

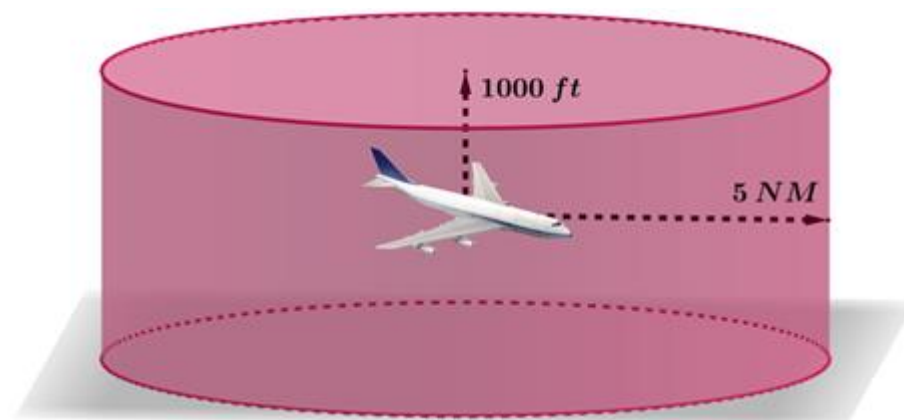
1 Zagadnienie dekonfliktacji

Proces ATM (*Air Traffic Management*) na poziomie sektora przestrzeni powietrznej ma charakter niezwykle dynamiczny, jako że złożone decyzje muszą być podejmowane w stosunkowo krótkim czasie.

Jednym z głównych zadań ATM jest zapewnienie separacji statku powietrznego podczas lotu.

Proces ten znany jest jako CDR (*Conflict Detection and Resolution*) lub proces **dekonfliktacji**.

Podczas lotu jeden statek powietrzny musi być oddalony od drugiego o co najmniej 5 NM w poziomie i 1000 ft w pionie, gdzie NM (*Nautical Mile*) to mila morska równa 1852 metry, a ft to stopa angielska równa ok. 30,5 cm. Daje to w rezultacie ok. 9000 m separacji poziomej i ok. 300 m separacji pionowej. Utworzony w ten sposób cylinder bezpieczeństwa przedstawiono na Rysunku 1.



Rys. 1. Cylinder bezpieczeństwa – separacja pozioma i pionowa.

O parze samolotów naruszającej co najmniej jedno z tych ograniczeń mówi się, że są w konflikcie, przy czym można mówić odpowiednio o konfliktach poziomych i pionowych.

Proces CDR odbywa się na kilku różnych etapach. Najpierw ma on miejsce na etapie planowania lotów. Ten proces znany jest jako dekonfliktacja strategiczna i odbywa się jeszcze przed startem samolotów. Kolejny etap to dekonfliktacja taktyczna, która ma miejsce podczas przelotów statków powietrznych przez obręb jednego sektora i obejmuje zwykle czas od pięciu do trzydziestu minut przed wystąpieniem konfliktu. Ostatnim etapem jest unikanie kolizji, mające na celu rozwiązanie nieuchronnych konfliktów w przedziale czasu zwykle mniejszym niż 1 minuta. Warto dodać, że zatłoczenie przestrzeni powietrznej wpływa również na inne segmenty ATM, takie jak ruch na lotniskach, który jest obecnie jednym z wąskich gardeł systemów ATM.

Proces dekonfliktacji taktycznej można więc traktować jako problem poszukiwania rozwiązania gwarantującego utrzymanie wymaganej separacji pomiędzy statkami powietrznymi w obrębie sektora. Aby to osiągnąć, trajektorie statków powietrznych (zawarte w bieżących planach lotu) mogą być odpowiednio korygowane, przy uwzględnieniu konkretnych aspektów operacyjnych, które najbardziej wpływają na dozwolone zmiany trajektorii. Możliwe do wykonania manewry są zazwyczaj podzielone na trzy typy: zmiany prędkości (przyspieszanie lub zwalnianie), zmiany kąta kursu (odchylenie w prawo lub w lewo) lub zmiany pionowe (zmiana poziomu lotu), przy czym wszystkie te manewry podlegają pewnym ograniczeniom operacyjnym.

