

FUNKCJE REKONFIGURACJI LOTU – PRÓBA POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA LOTU W PRZYPADKU DZIAŁAŃ O CHARAKTERZE TERRORYSTYCZNYM

Mariusz Krawczyk

Instytut Lotnictwa

Tomasz Rogalski

Politechnika Rzeszowska

Streszczenie

W pracy zaprezentowano główne założenia projektu europejskiego SOFIA, podejmującego próbę zbudowania systemu umożliwiającego automatyczne sprowadzenie samolotu na ziemię w przypadku wystąpienia na jego pokładzie działań o charakterze terrorystycznym. Podana została ogólna struktura systemu oraz omówiono przyjęte sposoby jego implementacji na czterech platformach badawczych: trzech symulatorach oraz dwóch samolotach: I23 Manager oraz D42 Diamond. Kolejno przedstawiono ogólne założenia planu badań oraz zaprezentowano i omówiono wybrane wyniki prób w locie.

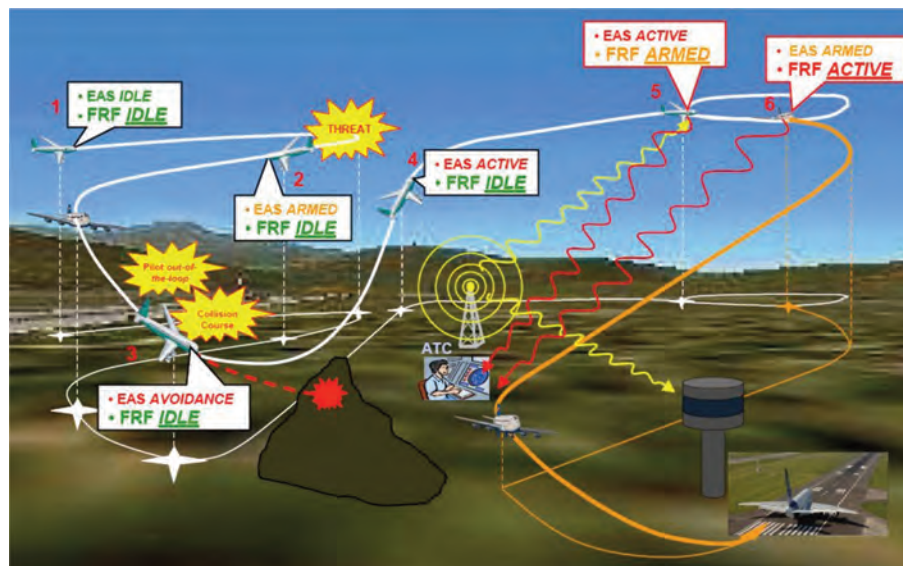
1. WSTĘP

Zakończony w 2009 roku Projekt Ramowy „Safe Automatic Flight Back and Landing of Aircraft” o akronimie SOFIA skutecznie wpisuje się w najnowsze trendy rozwojowe awioniki, w tym przypadku prowadzące do poprawy bezpieczeństwa wykonywania lotów. W SOFIA precyzyjnie wyznaczono obszar badawczy, koncentrując się wyłącznie na opracowaniu systemu zapobiegającego, czy też uniemożliwiającego uprowadzenie samolotu w wyniku działania o charakterze terrorystycznym.

Koncepcja systemu Flight Reconfiguration Function (FRF), której ogólne założenia pokazano na rys. 1 zakłada, że po aktywacji następuje kolejno wykreowanie nowego, optymalnego planu lotu w przestrzeni 4D, a następnie jego skuteczna, w pełni autonomiczna egzekucja, prowadząca w konsekwencji do bezpiecznego lądowania na wyznaczonym przez system lotnisku. Określenie „pełni autonomiczne” w praktyce oznacza całkowitą eliminację pilota w procesie sterowania lotem, polegającą na odwracalnym odłączeniu aktywnego i biernego Human Machine Interface HMI, w tym podstawowych organów sterowania. Działanie systemu FRF uważa się za zakończone po odkołowaniu do wydzielonej strefy postoju zlokalizowanej na lotnisku docelowym.

