

Wyniki symulacji pomiarów radarowego detektora przeszkód i sposób ich wykorzystania

Jerzy Graffstein

Instytut Lotnictwa, Warszawa

Streszczenie: Jednym z ważniejszych urządzeń w autonomicznych systemach antykolizyjnych jest detektor przeszkód. W artykule przedstawiono informacje dotyczące działania wybranego radarowego detektora przeszkód. Efektywność jego działania w systemie zależy w istotny sposób od techniki przetwarzania uzyskanych wyników pomiarów. W pracy opisano wybrane aspekty takiej analizy. Zaprezentowano wyniki symulacji pomiarów radarowego detektora przeszkód w typowych warunkach jego pracy. Uzyskane wyniki stanowią istotne wskazania dla tworzenia i weryfikacji sposobu przetwarzania wyników pomiarów uzyskanych z detektora przeszkód.

Słowa kluczowe: detekcja przeszkód, system antykolizyjny, detektor radarowy

DOI: 10.14313/PAR_203/105

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost liczby, prezentowanych w publikacjach technicznych, rozwiązań lotniczych systemów antykolizyjnych. Wiąże się to między innymi z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi poprawy bezpieczeństwa w ruchu obiektów latających pilotowanych i bezałogowych. Powstające rozwiązania wymienionych systemów różnią się przede wszystkim sposobem uzyskiwania informacji o występujących przeszkodach. Do tego celu wykorzystywane są poza systemami radiowymi, różnego rodzaju urządzenia detekcyjne między innymi typu kamery wizyjne, detektory radarowe [1], skanery na podczerwień i laserowe oraz wiele innych urządzeń.

Wychodząc naprzeciw współczesnym wyzwaniom podjęto

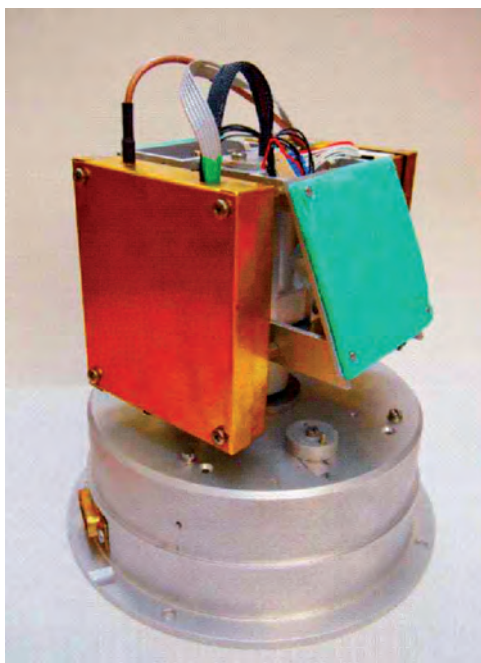
w Instytucie Lotnictwa próbę opracowania Radarowego Detektora Przeszkód (RDP). Zastosowane w nim sprzętowe rozwiązania i komputerowe oprogramowanie, powinno umożliwić wykrywanie nieruchomych i ruchomych przeszkód oraz określenie odległości od nich i prędkości, z jaką się poruszają. Wybór takiego urządzenia był podyktowany spodziewanymi korzyściami, polegającymi m.in. na skutecznej detekcji, również w trudnych warunkach przy braku widzialności, np. w nocy oraz we mgle lub w zapyleniu o ograniczonym natężeniu. Uzyskane doświadczenia w trakcie realizacji pracy stanowiły podstawę do dalszych rozważań opisanych w niniejszym artykule.

2. Radarowy Detektor Przeszkód (RDP)

Radarowy Detektor Przeszkód (RDP) jest podstawowym urządzeniem, które dostarcza do systemu antykolizyjnego

informacje o aktualnej sytuacji w przestrzeni otaczającej latający obiekt. Składa się z dwóch modułów nadawczo-odbiorczych pracujących z częstotliwością 24 GHz. Każdy z nich umieszczony jest razem z anteną nadawczą i odbiorczą na jednej płycie elektronicznej. Zostały one zamocowane w górnej części sztywnej, obrotowej platformy po dwóch przeciwnych jej stronach (rys. 1). Sygnał jest zbierany na przemian z jednego, a następnie z drugiego modułu i formowany w modulatorze, a następnie w filtrze dolnoprzepustowym i wzmacniaczu.

