

kpt. mgr inż. Marek BRZOZOWSKI *
mjr mgr inż. Mirosław MYSZKA *
kpt. mgr inż. Zbigniew LEWANDOWSKI *
mgr inż. Andrzej MODRZEWSKI **
* Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
** Przemysłowy Instytut Telekomunikacji

WYKORZYSTANIE METOD PRECYZYJNEGO WYZNACZANIA POZYCJI OBIEKTÓW POWIETRZNYCH ZA POMOCĄ GPS DO BADAŃ RADARU DALEKIEGO ZASIĘGU RST-12M

W artykule przedstawiono podstawowe właściwości radaru dalekiego zasięgu typu RST-12M oraz wyniki badań dokładności estymacji współrzędnych wykrywanych obiektów powietrznych z wykorzystaniem lotów samolotu z zainstalowanym na pokładzie odbiornikiem GPS i rejestratorem pozycji.

1. Wstęp

W roku 2006 w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia przeprowadzono badania typu radaru dalekiego zasięgu RST-12M wyprodukowanego przez Przemysłowy Instytut Telekomunikacji. Radar ten jest wersją rozwojową opracowanego w latach dziewięćdziesiątych i wdrożonego na uzbrojenie Sił Zbrojnych RP radaru NUR-12. Radar RST-12M jest przeznaczony do pracy na posterunkach radiolokacyjnych Sił Powietrznych, określonych mianem BACKBONE. Posterunki te mają charakter stacjonarny, pracujące na nich radary zamontowane są na wieżach wyposażonych w kopuły ochronne oraz instalacje klimatyzacji i ogrzewania zapewniające optymalne warunki pracy dla sprzętu elektronicznego. Infrastruktura techniczna posterunków BACKBONE oraz konstrukcja radarów przeznaczonych do pracy na tych posterunkach są podporządkowane wymogom nieprzerwanego działania z możliwie długimi okresami pracy bezawaryjnej.

2. Ogólna charakterystyka radaru RST-12M

Radar RST-12M jest trójwspółrzędnym radarem dalekiego zasięgu, pracującym na częstotliwościach pasma „L”. W skład radaru wchodzi trzy jednostki funkcjonalne: jednostka nadawcza, jednostka obróbki sygnałów i jednostka antenowa. Jednostki nadawcza i odbiorcza wykonane są w postaci kabin kontenerowych. Jednostkę antenową stanowi konstrukcja złożona z ramy nośnej, zespołu napędowego systemu antenowego, masztu antenowego oraz anten głównej i systemu IFF. Antenę główną radaru stanowi płaski szyk antenowy tworzący tzw. antenę ścianową, która jest obracana mechanicznie w płaszczyźnie azymutalnej. Charakterystyka promieniowania radaru w czasie nadawania ma kształt cos^2 . Charakterystyka odbiorcza natomiast ma postać wachlarza 8 wiązek elewacyjnych, co umożliwi pomiar wysokości lotu obserwowanych obiektów powietrznych. W skład radaru wchodzi również system IFF, zapewniający identyfikację przynależności wojskowych i cywilnych statków powietrznych. Tor odbiorczy radaru RST-12M zapewnia, na drodze cyfrowej obróbki sygnałów, detekcję obiektów powietrznych oraz pomiar ich trzech

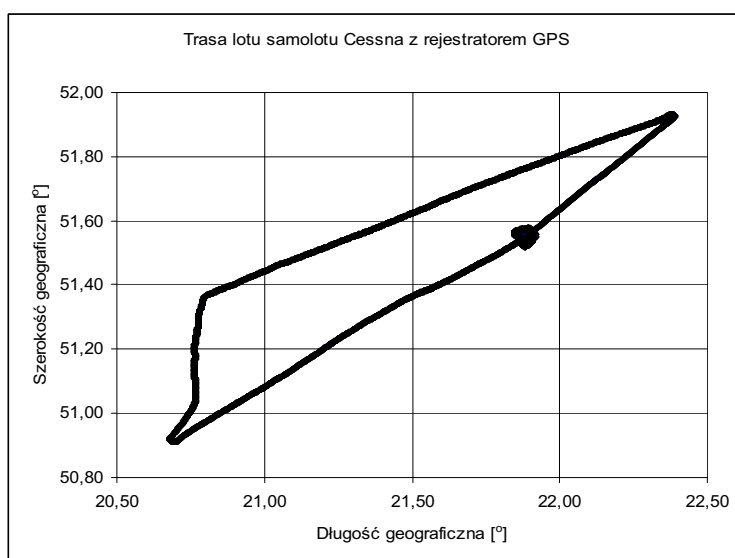
współrzędnych: azymutu, odległości i wysokości lotu. Radar RST-12M posiada rozbudowane algorytmy śledzenia obiektów powietrznych wykorzystujące dane z radaru pierwotnego oraz systemu IFF. Informacje o wykrytych przez radar obiektach powietrznych oraz dane z systemu IFF są przesyłane do systemu zbioru i obróbki informacji radiolokacyjnej Sił Powietrznych.