Dla wyjaśnienia koncepcji systemu FRF nie sposób nie wspomnieć o innych, ściśle z nim związanych systemach „bezpieczeństwa” jakie w licznych projektach badawczych postuluje się instalować po 2020 roku na pokładach samolotów. Są to w szczególności Threat Assessment, Resolution and Management System (TARMS) dokonujący walidacji zagrożenia oraz aktywowany przez niego Emergency Avoidance System (EAS) sterujący samolotem podczas lotu do tzw.

strefy bezpiecznej (HP – Holding Pattern) wyodrębnionej w przestrzeni powietrznej. Nie przesądzać jednoznacznie jak w przyszłości FRF wpisze się w system awioniczny samolotu, a w szczególności czy TARMS i EAS w ogóle będą stosowane w lotnictwie oraz czy FRF będzie aktywowany/dezaktywowany przez TARMS czy też inny system walidujący zagrożenie można stwierdzić, że funkcją FRF jest bezpieczne sprowadzenie na ziemię samolotu poczynając od HP, a kończąc na strefie postojowej lotniska.



Rys. 1. Idea działania systemu FRF (własność FP6-2005-CT-2006-030911)

Proces kreowania awaryjnego planu lotu (FP) przez FRF z założenia może odbywać się autonomicznie na pokładzie samolotu, bądź też alternatywnie w centrum kontroli ruchem lotniczym (ATC) celem przekazania go łączem radiowym do FRF. W przypadku gdy FP generowany jest autonomicznie przez FRF może on być przekazany (ale nie musi, np. w sytuacji awarii lub braku łączności radiowej) do wiadomości ATC. Ostatecznie więc mamy do czynienia z trzema następującymi scenariuszami pracy FRF:

- Scenariusz 1A – FP generowany autonomicznie przez FRF nie jest przekazywany do ATC,
- Scenariusz 1B – FP generowany autonomicznie przez FRF jest przekazywany do ATC,
- Scenariusz 2 – FP generowany przez ATC przekazywany jest do FRF.

W przypadku scenariusza 2 przekazany przez ATC FP walidowany jest przez FRF z pkt. widzenia jego wykonalności – w przypadku wyniku pozytywnego FRF przechodzi do wykonania FP, odwrotnie wynik negatywny implikuje konieczność generowanie autonomicznego FP przez FRF, który z kolei przekazywany jest zwrótnie do ATC.

2. FRF

2.1. Struktura i zadania FRF

FRF jest złożonym deterministycznym automatem skończonym, którego „nastawy” i przejścia między sub funkcjami, realizowane przez FRF Decision Centre Function, zależą od aktualnych parametrów i faz lotu. Strukturalnie, w skład FRF wchodzi następujące sub funkcje:

- FRF Decision Centre Function (DCF), funkcja nadrzędna, zarządzająca strukturą FRF;
- Health Monitoring System Interface (HMS), funkcja monitorująca stan techniczny systemów samolotu, w celu określenia, a następnie wprowadzenia ewentualnych limitów warunków eksploatacyjnych;
- Route Planning and Static Flight Monitoring (PLN), funkcja wyznaczająca FP oraz sprawdza-

jąca możliwość jego wykonania z pkt. widzenia braku konfliktów z terenem i strefami, w których lot jest niedozwolony oraz ograniczeń jakie na projektowaną trajektorię nakładają własności dynamiczne samolotu;

- Guidance Management and Leg Management (GLM), funkcja występująca w systemie FRF przewidzianym do implementacji na samolocie bez FMS, nadzorująca wykonanie FP oraz wypracowująca sygnały sterujące dla systemu automatycznego sterowania;
- Route Replanning (RPL), funkcja umożliwiająca zmianę FP w trakcie jego realizacji;
- Dynamic Flight Monitoring (DFM), funkcja nadzorująca wykonywanie FP, kontrolująca zużycie paliwa oraz czas, w celu ewentualnego uruchomienia RPL;
- External Communication (COM), funkcja zarządzająca wymianą danych pomiędzy FRF, a innymi systemami samolotu i naziemnymi, w szczególności przekazująca do ATC FP;
- Display Management (DSM), funkcja zarządzająca HMI, odłączająca organy sterowe, degenerująca wskazania na przyrządach pokładowych, etc;
- uzupełnione przez następujące bazy danych:
- statyczne: terenu, lotnisk wraz z pomocami nawigacyjnymi, stref niedozwolonych, BADA – własności dynamicznych samolotu (Base of Aircraft Data);
- dynamiczne: planu lotu, ruchu lotniczego, pogody.

