

# Fuzja Wielosensoryczna w Zagadnieniu Detekcji Bezzałogowych Statków Powietrznych

**Streszczenie.** W pracy skupiono się na problemie wykrywania bezzałogowych statków powietrznych naruszających zatrzeżoną przestrzeń powietrzną. Głównym celem badań jest opracowanie algorytmu umożliwiającego detekcję, identyfikację i rozpoznanie bezzałogowego statku powietrznego wlatującego w obszar monitorowanej przestrzeni powietrznej. Proponowana metoda polega na wielosensorycznej fuzji danych i opiera się na warunkowej filtracji komplementarnej oraz wielostopniowej klasteryzacji danych sensorycznych. Skuteczność proponowanego rozwiązania została przetestowana z wykorzystaniem metodologii szybkiego prototypowania w oprogramowaniu MATLAB na podstawie rzeczywistych danych sensorycznych pozyskanych podczas przeprowadzonych lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi.

**Abstract.** The paper focuses on the problem of detecting unmanned aerial vehicles that violate restricted airspace. The main purpose of the research is to develop an algorithm that enables the detection, identification and recognition of an unmanned aerial vehicle violating restricted airspace. The proposed method consists of multi-sensory data fusion and is based on conditional complementary filtration and multi-stage clustering. The efficiency of the proposed solution was tested using rapid prototyping approach in the MATLAB software on the basis of real sensory data acquired during arranged unmanned aerial vehicle flights. **(Multi-Sensory Data Fusion Applied to UAV Detection)**

**Słowa kluczowe:** systemy antydrone, fuzja danych, detekcja dronów, identyfikacja, rozpoznanie, algorytm śledzący  
**Keywords:** UAV, anti-drone system, data fusion, drone detection, identification, recognition, tracking algorithm

## Wprowadzenie

W ciągu ostatnich dwóch dekad nastąpił ogromny rozwój bezzałogowych statków powietrznych (BSP) [1, 2, 3]. Od momentu dopuszczenia BSP do powszechnego użytku cywilnego, liczba zdarzeń z ich udziałem stale rośnie. Niestety, zagrożenia jakie stwarzają mogą zagrażać bezpieczeństwu publicznemu i osobistemu. W artykule kompleksowo poruszono zagadnienie technologii systemów antydrone. Przedstawiono aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie oraz przegląd istniejących w tym zakresie rozwiązań rynkowych [4, 5, 6, 7]. Scharakteryzowano technologie radarowe, wizyjne, akustyczne i radiowe, które są wykorzystywane do wykrywania BSP. Podstawowy problem badawczy poruszony w artykule dotyczy fuzji danych pozyskanych z systemu radiowego AeroScope, radaru EchoGuard wyposażonego w cztery zestawy antenowe oraz systemu ADS-B w celu opracowania algorytmu detekcji UAV w przestrzeni 3D. W artykule omówiono proces wstępnego przetwarzania danych z wymienionych czujników, proces synchronizacji danych oraz fuzji danych radarowych w celu opracowania algorytmu detekcji dronów.

Głównym celem pracy było opracowanie algorytmu opartego na fuzji danych z wymienionych wyżej systemów sensorycznych, umożliwiającego wykrycie, identyfikację i rozpoznanie BSP naruszającego przestrzeń powietrzną monitorowaną przez omawiany system. Struktura artykułu zorganizowana została w sposób następujący. W pierwszej sekcji przedstawiono krótki przegląd systemów antydrone. Następnie przedstawiono koncepcję procedury testowej w warunkach rzeczywistych, realizowanej z użyciem zarówno pojedynczego, jak i wielu dronów. Rozdział 5 zawiera opis wybranych sensorów wraz z analizą danych, co ma istotny wpływ na wybór metody fuzji danych i opracowanie algorytmu. W rozdziale 6 przedstawiono algorytm fuzji danych wraz z opisem poszczególnych etapów projektowania systemu. Z kolei w sekcji 8 przedstawiono wyniki detekcji BSP, przeprowadzonej na danych z rzeczywistego eksperymentu. Wnioski zostały omówione w ostatnim rozdziale. Warty podkreślenia jest fakt, iż algorytm został przetestowany na danych rzeczywistych pozyskanych w trakcie kontrolowanych przez operatorów lotów BSP.

## Przegląd istniejących rozwiązań w zakresie systemów antydrone

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań w zakresie systemów antydrone. Ich głównym zadaniem jest przeciwdziałanie bezzałogowym statkom powietrznym poprzez ich wykrywanie i zwalczanie za pomocą metod kinetycznych lub energii skierowanej na BSP w postaci impulsu elektromagnetycznego [8, 9]. Najbardziej zaawansowane rozwiązania techniczne działają skutecznie w zakresie przestrzennym  $360^\circ$  (azymut) oraz  $-45^\circ \div 225^\circ$  (kąt elewacji). Dostępne są także systemy o znacznie bardziej ograniczonym, przestrzennym zakresie działania. Przykładem może być system AARONIA oparty na detektorze AARTOS (detektor RF), który działa w zakresie wysokościowym do  $10^\circ$  oraz system SpotterRF do  $90^\circ$ . Oprócz wyżej wymienionych rozwiązań dopuszczonych do użytku w terenach zabudowanych istnieją również systemy, które ze względu na swoje parametry emisyjne nie są dopuszczone do użytku w terenie zurbanizowanym, ale z powodzeniem mogą funkcjonować poza nim. Należą do nich systemy Bligher (A400 Radar), ROBIN (ELVIRA), ELTA (ELM2026) i Echodyne (EchoGuard). W najnowszych rozwiązaniach technicznych pojedynczy sensor radarowy jest w stanie zapewnić pełne półsferyczne pokrycie przestrzenne monitorowanego obszaru, dzięki czemu nie ma potrzeby integrowania kilku sensorów RF. Takie podejście minimalizuje wzajemne interferencje elektromagnetyczne i jednocześnie umożliwia efektywne wykorzystanie przydzielonych zasobów widma. Ponadto, dzięki zastosowaniu jednego czujnika radarowego, waga systemu antydrone może zostać w sposób znaczny zminimalizowana. Niezwykle istotnym parametrem systemów antydrone jest zasięg detekcji. Parametr ten w dużej mierze zależy od przekroju radarowego (RCS) obserwowanego BSP oraz prędkości, z jaką ten obiekt się porusza. Ponadto sygnatura elektromagnetyczna przekroju radarowego BSP może być wysoce skuteczną cechą wyróżniającą w procesie detekcji i klasyfikacji dronów, co pokazano w [10]. Średnio, zasięg detekcji dla ww. typu systemów wynosi od 800 m do 3500 m, w przypadku dronów poruszających się z prędkością ok. 40 m/s. Przykładowy radar EchoGuard wykorzystany w niniejszym projekcie, jest w stanie wykryć drony w odległości 900 m. Istotnym parametrem systemów antydrone jest również dokładność detekcji, której wartość powinna być jak najwyższa, zwłaszcza

w przypadku śledzenia szybko manewrujących obiektów na niewielkiej wysokości w obszarach zabudowanych [11].