3. Określenie dokładności estymacji współrzędnych obiektów powietrznych przez radar RST-12M

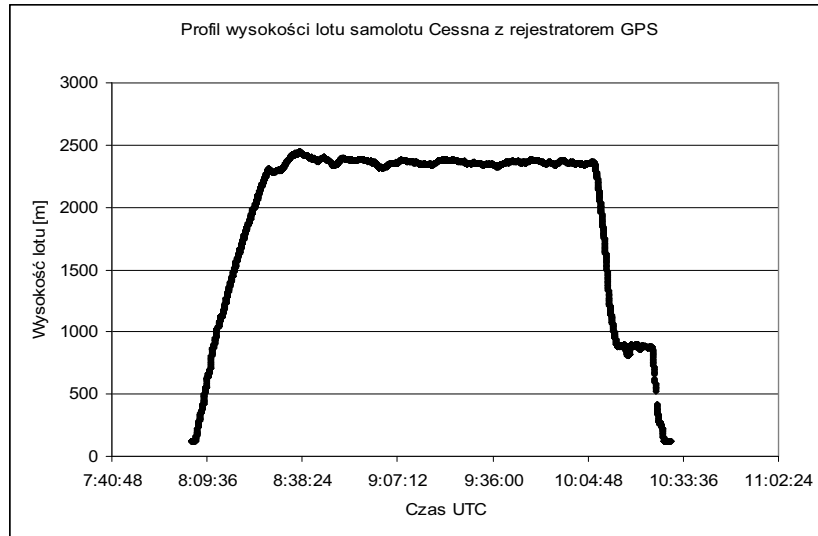
3.1 Opis zastosowanej metody badawczej

W celu określenia dokładności z jaką radar RST-12M mierzy współrzędne obiektów powietrznych, wykonano jego oblot samolotem Cessna z zamontowaną na pokładzie aparaturą GPS i rejestratorem pozycji. Dla uzyskania wysokiej dokładności wyznaczonej pozycji samolotu zastosowano różnicową metodę DGPS, wykorzystującą cztery stacje referencyjne rozmieszczone wzdłuż planowanej trasy jego lotu. Zarejestrowane w trakcie lotu dane pomiarowe pozwoliły na przeprowadzenie, w trybie post processing, korekty różnicowej pozycji samolotu. Korekty zostały obliczone niezależnie w oparciu o dane z każdej ze stacji referencyjnych a następnie otrzymane wyniki zostały uśrednione. Taka metoda wyznaczania pozycji pozwala na uzyskanie dokładności 1 m we współrzędnych płaskich oraz 3 m w odniesieniu do wysokości lotu. Pozycja samolotu była określana przez system GPS z interwałem 1 s i rejestrowana synchronicznie z czasem UTC. Rejestrację oraz udokładnienie pozycji samolotu wykonał zespół specjalistów z Katedry Nawigacji Lotniczej Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie oraz Katedry Geodezji Satelitarnej i Nawigacji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, działający pod kierownictwem płk nawig. dr hab. inż. Marka Grzegorzewskiego.