2.2. Implementacja FRF



Rys. 2. Zabudowa systemu FRF i doświadczalnego systemu sterownia na samolocie I23 Manager

Z założenia FRF nie jest systemem sterowania, co oznacza, że jego implementacja możliwa jest wyłącznie na samolotach posiadających system sterowania lotem umożliwiający w szczególności wykonanie manewru automatycznego lądowania. FRF w istocie jest algorytmem, którego implementacja do konkretnego systemu awionicznego samolotu i ATC musi uwzględniać specyfikę tychże systemów.

Podstawowym zagadnieniem jakie należy rozwiązać w procesie integracji FRF z systemem awioniczny samolotu jest wybór miejsca alokacji FRF jako kodu. Naturalnym i najłatwiejszym rozwiązaniem wydaje się osadzenie algorytmów FRF w urządzeniach istniejących, typu autopilot, czy FMS, biorących czynny udział w procesie automatyzacji lotu. Nie wyklucza to wszakże zastosowania FRF jako oddzielnego urządzenia zintegrowanego z systemem awioniczny za pomocą magistrali danych. Każde w wymienionych rozwiązaniach ma oczywiste wady i zalety. Rozwią-

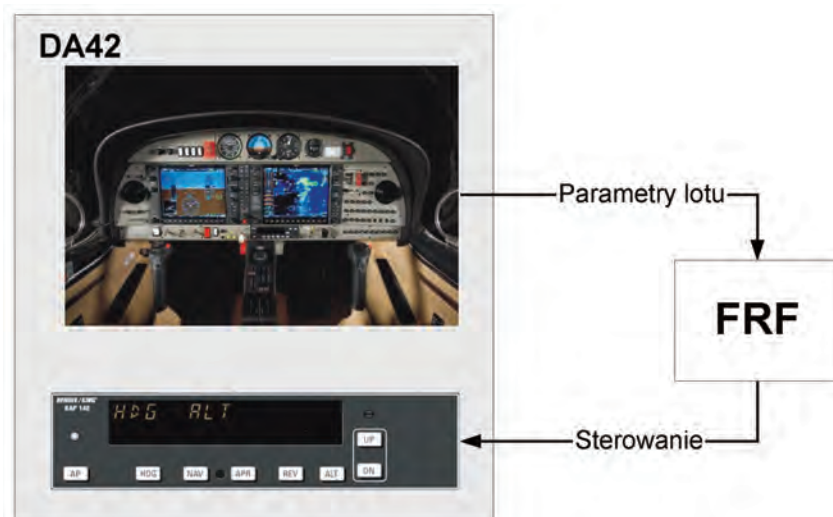
zanie pierwsze stanowi alternatywę wyłącznie dla producentów urządzeń, w których planuje się implementację FRF. Rozwiązanie drugie natomiast pozwala na większą unifikację kodu kosztem konieczności opracowania większej ilości mechanizmów dostosowujących typu: osadzania FP w FMS, przejęcia kontroli nad autopilotem, etc.

Najistotniejszym problemem jednak, jaki należy rozwiązać w procesie integracji systemu awionicznego, w skład którego wchodzi FRF, jest zapewnienie możliwości rozłączenia HMI w przypadku przejęcia zarządzania samolotem przez FRF. W projekcie SOFIA nie rozważano szczegółów takiej operacji ograniczając się do konkluzji, że z technicznego pkt. widzenia statkami powietrznymi najbardziej podatnymi na tego rodzaju rozwiązania są samoloty wyposażone w system sterowania pośredniego i zintegrowany glass cockpit.