Tak przetworzony sygnał z części ruchomej przekazywany jest przez wielokanałowe złącze obrotowe (wyposażone w pierścienie ślizgowe) do 16-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego znajdującego się w dolnej, nieruchomej części obudowy RDP. Cyfrowy sygnał podlega



Rys. 1. Konstrukcja Radarowego Detektora Przeszkód (RDP)

Fig. 1. Construction of Radar obstacle detector (RDP)

$$d_{sz} = \sum_{i=N_{zs\min}}^{i=N_{zs\max}} d_{RDP_7} (\sin(N_{zs} \alpha_s) - \sin((N_{zs} - 1) \alpha_s)) \quad (7)$$

Gdy oznaczymy prędkość względną wskazywaną w i -tym sektorze RDP jako V_{RDPi} , to prędkość radialna przeszkody wynikająca z tego pomiaru jest równa:

$$V_{0P} = V_0 \cos(|(7 - N_i) \alpha_s| + \psi_D) - V_{RDPi} \quad (8)$$

gdzie kąt dryfu samolotu dla jego prędkości podłużnej U i bocznej V w układzie z nim związanym wynosi:

$$\Psi_D = \arctg\left(\frac{V}{U}\right) \quad (9)$$

Składowe prędkości przeszkody w płaszczyźnie poziomej w układzie ziemskim mierzone w sektorze o numerze N_i wynoszą:

$$\dot{x}_{1P} = (V_0 \cos(|(7 - N_i) \alpha_s| + \psi_D) - V_{RDPi}) \cos(\Psi + (N_i - 7) \alpha_s) \quad (10)$$

$$\dot{y}_{1P} = (V_0 \cos(|(7 - N_i) \alpha_s| + \psi_D) - V_{RDPi}) \sin(\Psi + (N_i - 7) \alpha_s) \quad (11)$$

4. Wyniki symulacji wskazań (RDP)

Podjęcie decyzji o wyborze rodzaju manewru antykolizyjnego, jego parametrach i momencie rozpoczęcia jego wykonania jest kluczowe dla bezpiecznego uniknięcia zderzenia z przeszkodą. Jednocześnie stanowi kompromis między ograniczonym i ciągle zmniejszającym się czasem oraz odległością do wystąpienia kolizji (lot ze zbliżaniem się do przeszkody) a rosnącą ilością informacji o przeszkodzie (jej położenie, wymiary i sposób ruchu) i jednocześnie poprawą wiarygodności uzyskiwanych informacji. W dalszej części opisane zostaną dodatkowe szczegóły związane z estymacją wybranych wielkości charakteryzujących przeszkodę, w tym przede wszystkim jej charakterystyczny wymiar d_{sz} .

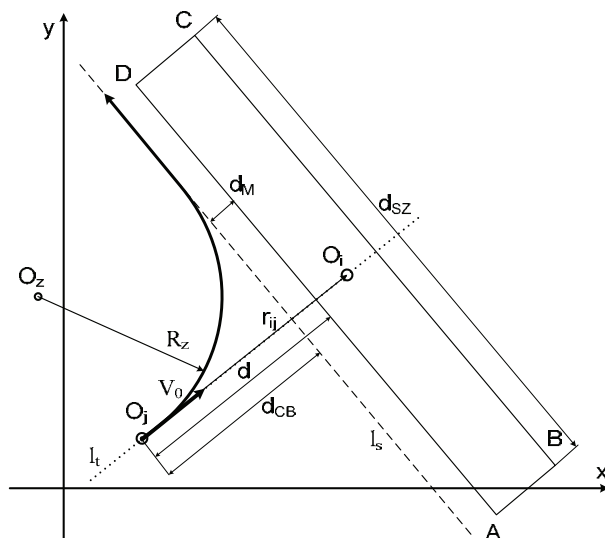
Na potrzeby symulacji przyjęto nieruchomą przeszkodę, której wymiar charakterystyczny (rys. 3) wynosił $d_{sz} = 400$ m. Samolot startuje z punktu odległego od przeszkody o 282 m i leci lotem poziomym ustalonym z prędkością $V_0 = 50$ m/s. W pierwszym cyklu symulacji samolot zbliża się z punktu startowego leżącego na symetralnej odcinka AD (rys. 3) pod kolejno arbitralnie przyjętymi kątami: 0° , 25° , 50° i 75° mierzonymi między podłużną osią samolotu a prostopadłą do krawędzi przeszkody AD (rys. 3).

W dwóch kolejnych cyklach symulacji, przy tych samych warunkach lotu, samolot zbliżał się do przeszkody niesymetrycznie i z kątami, jak w pierwszym cyklu. Przesunięcie od osi przeszkody wynosiło $+141$ m, a następnie -141 m. Wskazania RDP w poszczególnych sektorach tworzą rozkład prędkości (rys. 5, 6 i 7) pozwalający zgodnie ze wzorami (8), (10) i (11) na stwierdzenie, że przeszkoda jest nieruchoma mimo niezerowych wskazań RDP. Uzyskiwany rozkład odległości (rys. 8, 9 i 10) dla różnych momentów lotu samolotu był podstawą do estymacji długości d_{sz}

rzutu odcinka AD na płaszczyznę prostopadłą do podłużnej osi samolotu.