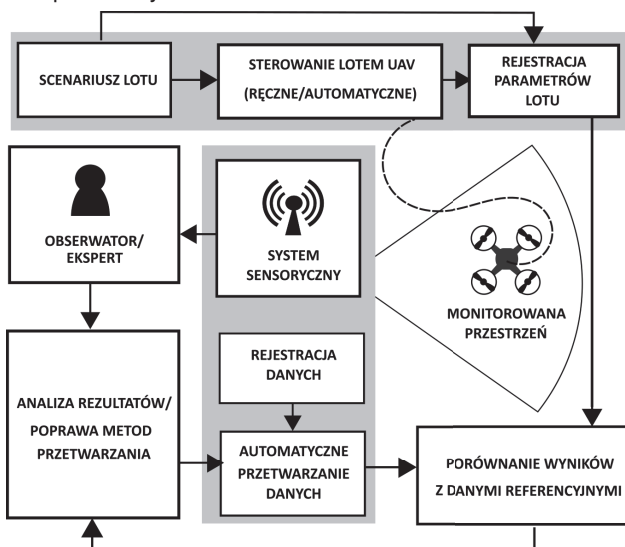
Skuteczność multisensorycznych systemów antydronowych wynika w głównej mierze z umiejętnej integracji danych dostarczonych przez poszczególne podsystemy sensoryczne (radarowe, optyczne, termowizyjne). Umiejętnie zrealizowana fuzyja multisensoryczna powinna umożliwić wykrycie i śledzenie różnego rodzaju obiektów, tj. dronów, ludzi i pojazdów w pełnym pokryciu półsferycznym oraz ekstrakcję cech, które użyte w procesie klasyfikacji umożliwiają identyfikację monitorowanego obiektu [12]. Z tego powodu fuzyja danych jest kluczowym procesem wpływającym bezpośrednio na skuteczność wykrywania, rozpoznawania i identyfikacji BSP przez tego typu systemy.

Dostępne na rynku komercyjnym systemy antydronowe wyposażone są najczęściej w minimalny zestaw sensorów. Nie są one jednocześnie zoptymalizowane pod względem integracji sensorów radarowych, optycznych czy termowizyjnych na jednej platformie. Prowadzi to do ich degradacji funkcjonalnej i selektywnego działania, a zatem ograniczonego ich wykorzystania w procesie detekcji obiektów. To z kolei zmniejsza skuteczność i prawdopodobieństwo wykrycia obiektu. W chwili obecnej systemy antydronowe, poddane analizie w poprzedniej części opracowania, nie posiadają funkcji umożliwiających fuzyję danych dostarczanych przez poszczególne elementy składowe systemu. Podejście zaproponowane w niniejszej pracy ma na celu wypełnienie tej luki.

### Procedury testowe i pozyskiwanie danych

Głównym celem przeprowadzonych procedur operacyjnych było pozyskanie danych z rzeczywistego systemu sensorycznego działającego w warunkach zbliżonych do tych, w których docelowo ma być użyty omawiany system. Aby odtworzyć scenariusz kontrolowanego naruszenia przestrzeni powietrznej, założono archiwizację następujących danych (Rys. 1):

- czas rozpoczęcia testu,
- czas startu BSP,
- czas wejścia BSP w monitorowaną przestrzeń,
- ścieżkę lotu (parametryzowany czasowo zapis koordynat przestrzennych BSP),
- parametry lotu.



Rys. 1. Koncepcja testów systemu w warunkach realistycznych

Proces akwizycji danych odbywał się w warunkach rzeczywistych podczas działań operacyjnych pod nadzorem wykwalifikowanych operatorów z użyciem bezzałogowych

statków powietrznych:

- DJI Matrice 600 z transponderem ADS-B;
- DJI Mavic 2.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu dostępnych technologii detekcji BSP wybrano trzy systemy sensoryczne zaklasyfikowane do grupy metod pasywnych i aktywnych. Na tym etapie zastosowano podejście holistyczne i dobrano sensory w celu uzyskania komplementarności danych. Zrezygnowano z metody akustycznej opartej na śledzeniu i analizie śladu dźwiękowego emitowanego przez obiekt latający. Istotną wadą wspomnianej metody jest wpływ dźwięków otoczenia (tzw. tła akustycznego), co ma negatywny wpływ na wykrywanie, klasyfikację i identyfikację BSP. Kolejną wadą jest siła i kierunek wiatru, które mają istotny wpływ na zasięg metody akustycznej. Dlatego też, biorąc pod uwagę powyższe cechy, wybrano następujące sensory, które użyte zostały podczas testów:

- transponder ADS-B ;
- system radiowy DJI AeroScope (w pozostałej części opracowania notacja "AEROSCOPE" i "AeroScope" będzie używana zamiennie) do odbioru pakietów informacyjnych wysyłanych przez BSP do operatora;
- EchoGuard radar wyposażony w cztery anteny dające pełne pokrycie planarne oraz pokrycie wertykalne w zakresie  $\pm 40^\circ$  (system ten odłąd będzie nazywany terminem "radar").

Jako wynik procesów akwizycji przeprowadzonych w trakcie lotów testowych, uzyskano każdorazowo trzy zestawy danych, odpowiednio dla każdego z czujników. W dalszej części pracy wyjaśnione zostaną symbole stosowane w tabelach wyników oraz przedstawione w formie graficznej poglądowe przebiegi czasowe wybranych wielkości.

### Opis danych sensorycznych

#### Transponder ADS-B

Zgodnie z nowelizacją prawa lotniczego od 31 grudnia 2020 roku każdy BSP powinien być wyposażony w transponder ADS-B. Celem takiego działania jest obowiązkowe informowanie innych użytkowników przestrzeni powietrznej o własnej pozycji, widocznej na radarze kontroli lotów i identyfikowanej przez inne statki powietrzne, np. pasażerskie wyposażone w TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System)- system ostrzegania i unikania kolizji, który reaguje na sygnały z transponderów ADS-B. System ADS-B jest systemem pasywnym rejestrującym dane nadawane przez statki powietrzne znajdujące się aktualnie w zasięgu odbiornika ADS-B. Dane zawarte są w tablicy składającej się z 39 kolumn i zawierają informację o obecności różnych typów statków powietrznych, rozróżnianych według klasyfikacji ICAO (International Civil Aviation Organization):

- 0 = niezidentyfikowany (brak informacji o typie statku);
- 2 = mały statek powietrzny (od 15,500 do 75,000 lb);
- 3 = duży statek powietrzny (od 75,000 do 300,000 lb);
- 5 = ciężki > 300,000 lb;
- 14 = BSP (bezzałogowy statek powietrzny).

Dlatego analiza danych wymaga wstępnej filtracji, węższej dalsze rozważania wyłącznie do bezzałogowych statków powietrznych. Na potrzeby analizy informacji sensorycznej oraz syntezy algorytmu fuzyji danych przyjęto następujący wektor wartości pomiarów opisujących aktualny stan zarejestrowanego obiektu:

$$(1) \quad X_1 = [ICAO, lat_1, long_1, h, y, V_{xy}, V_z, ET],$$

gdzie: *ICAO* to kod typu statku powietrzego, *lat1* jest sze-

rokością geograficzną, na jakiej znajduje się wykryty obiekt, analogicznie  $long1$  jest długością geograficzną,  $h$  oznacza wysokość n.p.m,  $y$  to orientacja (kurs) obiektu,  $V_{xy}$  jest prędkością w płaszczyźnie horyzontalnej,  $V_z$  oznacza prędkość wznoszenia/opadania,  $ET$  to kategoria statku powietrznego nadającego sygnał. Dane uzyskane z transpondera ADS-B stanowią najpewniejszą identyfikację obiektu. Jest tak pod warunkiem, że BSP jest wyposażony w takie urządzenie. Problemem jest jednak masa transpondera ADS-B. Nawet zminiaturyzowane urządzenia nie są na tyle lekkie, aby mogły być uniesione przez drony ważące mniej niż 2 kg, a tych obecnie lata najwięcej w przestrzeni powietrznej. W związku z tym na dzień dzisiejszy nie ma gwarancji, że wszystkie drony będą wyposażone w transponder ADS-B, dlatego w niniejszym artykule zaproponowano fuzję danych z kilku różnych czujników.