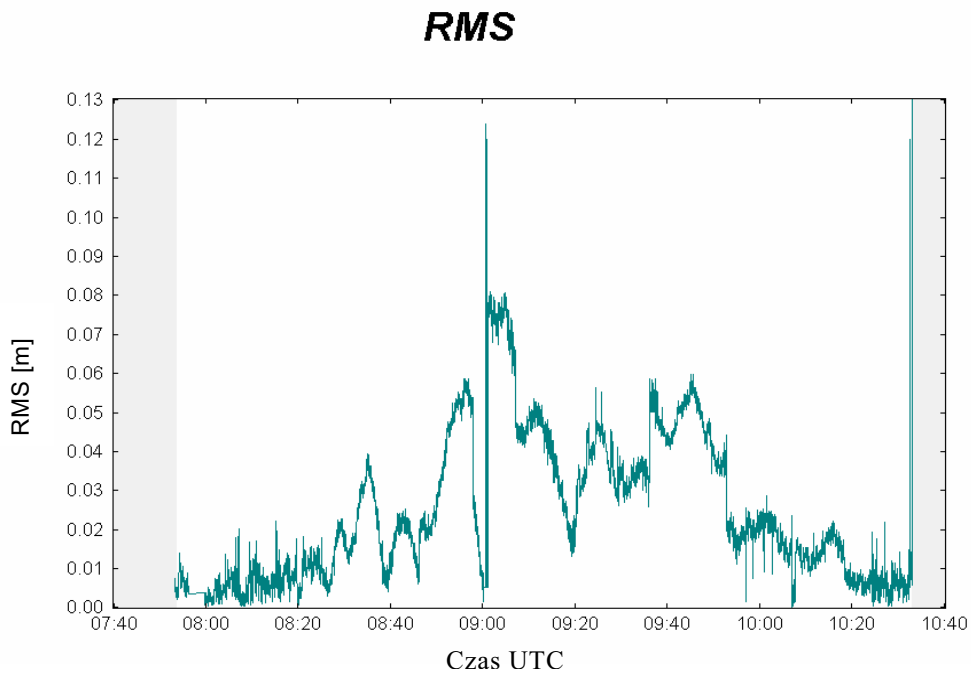
Na podstawie uzyskanych wyników w sposób graficzny przedstawiono: na rysunku nr 1 przebieg trasy lotu samolotu Cessna we współrzędnych płaskich; na rysunku nr 2 profil wysokości lotu; na rysunku nr 3 błąd średni trójwymiarowej pozycji samolotu (RMS) obliczony na każdą sekundę lotu; na rysunku nr 4 odcinek trasy samolotu obserwowany przez radar RST-12M, w jego lokalnym układzie współrzędnych biegunowych.



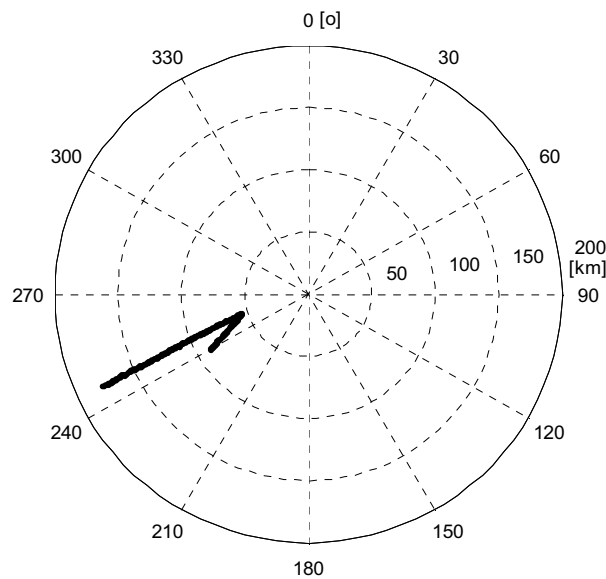
Rys. 1 Przebieg trasy lotu samolotu Cessna z rejestratorem pozycji GPS.



Rys. 2 Profil wysokości lotu samolotu Cessna z rejestratorem GPS.



Rys. 3 Średni błąd trójwymiarowej pozycji samolotu (RMS) obliczony na każdą sekundę lotu, według czasu UTC.



Rys. 4 Odcinek lotu samolotu Cessna obserwowany przez radar RST-12M.

Uzyskane w trakcie lotów dane wzorcowe GPS położenia samolotu zostały określone w globalnym układzie współrzędnych geograficznych WGS-84, jako: szerokość geograficzna B , długość geograficzna L i wysokość H .

W czasie oblotu samolotem z rejestratorem pozycji zegar systemowy badanego radaru był zsynchronizowany czasem UTC uzyskiwanym z serwera czasu systemu zbioru i obróbki informacji radiolokacyjnej. W radarze rejestrowano wykrycia (ploty) śledzonego samolotu we współrzędnych R , β , H i cechowano je czasem na moment wykrycia.

