

METODA OKREŚLANIA ROZRÓŻNIALNOŚCI OBIEKTÓW POWIETRZNYCH PRZEZ URZĄDZENIA RADIOLOKACYJNE Z WYKORZYSTANIEM LOTÓW SAMOLOTÓW Z ZAMONTOWANYMI NA POKŁADZIE ODBIORNIKAMI GPS I REJESTRATORAMI POZYCJI

Streszczenie: W artykule przedstawiono założenia metody badań rozróżnialności obiektów powietrznych przez urządzenia radiolokacyjne z wykorzystaniem lotów samolotów, których trójwymiarowa pozycja jest określana z dokładnością około 1 m z interwałem czasowym 1 s za pomocą różnicowych technik pozycjonowania GPS. W drugiej części artykułu przedstawiono wyniki sprawdzeń zrealizowanych według zaproponowanej metody, wykonanych w ramach badań typu radaru NUR-22N-(3D).

METHOD OF DEFINITION AIRCRAFTS DISTINCTION BY RADIOLOCATION DEVICES, USING FLIGHTS OF AIRCRAFTS WITH GPS RECEIVERS AND POSITION RECORDERS INSTALLED ON BOARD

Abstract: In this article there were presented foundation for the flying objects distinction research method by radiolocation devices, using flights of aircraft, which 3-dimensional position is determine exact to about 1m and time interval 1s by means of Differential GPS. In the second part of this paper there where showed results of verification realized according to suggested method, performed within the confines of radar *NUR-22N-(3D)* type tests.

1. Wstęp

Problem określenia rzeczywistych wartości rozróżnialności odległościowej i azymutalnej radaru w normalnych warunkach pracy wymaga wykonywania oblotów parą samolotów po odpowiednio zaplanowanej trasie oraz znajomości chwilowych wartości odległości pomiędzy tymi samolotami. Problem odpowiedniego nawigowania samolotów i zapewnienia dynamicznego pomiaru odległości pomiędzy samolotami w locie przez wiele lat uniemożliwiało prowadzenie badań rozróżnialności z odpowiednią dokładnością i wiarygodnością. Pojawienie się globalnego systemu pozycjonowania GPS oraz opanowanie technologii precyzyjnego określania chwilowych pozycji statków powietrznych w locie umożliwiło opracowanie i zastosowanie nowych metod badań urządzeń radiolokacyjnych w zakresie określania ich zdolności do rozróżniania obiektów powietrznych. Nowo opracowywane konstrukcje radarów trójwspółrzędnych, często realizowane jako radary z elektronicznie skanowaną wiązką wymagają zastosowania nowoczesnych metod badawczych, u podstaw których leży możliwość porównania danych o obserwowanym obiekcie

estymowanych przez radar z jego rzeczywistymi współrzędnymi położenia w przestrzeni w danym momencie czasowym. Jako źródło informacji o rzeczywistych współrzędnych położenia samolotu najwygodniej jest wykorzystać odbiorniki systemu GPS, dające możliwość precyzyjnego określania położenia lecącego samolotu z interwałem czasowym na poziomie 1 s. Bardzo korzystną okolicznością występująca w badaniach sprzętu radiolokacyjnego jest to, że na pokładzie samolotu można zamontować autonomiczny odbiornik GPS rejestrujący pozycje absolutne wraz z zestawem danych pozwalających na wykonanie udokładnienia pozycji po zakończeniu lotu w trybie postprocessingu.

2. Metoda określania rozróżnialności w odległości i azymucie obiektów powietrznych przez urządzenia radiolokacyjne z wykorzystaniem systemu GPS

Metoda pomiaru rozróżnialności w azymucie lub odległości polega na przeprowadzeniu lotów dwoma jednakowymi samolotami na stałej wysokości w kierunku promieniowym względem badanego radaru. Na pokładach obydwu samolotów muszą być zamontowane odbiorniki GPS z rejestratorami pozycji. Pozycję samolotów najwygodniej jest określać we współrzędnych prostokątnych x, y, z w układzie ECEF. W celu wspomagania pilotów w utrzymywaniu zadanego ugrupowania w locie, na pokładach samolotów instaluje się dodatkowe odbiorniki GPS, pozwalające na kontrolę odległości pomiędzy lecącymi samolotami w układzie przód-tył, lewo-prawo, góra-dół oraz wzajemnej odległości skośnej.