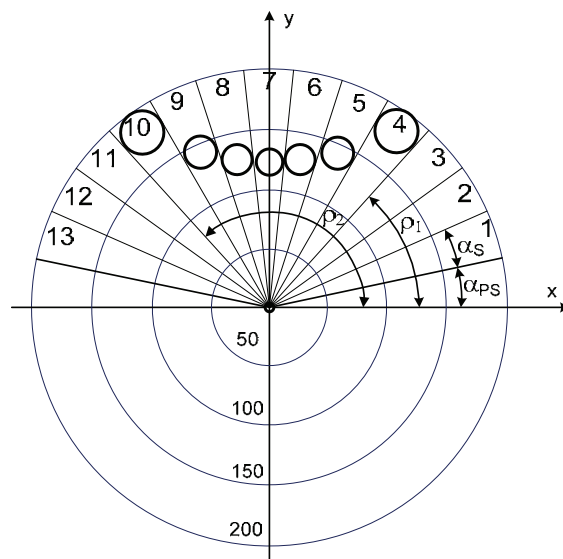
Rozkład zmierzonych przez RDP odległości i prędkości w poszczególnych wiązkach detektora pozwala na przybliżone oszacowanie położenia przeszkody względem samolotu – np. symetryczne (rys. 5, 8) lub niesymetryczne (rys. 6, 7, 9 i 10).

Przykładowy odczyt danych z RDP (rys. 4), na którym pokazany został układ 7 wiązek z wykrytymi odcinkami przeszkody, pozwala wnioskować o istnieniu symetrycznie usytuowanej przeszkody oddalonej o ok. 114,8 m. Wektor prędkości obiektu ma kierunek w przybliżeniu prostopadły do krawędzi AD przeszkody.



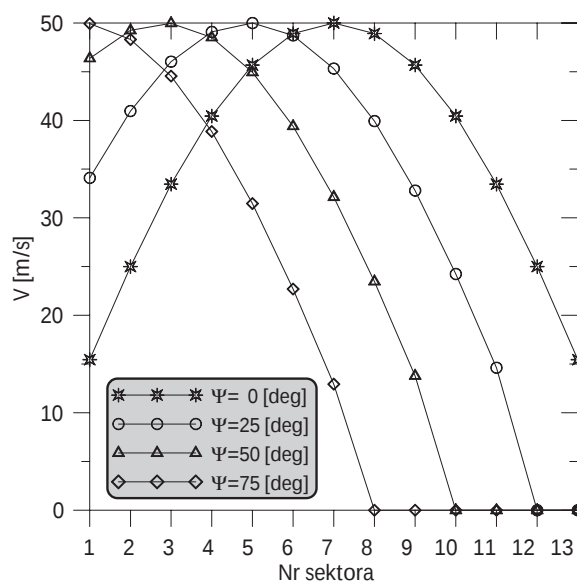
Rys. 3. Wielkości geometryczne określające położenie i ruch obiektu względem przeszkody – przykład antykolizyjnej trajektorii

Fig. 3. Geometrical parameters defining position and motion of the object towards an obstacle – example of anti-collision trajectory