#### System radiowy DJI AeroScope

Istotą działania tego systemu, jest wykrywanie sygnału komunikacji radiowej RF pomiędzy BSP a operatorem naziemnym. Platforma latająca komunikuje się z kontrolerem w określonym paśmie częstotliwości. Po zidentyfikowaniu tego pasma częstotliwości istnieje duże prawdopodobieństwo, że w zasięgu detekcji znajduje się BSP. System dostarcza wstępnie przetworzone dane w postaci 19 kolumnowej tabeli, z których każda zawiera dane określonej wielkości fizycznej inderksowane czasem rejestracji. Na potrzeby dalszej analizy informacji sensorycznej oraz syntezy algorytmu fuzji danych przyjęto następujący wektor wielkości pomiarowych opisujących aktualny stan zarejestrowanego obiektu:

$$(2) \quad X_2 = [V, lat_2, long_2, d, h, y, DT, Did],$$

gdzie:  $V$  jest prędkością lotu obiektu,  $lat_2$  jest szerokością geograficzną na jakiej znajduje się obiekt, analogicznie  $long_2$  opisuje długość geograficzną,  $d$  to odległość BSP od systemu sensorycznego,  $h$  jest wysokością, na której leci obiekt,  $y$  opisuje orientację (kurs) obiektu,  $DT$  oznacza typ BSP,  $Did$  jest unikalnym identyfikatorem BSP.

Wadą tego systemu jest detekcja BSP jedynie jednego producenta - firmy DJI.

#### EchoGuard Radar

System radarowy wyposażony jest w cztery zespoły antenowe. Planarny zakres skanowania pojedynczej anteny radarowej wynosi  $120^\circ (\pm 60^\circ)$  i  $80^\circ$  w płaszczyźnie wertykalnej ( $\pm 40^\circ$ ). Anteny są rozmieszczone co  $90^\circ$ , pokrywając planarnie cały obszar ( $360^\circ$ ). Ponieważ zakres skanowania każdej z czterech anten wynosi  $120^\circ$ , obszary obserwacji poszczególnych anten częściowo się pokrywają. System dostarcza danych w postaci tabeli zawierającej 24 kolumny, z których każda zawiera dane zmiennych stanu obserwowanego obiektu sparаметryzowane czasowo. Na potrzeby dalszej analizy informacji sensorycznej i syntezy algorytmu fuzji danych przyjęto następujący wektor wielkości pomiarowych opisujących aktualny stan śledzonego obiektu:

$$(3) \quad X_3 = [P_{BSP}, CL, RCS, az, el, R, x, y, z, V_x, V_y, V_z],$$

gdzie:  $P_{BSP}$  opisuje prawdopodobieństwo faktu, że wykryty obiekt należy do klasy BSP,  $CL$  jest poziomem ufności detekcji,  $RCS$  to przekrój radarowy,  $az$  oznacza szacowany azymut kursu obiektu,  $h$  jest szacowaną wysokością,

$R$  opisuje szacowaną odległość pomiędzy BSP a radarem,  $x, y$  i  $z$  to szacunkowe współrzędne BSP opisane w kartezjańskim układzie współrzędnych związanym z radarem, natomiast  $V_x, V_y$  i  $V_z$  są składowymi prędkościami BSP odpowiednio w osiach  $x, y$  i  $z$ .

#### Koncepcja fuzji sensorycznej

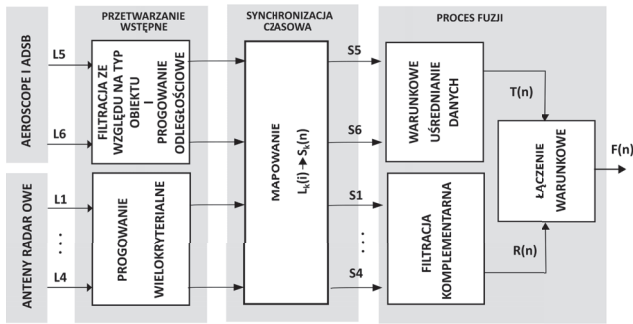
Dzienniki lotów zawierają informacje pozyskane przez trzy rodzaje czujników. Chociaż każdy z nich pozyskuje dane pomiarowe w sposób selektywny, wykorzystując różne techniki pomiarowe (rejestracji), to wszystkie razem są źródłem danych o szerokim spektrum, które wzajemnie się uzupełniają. Ponieważ każde z wymienionych źródeł informacji obciążone jest pewną niepewnością i niedokładnością pomiarową (czasami bardzo znaczącą), dlatego fuzja informacji dostarczanych przez wszystkie te źródła pozwala na zwiększenie pewności detekcji. Znanych jest kilka metod fuzji danych opartych np. o filtr Kalmana, filtr komplementarny, funkcję ważoną czy metody predykcyjne. Najpopularniejsza metoda fuzji danych pochodzących z wielu źródeł bazuje na koncepcji filtru Kalmana [28]. Takie podejście dobrze pasuje do sytuacji, gdy dynamika poszczególnych źródeł danych różni się znacząco, co nie dotyczy prezentowanego problemu. Przeprowadzona dogłębnie analiza danych stała się przyczynkiem do wyboru metody integracji danych uwzględniającej warunkową komplementarność danych, zależną od aktualnych warunków, narzucanych przez typ zidentyfikowanego BSP i jego wyposażenie (np. obecność systemu ADS-B). Ponadto, dane wybrane do fuzji są wynikiem wieloetapowej ekstrakcji i analizy. Z tego powodu zastosowanie podejścia opartego na filtrze Kalmana, które było pierwotnie rozważane, zostało ostatecznie zarzucone na wczesnym etapie rozwoju projektu. Zamiast tego zastosowano warunkową filtrację komplementarną. Przeprowadzona w poprzednim rozdziale analiza danych pozwoliła na sformułowanie kilku spostrzeżeń:

- Każdy z czujników działa asynchronicznie w sposób oparty na zdarzeniach;
- Dane dostarczane przez systemy radarowe AeroScope i EchoGuard zawierają zakłócenia w postaci krótkotrwałych impulsów o dużej amplitudzie;
- System ADS-B dostarcza informacje o wszystkich statkach powietrznych w przestrzeni powietrznej, które znajdują się w zasięgu odbiornika ADS-B, zarówno załogowych jak i bezzałogowych;
- Żaden z tych czujników nie pozwala na przeprowadzenie pełnej procedury wykrywania, rozpoznawania i identyfikacji;
- Pożądanego efektu można osiągnąć poprzez fuzję danych z kilku czujników na zasadzie inteligentnego uzupełniania informacji.

Na rysunku 2 przedstawiono ilustrację przyjętej koncepcji fuzji danych. Jak można zauważyć, proces ten jest realizowany sekwencyjnie, w ramach trzech etapów. Na wejściu procesu znajduje się sześć niezależnych źródeł informacji: Transpondery ADS-B i AEROSCOPE oraz cztery anteny radarowe ECHOGUARD. Ponieważ dane pochodzące z transponderów mają inne cechy niż te dostarczane przez radar, są one przetwarzane niezależnie. W pierwszym etapie przetwarzania wstępnego wykrywane są błędy grube i usuwane ze zbiorów danych. W kolejnej fazie dane są synchronizowane względem momentu inicjalizacji systemu z zadaniem okresem próbkowania.