W przypadku sprawdzania rozróżnialności w odległości samoloty lecą w ugrupowaniu przedstawionym schematycznie na Rys.1. Na komendę z ziemi jeden z samolotów wykonuje manewr zbliżania i oddalania względem drugiego.

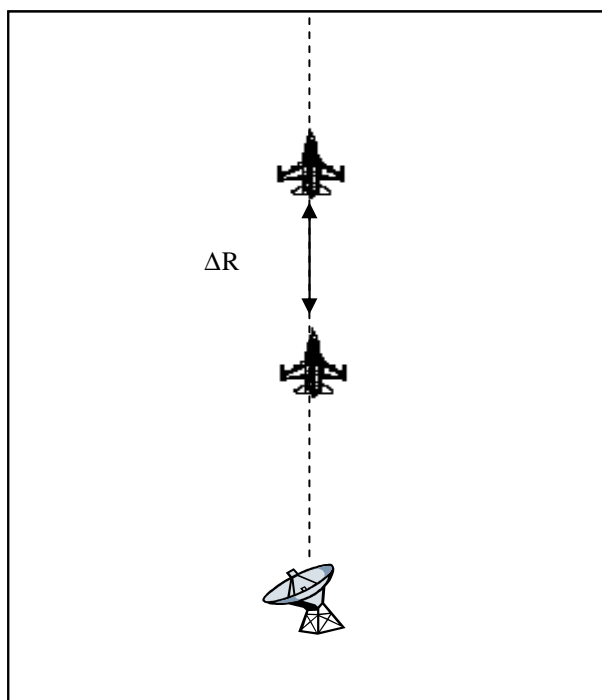
W przypadku sprawdzania rozróżnialności w azymucie samoloty lecą w ugrupowaniu przedstawionym schematycznie na Rys.2, w zadanej odległości względem siebie, utrzymując jednakową wysokość i odległość względem badanego radaru. Zmiany odległości pomiędzy samolotami oraz korekty położenia względem badanego radaru piloci wykonują na komendę nawigatora nadzorującego loty.

W rejonie wykonywania lotów należy umieścić na punkcie o znanych współrzędnych odbiornik GPS i uruchomić go w trybie pracy jako stacja referencyjna. Możliwe jest również wykorzystanie permanentnych stacji referencyjnych GPS, działających w sieci ASG-EUPOS. Za pomocą odbiornika GPS należy również określić współrzędne prostokątne x_r, y_r, z_r w układzie ECEF miejsca stania badanego radaru.

Procedura określania rozróżnialności radaru w odległości:

- a) w odbiorniku GPS pełniącym funkcję stacji referencyjnej należy włączyć rejestrację danych pomiarowych;
- b) badany radar należy uruchomić zgodnie z jego instrukcją eksploatacji;
- c) jako źródło synchronizacji czasu należy ustawić czas UTC (np. pobierany z pokładowego odbiornika GPS), algorytm inicjacji i śledzenia ustawić na automatyczną inicjację, włączyć rejestrację informacji wykryć obiektów wykonywanych przez radar;
- d) następnie należy wykonać lot dwoma samolotami wyposażonymi w odbiorniki GPS, na kierunku azymutalnym względem badanego radaru w ugrupowaniu przedstawionym schematycznie na Rys.1. W trakcie oblotu należy zachować jednakowy azymut i wysokość lotu obu samolotów;
- e) w trakcie lotu, na komendę nawigatora, samoloty zaczynają zwiększać odległość między sobą do momentu, kiedy radar wykrywa je jako dwa obiekty powietrzne;

- f) następnie na komendę nawigatora samoloty zaczynają zmniejszać odległość między sobą do momentu, gdy radar przestanie je rozróżniać i zostaną wykryte jako obiekt pojedynczy;
- g) procedurę oddalania i zbliżania samolotów należy powtarzać cyklicznie na całej trasie lotu, zarówno w trakcie oddalania jak i zbliżania się samolotów do miejsca stania radaru. Zależnie od możliwości przebywania w powietrzu samolotów, loty na zbliżanie i oddalanie powtarza się kilkakrotnie;
- h) po zakończeniu lotu dane zarejestrowane przez badany radar należy przenieść na zewnętrzny nośnik informacji (dysk wymienny, CD-ROM). Analogicznie należy zarchiwizować dane zarejestrowane przez odbiorniki GPS zamontowane w samolotach oraz na punkcie referencyjnym. Dane ze stacji pracujących w sieci ASG-EUPOS są udostępniane w serwisie internetowym systemu.