Implementacja modelowego FRF na czterech następujących platformach badawczych: symulatorze ATC ASF (Deutsche Flugsicherung GmbH) połączonym z symulatorem lotu ATENA (Galileo Avionica), symulatorze AirLab™ (THALES Avionics), samolocie I23 Manager (Instytut Lotnictwa) oraz samolocie DA42 (Diamond Aircraft Industries), została zaplanowana i przeprowadzona przez ich właścicieli.

W przypadku trzech symulatorów wykorzystanych w projekcie SOFIA implementacja FRF polegała na modyfikacji ich oprogramowania o algorytmy FRF, a także na zapewnieniu możliwości wymiany danych pomiędzy symulatorem lotu ATENA, a symulatorem ATC ASF oraz samolotem D42 Diamond i ATC.

W samolocie I23 Manager do implementacji FRF zaprojektowano, a następnie wykonano na bazie PC-104 pokazany na rys 2 komputer, który kolejno zintegrowano z pokazaną na rys. 2 badawczą instalacją autopilota. W celu zapewnienia efektywnej możliwości wymiany oprogramowania i nastaw autopilota, na komputerze PC-104, poza algorytmami FRF, zaimplementowano także algorytmy autopilota (moduł autopilota został zdemontowany). Ostatecznie w skład zmodyfikowanego doświadczalnego układu sterowania po weszły: komputer PC-104 z integralnym modułem GPS, trzy serwomechanizmy (lotek, steru wysokości i trymera steru wysokości), panel sterowania autopilota oraz urządzenia pomiaru parametrów lotu (AHRS, CDA, magnetometr).



Rys. 3. Idea zabudowy systemu na samolocie D42 Diamond

W przypadku samolotu D42 Diamond implementacja FRF (rys. 3) polegała natomiast na osadzeniu oprogramowania na komputerze typu Laptop, połączonym z Systemem Garmin G1000 (dostarczającego do FRF parametry lotu) oraz autopilotem Bendig King KAP 140. Dodatkowo samolot został wyposażony w łącze radiowe umożliwiającego przekazanie parametrów lotu

(w tym pozycji) do systemu ATC Phoenix jaki na czas trwania badań zainstalowany został na lotnisku.

2.3. Zasady kreowania FP

W zależności od przyjętego scenariusza, FP tworzony jest przez sub funkcję Route Planning and Static Flight Monitoring pokładowego FRF lub alternatywnie FRF implementowanego w centrum przy ATC. Podczas obliczeń FP samolot sterowany przez EAS znajduje się wewnątrz HP. Idea tworzenia FP zakłada korzystanie z ogólnie dostępnych dróg lotniczych oraz procedur podejścia albo zakłada lot bezpośrednio w kierunku lotniska docelowego (rozwiązanie domyślne w scenariuszu 1A i 1B). W każdym z wymienionych przypadków FP tworzą tzw. punkty drogi (WP), opisane w przestrzeni 4D, co oznacza, że poza położeniem geograficznym i wysokością, WP opisuje dodatkowo zaplanowany czas jego osiągnięcia. Pierwszym WP jest środek HP, a ostatnim miejsce postojowe na terenie wybranego lotniska, na którym panują odpowiednie warunki pogodowe oraz umożliwiające przyjęcie samolotu, a więc charakteryzującego się właściwym wyposażeniem pomocy nawigacyjnych, odpowiednią długością i nawierzchnią pasa startowego, zlokalizowanego w możliwie dużej odległości od aglomeracji miejskich oraz jak najmniejszym aktualnym ruchem lotniczym. Głównym kryterium wyboru lotniska docelowego jest odległość.