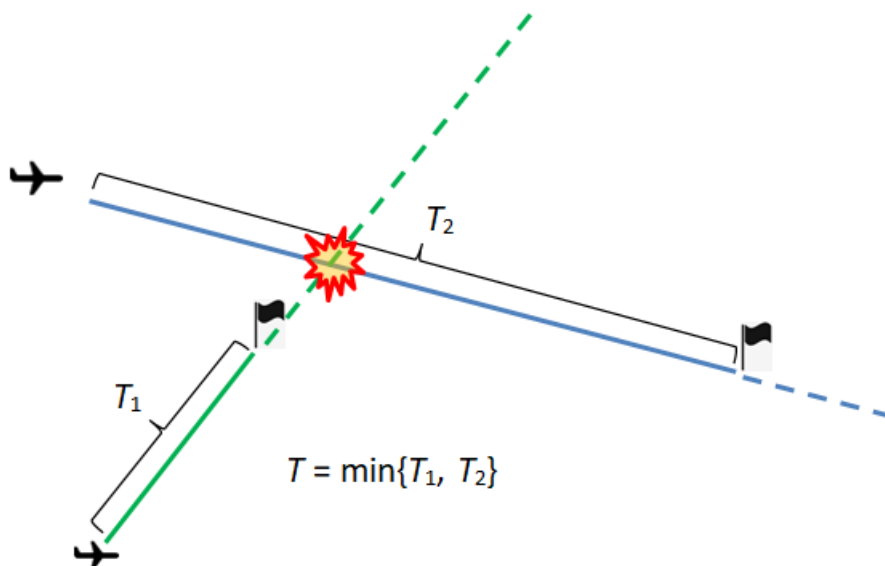
2 Analityczne metody wykrywania konfliktów

W fazie przelotu statek powietrzny wykorzystuje zwykle jeden ze skończonej liczby poziomów lotu. Dlatego też dekonfliktację taktyczną przeprowadza dla wszystkich statków powietrznych przemieszczających się na jednym, tym samym poziomie lotu. Eliminuje to potrzebę rozwiązywania konfliktów pionowych.

W bazowej procedurze wykrywania konfliktów trajektoria lotu każdego statku powietrznego modelowana jest zwykle za pomocą liniowych funkcji czasu, czyli zakłada się, że ruch statku powietrznego jest jednostajny prostoliniowy.

Procedury wykrywania konfliktu między parą statków powietrznych o znanych pozycjach początkowych oraz określonych wektorach prędkości zebrane są w załączonym artykule.

Należy podkreślić, że w większości metod wykrywania konfliktów zakłada się, że statki powietrzne wykonują lot prostoliniowo, bez wykonywania jakichkolwiek manewrów. Wykrywa się więc potencjalne konflikty dowolnie odległe od przyjętych do obliczeń pozycji obu statków powietrznych. W szczególności sygnalizowane mogą być w ten sposób również konflikty, które w rzeczywistości nie wystąpią, gdyż przynajmniej jeden ze statków powietrznych wcześniej wyląduje. Sytuację tę obrazuje Rysunek 2.