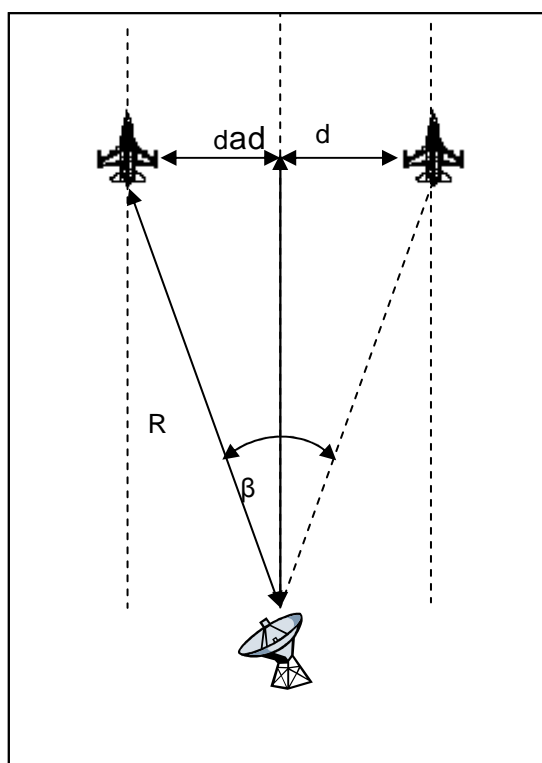


Rys.1 Graficzna ilustracja sytuacji powietrznej przy określaniu rozróżnialności w odległości

Procedura określania rozróżnialności radaru w azymucie:

- a) w odbiorniku GPS pełniącym funkcję stacji referencyjnej należy włączyć rejestrację danych pomiarowych;
- b) badany radar należy uruchomić zgodnie z jego instrukcją eksploatacji;
- c) jako źródło synchronizacji czasu należy ustawić czas UTC pobierany z pokładowego odbiornika GPS, algorytm inicjacji i śledzenia ustawić na automatyczną inicjację, włączyć rejestrację informacji opracowywanej przez radar;
- d) następnie należy wykonać lot dwoma samolotami wyposażonymi w odbiorniki DGPS, na kierunku azymutalnym względem badanego radaru w ugrupowaniu przedstawionym schematycznie na Rys.2. W trakcie badania należy zachować jednakowy azymut, wysokość lotu oraz jednakową odległość między samolotami w trakcie każdego zbliżania i oddalania;
- e) w każdym oddalaniu należy zaobserwować moment, w którym obserwowane samoloty przestaną być wykrywane przez radar jako dwa oddzielne obiekty powietrzne. Zannotować czas UTC, wykrycia ostatniej pary plotów, przed sklejeniem ich w jeden obiekt powietrzny;

- f) w każdym zbliżaniu zaobserwować moment, w którym obserwowane samoloty zostaną rozróżnione przez radar jako dwa obiekty powietrzne. Zannotować czas UTC, wykrycia pierwszej pary plotów pochodzących od obserwowanych samolotów;
- g) zależnie od możliwości przebywania w powietrzu samolotów, loty na zbliżanie i oddalanie należy powtórzyć kilkakrotnie;
- h) po zakończeniu lotu dane zarejestrowane przez badany radar należy przenieść na zewnętrzny nośnik informacji (dysk wymienny, CD-ROM). Analogicznie należy zarchiwizować dane zarejestrowane przez odbiorniki GPS zamontowane w samolotach oraz na punkcie referencyjnym.