W ostatniej fazie procesu fuzji zsynchronizowane dane są łączone w dwóch etapach. W pierwszym z nich, detekcje





Rys. 2. Koncepcja wielosensorycznej fuzji danych

zarejestrowane przez transpondery są łączone za pomocą operacji uśredniania, natomiast detekcje zarejestrowane przez cztery anteny radarowe są łączone za pomocą filtra komplementarnego. Następnie te dwa niezależne kanały są łączone poprzez operację fuzji warunkowej.

#### Przetwarzanie wstępne danych

Ponieważ znacznie łatwiej jest analizować i przetwarzać wskaźniki oparte na odległości zdefiniowanej w przestrzeni kartezjańskiej, wszystkie dane dotyczące położenia wykrytych obiektów są przeliczane do wspólnego kartezjańskiego układu współrzędnych, powiązanego ze środkiem geometrycznym stacji radarowej i zorientowanego: Północ - Wschód - Góra. Dane z transponderów są konwertowane z przestrzeni współrzędnych geograficznych (lon-lat-alt). Jak już wspomniano, pierwszy etap procedury polega na usunięciu błędów grubych, które nie zostaną wykorzystane w procesie fuzji. Ponieważ pakiety danych emitowane przez transpondery mają stosunkowo duży zasięg przestrzenny, odbiorniki wchodzące w skład opisywanego systemu mogą rejestrować informacje pochodzące od wielu, często bardzo odległych, obiektów latających. Tak więc pierwszą operacją, którą należy wykonać, jest usunięcie tych detekcji za pomocą progowania opartego na odległości. Czujnik ADS-B może odbierać dane nadawane przez duże statki powietrzne, które znajdują się poza zakresem działania opisywanego systemu. Dlatego w pierwszym etapie przetwarzania sygnału zastosowano filtrację, która spośród wszystkich zidentyfikowanych przez system statków powietrznych wyodrębnia jedynie dane związane z bezałogowymi statkami powietrznymi. W tym przypadku zastosowano dedykowane filtrowanie warunkowe, w którym do wyodrębnienia BSP wykorzystano parametr "PingDetectionemitterType = 14". Biorąc pod uwagę radar, progowanie na podstawie odległości jest również pierwszym realizowanym kryterium usuwania błędnych detekcji. Algorytmy oprogramowania radaru sygnują każdą detekcję dwoma dodatkowymi znacznikami, które są przydatne w dalszej analizie danych. Pierwszy z nich, nazwany *UAV Probability*, którego wartość zawiera się w przedziale od 0 do 1, opisuje pewność, że wykryty obiekt należy do klasy BSP. Drugi to *Confidence Level*, który przyjmuje wartości z zakresu [0-100] i odzwierciedla pewność, że dana detekcja nie jest szumem pomiarowym. W preprocessingu wysokie wartości tych znaczników są wykorzystywane do zawężenia zbioru analizowanych danych.

#### Synchronizacja czasowa danych

Przedstawiona dotychczas metoda fuzji wielosensorycznej opiera się na założeniu, że wszystkie dane dostarczane przez poszczególne sensory systemu są synchroniczne. Założenie takie jest niezbędne do analizy relacji

przestrzennych pomiędzy wykrytymi obiektami. Oznacza to, że dla każdej instancji  $n$  czasu dyskretnego można wyróżnić zbiory danych określające detekcje zebrane w tym samym czasie:  $S_k(n)$ ,  $k = 1, \dots, K$ , gdzie  $n$  jest indeksem danego sensora. W rzeczywistych systemach, takich jak system opisany w niniejszej pracy, zarówno momenty detekcji, jak i momenty ich rejestracji są związane ze zdarzeniem. Oznacza to, że po zaklasyfikowaniu przez algorytm sensora danego pomiaru (odczytu) jako detekcji BSP, jest on zapisywany w rejestrze logów ze "stemplem czasowym" danego sensora zdefiniowanym przez zegar danego czujnika. Dlatego pierwszym etapem procesu fuzji danych jest synchronizacja danych. Dla każdej instancji dyskretnego czasu  $n$  należy dokonać następującego odwzorowania:

$$(4) \quad L_k(i) \rightarrow S_k(n),$$

gdzie  $i$  oznacza indeks detekcji zapisany w rejestrze  $k$ -tego czujnika, natomiast  $n$  określa kolejne chwile w czasie,  $t_n = n\Delta t$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , dyskretyzowane okresem próbkowania  $\Delta t$ . Odbywa się to poprzez etykietowanie elementów oryginalnych zbiorów  $L_k$  indeksami należącymi do danego zbioru  $S_k(n)$ . Każdy zbiór zawiera detekcje pozyskane w okresie czasu  $t \in \langle (n-1)\Delta t, n\Delta t \rangle$ . W szczególności zbiory te mogą być puste, co oznacza, że w danym przedziale czasu nie było żadnej detekcji. Każdy zapis danych dostarczonych przez poszczególne czujniki otrzymuje unikalny numer identyfikacyjny. W każdym okresie próbkowania  $n$  może być zarejestrowanych wiele detekcji o tym samym ID. Podczas procesu synchronizacji należy połączyć te detekcje w jedną. Operacja ta może być wykonana za pomocą różnych metod. W przypadku niniejszej pracy zastosowano operację uśredniania.

#### Fuzja danych z transpondera ADS-B i Aeroskopu

Idea filtra komplementarnego jest dobrze znana z zastosowań w inercyjnych układach pomiarowych IMU (ang. Inertial Measurement Unit), których zadaniem jest estymacja orientacji BSP na podstawie pomiarów z niezależnych sensorów, charakteryzujących się różnymi właściwościami w dziedzinie częstotliwości. Podczas analizy danych sensorycznych pozyskanych przez system zauważono, że w obrębie niektórych obszarów detekcje dostarczane przez wiele sensorów wzajemnie się uzupełniają. Detekcje systemów ADS-B i AeroScope są bardzo podobne, pod warunkiem, że obserwowany BSP jest platformą DJI. W przypadku, gdy obserwowany obszar zostanie naruszony przez BSP innego producenta, wówczas detekcje systemu ADS-B uzupełnią wskazania radaru. Biorąc pod uwagę powyższe obserwacje, zaproponowano fuzję danych opartą na warunkowej komplementarności. Biorąc pod uwagę aktywność filtra w założonym przedziale czasowym, sprawdza on najpierw, czy systemy ADS-B i AeroScope wykryły obecność BSP. Jeśli oba czujniki zarejestrowały detekcje, to są one uśredniane w rozpatrywanym przedziale czasowym. Jeśli detekcja pojawiła się tylko w danych pochodzących z ADS-B, oznacza to, że wykryty BSP nie jest dronem DJI i w tym przypadku jako wynik fuzji przyjmowane są detekcje dostarczone przez ADS-B. Natomiast gdy systemy ADS-B i AEROSCOPE nie pokazują aktywności BSP, a detekcje pojawiają się tylko w odczytach radarowych, to najprawdopodobniej w obserwowanym obszarze znajduje się BSP innego producenta niż DJI, który nie ma zainstalowanego transpondera ADS-B ani AEROSCOPE. Dlatego dane wyjściowe tej części systemu przyjmują postać sumy warunkowej:

$$(5) \quad T(n) = S_5(n) \cup S_6(n) \cup \bar{S}_{5,6}(n),$$

gdzie  $S_5$  to detekcje systemu ADS-B,  $S_6$  detekcje systemu AEROSCOPE, natomiast  $\bar{S}_{5,6}$  oznacza średnią otrzymaną z elementów zbiorów  $S_5$  i  $S_6$ .