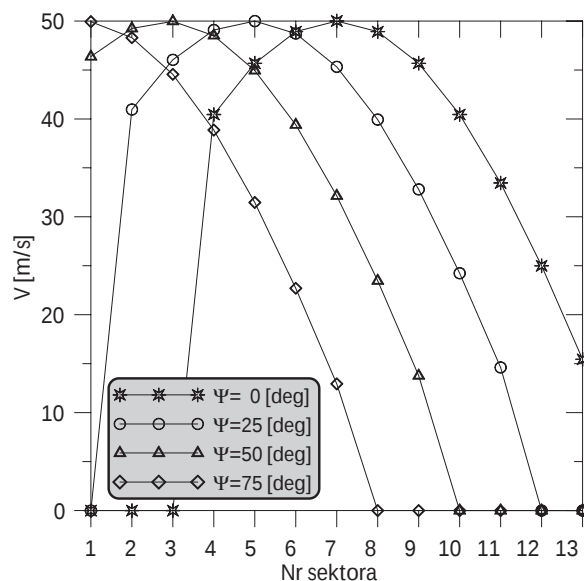


Rys. 4. Przykład graficznej formy i wyników pomiaru RDP

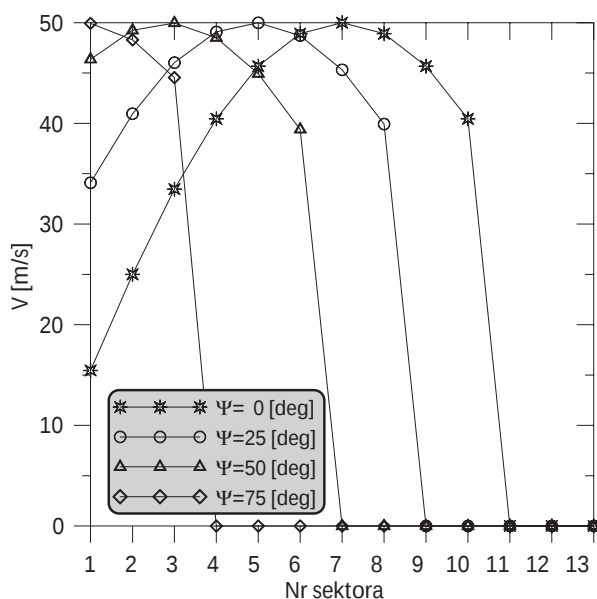
Fig. 4. Example of graphical form of RDP measurement's result



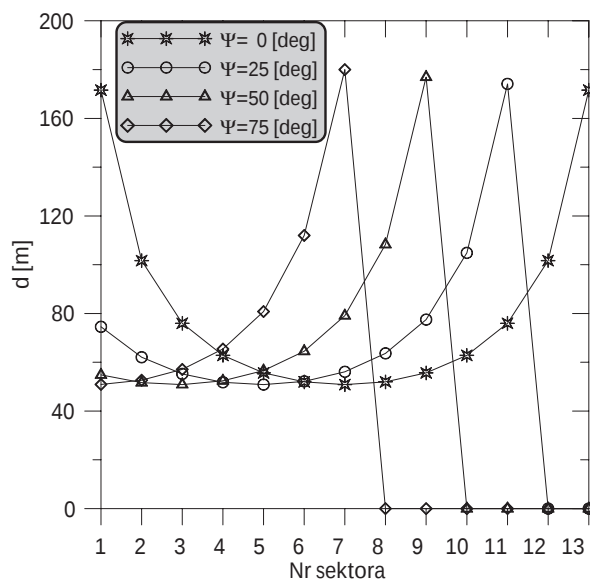
Rys. 5. Pomiar prędkości w wiązkach RDP – ruch symetryczny
Fig. 5. Measurement of velocity in bundles RDP – symmetric movement



Rys. 6. Pomiar prędkości w wiązkach RDP – ruch niesymetryczny
Fig. 6. Measurement of velocity in bundles RDP – no symmetric movement



Rys. 7. Pomiar prędkości w wiązkach RDP – ruch niesymetryczny
Fig. 7. Measurement of velocity in bundles RDP – no symmetric movement



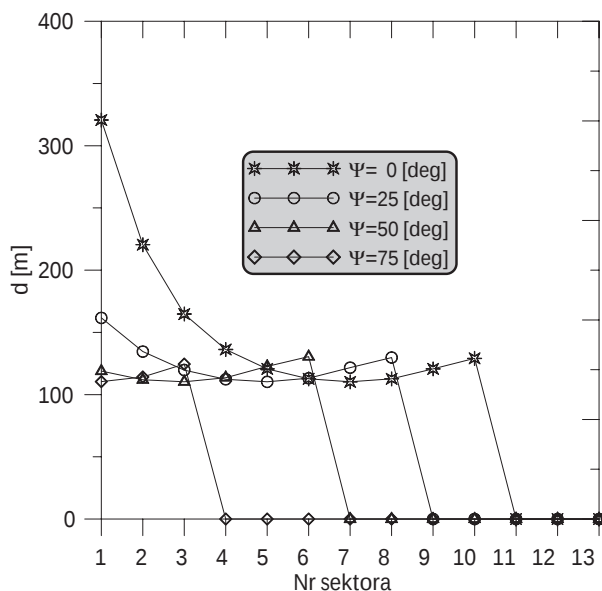
Rys. 8. Pomiar odległości w wiązkach RDP – ruch symetryczny
Fig. 8. Measurement of distance in bundles RDP – symmetric movement

Omawiany układ wiązek (rys. 4) z wykrytą przeszkodą może także odpowiadać zupełnie innemu scenariuszowi, w którym występuje np. 7 przeszkód o małym charakterystycznym wymiarze leżących w przybliżeniu na jednej linii w podobnej odległości od punktu startu. Przyjmując nawet największe, możliwe odległości między tymi hipotetycznymi przeszkodami są jednak za małe, aby umożliwić bezpieczny przelot samolotu między nimi z jednoczesnym zachowaniem odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa. W tej sytuacji (podobnie jak poprzednio opisaną – jedna duża przeszkoda), w celu uniknięcia zderzenia z przeszkodą