Rys.2 Graficzna ilustracja sytuacji powietrznej przy określaniu rozróżnialności w azymucie

Opracowanie wyników oblotów

Współrzędne położenia samolotów wykonujących oblot, zarejestrowane przez odbiorniki GPS, należy udokładnić poprzez wykonanie korekcji różnicowej w oparciu o dane zarejestrowane przez odbiornik pracujący na punkcie referencyjnym lub dane zarejestrowane przez permanentne stacje referencyjne sieci ASG-EUPOS, działające w rejonie oblotów. Wykonanie korekcji różnicowej pomiarów GPS umożliwia specjalistyczne oprogramowanie, dostarczane przez producenta odbiorników GPS. W Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia wykorzystywane jest oprogramowanie Trimble Business Center, współpracujące z odbiornikami GPS Trimble R3.

W celu określenia rozróżnialności badanego radaru w odległości należy wykonać następujące czynności:

Ze zbioru plotów zarejestrowanych przez radar wyselekcjonować pary wykryć samolotów wykonujących oblot o jednakowym czasie rejestracji i minimalnych wartościach różnicy odległości ΔR pomiędzy nimi. Dla tak wyselekcjonowanych plotów należy

dopasować ze zbioru danych zarejestrowanych przez odbiorniki GPS współrzędne x,y,z (ECEF) położenia samolotów odpowiadające momentom czasowym rejestracji plotów. W oparciu o współrzędne GPS należy obliczyć rzeczywistą odległość pomiędzy samolotami ze wzoru:

$$\Delta R_k = \sqrt{(x_1^k - x_2^k)^2 + (y_1^k - y_2^k)^2 + (z_1^k - z_2^k)^2} \quad [m]$$

gdzie:

- ΔR_k - różnica odległości pomiędzy samolotami w chwili k ;
- (x_1^k, y_1^k, z_1^k) - współrzędne ECEF jednego samolotu w chwili k ;
- (x_2^k, y_2^k, z_2^k) - współrzędne ECEF drugiego samolotu w chwili k .

Następnie w oparciu o otrzymany zbiór wyników można obliczyć wartość średnią i odchylenie standardowe odległości między obiektami, przy której następuje ich rozróżnienie, będące miarą rozróżnialności w odległości badanego radaru:

$$\overline{\Delta R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta R_k \quad [m]$$

$$\sigma^{\Delta R} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\Delta R_k - \overline{\Delta R})^2} \quad [m]$$

W celu określenia rozróżnialności badanego radaru w azymucie należy wykonać następujące czynności:

Ze zbioru plotów zarejestrowanych przez radar należy wyselekcjonować pary wykryć odpowiadające momentom czasowym (UTC) zanotowanym w trakcie lotów. Dla otrzymanego zbioru danych sprawdzić, czy dla poszczególnych par wykryć spełnione są następujące warunki: jednakowy czas rejestracji, różnica odległości od radaru określonych dla plotów nie większa niż wymagany parametr rozróżnialności w odległości badanego radaru.

Dla tak wyselekcjonowanych plotów należy dopasować ze zbioru danych zarejestrowanych przez odbiorniki GPS współrzędne x,y,z (ECEF) położenia samolotów odpowiadające momentom czasowym k rejestracji poszczególnych par plotów.

W oparciu o wyselekcjonowane dane należy obliczyć rzeczywiste odległości pomiędzy poszczególnymi samolotami a badanym radarem w momentach czasowych k :

$$R_{sk} = \sqrt{(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2 + (z_r - z_s)^2} \quad [m]$$

gdzie:

- R_{sk} - rzeczywista odległość pomiędzy radarem i samolotem s w chwili k ;
- (x_r, y_r, z_r) - współrzędne ECEF miejsca stania radaru;
- (x_s, y_s, z_s) - współrzędne ECEF samolotu s w chwili k .

Sprawdzić, czy różnica obliczonych odległości jest nie większa od parametru rozróżnialności w odległości badanego radaru. Jeżeli różnica rzeczywistych odległości pomiędzy samolotami i radarem jest większa niż parametr rozróżnialności w odległości badanego radaru, analizowaną parę wykryć należy odrzucić.

Jeżeli różnica obliczonych odległości pomiędzy samolotami i radarem jest mniejsza niż parametr komórki odległościowej badanego radaru obliczyć wartość średnią z tych dwu odległości i przyjąć ją jako odległość prawdziwą R_k pomiędzy radarem a parą samolotów wykonujących oblot w rozpatrywanym momencie czasowym k .

$$R_k = \frac{R_{s1k} + R_{s2k}}{2}$$

gdzie:

R_{s1k} - rzeczywista odległość do samolotu $s1$ w chwili k ;

R_{s2k} - rzeczywista odległość do samolotu $s2$ w chwili k .