Dest. ICAO: EPKR Distance to TCP: 24 381,83 Bearing to TCP: 14,05 Current State: ACTIVE Guid. ms: 20 Max Wind: 20

Current Time: 6:21:26 Time to TCP: 0:07:54 Lateral Dev.: 20 341,85 Initialize Reconfigurator Cancel Threat

Time Deviation: 0:10:12 Turn Dir. at TCP: LEFT Vertical Dev.: -939,57 Reconfigure with Negotiator Reconfigure without Negotiator Reset

wp	Latitude	Longitude	Altitude	Course	G Speed	V Speed	Time	Fuel
1	49°55'00"N	021°10'31"E	800	140,00	63,61	0,00	6:21:21	125,00
2	49°54'45"N	021°11'15"E	891	118,10	46,30	3,41	6:21:42	124,77
3	49°45'45"N	021°24'45"E	1748	135,82	46,81	3,01	6:29:57	119,79
4	49°43'45"N	021°28'45"E	1433	127,67	51,44	-2,69	6:31:54	119,30
5	49°41'45"N	021°40'15"E	665	104,96	51,44	-2,69	6:36:31	118,14
6	49°41'38"N	021°41'12"E	593	100,86	51,44	-2,69	6:36:54	118,05
7	49°41'04"N	021°43'36"E	433	110,00	34,00	-1,78	6:38:24	117,68

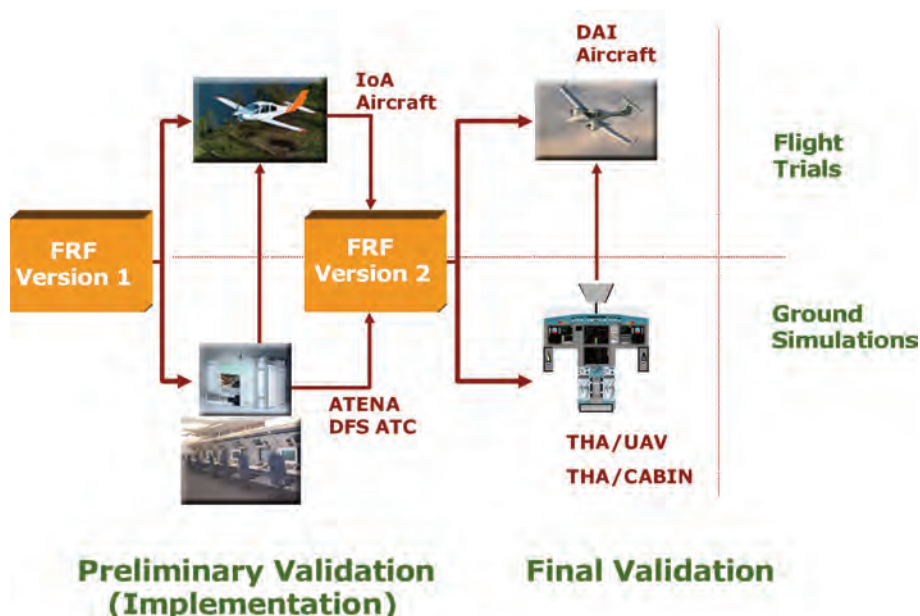
Altitude: 2500 Distance: 35747
 Validating Flight Plan
 Flight Plan is valid
 A valid reconfiguration solution has been found
 Applying Flight Plan
 Guidance Activity Loop started
 <== Flight Reconfiguration completed

Rys. 4. Plano lotu wygenerowany przez FRF

Dobór WP składających się na FP wykonywany jest przez FRF w sposób automatyczny, przy zachowaniu dwóch zasad. Pierwsza stanowi, że trajektoria lotu wolna od konfliktów z terenem nie może przebiegać przez strefy: zakazane, ograniczone oraz niebezpieczne – wg AIP (Aeronautical Information Publication), a także wokół sklasyfikowanych przeszkód. Druga uwzględnia własności dynamiczne samolotu jako więzy nałożone na projektowaną trajektorię, w postaci prędkości lotu, w szczególności wznoszenia, opadania oraz przelotu. Przykładowy FP pokazano na rys. 4.

3. BADANIA W LOCIE

3.1. Plan badań



Rys. 5. Struktura badań wykonanych w projekcie SOFIA (własność FP6-2005-CT-2006-030911)

W programie SOFIA badania systemu FRF zrealizowano wg scenariusza pokazanego na rys. 5.

W początkowej fazie opracowany system FRF poddany został wstępnym badaniom symulacyjnym na połączonych ze sobą symulatorze lotu ATENA i symulatorze ATC. W trakcie badań symulowane były wszystkie przewidziane scenariusze działania systemu (1A, 1B, 2) celem stwierdzenia poprawności działania oprogramowania oraz określenia wpływu jaki samolot sterowany za pośrednictwem FRF stanowi dla ATC.