#### Fuzja danych radarowych

Radar umożliwia wykrywanie, lokalizację i pomiar parametrów ruchu obiektu poruszającego się w jego zasięgu. Zasięg detekcji radaru zależy od jego czułości oraz konfiguracji przestrzennej jego anten. Ponadto warunki środowiskowe wraz z wymienionymi czynnikami powodują, że ten sam obiekt śledzony przez wiele anten może być wykrywany z różną dokładnością i pewnością. Przykładowo, pewność wykrycia obiektu poruszającego się na granicy zasięgu czujnika jest zwykle mniejsza niż obiektu znajdującego się w centrum obszaru detekcji. Tak więc, mając informację o detekcji pochodzącej z wielu anten radarowych monitorujących ten sam obszar obserwacji, zwykle możliwe jest zwiększenie dokładności i pewności detekcji. W przypadku detekcji wielokrotnych problemem jest określenie, które z nich reprezentują ten sam obiekt, a następnie jak dokonać ich fuzji. W pracy zastosowano klasteryzację dystalną i filtrację komplementarną ze współczynnikami wagowymi obliczanymi, jako funkcje współczynnika pewności. Załóżmy, że dany obszar jest monitorowany przez cztery anteny radarowe o różnych konfiguracjach przestrzennych a w obrębie tego obszaru porusza się  $M$  niezidentyfikowanych obiektów. Zbiór detekcji obiektów zarejestrowanych przez  $k$ -tą antenę w czasie  $n$  jest oznaczony, jako:

$$(6) \quad S_k(n) = \{d_i^k\}, i = 1, 2, \dots, M, k = 1..4$$

where:

$$(7) \quad d_i^k = (P_i^k, c_i^k), c_i^k \in [0, 1]$$

$P_i^k$  oznacza  $i$ -tą detekcję  $k$ -tej anteny opisaną we współrzędnych kartezjańskich, natomiast  $c_i^k$  jest współczynnikiem pewności detekcji oszacowanym przez wewnętrzny algorytm systemu radarowego. Pierwszym etapem procedury fuzji jest identyfikacja danego obiektu wśród wszystkich detekcji przechwyconych przez poszczególne anteny. Odbywa się to poprzez określenie podobieństwa (w sensie zastosowanej metryki) elementów należących do zbiorów  $S_1...S_4$ . Podobieństwo związane jest z przestrzenną bliskością elementów, dlatego najwygodniejszą i najbardziej intuicyjną metryką jest metryka euklidesowa, która została wykorzystana w opisanym podejściu. Dwa obiekty uchwycone przez różne czujniki w tym samym momencie  $n$  w czasie są uważane za podobne, jeśli odległość między nimi jest mniejsza niż pewna wartość progowa:

$$(8) \quad |d_i^k - d_j^l| < d_T, k, l = 1..4, i = 1..M_k, j = 1..M_j$$

Próg ten zależy od wielu kwestii, takich jak rozdzielczość przestrzenna sensorów i jest dostrajany eksperymentalnie. Wynikiem procesu sprawdzania podobieństwa elementów jest macierz:

$$(9) \quad A_s = \{a_n, a_m\}, n = 0..N_s, m = 1..4$$

gdzie  $m$  jest równe liczbie czujników, a  $n$  jest liczbą par elementów sklasyfikowanych odpowiednio jako podobne. Na przykład rząd elementów macierzy  $[1 \ 0 \ 2 \ 0]$  oznacza, że pierwszy element zbioru  $S_1$  jest podobny do drugiego elementu zbioru  $S_3$ , co z kolei oznacza (wg algorytmu), że anteny 1 i 3 wykryły ten sam obiekt. Kolejnym etapem procedury agregacji danych jest łączenie detekcji tego samego obiektu uchwyconego przez wiele anten radarowych, wskazanych przez macierz podobieństwa. Każdy rząd tej macierzy wskazuje parę detekcji, które są wystarczająco bliskie w sensie zastosowanego progu. W prezentowanym podejściu do łączenia podobnych detekcji wykorzystano komplementarną średnią ważoną. Współczynniki wagowe obliczane są w sposób zapewniający, że detekcja uchwycona z wyższym współczynnikiem pewności ma również większy wpływ na wynik fuzji. Załóżmy, że dwie detekcje sklasyfikowane jako podobne są dane przez:

$$(10) \quad d_i^k = (P_i^k, c_i^k) \text{ oraz } d_j^l = (P_j^l, c_j^l),$$

wtedy fuzja  $(\tilde{P}, \tilde{c})$  powyższych elementów wyznaczona będzie jako:

$$(11) \quad \tilde{P} = w_1 P_i^k + w_2 P_j^l$$

$$(12) \quad \tilde{c} = \max(c_i^k, c_j^l)$$

Współczynniki wagowe obliczane są komplementarnie jako funkcje współczynników pewności. Dla  $c_i^k > c_j^l$ :

$$(13) \quad w_1 = 0.5 \left( 1 + \frac{1}{1 + e^{-\alpha(c_i^k - d_T)}} \right), w_2 = 1 - w_1,$$

natomiast dla  $c_i^k \leq c_j^l$ :

$$(14) \quad w_1 = 0.5 \left( 1 + \frac{1}{1 + e^{-\alpha(c_j^l - d_T)}} \right), w_2 = 1 - w_1$$

Po tym etapie procesu fuzji, dla  $n$ -tej chwili czasowej, otrzymuje się następujący wektor detekcji:

$$(15) \quad R(n) = [\tilde{d}_1(n), \tilde{d}_2(n), \dots, \tilde{d}_{M_n}(n)], M_n \leq M$$

#### Fuzja wynikowa

Na tym etapie procesu, detekcje pochodzące z dwóch odrębnych kanałów informacyjnych (transponder i radar) muszą zostać połączone w jedną detekcję wyników. Zbiór zawierający zintegrowane odczyty z transponderów ADS-B i AeroScope, zarejestrowane w okresie próbkowania  $n$  oznaczmy jako  $T(n)$ . Z drugiej strony istnieje zbiór zawierający fuzję detekcji radarowych  $R(n)$  zarejestrowanych w tym samym okresie próbkowania. Fuzja tych zbiorów jest wykonywana przy użyciu następującego schematu warunkowego:

$$(16) \quad F_n = \begin{cases} T(n) & \text{dla } T(n) \neq \phi \cap R(n) = \phi \\ R(n) & \text{dla } T(n) = \phi \cap R(n) \neq \phi \\ \tilde{F}(n) & \text{w innym wypadku} \end{cases}$$

Dwa pierwsze przypadki tego schematu są oczywiste i nie będą komentowane. Przyjrzyjmy się bliżej trzeciemu przypadkowi, opisującemu sytuację, w której zarówno transponder, jak i radar zarejestrowały detekcję. W takim przypadku istnieje potrzeba rozróżnienia dwóch przypadków. Pierwszy przypadek opisuje sytuację, w której odczyty pochodzące z transponderów i radaru dotyczą tego samego obiektu - wtedy należy je scalić. Druga sytuacja, to taka, gdy detekcje zarejestrowane przez radar i odbiorniki transponderów są rozłączne. W celu realizacji fuzji, w wyżej opisanych przypadkach wykonywana jest następująca procedura warunkowa:

$$(17) \quad \hat{F}_n = \begin{cases} T_i(n) \cup R_j(n) & \text{dla } |T_i(n) - R_j(n)| > T_d \\ T_i(n) & \text{dla } |T_i(n) - R_j(n)| \leq T_d \end{cases}$$

Jeśli więc odległość między detekcjami  $T_i(n)$  i  $R_j(n)$  jest większa od założonego progu  $T_d$ , obie detekcje są zapisywane w rejestrze. W przeciwnym wypadku istnieje duże prawdopodobieństwo, że dwie detekcje odnoszą się do tego samego obiektu. W takim przypadku detekcja  $T_i(n)$  pochodząca z transpondera jest zachowywana, gdyż jest bardziej wiarygodna.