W celu wykonania analizy porównawczej danych wzorcowych z danymi zarejestrowanymi w radarze, wykonano przeliczenie wzorcowych współrzędnych geograficznych samolotu (B , L , H) do lokalnego układu R , β , H badanego radaru, korzystając z algorytmu odwrotnego zadania geodezyjnego Morozowa.

Z uwagi na fakt, że w badanym radarze wykrycia cechowane były czasem z rozdzielczością 1 ms, wykonano interpolację liniową wzorcowych danych położenia samolotu, określonych z interwałem 1 s na moment czasowy (k) każdego wykrycia (plotu) zarejestrowanego w radarze.

W wyniku przeprowadzenia opisanych powyżej operacji uzyskano dwa, zsynchronizowane w czasie zbiory chwilowych współrzędnych położenia obserwowanego samolotu:

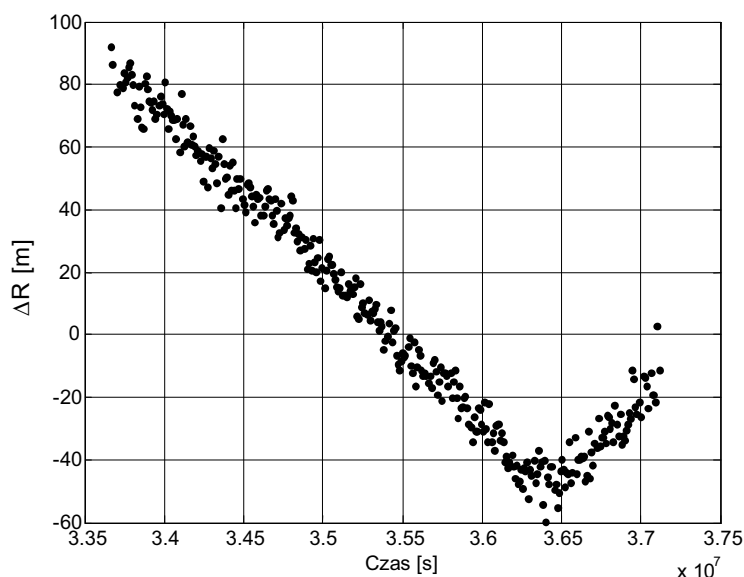
- wyznaczone przez badany radar: R , β , H oraz
- wzorcowe współrzędne DGPS: R^o , β^o , H^o .

3.2 Dokładność określania odległości (R)

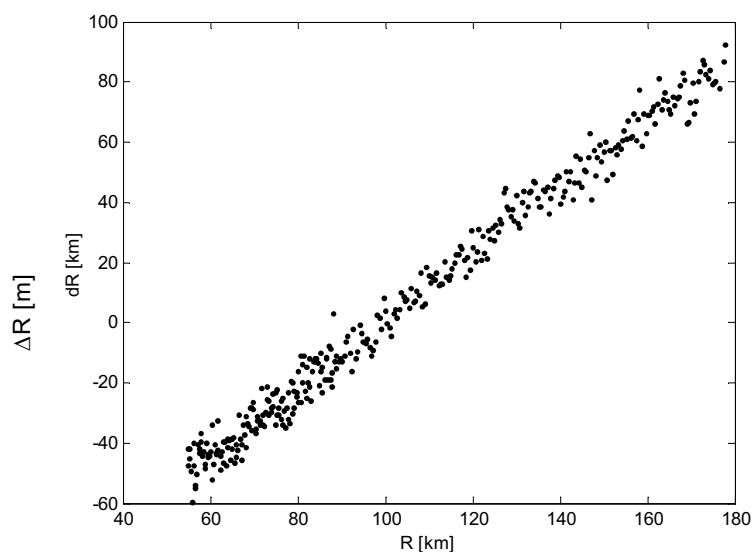
W celu określenia dokładności estymacji odległości przez radar RST-12M wyliczono błąd bezwzględny (ΔR_k) pomiaru odległości stanowiący różnicę odległości wyznaczonej przez radar i odległości wzorcowej, obliczonej na podstawie zarejestrowanej pozycji samolotu dla każdego kolejnego k -tego wykrycia samolotu.

$$\Delta R_k = R_k - R_k^o$$

Po wykreśleniu otrzymanych różnic w funkcji czasu (rysunek nr 5) i odległości (rysunek nr 6), stwierdzono, że występuje ścisła zależność pomiędzy wartością błędu ΔR_k , a wartością odległości na której znajdował się samolot w chwili danego wykrycia.