Rys. 6. Scenariusz wstępnych prób w locie

Kolejno, pod nadzorem EASA, wykonane zostały wstępne badania w locie na samolocie I23 Manager. Realizowany scenariusz 1A działania systemu zakładał, że podczas rejsowego lotu z EPRJ na lotnisko EPNL poprzez pkt nawigacyjny ARSEK, na wysokości pkt nawigacyjnego TIREN zachodzi próba wrogiego przejęcia samolotu. Powoduje to aktywację systemu EAS, który prowadzi samolot do strefy bezpiecznej (HP) zlokalizowanej wokół pkt nawigacyjnego LUXAR. Kolejno wewnątrz HP po uzbrojeniu, system FRF wyznacza FP na najbliższe lotnisko (hipote-

tycznie EPKR), a następnie po przejściu w stan aktywności steruje lotem wg zaplanowanego FP. W scenariuszu HP oraz strefę niedozwoloną EPA4 rozmieszczono w taki sposób, aby system FRF nie miał możliwości wygenerowania planu lotu bezpośrednio z HP na lotnisko EPKR. Dlatego też oczekiwane było jedno z dwóch, pokazanych na rys. 6 rozwiązań FP(FRF1 lub FRF 2).

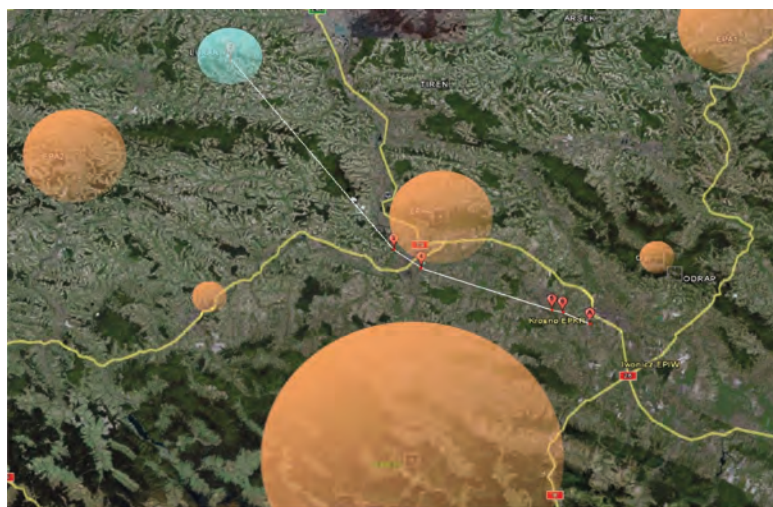
W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych otrzymano wolny od błędów system FRF Version 2 (rys. 5), który posłużył do wykonania dwóch cykli badań finalnych na symulatorze AirLab™ oraz samolocie D42 Diamond, w trakcie których zostały zrealizowane wszystkie hipotetyczne scenariusze działania systemu FRF (1A, 1B, 2).

3.2. Omówienie przebiegu badań w locie

W ramach wstępnych prób w locie przeprowadzono na samolocie I23 Manager, operując z lotnisk w Jasionce wykonano 19 lotów, o łącznym czasie około 12 godzin. Założono, że FRF włączany będzie wyłącznie w konfiguracji gładkiej, a loty zakwalifikowano jako kategorii czwartej, wprowadzając ograniczenia na minimalną wysokość lotu z włączonym FRF powyżej 1000m oraz prędkość lotu poniżej 260km h⁻¹.

Podczas 18 lotów udało się wyeliminować wszystkie wykryte błędy w oprogramowaniu FRF, głównie w funkcji GLM odpowiedzialnej za realizację FP oraz wyliczenie sygnałów sterujących dla autopilota.