#### Identyfikacja i śledzenie obiektów

Na ostatnim etapie procesu pozyskiwania informacji o naruszeniu przestrzeni powietrznej objętej ochroną, należy zapewnić identyfikację wykrycia i śledzenia zidentyfikowanego obiektu. Jest to najważniejsza informacja z punktu widzenia użytkownika końcowego. Jednocześnie wykonanie tych operacji jest bardzo złożone. Oczywiście wszystkie opisane wcześniej etapy przetwarzania danych są absolutnie niezbędne do wykonania ostatniego etapu i to należy podkreślić. Identyfikacja obiektów wykrywanych przez poszczególne anteny radarowe odbywa się na podstawie sygnatur nadawanych im przez algorytmy oprogramowania radarowego. Podobnie dane przesyłane przez transponder, zawierają własne sygnatury identyfikujące obiekty. Co więcej, podczas łączenia detekcji informacje te są tracone. Dlatego bardzo ważne jest łączenie nowonadchodzących danych z tymi wcześniej zarejestrowanymi. Innymi słowy, należy znaleźć następujące podobieństwo:

$$(18) \quad F_i(n) \sim F_j(n-1), i = 1, 2, \dots, \bar{F}(n), j = 1, 2, \dots, \bar{F}(n-1),$$

gdzie indeks czasowy  $n$  oznacza bieżącą detekcję, natomiast  $n - 1$  to detekcja uzyskana wcześniej. Jednym z możliwych rozwiązań wspomnianego problemu jest zastosowanie podejścia predykcyjnego. Proponowana metoda polega na porównaniu predykcji detekcji z aktualną detekcją, przy użyciu metryki euklidesowej:

$$(19) \quad F_i(n) \sim \hat{F}_j(n), i = 1, 2, \dots, \bar{F}(n), j = 1, 2, \dots, \bar{F}(n-1),$$

gdzie  $\hat{F}_j(n)$  oznacza predykcję położenia wykrytych obiektów obliczoną w bieżącej chwili  $n$ . Predykcja jest funkcją przeszłych, zarejestrowanych w systemie odczytów:

$$(20) \quad \hat{F}_j(n) = f(F_j(n), F_j(n-1), \dots, F_j(n-H)),$$

gdzie  $H$  jest liczbą odczytów z przeszłości branych do obliczenia predykcji. Inną opcją pozwalającą na uzyskanie

predykcji położenia rozważanego obiektu jest wykorzystanie informacji o jego prędkości. Ponieważ radar podaje szacunkowe prędkości detekcji mierzone względem trzech osi, łatwo jest znaleźć predykcję położenia obiektu wykorzystując te dane:

$$(21) \quad \hat{F}_j(n) = f(F_j(n), v_{x,j}(n-1), v_{y,j}(n-1), v_{z,j}(n-1))$$

Jeszcze jedną możliwością znalezienia podobieństwa między bieżącą a przeszłymi detekcjami jest ich bezpośrednie porównanie przy użyciu metryki euklidesowej. We wszystkich wyżej wymienionych opcjach, jeśli odległość pomiędzy bieżącą i poprzednią detekcją zostanie rozpoznana jako podobna, bieżąca detekcja otrzymuje identyfikator poprzedniej. W przeciwnym razie bieżąca jest traktowana jako nowa detekcja i otrzymuje nowy identyfikator.

#### Wyniki

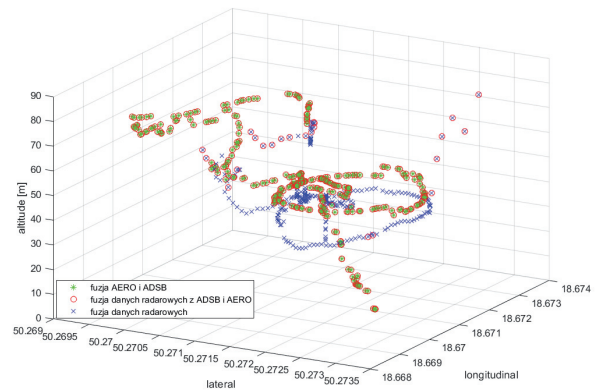
Celem zadania była walidacja opracowanego algorytmu wykrywania BSP. Danymi wejściowymi testowanego algorytmu były dane sensoryczne pozyskane w ramach zaplanowanych lotów testowych z użyciem:

- Pojedynczego drona - DJI Matrice 600;
- Dwóch symultanicznie kontrolowanych dronów - DJI Matrice 600 oraz DJI Mavic 2.

W przypadku wykorzystania platformy DJI Matrice 600 pozyskany został pełen zestaw danych pomiarowych obejmujący zarówno ADS-B jak i AeroScope oraz radar (cztery anteny sektorowe). Z kolei przy wykorzystaniu platformy DJI Mavic, ze względu na brak transpondera ADS-B pozyskano jedynie dane radarowe oraz te pochodzące z AeroScope.

#### Detekcja pojedynczego statku powietrznego

Pierwszy test polegał na wykonaniu kontrolowanego przez operatora lotu BSP typu DJI Matrice 600 w monitorowanym obszarze ograniczonej przestrzeni powietrznej. W trakcie lotu dane pomiarowe pozyskiwane były w sposób ciągły z trzech omawianych wyżej systemów sensorycznych.

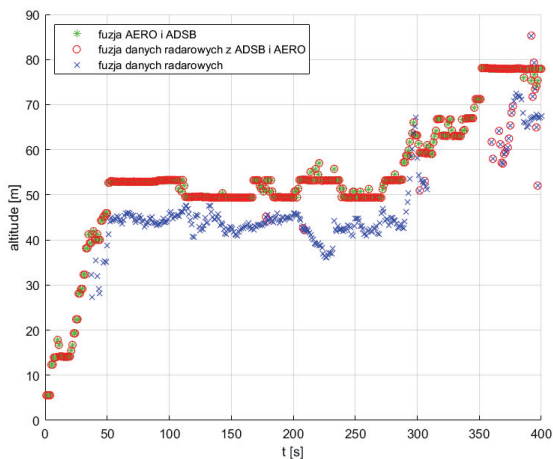


Rys. 3. Wynik fuzji danych pochodzących z trzech systemów sensorycznych określający tor lotu drona DJI Matrice 600.