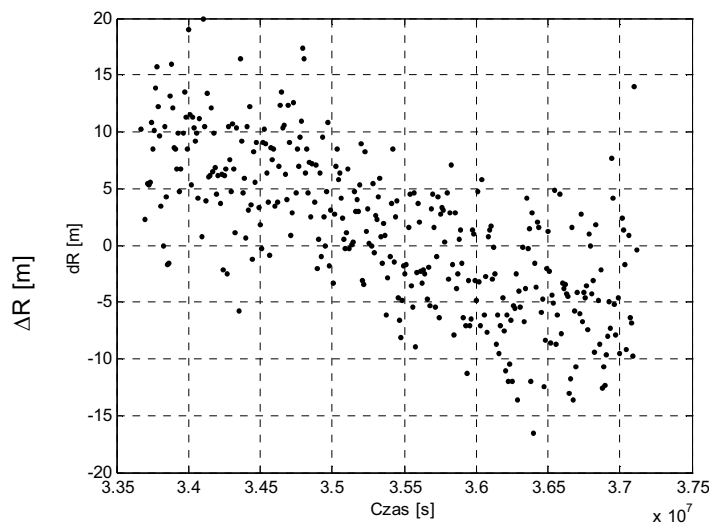
Rys. 5 Błąd bezwzględny pomiaru odległości w funkcji czasu.



Rys. 6 Błąd bezwzględny pomiaru odległości w funkcji odległości.

Analiza algorytmu estymacji odległości w radarze RST-12M przeprowadzona przez specjalistów z Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji wykazała, że zaobserwowana zależność błędu pomiaru odległości od odległości, na której znajduje się wykryty obiekt była wynikiem użycia w obliczeniach odległości przybliżonej wartości prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych czyli 300000 km/s. Po podstawieniu do algorytmu obliczeniowego wartości prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w atmosferze ziemskiej, czyli 299705,843 km/s wykonano ponownie obliczenia odległości do samolotu z rejestratorem pozycji w trybie off line w oparciu o dane pomiarowe zarejestrowane w radarze RST-12M w trakcie oblotu.

Wykres błędu bezwzględnego pomiaru odległości obliczonego w oparciu o skorygowane dane przedstawiono na rysunku nr 7.



Rys. 7 Błąd bezwzględny pomiaru odległości w funkcji czasu po korekcie algorytmu pomiaru odległości.

Jak widać na rysunku nr 7 po wprowadzeniu do algorytmu obliczeniowego udokładnionej wartości prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w atmosferze zależność błędu bezwzględnego pomiaru odległości od odległości na której znajduje się wykryty obiekt powietrzny znacznie się zmniejszyła. Najbardziej prawdopodobną przyczyną występowania szcążkowej zależności wartości błędu pomiaru odległości od odległości jest zależność chwilowej prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych od stanu ośrodka w którym się poruszają w tym wypadku od chwilowych własności propagacyjnych atmosfery. W oparciu o skorygowane wartości pomiarów odległości obliczono wartość średnią błędu ($\overline{\Delta R}$), odchylenie standardowe (σ^R) oraz błąd średniokwadratowy pomiaru odległości ($\Delta R_{\text{sr.kw.}}$) zgodnie z następującymi wzorami:

$$\overline{\Delta R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_k - R_k^o)$$

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

$$\Delta R_{\text{sr.kw.}} = \sqrt{(\overline{\Delta R})^2 + (\sigma^R)^2}$$

n – liczba wszystkich pomiarów odległości.