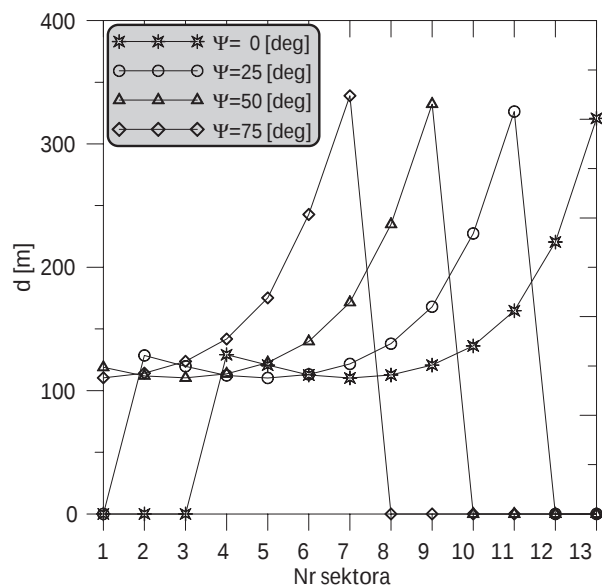
istnieje konieczność wykonania manewru zakrętu, który zapewni zmianę kierunku lotu obiektu o 90° .

Niesymetryczność położenia obiektu względem przeszkody odzwierciedlają rozkłady wiązek RDP, w których wykryto przeszkodę i pomierzono jej charakterystyczny wymiar d_{sz} (rys. 9 i 10).

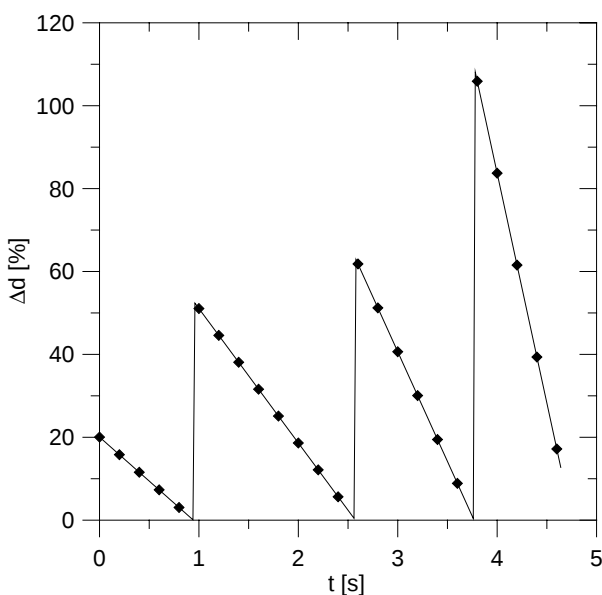
Na wykresach (rys. 11–14) przedstawiono przebieg błędów estymacji długości d_{sz} w czasie zbliżania się samolotu do przeszkody. Przedstawione niedokładności wynikają ze sposobu dokonywanego pomiaru przez RDP. Maksymalny błąd omawianego pomiaru wynika z szerokości wiązki,



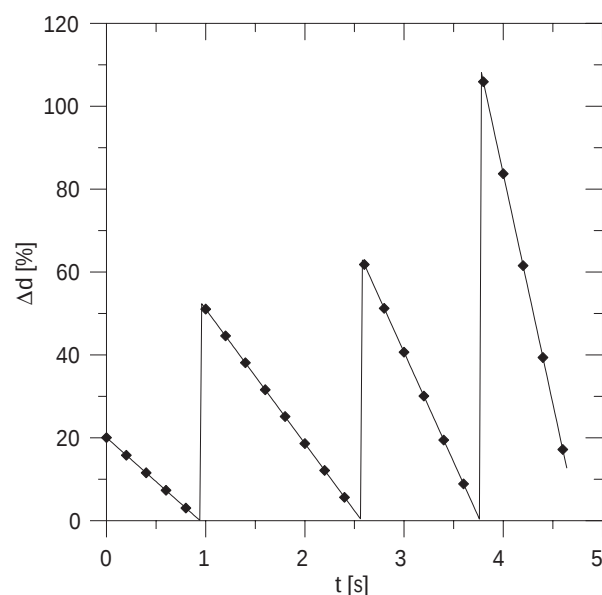
Rys. 9. Pomiar odległości w wiązkach RDP – ruch niesymetryczny
Fig. 9. Measurement of distance in bundles RDP – no symmetric movement