W oparciu o współrzędne ECEF dla każdej pary wykryć spełniających powyższe warunki obliczyć rzeczywistą odległość między samolotami w chwili k ze wzoru:

$$2d_k = \sqrt{(x_1^k - x_2^k)^2 + (y_1^k - y_2^k)^2 + (z_1^k - z_2^k)^2} \quad [m]$$

gdzie:

d_k - połowa odległości pomiędzy samolotami w chwili k ,

(x_1^k, y_1^k, z_1^k) - współrzędne ECEF pierwszego samolotu w chwili k ,

(x_2^k, y_2^k, z_2^k) - współrzędne ECEF drugiego samolotu w chwili k .

Dla rozpatrywanych wyników należy obliczyć wartości kąta β , będącego różnicą azymutów na jakich znajdowały się poszczególne samoloty wykonujące oblot względem miejsca stania radaru w chwili k .

$$\beta_k = 2 \arcsin \frac{d_k}{R_k} [^\circ]$$

Na podstawie zbioru wyników obliczonych dla poszczególnych momentów czasowych obliczyć wartość średnią kąta β będącą oszacowaniem rzeczywistej rozróżnialności obiektów powietrznych w azymucie badanego radaru.

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \beta_k [^\circ]$$

Następnie można obliczyć odchylenie standardowe σ^β ze wzoru:

$$\sigma^\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\beta_k - \bar{\beta})^2} [^\circ]$$

3. Wyniki sprawdzeń zdolności rozróżniania obiektów powietrznych przez radar NUR-22N (3D)

W 2008 r. w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia przeprowadzono badania zdawczo-odbiorcze trójwspółrzędnego radaru typu NUR-22N-(3D) produkcji CNPEP „RADWAR” (Rys.3). Radar NUR-22N-(3D) jest radarem krótkiego zasięgu przeznaczonym do wykrywania i rozpoznania obiektów powietrznych w systemach obrony przeciwlotniczej Marynarki Wojennej i Wojsk Lądowych.



Rys.3 Radar NUR-22N-(3D) w pozycji pracy bojowej [www.rawar.com.pl]

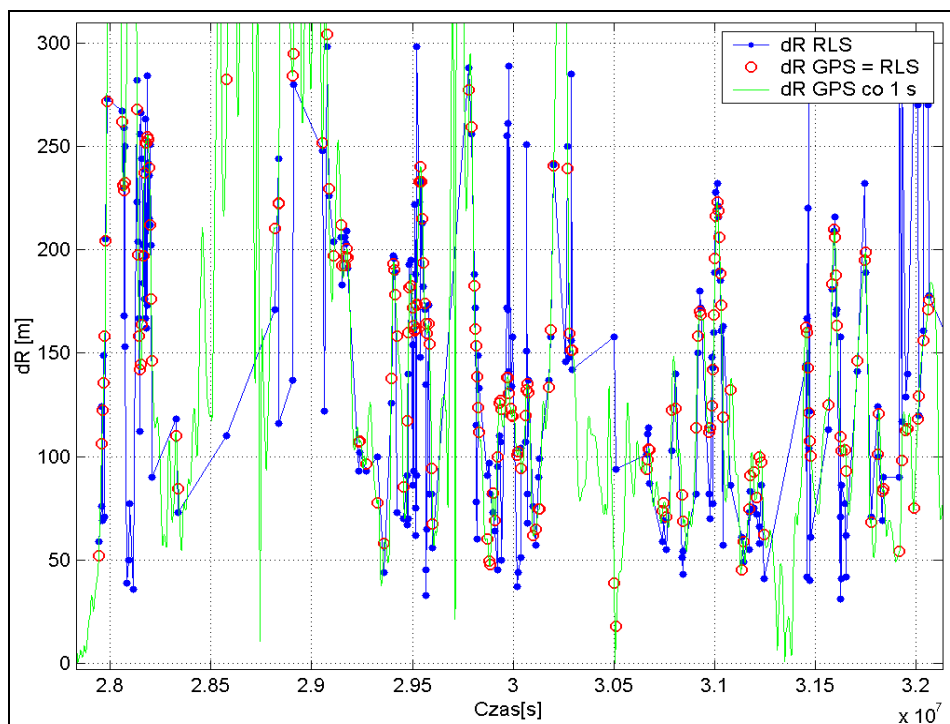


Rys.4 Odbiornik GPS Trimble R3 zamontowany w kabinie samolotu PZL 130 Orlik

Określenie parametru rozróżnialności obiektów powietrznych w odległości, radaru NUR-22N (3D).