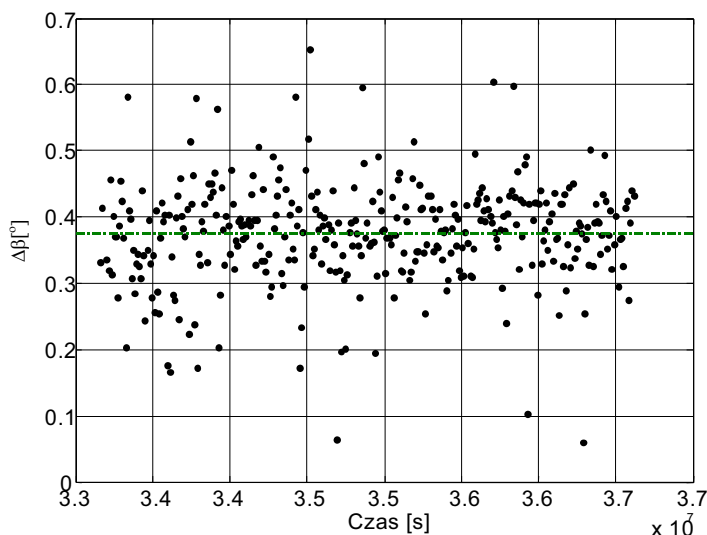
Po wykonaniu obliczeń otrzymano następujące wyniki:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta R} &= -0,3 \text{ [m]} \\ \sigma^R &= 7,5 \text{ [m]} \\ \Delta R_{\text{sr.kw.}} &= 8,1 \text{ [m]} \end{aligned}$$

3.3 Dokładność określania azymutu (β)

Kolejnym parametrem określanym przez radar dla każdego wykrycia obiektu powietrznego jest azymut. W celu sprawdzenia dokładności wyznaczania przez radar RST-12M azymutu wykrytych obiektów powietrznych obliczono dla każdego wykrycia różnicę azymutu wyestymowanego przez radar (β_k) oraz azymutu obliczonego na podstawie zarejestrowanych danych GPS o pozycji samolotu (β_k^o). Otrzymane wartości błędów bezwzględnych ($\Delta\beta$) pomiaru azymutu dla kolejnych wykryć przedstawiono na rysunku nr 8.

$$\Delta\beta = \beta_k - \beta_k^o$$



Rys. 8 Błąd bezwzględny pomiaru azymutu w funkcji czasu.

Analizując otrzymany wykres stwierdzono, że pomiar azymutu obiektów powietrznych przez badany radar jest obarczony błędem systematycznym o wartości $+0,38^\circ$ (linia przerywana koloru zielonego). Źródłem tego błędu było niedokładne zorientowanie radaru względem północy geograficznej. Z uwagi na możliwość wyznaczenia wartości odchyłki justowania radaru względem północy geograficznej oraz jej znaku można było w prosty sposób skorygować nastawy radaru. Powyższe wyniki zostały dodatkowo potwierdzone poprzez wykonanie pomiarów terenowych współrzędnych położenia masztu telekomunikacyjnego, którego echo jest widziane przez radar jako punktowy obiekt terenowy.

W oparciu o skorygowane wartości pomiarów azymutu wyliczono wartość średnią błędu ($\overline{\Delta\beta}$), odchylenie standardowe (σ^β) oraz błąd średniokwadratowy pomiaru azymutu ($\Delta\beta_{\text{sr.kw.}}$).

$$\overline{\Delta\beta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\beta_k - \beta_k^o)$$

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

$$\Delta\beta_{\text{sr.kw.}} = \sqrt{(\overline{\Delta\beta})^2 + (\sigma^\beta)^2}$$