Rys. 10. Pomiar odległości w wiązkach – ruch niesymetryczny
Fig. 10. Measurement of distance in bundles RDP – no symmetric movement



Rys. 11. Błąd pomiaru odległości – symulowany symetryczny lot samolotu
Fig. 11. Error of distance measurement – symmetric flight simulation of aircraft



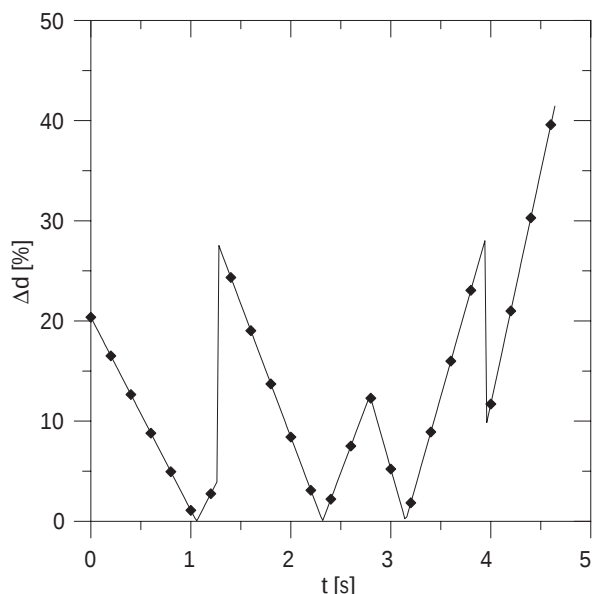
Rys. 12. Błąd pomiaru odległości – symulowany niesymetryczny lot samolotu
Fig. 12. Error of distance measurement – no symmetric flight simulation of aircraft

sposobu jej odbicia się od powierzchni przeszkody i jej odległości od samolotu.

Dla usytuowania podłużnej osi samolotu pod kątem różnym od 90° względem symetrycznej odcinka AD można wyliczyć wymiar przeszkody rzutowanej na oś prostopadłą do osi samolotu. Znajomość długości wspomnianego wymiaru jest wystarczająca do zdefiniowania bezpiecznego manewru antykolizyjnego.

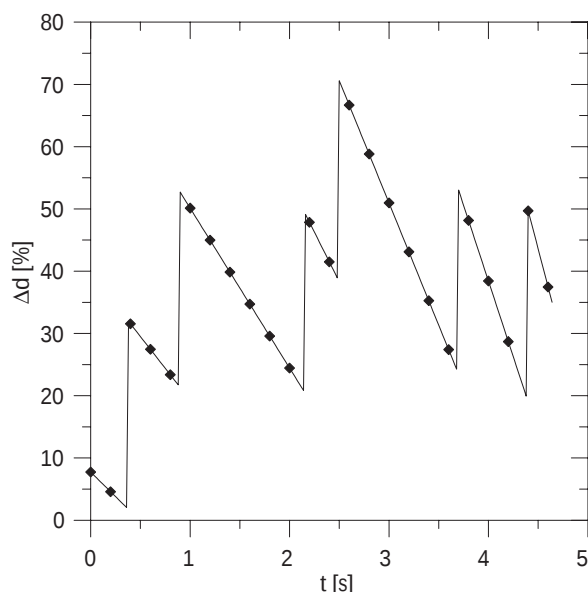
Najmniejsza wartość błędu pomiaru występuje dla odczytu, który poprzedza zmianę liczby sektorów, w których wykryto przeszkodę. To zjawisko jest prze-

ślanką do tego, aby w miarę dysponowania zapasu czasu jednym z kryteriów wyboru momentu podjęcia decyzji o sposobie ominięcia przeszkody było uzyskanie większej liczby wiązek odbitych od przeszkody. Z punktu widzenia bezpieczeństwa samolotu korzystne jest, aby wskazywany wymiar przeszkody d_{sz} był najbliższy wartości rzeczywistej. Taka sytuacja występuje, gdy brzegowe wiązki radaru całą swoją szerokością obejmują powierzchnię przeszkody. Jest to istotna informacja, gdyż w tym momencie dysponujemy najbardziej precyzyjną informacją pozwalającą na dokonanie wyboru odpowiedniego manewru antykolizyjnego.



