w przestrzeni sektora planowania definiuje (8).

$$\boldsymbol{S}_C = \{1,2,...,s_C,...,S_C\} \tag{8}$$

Zbiór stref czasowo zabronionych o ściśle określonych współrzędnych geograficznych oznaczamy więc $\boldsymbol{O}_C$.

Czas obowiązywania zakazu lotów w strefie czasowo zabronionej definiuje (9) i (10).

$$\tau : \boldsymbol{S}_c \times \boldsymbol{T} \rightarrow \{0,1\} \tag{9}$$

$$\tau(s_C,t) = \begin{cases} 1 - \text{strefa } s_C \text{ jest zakazana w chwili } t \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{10}$$

Relacja przyporządkowująca strefy stale zabronione otoczeniom separacji statku powietrznego przedstawiona jest w (11) i (12).

$$\delta : \boldsymbol{S}_S \times \boldsymbol{O}_{SEP} \rightarrow \{0,1\} \tag{11}$$

$$\delta(p,s_S,t) = \begin{cases} 1 - O_{SEP}\left(w(p,t),h(p,t),p,t\right) \cap O_S(s_S) \neq \Phi \\ 0 - O_{SEP}\left(w(p,t),h(p,t),p,t\right) \cap O_S(s_S) = \Phi \end{cases} \tag{12}$$

Relacja przyporządkowująca strefy czasowo zabronione otoczeniom separacji statku powietrznego przedstawiona jest zależnościami (13) i (14).

$$\varepsilon : \boldsymbol{S}_C \times \boldsymbol{O}_{SEP} \times \boldsymbol{T} \rightarrow \{0,1\} \tag{13}$$

$$\varepsilon(p,s_C,t) = \begin{cases} 1 - O_{SEP}\left(w(p,t),h(p,t),p,t\right) \cap O_C(s_C) \neq \Phi \wedge \tau(s_C,t) = 1 \\ 0 - O_{SEP}\left(w(p,t),h(p,t),p,t\right) \cap O_C(s_C) = \Phi \vee \tau(s_C,t) = 0 \end{cases} \tag{14}$$

Warunek bezkolizyjności trajektorii lotów ze strefami zabronionymi stale i czasowo definiujemy jako (15).

$$\underset{p \in P}{\forall} \underset{t \in T}{\forall} \underset{s_S \in S_S}{\forall} \underset{s_C \in S_C}{\forall} \quad \delta(p,s_S,t) = 0 \wedge \varepsilon(p,s_C,t) = 0 \tag{15}$$

Koszt przelotu p-tego statku powietrznego (k-tego typu) z i-tego do j-tego punktu zmiany parametrów lotu oznaczymy przez $d(p, i, j)$.

Koszt wykonania manewru p-tego statku powietrznego (k-tego typu) pomiędzy i-tym a j-tym punktem zmiany parametrów lotu, będący funkcją jego masy oraz właściwości aerodynamicznych, oznaczymy przez $m(p, i, j)$.

Koszty przelotów oraz osiągi statków powietrznych poszczególnych typów zostaną określone na podstawie bazy danych osiągów statków powietrznych rozwijanej przez EUROCONTROL w ramach projektu BADA (Base of Aircraft Data).

Zmienna decyzyjna dla zadania operacyjnego wyznaczania niekolizyjnych trajektorii lotów nietrasowych dana jest (16).

$$x(p,i,j) = \begin{cases} 1 - p\text{-ty statek pwietrzny leci z } i\text{-tego do } j\text{-tego punktu z niezmiennymi} \\ \quad \text{podstawowymi parametrami lotu} \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{16}$$

Dla tak zapisanego modelu bezkolizyjnej trajektorii lotu nietrasowego przewiduje się zadanie wyznaczania rozwiązania minimalizującego liczbę wykonywanych manewrów i odchylenie trajektorii lotu od prostej z uwzględnieniem krzywizny ziemi.