Po zakończeniu eksperymentu pozyskane dane zostały poddane dalszemu przetwarzaniu. Wymuszono synchronizację czasową z okresem próbkowania równym 1 [s]. Na rysunku 3 przedstawiono na wykresie 3D wynik opisanej w poprzednim rozdziale procedury fuzji. Niebieskimi krzyżykami zaznaczono detekcje zarejestrowane przez system radarowy po przefiltrowaniu i scaleniu danych pochodzących z czterech anten. W przypadku fuzji danych radarowych pojawiły się dodatkowe detekcje, które były



wynikiem przyjętych wartości progowych filtracji uzupełniającej. Wartości progowe zastosowane w procesie filtracji wynosiły:  $P_{BSP}=0,7$  oraz  $CL=80\%$ . Z drugiej strony, trasa lotu BSP zarejestrowana przez systemy transponderów ADS-B i AEROSCOPE po procesie fuzji jest zaznaczona czerwonymi okręgami. Jak można zauważyć, patrząc na ten rysunek, istnieje niewielkie przesunięcie między danymi transponderów i radaru w odniesieniu do pomiarów wysokości lotu. Zjawisko to zostało dokładniej zilustrowane na rysunku 4. Przyczyną takiej rozbieżności w przedstawionych wynikach jest fakt, że przesunięcia montażowe anten radarowych nie zostały zmierzone wystarczająco dokładnie. Wreszcie tor lotu, będący wynikiem pełnej fuzji danych z transponderów i radaru zaznaczono na rysunku 3 za pomocą zielonych gwiazdek. Jak wyjaśniono w poprzedniej sekcji, dane pochodzące z transponderów, zarejestrowane przez system GPS, są uważane za bardziej wiarygodne niż pomiary radarowe. Dlatego w przypadkach, gdy w danym okresie próbkowania występują zarówno dane radarowe, jak i te z transpondera, fuzja skutkuje pominięciem odczytów radarowych.

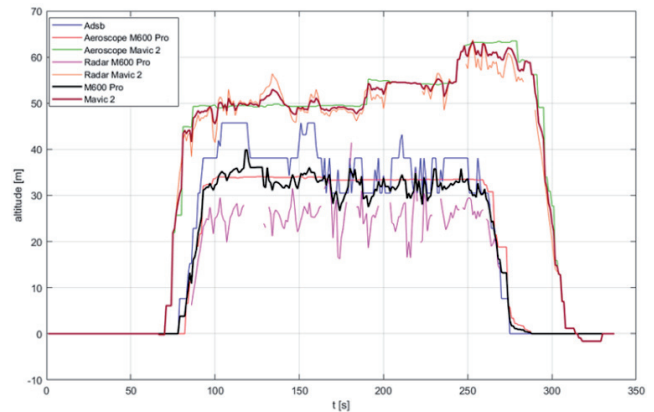


Rys. 4. Wykres wysokości lotu BSP

#### Detekcja wielu statków powietrznych

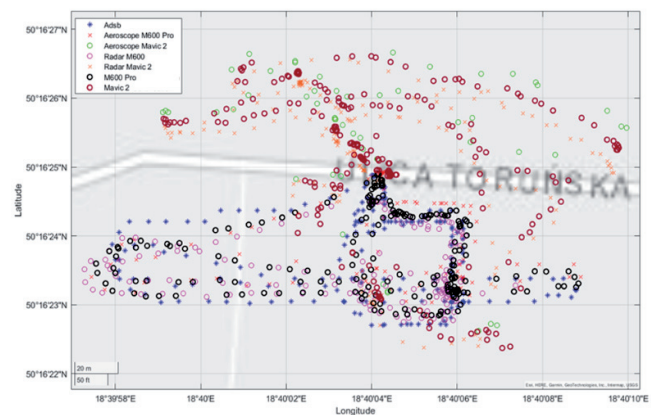
Testy systemu zostały przeprowadzone kompleksowo i nastąpiły po etapie integracji systemu. Scenariusz testowy zakładał jednoczesny lot dwóch dronów - Mavic 2 i Matrice 600 Pro. Wysokość lotu pierwszego z nich wynosiła około 50 [m], natomiast drugi dron przelatywał na wysokości 30 [m]. Konfiguracja montażu anten radarowych była taka sama jak w eksperymencie opisanym w poprzedniej sekcji. Również notacja stosowana do oznaczania poszczególnych etapów przetwarzania danych jest taka sama. Ponownie, jak w poprzednim scenariuszu, jako odniesienie do pomiarów radarowych wykorzystano dane pozyskane z nadajników transponderowych. Tym razem analizę wyników rozpoczniemy od obserwacji zarejestrowanych danych wysokościowych, przedstawionych na rysunku 5. Rozważmy lot drona M600. Analizując dane AEROSCOPE widzimy niemal płaski, bardzo precyzyjny zapis wysokości lotu na poziomie 32 [m]. Biorąc pod uwagę odczyty ADS-B, również zamontowane na pokładzie M600, odczyty nie są tak dokładne i można zaobserwować oscylacje o amplitudzie około 10 [m]. Jeśli chodzi o detekcje radarowe tego obiektu, można zaobserwować niewielkie przesunięcie o około -5 [m]. Ostatecznie, po połączeniu danych z tych trzech źródeł, wyodrębniono ścieżkę wysokości lotu M600 (czarna linia). Z drugiej strony, analizując lot drona Mavic

2, możemy stwierdzić, że dane opisujące wysokość zarejestrowaną przez radar i AEROSCOPE są do siebie bardziej podobne. Podobnie jak w pierwszym przypadku, procedura fuzji dała dość wiarygodną identyfikację toru lotu (czerwona linia).



Rys. 5. Wykres wysokości lotu śledzonych statków powietrznych

Rysunek 7 przedstawia z kolei wyniki detekcji śledzonych statków powietrznych na płaszczyźnie we współrzędnych geograficznych. Odczyty z transponderów są oznaczone zgodnie z legendą rysunku. Jak wspomniano wcześniej, są one traktowane jako odniesienie do wyników fuzji danych. Możemy zaobserwować niewielkie przesunięcie między danymi ADS-B i AEROSCOPE identyfikującymi dron M600. Patrząc na wyniki fuzji danych radarowych, można zauważyć, że obydwa drony zostały wykryte, poprawnie zidentyfikowane i śledzone.

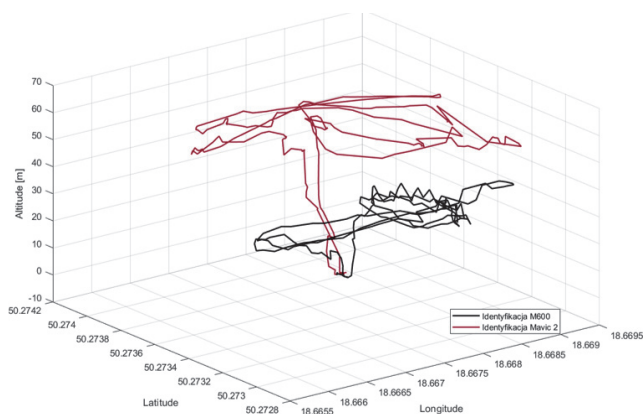


Rys. 6. Tor lotu śledzonych obiektów w przestrzeni 2D - bezpośrednie detekcje i identyfikacja

Jest to widoczne jeszcze lepiej na rysunku 7 jako wykres 3D. Ponieważ dane transponderów zawierają informacje o typie BSP, obiekty te zostały zidentyfikowane jako dwa drony: M600 i Mavic2. Oczywiście, ze względu na posiadanie tylko odczytów radarowych, nie jest możliwe przeprowadzenie identyfikacji na wysokim poziomie. Niemniej jednak, jak pokazano na rysunku 7, radar był w stanie zidentyfikować dwa oddzielne ślady statków powietrznych latających w monitorowanej przestrzeni.