Rys. 13. Błąd pomiaru odległości – symulowany niesymetryczny lot samolotu

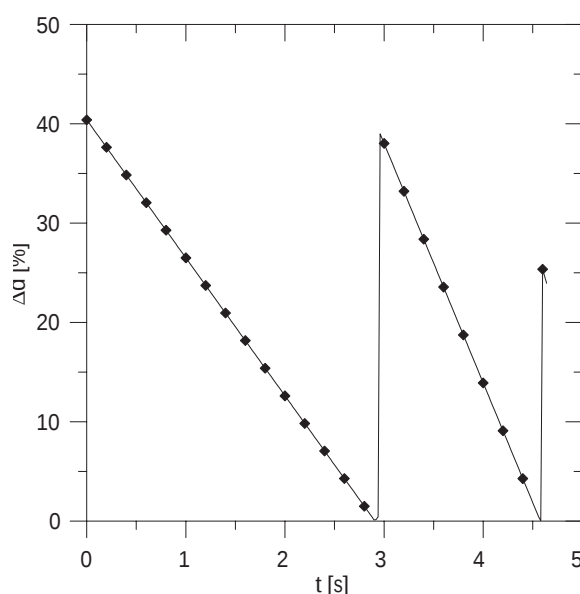
Fig. 13. Error of distance measurement – no symmetric flight simulation of aircraft



Rys. 14. Błąd pomiaru odległości – symulowany niesymetryczny lot samolotu

Fig. 14. Error of distance measurement – no symmetric flight simulation of aircraft

Uzyskanie najwyższej dokładności pomiaru długości d_{sz} przeszkody w pierwszym pomiarze po zmianie liczby wiązek z wykrytą przeszkodą jest możliwe przede wszystkim w symetrycznym, prostym locie. W innych sytuacjach efekt ten ma podobny charakter (rys. 14) i spadek opisywanego błędu jest, w wielu przypadkach również znaczny ale często nie osiąga wartości zerowej (rys. 12 i 13). Zjawisko, w którym omawiany błąd nie spada do zera wynika z niejednoczesnej zmiany brzegowych wiązek



Rys. 15. Liczba wiązek z wykrytą przeszkodą – symulowany symetryczny lot samolotu

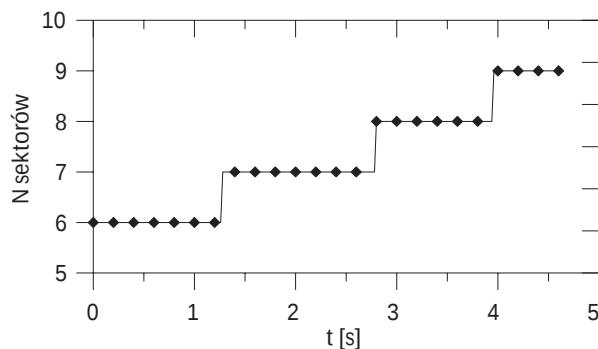
Fig. 15. Number of bundles with detection obstacle – symmetric flight simulation of aircraft

– w tym samym czasie liczba wiązek z wykrytą przeszkodą wzrasta o jeden (rys. 16, 17 i 18), a nie jak w przypadku symetrycznego położenia – o dwa (rys. 15). Ostatecznie estymacja wartości długości d_{sz} dokonywana będzie w oparciu o następujące dane: położenie katowe wiązek, w których wykryto przeszkodę, wyliczoną odległość od niej oraz czas zmiany liczby wspomnianych wiązek (rys. 15–19).

5. Wnioski

Do podjęcia właściwej decyzji doboru odpowiedniego manewru antykolizyjnego wymagane jest uzyskanie wyników analizy pomiarów RDP w trybie *on-line*. Wyniki te są niezbędne do zapewnienia orientacji pilota (operatora lub autopilota) obiektu latającego o sposobie rozmieszczenia i wielkości przeszkód w najbliższym otoczeniu. Z analizy symulowanych danych pomiarowych detektora przeszkód wynikał ścisły związek między uzyskiwanym charakterem pomiarów a sposobem ich numerycznej obróbki. Możliwości uzyskania dokładniejszych pomiarów: położenia, wymiaru i prędkości przeszkody stanowią istotny powód, dla którego wybór chwili rozpoczęcia manewru antykolizyjnego należy w miarę możliwości opóźnić o pewien czas uwzględniający dostateczny margines bezpieczeństwa. Podsumowując dotychczasowe rozważania uwzględniające wyniki symulacji wskazań RDP można wyodrębnić następujące etapy przetwarzania danych z RDP:

1. Wstępna obróbka sygnału z RDP (FFT i CFAR) [3, 7].
2. Wyliczenie najmniejszej odległości od przeszkody.
3. Oszacowanie charakterystycznego wymiaru przeszkody.
4. Wyliczenie prędkości przeszkody.
5. Poprawa dokładności charakterystycznego wymiaru przeszkody.
6. Zwiększenie dokładności pomiaru prędkości przeszkody.