3. PODSUMOWANIE

Nowe możliwości rozłożenia w czasie i przestrzeni potoku ruchu statków powietrznych mogą zostać wykorzystane pod warunkiem zapewnienia służbom kontroli ruchu lotniczego nowych narzędzi wspomagania pracy. Metoda operacyjnego wyznaczania bezkolizyjnej trajektorii lotu nietrasowego pozwoli na efektywne zarządzanie ruchem lotniczym nietrasowym zarówno w obrębie obecnych struktur przestrzeni powietrznej (RCA), jak i w przyszłym modelu europejskiej przestrzeni powietrznej (FRA). Opracowany model pozwala na:

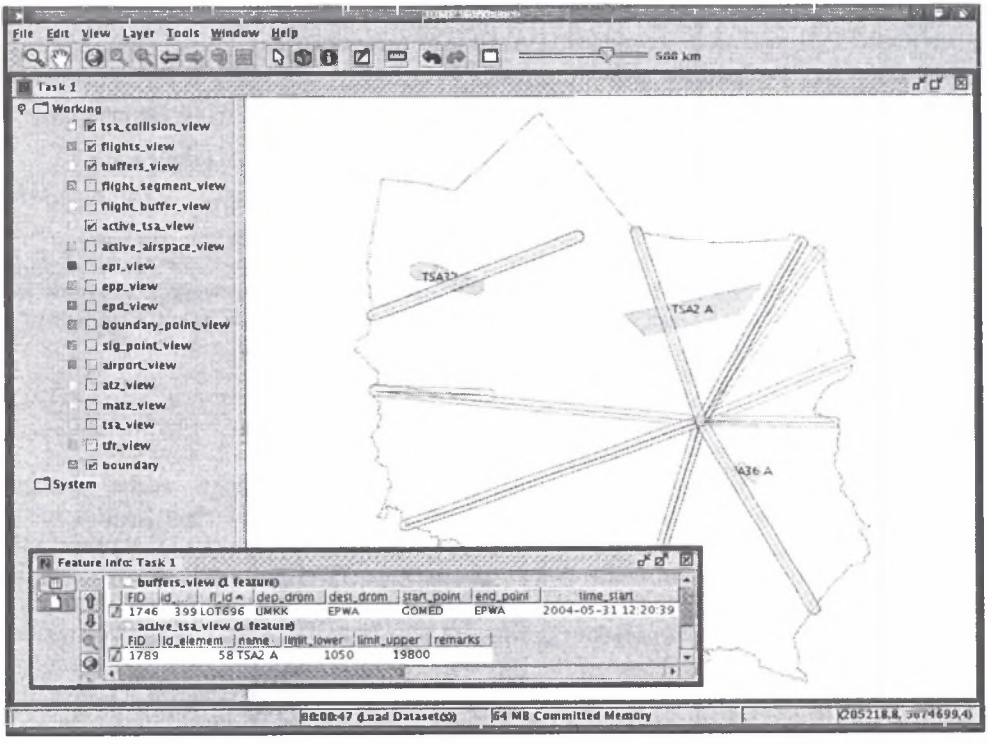
- wyznaczenie bezkolizyjnej trajektorii lotu nietrasowego statku powietrznego,
- zweryfikowanie bezkolizyjności tras lotu statków powietrznych ze sobą,
- sprawdzenie bezkolizyjności trajektorii z elementami przestrzeni powietrznej,
- wyznaczenie innej trajektorii lotu w celu uniknięcia ewentualnej kolizji lub braku możliwości wykonania operacji startu bądź lądowania przy założonych parametrach lotu,
- wyznaczenie wszystkich trajektorii w taki sposób, aby statki powietrzne lądujące na tych samych lotniskach wlatywały w rejony kontrolowane lotnisk z zachowaniem odpowiednich separacji,

– wyznaczenie wszystkich trajektorii o minimalnej łącznej sumie długości lotów przy najmniejszej liczbie zmian parametrów lotów (kierunku, wysokości i prędkości).