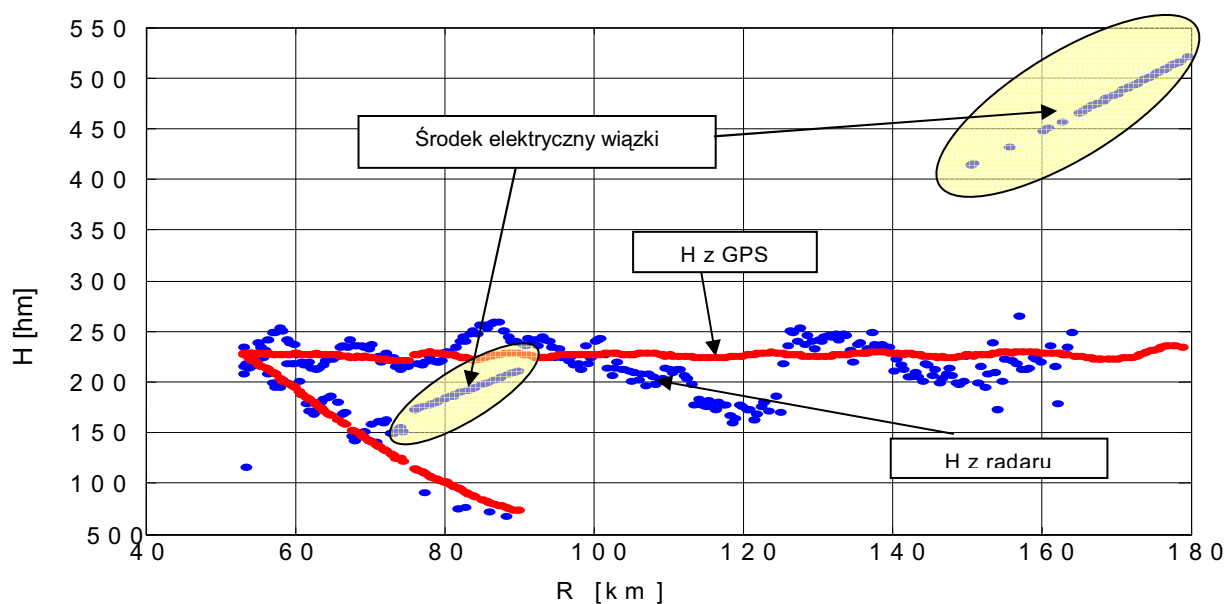
n – liczba wszystkich pomiarów azymutu wykonanych przez radar.

W odniesieniu do wszystkich pomiarów azymutu wykonanych przez radar w trakcie oblotu, otrzymano następujące wyniki dokładności pomiaru azymutu:

$$\begin{aligned}\overline{\Delta\beta} &= 0,00^\circ \\ \sigma^\beta &= 0,08^\circ \\ \Delta\beta_{\text{sr.kw.}} &= 0,08^\circ\end{aligned}$$

3.4 Dokładność wyznaczania wysokości lotu obiektów powietrznych (H)

Radar RST-12M jest radarem trójwspółrzędnym, zdolnym do pomiaru wysokości lotu obiektów powietrznych. Ocena dokładności pomiaru wysokości jest zagadnieniem dość trudnym. Nie można jej wykonać w oparciu o obserwacje odbić od obiektów terenowych, co jest możliwe w odniesieniu do wyznaczania dokładności określania odległości i azymutu. Stosowane w radarach wielowiązkowych algorytmy wyznaczania wysokości wymagają odbioru echa od obiektu powietrznego przez co najmniej dwie elewacyjne wiązki odbiorcze. Jakość estymacji wysokości silnie zależy od poziomu odbieranego sygnału echa. Z tych względów ocena rzeczywistej dokładności pomiaru wysokości przez radar wymaga wykonania oblotu statkiem powietrznym oraz znajomości wysokości na której lot ten był wykonywany. Zastosowanie do pomiaru wysokości różnicowej techniki DGPS pozwoliło na uzyskanie bezprecedensowej dokładności pomiaru chwilowej wartości wysokości lotu statku powietrznego na poziomie 3 m. Zarejestrowane w ten sposób dane wzorcowe wysokości lotu pozwoliły na przeprowadzenie analizy procesu pomiaru wysokości obiektów powietrznych przez radar RST-12M. Wyniki pomiaru wysokości lotu, uzyskane w trakcie lotów samolotu Cessna przedstawiono graficznie na rysunku nr 9. Rysunek ten przedstawia wykres wysokości lotu samolotu Cessna zmierzonej przez odbiornik GPS oraz wyestymowanej przez badany radar. Z uwagi na stosunkowo niski pułap na jakim wykonywany był lot, samolot wykrywany był tylko w pierwszej dolnej parze wiązek odbiorczych. W wielu przypadkach echo obserwowanego samolotu było wykrywane tylko w jednej wiązce elewacyjnej, co uniemożliwiało wykonanie estymacji (pomiaru) wysokości. W takiej sytuacji wysokość samolotu była wyznaczana w oparciu o kąt elewacji osi wiązki antenowej, w której wykryto obiekt. Takie przypadki wyróżnione są na rysunku nr 9 kolorem żółtym. W trakcie pracy bojowej wysokości określone, jako środek elektryczny pojedynczej wiązki traktowane są, jako wątpliwe i nie są brane pod uwagę, jako parametry danego wykrycia.