#### Podsumowanie

Niniejszy artykuł dotyczył problemu wykrywania bezzałogowych statków powietrznych naruszających monitorowaną przestrzeń powietrzną. W pracy dokonano przeglądu dostępnych rozwiązań rynkowych w zakresie systemów antydronowych oraz istniejących technologii detekcji, co pokazało istniejące możliwości przeciwdziałania



Rys. 7. Tor lotu śledzonych obiektów w przestrzeni 3D - końcowy wynik fuzji danych

nia bezzałogowym statkiem powietrznym. Przeprowadzona analiza wykazała również niedoskonałości istniejących systemów antydronowych oraz wskazała nowe kierunki badań. W kolejnym etapie przeanalizowano dane dostarczane przez system sensoryczny podczas testów terenowych w warunkach rzeczywistych. Zaproponowano algorytm fuzji danych pozyskanych przez wiele sensorów, umożliwiającą detekcję, identyfikację i rozpoznanie BSP w przestrzeni 3D. Opracowany system detekcji obejmuje trzy podsystemy: przetwarzanie wstępne, synchronizację czasową oraz fuzję danych opartą na komplementarnym filtrowaniu warunkowym. Skuteczność zaproponowanego rozwiązania została przetestowana na podstawie szybkiego prototypowania w środowisku symulacyjnym MATLAB z wykorzystaniem danych z rzeczywistego systemu sensorycznego uzyskanych podczas kontrolowanych lotów UAV. Należy zatem stwierdzić, że jeśli bezzałogowy statek powietrzny wlatujący w zasięg systemu monitorowania jest wyposażony w transponder ADS-B lub AEROSCOPE, to nie ma problemu z jego wykryciem i identyfikacją. Niestety, najbardziej prawdopodobnym scenariuszem jest to, że BSP naruszający ograniczoną przestrzeń powietrzną celowo nie będzie wyposażony w takie urządzenia. W takim przypadku zdolności wykrywania systemu opierają się na odczytach radarowych. Radar wykorzystany w tym projekcie jest bardzo czuły i jest w stanie wykrywać małe obiekty - zarówno miniaturowe drony, jak i inne obiekty. Ta właściwość czujnika rodzi kolejne problemy z interpretacją danych. Zazwyczaj radar rejestruje znacznie więcej obiektów niż te, które są przedmiotem obserwacji. W tym artykule zaproponowaliśmy wieloetapową filtrację w celu odrzucenia fałszywych detekcji. Skuteczność proponowanego podejścia została potwierdzona przez liczne testy. Kolejnym kluczowym problemem poruszonym w tym artykule była fuzja danych z detekcji zarejestrowanych przez wiele anten radarowych z nakładającymi się polami widzenia. Fuzja oparta na filtrach komplementarnych rozwiązała ten problem w zadowalający sposób. Kolejnym zagadnieniem jest identyfikacja i śledzenie wykrytego obiektu na podstawie odczytów radarowych. W procesie fuzji znikają unikalne sygnatyry detekcji nadane obiektom przez oprogramowanie radarowe i należy nadać nowe identyfikacje połączonym danym. W kolejnych fazach działania systemu identyfikacja ta musi być śledzona, aby zapewnić ciągłą obserwację zidentyfikowanego obiektu. Problem ten został rozwiązany w tym projekcie poprzez zastosowanie metody klasteryzacji predykcyjnej. W tym przypadku również uzyskano zadowalające wyniki. Jednakże, mimo że możliwości operacyjne systemu monitorowania

opartego na przedstawionej metodologii były ogólnie zadowalające, wymagane są dalsze prace nad poprawą jego wydajności. Najważniejszą kwestią, którą należy ponownie przeanalizować, jest fuzja danych radarowych pod względem nakładających się obszarów obserwacji i śledzenia detekcji. Zastosowanie bardziej wyrafinowanych metod zapewniających bardziej wiarygodne przewidywanie śledzonego obiektu wydaje się być korzystnym punktem wyjścia do ulepszenia metody.

**Autorzy:** Dr hab. inż. Roman Czyba, Dr hab. inż. Krzysztof Skrzypczyk, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Katedra Automatyki i Robotyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, email: roman.czyba@polsl.pl, krzysztof.skrzypczyk@polsl.pl; Dr hab. inż. Janusz Dudczyk, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Łączności, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, email: jdudczyk@pusb.pl

#### LITERATURA

- [1] Konatowski, S.; Tatko, S.: Zachowanie się bezpilotowych statków powietrznych w formacji. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 99 NR 5/2023, str. 53-58, doi:10.15199/48.2023.05.10.
- [2] Wojtanowski, J.; Zygmunt, M.; Drozd, T.; Jakubaszek, M.; Życzkowski, M.; Muzal M.: Distinguishing Drones from Birds in a UAV Searching Laser Scanner Based on Echo Depolarization Measurement, *Sensors*, 21(16), 5597, 2021.
- [3] Adamski, M.; Urbaniak, W.; Dąbrowska, A.; Dąbrowski, A.: Testowanie bezzałogowych statków powietrznych do monitorowania zanieczyszczeń w środowisku. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 9/2018, str. 14-17, doi:10.15199/48.2018.09.03.
- [4] Flak, P. Drone Detection Sensor With Continuous 2.4 GHz ISM Band Coverage Based on Cost-Effective SDR Platform, *IEEE Access*, Vol.9, pp.114574 – 114586, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104738, 2021.
- [5] Yang, S.; Qin, H.; Liang, X.; Gulliver, T. A. An Improved Unmanned Aerial Vehicle Detection Algorithm Using Radiofrequency-Based Statistical Fingerprint Analysis, *Sensors*, 19(2), 274, 2019.
- [6] Garcia, A.J.; Lee, J.M.; Kim, D.S. Anti-Drone System: Drone Detection using Neural Networks. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea (South), DOI: 10.1109/ICTC49870.2020.9289397, 2020.
- [7] Martian, A.; Chiper, F.L.; Craciunescu, R.; Vlădeanu C.; Fratu, O.; Marghescu, I.: RF Based UAV Detection and Defense Systems: Survey and a Novel Solution, *International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) Romania*, 10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527871, may 2021.
- [8] Semkin, V.; Yin, M.; Hu Y.; Mezzavilla, M.; Rangan, S.: Drone Detection and Classification Based on Radar Cross Section Signatures, 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), IEEE Publisher, 10.23919/ISAP47053.2021.9391260, Japan 2020.
- [9] Górski, K.; Szymański, S.; Mielczarek, I.; Grzesiak, J.: Elektroniczne systemy ochrony przed BSP. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 9/2022, str. 130-134, doi:10.15199/48.2022.09.28.
- [10] Ferreira, R.; Gaspar, J.; Sebastao, P.; Souto, N.: A Software Defined Radio Based Anti-UAV Mobile System with Jamming and Spoofing Capabilities, *Sensors*, vol. 22, issue 4, 22(4), 1487, 2022.
- [11] Sazdić-Jotić, B.M.; Obradović, D.R.; Bujaković, D.M.; Bondžulić, B.P.: Feature Extraction for Drone Classification, 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TEL-SIKS), Serbia 2019
- [12] Christnacher, F., Hengy, S., Laurenzis, M., Matwyschuk, A., Naz, P., Schertzer, S., Schmitt, G.: Optical and acoustical UAV detection, *Proceedings Volume 9988, Electro-Optical Remote Sensing X, 99880B (2016)* https://doi.org/10.1117/12.2240752, Event: SPIE Security + Defence, 2016, Edinburgh, United Kingdom.