Opracowany model pozwoli na zwiększenie bezpieczeństwa ruchu lotniczego kontrolowanego dzięki skróceniu łącznego czasu przebywania statków powietrznych w powietrzu oraz dzięki zmniejszeniu liczby manewrów wykonywanych przez pilotów. Ruch statków powietrznych nie będzie ograniczony wytyczonymi drogami lotniczymi, co pozwoli służbom kontroli ruchu lotniczego obsłużyć większą liczbę lotów, a tym samym zwiększyć przepustowość poszczególnych sektorów kontroli ruchu lotniczego.

Implementacja algorytmów wyznaczających trajektorie lotów wykonana została z wykorzystaniem Systemów Informacji Przestrzennej (GIS - Geographical Information System). Przeprowadzone zostały badania na przedstawionym fragmencie modelu przestrzeni powietrznej oraz wykonana została implementacja algorytmów weryfikacji bezkolizyjności trajektorii lotów z elementami przestrzeni powietrznej.

Wynik działania algorytmu dla rejsów realizowanych w godzinach od 12^{00} do 13^{00} UTC zobrazowany został na rys. 1. Na zobrazowaniu wyróżnione zostały otoczenia trzech kolizyjnych trajektorii lotów. Do wizualizacji danych wykorzystane zostało oprogramowanie JUMP. Do zobrazowania elementów przestrzennych zastosowane zostało odwzorowanie UTM-34 (poprzeczne odwzorowanie Merkatora).



Rys. 1. Graficzna prezentacja wyników obliczeń
Fig. 1. Graphical presentation of calculation results

Czas potrzebny na zweryfikowanie bezkolizyjności trajektorii lotów z wydzielonymi elementami przestrzeni powietrznej okazał się być na tyle krótki (rzędu 10^{-3} sek.), że

proponowany model i metoda mogą zostać wykorzystane do implementacji systemu wspomagania pracy operacyjnej Służb Kontroli Ruchu Lotniczego.

Literatura

1. AIP – Aeronautical Information Publication – Polska, Agencja Ruchu Lotniczego PPL, Warszawa 2000.
2. ATFM Operations – Basic CFMU Handbook, Eurocontrol CFMU, 2002.
3. Gilbo E. P.: Airport Capacity. Representation, Estimation, Optimization, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.1, pp.144–154, 1993.
4. IL-4444 – Instrukcja o ruchu lotniczym kontrolowanym, ULC, Warszawa 2004.
5. Integrated Initial Flight Plan Processing System – Basic CFMU Handbook, Eurocontrol CFMU, 2002.
6. Malarski M., Piątek M.: Bezpieczna trajektoria lotu nietrasowego w ruchu lotniczym kontrolowanym. Prace Naukowe Politechniki Radomskiej, Transport z. 2 (20) pod red. Z. Strzyżakowskiego, Wydawnictwo ITE, ss. 359-364, Radom 2004.
7. Piątek M., Malarski M.: Dynamiczne wyznaczanie trajektorii lotu nietrasowego dla zadania szeregowania samolotów lądujących, , „Badania operacyjne i systemowe 2004 Zastosowania", pod red. Z. Bubnickiego, O. Chryniewicza, J. Węglarza, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, ss. 319-328, Warszawa 2004.
8. Piątek M.: Operacyjne wyznaczanie trajektorii lotu nietrasowego z wykorzystaniem systemów informacji przestrzennej (GIS), „Transport XXI wieku", materiały konferencyjne tom I, ss. 157-164, Warszawa 2004.
9. Piątek M.: Analiza drzewa niezdatności systemu wspomagania pracy służb kontroli ruchu lotniczego. Materiały XXXIII Zimowej szkoły niezawodności „Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń", ss. 419-425, Szczyrk 2005.
10. OGC – http://www.opengis.org, Open GIS Consortium, Wayland, MA.