Rys. 16. Liczba wiązek z wykrytą przeszkodą – symulowany niesymetryczny lot samolotu

Fig. 16. Number of bundles with detection obstacle – no symmetric flight simulation of aircraft

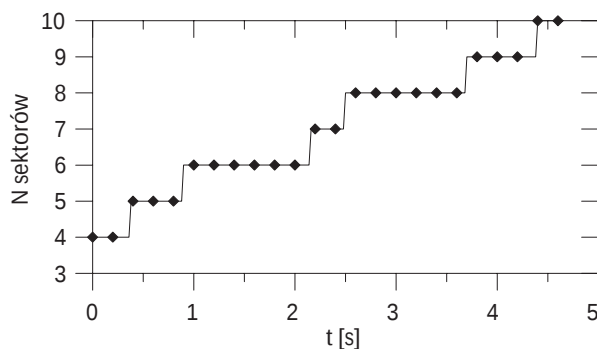
7. Określenie położenia przeszkody w prostokątnym układzie współrzędnych [5].
8. Sprawdzenie warunku kolizji (4).

Bibliografia

1. Ariyur K.B., Lommel P., Enns D.F., *Reactive in flight obstacle avoidance via radar feedback*. Portland, 2005, 2978–2982.
2. Benayas J.A., Fernández J.L., Sanz R., Diéguez A.R., *The beam-curvature method: a new approach for improving local realtime obstacle avoidance*. The International Federation of Automatic Control, 2002.
3. Dziubiński J., *Radarowy detektor przeszkód bliskiego zasięgu*, Prace Instytutu Lotnictwa, Nr 224, Warszawa, 2012, 3–8.
4. Graffstein J., *Elementy procesu wykrycia zagrożenia kolizją i automatycznie sterowany manewr awaryjny*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, Nr 2, 2012, 383–387.
5. Jankowski S., Szymański Z., Szczyrek J., *Reconstruction of environment model by using radar vector field histograms*, “Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments”, Proc. of SPIE vol. 8454, no 845422, 2012, DOI: 10.1117/12.2012565.
6. Lalish E., Morgansen K.A., Tsukamaki T., *Decentralized Reactive Collision Avoidance for Multiple Unicycle-Type Vehicles*. American Control Conference, 2009, 5055–5061.
7. Szpakowska-Peas E., *Algorytm detekcji obiektów dla Radarowego Detektora Przeszkód*. Prace Instytutu Lotnictwa, Nr 224, Warszawa, 2012, 9–19.

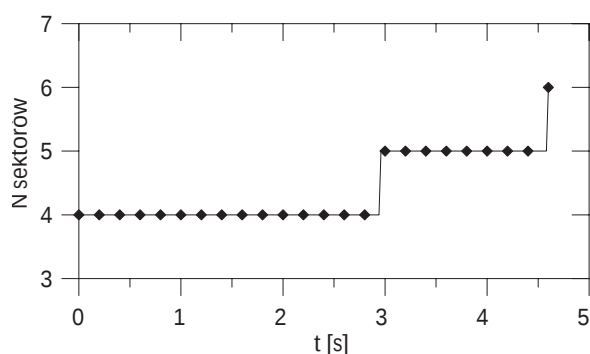
Simulation results of radar obstacle detector measurements and method of usage

Abstract: A detector of obstacles is one of the most important units in any autonomous anti-collision system. In the article the operation of example of such a radar detector is considered. The effectiveness of operation depends essentially on techniques of measured data processing. Some selected aspects



Rys. 17. Liczba wiązek z wykrytą przeszkodą – symulowany niesymetryczny lot samolotu

Fig. 17. Number of bundles with detection obstacle – no symmetric flight simulation of aircraft



Rys. 18. Liczba wiązek z wykrytą przeszkodą – symulowany niesymetryczny lot samolotu

Fig. 18. Number of bundles with detection obstacle – no symmetric flight simulation of aircraft

of such an analysis are presented. Simulation results of measuring process completed by the radar detector of obstacles are presented for typical conditions of operation. Obtained results are crucial pointers for synthesis and verification of the method of processing the measuring data delivered by the detector of obstacles.

Keywords: detection of obstacle, obstacle avoidance system, radar detection

Artykuł recenzowany, nadesłany 20.11.2013 r., przyjęty do druku 20.12.2013 r.

dr inż. Jerzy Graffstein

Adiunkt w pionie Centrum Nowych Technologii Instytutu Lotnictwa. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia modelowania dynamiki ruchu obiektów latających, automatyczne sterowania lotem wzdłuż zadanej trajektorii oraz zagadnienia autonomicznych systemów antykolizyjnych w zastosowaniach lotniczych.

e-mail: jgraff@ilot.edu.pl