W finalnej próbie (nr 19) wykonano lot automatyczny z pokazanej na rys. 7 HP na lotnisko EPKR wg FP wyznaczonego przez FRF. Z uwagi na konfigurację autopilota samolotu I23 Manager, odpowiednią prędkością i wysokością lotu samolotu sterowano w trybie ręcznym. Próbę zakończono na podejściu do EPKR. Po zakończeniu lotów do oceny zaangażowanie pilota – operatora w realizację prób, wykorzystywana była metoda TLX (Task Load Index).



Rys. 7. Przebieg lotu z HP do lotniska w Krośnie (EPKR)

Finalne próby w locie wykonano na samolocie D42 Diamond w rejonie ATLAS Airfield Ganderkesee. Ogółem wykonano cztery loty, w tym pierwszy próbny, mający za zadanie sprawdzenie działania systemu awionicznego po implementacji FRF. W locie drugim samolot pilotowany był ręcznie zgodnie z FP wyliczonym przez FRF, w trzecim i czwartym natomiast wykonano lot automatyczny w przestrzeni 2D (bez sterowania prędkością i wysokością lotu). Podczas lotów parametry lotu transmitowane były do systemu Phoenix pełniącego rolę polowego ATC, w celu sprawdzenia współdziałania systemu FRF z systemem kierowania ruchem lotniczym. Na rys. 8 przykładowo pokazano sytuację potencjalnie konfliktową, w której samolot oznaczony symbolem DLH654 musiał ustąpić drogi samolotowi kierowanemu przez FRF oznaczonemu symbolem SOFIA.



Rys. 8. Sytuacja potencjalnie konfliktowa jaką zarejestrowano podczas prób w locie (własność Diamond Aircraft Industries oraz Deutsche Flugsicherung GmbH)

4. WNIOSKI

Wyniki serii naziemnych badań symulatorowych oraz prób w locie pozwalają na pozytywną ocenę skuteczności systemu FRF, w odniesieniu do poprawy bezpieczeństwa lotu w sytuacji działań terrorystycznych. System prawidłowo wylicza awaryjny FP, a sposób jego wykonania wg oceny kontrolerów ATC nie stanowi zagrożenia dla pozostałego ruchu lotniczego. Z wstępnych badań symulatorowych oraz końcowych badań w locie wynika, że szczególnie pożądanym rozwiązaniem jest scenariusz 1B, w którym FP wyznaczany na pokładzie samolotu, jest następnie wysyłany do ATC, w celu reorganizacji istniejącego ruchu lotniczego uwzględniającej konieczność realizacji awaryjnego FP.

Oczekuje się, że system FRF ma szansę wejść do użytkowania po 2020-2025 roku. Z uwagi na jego złożoność i spodziewane trudności modyfikacji systemów istniejących można wnioskować, że system FRF będzie implementowany głównie w nowoprojektowanych systemach awionicznych.

W trakcie badań dodatkowo skonstatowano, że projektowany system ma większy potencjał niż zakładano. Poza zadaniem przeciwdziałania aktom terroryzmu, może on także po znacznych uproszczeniach pełnić rolę systemu bezpieczeństwa małych samolotów, którego zadaniem byłby bezpieczny powrót na lotnisko np. w przypadku zasłabnięcia, czy też utraty orientacji przez pilota.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SA Ames Research Center: *NASA TLX*, ver. 2.0, December 2007.
- [2] SOFIA Rapport: *D.2.3 FRF Function design*, December 2007.
- [3] SOFIA Rapport: *D.3.2 Platform Adaptation Delivery Report*, August 2008.
- [4] SOFIA Rapport: *D.4.2 SOFIA Validation Trials*, May 2009.

**FLIGHT RECONFIGURATION FUNCTION - TENDING TO A/C SAFETY LEVEL
AUGMENTATION IN CASE OF ONBOARD HOSTILE ACTION**

Abstract

In the article main assumptions of the SOFIA VI FP are presented. The SOFIA project is a response to the challenge of development concepts and techniques enabling the aircraft to return automatically and safely to the airport in case of hostile actions on board. The main structure of Flight Reconfiguration Function module was presented as well as some problems, which appeared during the implementation on four experimental platforms, are discussed. Such platforms are: two research simulators and two aircraft. As a conclusion, the test trials program and some remarks about test flights results are provided.