Na podstawie zarejestrowanych w trakcie lotu danych radarowych w postaci współrzędnych wykryć (plotów), cechowanych czasem UTC, oraz danych o położeniu samolotów zarejestrowanych za pomocą odbiorników GPS wykonano selekcję danych i obliczenia zgodnie z procedurami opisanymi w punkcie 2.

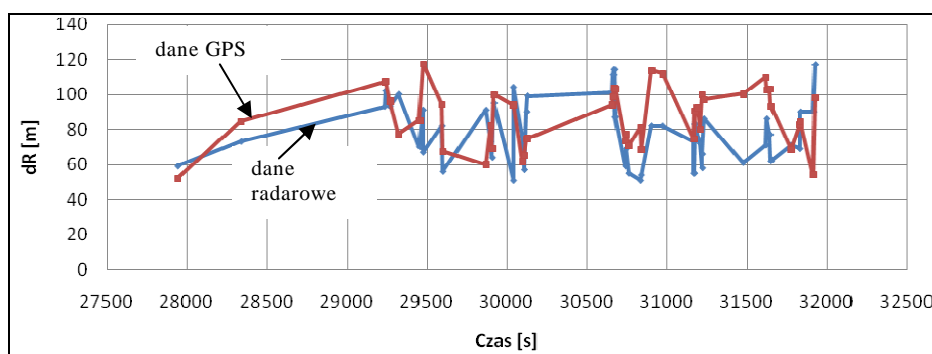
Na Rys.5 zobrazowano rzeczywiste różnice odległości pomiędzy samolotami obliczone na podstawie danych zarejestrowanych przez odbiorniki GPS (oznaczonych jako „dR GPS co 1s”), różnice odległości obliczone z danych zawartych w plotach estymowanych przez radar (oznaczonych jako „dR RLS”) oraz wskazanie danych GPS odpowiadających czasowi estymacji plotów przez radar (oznaczone jako „dR GPS=RLS”). Selekcja po czasie jest niezbędna, ponieważ badany radar wykrywa, śledzi i estymuje parametry obiektów zgodnie z cyklem obrotu anteny, z rozdzielczością rzędu milisekund.



Rys. 5 Zobrazowanie różnic odległości pomiędzy samolotami

Na Rys.6 wyselekcjonowane dane przedstawiono w formie wykresu.

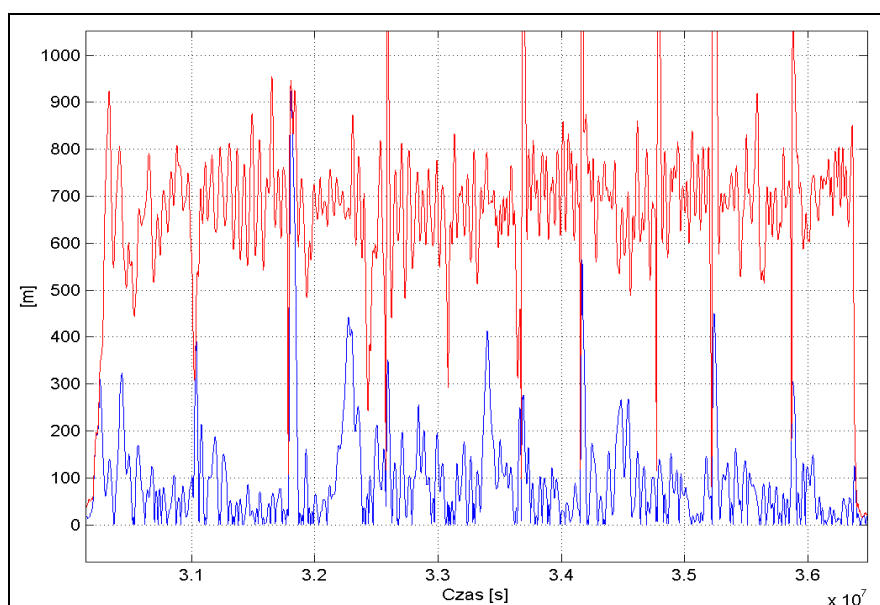
Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że szacowana rzeczywista zdolność rozróżniania obiektów powietrznych w odległości przez radar NUR-22N-(3D) wynosi około 87m.