Rys.2 Przykład konfliktu wykrytego, choć w rzeczywistości nie występującego

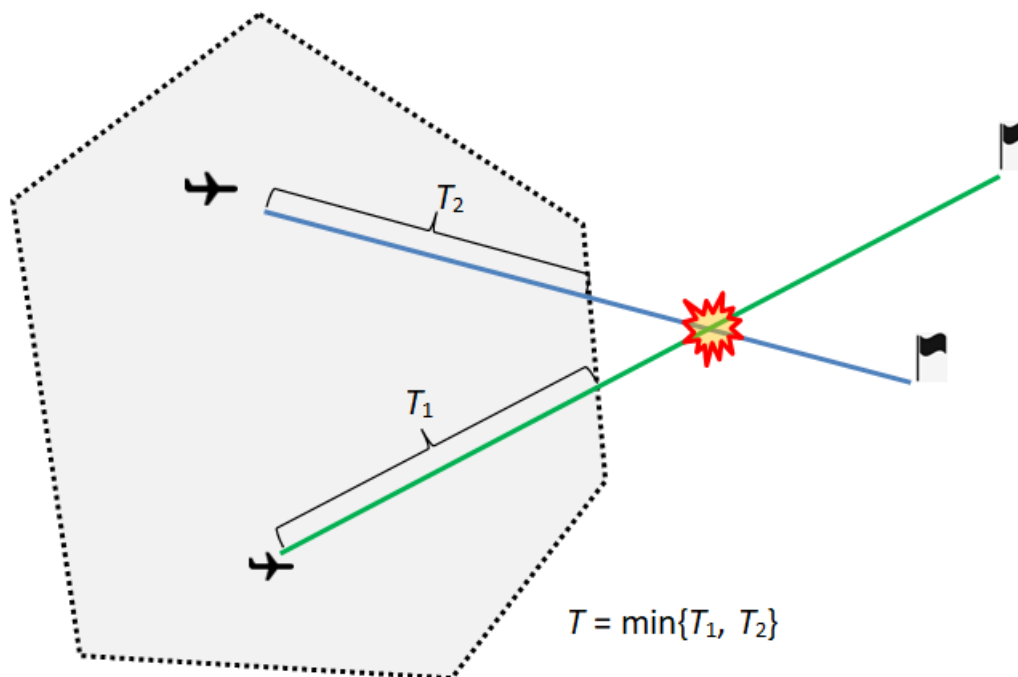
Uzasadniona jest więc modyfikacja procedury, która uwzględniałaby dodatkowo pewien założony horyzont czasowy T , w którym potencjalne ryzyko wystąpienia konfliktu jest realne. W najprostszej wersji przyjęty horyzont czasowy może wynikać wprost z terminu lądowania, tego statku powietrznego, który planowo kończy lot wcześniej.

3 Detekcja konfliktów w dekonfliktacji taktycznej

Do wykrywania potencjalnego konfliktu dla pary samolotów na poziomie taktycznym (w sektorze) może być jedna z metod analitycznych, dla której dane wejściowe stanowią faktyczne

pozycje i wektory prędkości obu statków powietrznych pozyskane z systemów dozoru oraz bieżące plany lotu (być może różne od planów złożonych).

Z racji swoich kompetencji służba ATC (Air Traffic Control) jest odpowiedzialna za bezpieczeństwo lotów jedynie we własnym sektorze, dlatego w wykrywaniu konfliktów na poziomie taktycznym istotny jest dobór odpowiedniego horyzontu czasowego T . Horyzont ten powinien z jednej strony uwzględniać rozmiary sektora (a precyzyjniej – czas jaki pozostał statkom powietrznym do jego opuszczenia) oraz ewentualne plany lądowania statku powietrznego wewnątrz sektora. Na Rysunku 3 pokazano przykładową sytuację konfliktu poza sektorem służby ATC.



Rys.3 Przykład konfliktu poza sektorem kontrolowanym przez służbę ATC

Horyzont T da się wyznaczyć analitycznie na podstawie aktualnej pozycji i ustalonego ze służbami ATC wektora prędkości statku powietrznego, lotniska docelowego (zapisanego w bieżącym planie lotu) i współrzędnych granic sektora.