Rys. 9 Porównanie wysokości z GPS oraz pomiarów wysokości lotu statku powietrznego wykonanych przez radar RST-12M.

Źródłem widocznych na powyższym rysunku okresowych zaburzeń wartości mierzonej przez radar wysokości są zjawiska związane z wielodrogowością odbioru sygnałów echa. Najniższa wiązka odbiorcza częściowo oświetla powierzchnię ziemi, przez co jej kształt zostaje zaburzony w zależności od charakterystyki odbiciowej powierzchni gruntu. Powyższego zjawiska nie obserwuje się w przypadku pomiaru wysokości samolotów obserwowanych w wyższych parach wiązek elewacyjnych.

Na podstawie zarejestrowanych danych pomiarowych wykonano obliczenia wartości średniej błęd ($\overline{\Delta H}$), odchylenie standardowe (σ^H) oraz błąd średniokwadratowy ($\Delta H_{\text{sr.kw.}}$) pomiaru wysokości. Otrzymane wyniki odnoszą się tylko do sytuacji gdy echo od obserwowanego samolotu było widziane w dwu wiązkach elewacyjnych. Taka sytuacja miała miejsce w odniesieniu do 70% wykryć samolotu Cessna.

$$\Delta H = H_k - H_k^o$$

$$\overline{\Delta H} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (H_k - H_k^o)$$

$$\sigma^H = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [(H_k - H_k^o) - \overline{\Delta H}]^2}$$

$$\Delta H_{\text{sr.kw.}} = \sqrt{(\overline{\Delta H})^2 + (\sigma^H)^2}$$

n – liczba wszystkich pomiarów wysokości wykonanych przez radar w sytuacji gdy echo od obiektu było widziane w dwóch wiązkach odbiorczych.

$$\begin{aligned}\overline{\Delta H} &= -212 \text{ [m]} \\ \sigma^H &= 234 \text{ [m]} \\ \Delta H_{\text{sr.kw.}} &= 336 \text{ [m]}\end{aligned}$$

4. Podsumowanie

Wykorzystanie różnicowych technik DGPS do wyznaczania pozycji samolotu w locie stworzyło nowe narzędzie do badań sprzętu radiolokacyjnego. Uzyskiwana dokładność wyznaczania pozycji na poziomie 1 m dla współrzędnych płaskich i 3 m w odniesieniu do wysokości powoduje, że chwilowe położenie samolotu w przestrzeni jest znane z dokładnością nie przekraczającą jego wymiarów gabarytowych. Uwzględniając również fakt, że dane rejestrowane przez odbiornik GPS zainstalowany na pokładzie samolotu oraz dane rejestrowane w radarze są zapisywane synchronicznie z jednolitym czasem UTC. Oznacza to, że wyniki obserwacji przez radar samolotu z rejestratorem pozycji mogą być porównywane z rzeczywistym położeniem samolotu w przestrzeni. Stanowi to jakościową zmianę w historii badań sprzętu radiolokacyjnego. Na podstawie nawet jednego lotu można przeprowadzić kompleksową i obiektywną ocenę najważniejszych parametrów eksploatacyjnych radaru, którymi są: dokładność zorientowania radaru względem północy geograficznej, dokładność pomiaru azymutu obiektów powietrznych, dokładność pomiaru

odległości do wykrywanych obiektów powietrznych, dokładność pomiaru wysokości lotu obiektów powietrznych. Trasa lotu samolotu z rejestratorem pozycji może być zaplanowana z dużą swobodą w zakresie odległości od radaru, azymutu oraz wysokości lotu. Stwarza to dodatkowe możliwości analiz działania algorytmów wykrywania obiektów powietrznych oraz pomiaru ich współrzędnych zaimplementowanych w badanym radarze w zależności od zmiennych warunków obserwacji obiektu powietrznego. Analizy działania radaru odniesione do znanego położenia obserwowanego rzeczywistego obiektu powietrznego stanowią dla konstruktorów materiał wyjściowy do optymalizacji algorytmów wykrywania i pomiaru współrzędnych obiektów powietrznych.

Literatura

- [1] Opracowanie zbiorowe „Sprawozdanie z badań typu trójwspółrzednego radaru kontroli obszaru powietrznego RST-12M” – WITU 2006.