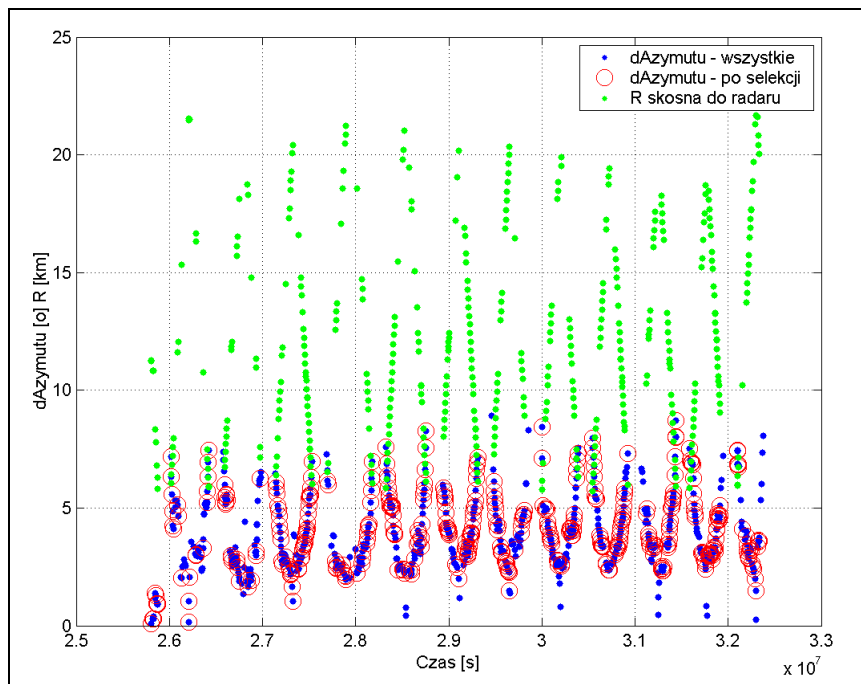
Rys. 6 Zobrazowanie wyselekcjonowanych różnic odległości pomiędzy obserwowanymi samolotami, obliczonych na podstawie danych radarowych (kolor niebieski) oraz odpowiadające im rzeczywiste odległości obliczone na podstawie danych zarejestrowanych odbiornikami GPS (kolor czerwony)

Określenie parametru rozróżnialności obiektów powietrznych w azymucie, radaru NUR-22N (3D).

Na podstawie zarejestrowanych w trakcie lotu danych radarowych w postaci współrzędnych wykryć (plotów), cechowanych czasem UTC, oraz danych o położeniu samolotów zarejestrowanych za pomocą odbiorników GPS wykonano selekcję danych i obliczenia zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 2 niniejszego opracowania. Na Rys.7 zobrazowano przebieg lotu pary samolotów przedstawiony w aspekcie utrzymania krytycznych, ze względu na ocenę radaru, parametrów szyku. Parametry radaru związane ze strefą, zakłócenia atmosferyczne i terenowe oraz uwzględnienie warunku potencjalnej rozdzielczości radaru, wymusiły wykonanie lotu na odległościach względem miejsca stania radaru rzędu 6km. Pociągnęło to za sobą konieczność rozsunięcia wzajemnego samolotów na odległość około 1 km. W pierwszym locie zdecydowano się na utrzymywanie odległości wzajemnej obiektów powietrznych równej 700 m. Na Rys. 7 kolorem czerwonym (u góry) przedstawiono bieżące wartości odległości wzajemnej obiektów powietrznych (odległość „ $2*d$ ” wg Rys.2), natomiast kolorem niebieskim (na dole) bezwzględną wielkość różnicy odległości pomiędzy samolotami i miejscem stania radaru (odległości „R” do każdego z pary samolotów wg Rys.2). Rozważając teoretycznie, zgodnie z założeniami procedury wykonania sprawdzenia rozróżnialności radaru, idealnie wykonany lot szyku samolotów, wygenerowałby wykres ww. odległości taki, że linia czerwona na rysunku powinna przebiegać płasko w miejscu oznaczonym „700 m”, a linia niebieska powinna równać się wartości „0 m”. W rzeczywistości skumulowane błędy sterowania powodują, że wartości rzeczywiste oscylują w pobliżu wartości idealnych. Duże odchylenia zobrazowane na wykresie są miejscami, w których samoloty wykonywały nawroty. Na zbiór danych spełniających warunek rozróżnienia w azymucie, nałożono filtr w postaci kryterium nie rozróżnienia obiektów w odległości. Na Rys.8 zobrazowano różnice azymutów otrzymanych w wyniku wstępnej selekcji zarejestrowanych danych (kolor niebieski) oraz odległości średniej, na jakiej znajdowały się w danej chwili samoloty wykonujące oblot (kolor zielony). Kolorem czerwonym zaznaczono różnice azymutów, dla których różnica odległości samolotów od radaru była mniejsza niż 60m.