W celu wykrycia potencjalnego konfliktu w całym sektorze należy powtórzyć tę procedurę dla każdej pary statków powietrznych, które w danej chwili przebywają w kontrolowanym sektorze. Oczywiście złożoność takiej procedury w najprostszym przypadku - lotów po prostej jest rzędu $O(n^2)$.

4.Unikanie konfliktów w dekonfliktacji taktycznej

4.1. Wektorowanie

Idea procesu dekonfliktacji, CDR, zakłada nie tylko wykrywanie potencjalnych konfliktów w sektorze, ale również wdrożenie procedury ich uniknięcia. Jedną z czynności, które podejmuje kontroler w sytuacji zagrożenia konfliktem statków powietrznych (ale również, gdy na przykład trzeba obejść rejon z niesprzyjającymi warunkami meteorologicznymi) - jest wektorowanie, czyli przekazywanie pilotowi określonych kursów, które pozwolą utrzymać bezpieczeństwo lotu. Gdy statkowi powietrznemu podaje się początkowy wektor odchylający go od uprzednio nakazanej trasy, to pilot powiadamiany jest o celu, w jakim dokonana została zmiana trasy oraz o granicy, do której zmieniony wektor będzie obowiązywał. Jeśli to możliwe kontroler naprowadza statek powietrzny ponownie na jego zamierzony lub uprzednio wyznaczony tor lotu, w granicach kontrolowanego sektora.

Na użytek tego projektu terminem – wektorowanie - obejmujemy również polecenia kontrolera ATC dotyczące zmiany prędkości podróżnej i poziomu lotu, które to działania wchodzą do zbioru operacji dających możliwość unikania konfliktów i zachowania bezpieczeństwa w sektorze. Jest to tym bardziej uzasadnione, że każda z tych operacji wpływa na zmianę tego samego wektora - aktualnego wektora prędkości podróżnej statku powietrznego.

Wektorowanie prowadzone przez kontrolera w sposób klasyczny, na podstawie analizy wizualizowanych danych z systemów dozoru, jest zadaniem trudnym, absorbującym, przez co narażonym na błędy ludzkie.

Uzasadnione jest wspomaganie procedury wektorowania prowadzonej przez kontrolera ATC w sytuacji występującego zagrożenia konfliktem statków powietrznych w sektorze.

4.2. Metoda zbioru manewrów

Jedną z metod dekonfliktacji taktycznej bazuje na możliwości wykorzystywania nie jedynie drogi narzuconej w planie lotu, a całego zbioru dróg alternatywnych wyznaczonych dla każdego statku powietrznego.

W metodzie tej proces dekonfliktacji polega na wskazaniu każdemu ze statków powietrznych dokładnie jednej ze zbioru przypisanych do niego dróg alternatywnych tak, by w ten sposób zagwarantowane było bezpieczeństwo ruchu w określonej części przestrzeni powietrznej.

Dla modelu sektora wolnej przestrzeni, zamiast mówić o zbiorze dróg alternatywnych, lepiej posługiwać się zbiorem dopuszczalnych manewrów. Do każdego statku powietrznego przypisana może być bowiem skończona liczba manewrów, z których – w przypadku zagrożenia – może być wybrany ten, który dzięki odpowiedniemu wektorowaniu, pozwoli niebezpieczeństwu zapobiec.

Przyjmijmy dla uproszczenia, że każdemu statkowi powietrznemu przypisano m alternatywnych tras przelotu. Wyszukiwanie bezpiecznej trasy dla wszystkich statków powietrznych jest zadaniem, które ma naturę kombinatoryczną. Do reprezentowania potencjalnego rozwiązania takiego zagadnienia można zastosować n -elementowy wektor, którego i -ta pozycja zawierać będzie informację o numerze jednego z m manewrów wybranych dla i -tego statku powietrznego.

Każdy unikalny wektor skonstruowany w ten sposób nazywać będziemy wariantem doboru manewrów.