Rys.7 Zobrazowanie odległości pomiędzy samolotami wykonującymi oblot, (kolor czerwony) oraz różnic odległości pomiędzy samolotami i miejscem stania radaru (kolor niebieski)



Rys.8 Zobrazowanie różnic azymutów obiektów powietrznych

Rozróżnialność azymutalną radaru obliczono jako wartość średnią minimalnych kątów, na których obiekty powietrzne były rozróżniane, z każdego zbliżania/oddalania się pary samolotów do/od radaru. Obliczona wartość średnia różnicy azymutów, równa rozróżnialności radaru w azymucie, wyniosła $2,5^\circ$.

4. Wnioski

Przedstawiona w artykule metoda badań stanowi nową jakość w dziedzinie krajowych badań urządzeń radiolokacyjnych. Zastosowanie technologii GPS do określania rzeczywistych współrzędnych położenia statków powietrznych w trakcie lotu umożliwiło po raz pierwszy precyzyjną i obiektywną kontrolę poprawności pracy i estymacji danych wynikowych przez badane radary. Analiza działania radaru w odniesieniu do rzeczywistych współrzędnych położenia obserwowanych samolotów, wyeliminowała czynnik nieokreśloności występujący we wszystkich wcześniej stosowanych metodach określania parametrów rozróżnialności.

Z punktu widzenia efektywności oblotów radaru przez parę samolotów w zadanym ugrupowaniu, niebagatelne znaczenie ma możliwość wspomaganie pilotów danymi o wzajemnym położeniu statków powietrznych realizujących dane zadanie za pomocą dodatkowego zestawu GPS. Doświadczenia i opinie uzyskane w trakcie badań radaru NUR-22N (3D) pozwoliły stwierdzić, że udostępnienie pilotom danych o wzajemnym położeniu samolotów, znacznie podnoszą precyzję pilotażu a tym samym efektywność badań sprzętu radiolokacyjnego.

Literatura

- [1] Gajderowicz I., „Kartografi matematyczna dla geodetów, wydanie II”, Wydawnictwo Akademii Rolniczo-Technicznej, 1999.

- [2] Hofmann-Wallenhof, B., Lichtenger H. , Collins J., „GPS Teory and practice, Fourth edition, Springer, Wien New York, 1997.
- [3] Lamparski J., „Navstar GPS od teorii do praktyki”, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińskiego-Mazurskiego, 2001.
- [4] Misra P., „Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance”, Ganga-Jamuna Press, 2001.
- [5] Opracowanie zbiorowe, „Sprawozdanie z badań typu trójwspółrzednego radaru NUR-22N-(3D); protokoły szczegółowe”, WITU, Zielonka 2008.
- [6] Specht C., „System GPS”- Wydawnictwo Bernardinum Sp.z o.o., Pelpin 2007.
- [7] Brzozowski M., Myszka M., Lewandowski Z., „Metoda badania rozróżnialności azymutalnej i odległościowej stacji radiolokacyjnych”, Problemy Techniki Uzbrojenia, 2004.