Chociaż sprawdzenie, czy dla danego wariantu doboru manewrów występuje jakikolwiek konflikt między statkami powietrznymi jest procedurą o złożoności wielomianowej (dla przypadku statków powietrznych poruszających się po prostej jest to złożoność $O(n^2)$), to należy pamiętać, że liczba wszystkich wariantów doboru manewrów dla n statków powietrznych wynosi m^n . Sprawdzenie wszystkich wariantów (czyli użycie metody pełnego przeglądu rozwiązań) z zamiarem zagwarantowania bezpieczeństwa przestrzeni powietrznej jest więc, z obliczeniowego punktu widzenia, niepraktyczne.

4.3. Tablica konfliktów dla sektora wolnej przestrzeni

Wygodną metodą reprezentowania bieżącej sytuacji w sektorze jest tzw. tablica konfliktów. Składa się ona z $(m \times n)$ wierszy i $(m \times n)$ kolumn. W wierszach i kolumnach reprezentowane są wszystkie dopuszczalne manewry wszystkich statków powietrznych znajdujących się w danej chwili w sektorze. Na przecięciu danego wiersza i kolumny znajduje się wartość binarna, za pomocą której wyraża się fakt występowania albo braku ryzyka konfliktu dla pary statków poruszających się po drogach wynikłych z zastosowania odpowiednich manewrów. Oczywiście wartość dla pary kolumna-wiersz odpowiadającej temu samemu statkowi powietrznemu zawsze wskazuje na brak konfliktu, gdyż statek powietrzny nie może wejść w konflikt z samym sobą. Cała tablica jest nadmiarowa do reprezentowania wszystkich konfliktów, wystarczy wykorzystać jej część, co pokazuje przykładowa Tablica 1.

Zakładać będziemy, że binarne wartości do tablicy dostarcza moduł obliczeniowy, który realizuje bazową procedurę wykrywania konfliktu (z uwzględnieniem horyzontu T) dla każdej pary statków powietrznych i przypisanych im manewrów na bieżących danych dostarczanych z systemu dozoru.

		Samolot 1			Samolot 2			Samolot 3		
		Zakręt o 15°	Lot na wprost	Zakręt o 355°	Zakręt o 15°	Zakręt o 25°	Zakręt o 300°	Zakręt o 10°	Lot na wprost	Zakręt o 275°
Samolot 1	Zakręt o 15°	-	-	-	0	1	0	0	1	0
	Lot na wprost	-	-	-	1	0	0	1	1	0
	Zakręt o 355°	-	-	-	1	0	1	0	0	1
Samolot 2	Zakręt o 15°	-	-	-	-	-	-	0	1	0
	Zakręt o 25°	-	-	-	-	-	-	0	0	0
	Zakręt o 300°	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Samolot 3	Zakręt o 10°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lot na wprost	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zakręt o 275°	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 1. Przykładowa tablica konfliktów dla trzech samolotów i trzech dopuszczalnych manewrów dla każdego z nich (1 oznacza konflikt, 0 – brak konfliktu)

4.4. Klasyczny system wspomagania wektorowania

Tablica konfliktów skonstruowana w sposób opisany w punkcie 4.3 jest punktem wyjścia w procedurze poszukiwania rozwiązania (wariantu manewrów), który byłby dopuszczalny. W tym celu należy sformułować odpowiedni problem programowania matematycznego.

Ze względu na konieczność użycia w problemie zmiennych decyzyjnych o charakterze dyskretnym (za pomocą zmiennych binarnych wskazywać będziemy wybrany wariant manewru statku powietrznego), konieczne jest użycie metod rozwiązywania problemów *Mixed Integer Programming* (MIP).

Do rozwiązania problemu można więc zastosować solver - ILOG CPLEX.

Jeśli istnieje rozwiązanie problemu unikania konfliktu istnieje, zastosowany solver zwróci odpowiedni wektor wartości, który stanowi gotową instrukcję wektorowania wszystkich statków powietrznych w sektorze.