#### ZASTOSOWANIE AEROFOTOGRAMETRII W PODCZERWIENI DO ŚLEDZENIA DZIKÓW W ICH NATURALNYM ŚRODOWISKU ORAZ IDENTYFIKACJI OSOBNIKÓW ZARAŻONYCH AFRYKAŃSKIM POMOREM ŚWIŃ. CZ. II – BADANIA SYSTEMU *ASFochrona*

PAWEŁ SZCZEPANIAK, PAWEŁ KALINOWSKI, LESZEK UŁANOWICZ

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa e-mail: pawel.szczepaniak@itwl.pl; pawel.kalinowski@itwl.pl; leszek.ulanowicz@itwl.pl

#### Krzysztof Sibilski

Politechnika Warszawska, Wydzaił Mechaniczny Energetyki i Lotnicwa

 $e\text{-}mail:\ krzyszt of.sibilski@pw.edu.pl$ 

W artykule omówiono wyniki badań w locie systemu technicznego ASFochrona opracowane w ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Przedstawiono wyniki badań osiągów bezzałogowych statków powietrznych NeoxASF i AtraxASF oraz możliwości operacyjne podsystemów przeznaczonych do wykrywania dzików w ich naturalnym środowisku oraz identyfikacji dzików chorych na Afrykański pomór świń. Zaprezentowano zestawienia badań w locie oraz sformułowano wnioski wynikające z tych badań.

#### 1. Wstęp

W artykule zostaną przedstawione efekty realizacji projektu badawczego pt. "Zastosowanie innowacyjnych i efektywnych metod i technologii umożliwiających wykrycie watah dzików, identyfikacji osobników z objawami klinicznymi ASF w naturalnym terenie ich występowania", nr umowy DOB-BIO9/30/01/2018, realizowanego w ramach projektów na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa, konkurs 9/2018, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Efektem realizacji tego grantu jest system ASFochrona.

System ASFochrona służy do wykrywania i prowadzenia zdalnej obserwacji watah dzików oraz identyfikacji osobników z objawami afrykańskiego pomoru świń (ASF). Dziki są monitorowane w naturalnym terenie ich występowania. Z pomocą systemu ASFochrona można określić liczebność dzików oraz monitorować drogi ich przemieszczania się.

System ASFochrona składa się z dwuch podsystemów technicznych praznaczonych do:

- oblotów większych obszarów (tzw. oblotu wielkoobszarowego), podsystemu NeoxASF z samolotem bezzałogowym klasy mini oraz,
- oblotów precyzyjnych podsystemu technicznego *AtraxASF* z bezzałogowym statkiem powietrznym w układzie czterowirnikowego mikrowiropłata.

Bezzałogowe statki powietrzne *NeoxASF* i *AtraxASF* wyposażone są w system sterowania i kontroli lotu (SSKL), pracujący w trybie sterowania zdalnego RC (w zakresie widzialnym) oraz w automatycznym trybie sterowania AP (głównie w lotach bez widzialności BVLOS).

Zadaniem SSKL jest:

- sterowanie BSP w czasie wykonywania zadania w rożnych misjach,
- odbiór transmisji danych pilotażowo nawigacyjnych z pokładu BSP,
- odbiór i rozkodowywanie obrazów przesyłanych z pokładu BSP,
- prezentacja graficzna parametrów pilotażowo-nawigacyjnych,
- prezentacja mapy zobrazowującej planowaną i aktualnie realizowaną trasę lotu.

BSP *NeoxASF* wykonuje start ze stabilizacją (w trybie RC) z lekkiej wyrzutni startowej (LWS) i ląduje w trybie sterowania RC na utwardzonej, trawiastej powierzchni. Prędkość startu BSP *NeoxASF* z LWS wynosi do 15 m/s, a maksymalna energia startu z wyrzutni wynosi około 2 kJ. *NeoxASF* jest wyposażony w pirotechniczny układ spadochronowy zabezpieczający bezpieczne lądowanie w sytuacjach awaryjnych.

Watahy oraz pojedyncze dziki są wykrywane na podstawie analizy serii zdjęć wykonanych przez zainstalowane na pokładach BSP kamery termowizyjne. Częstotliwość wykonywania serii zdjęć termowizyjnych zależy od typu kamery.

Podczas oblotu w wielko<br/>obszarowego wykrycie dzików jest możliwe dzięki zabudowanej na BSP<br/> NeoxASF kamerze termowizyjnej KTCH. Kamera KTCH wykonuje zdjęcia w rozdzielczości 640x512 pixeli z częstotliwością migawki 60 Hz. Zdjęcia te są przekazywane w czasie rzeczywistym ("on line") z BSP<br/> NeoxASF do znajdującej się w pojeździe dowodzenia stacji wstępnego przetwarzania obrazu (SWPO).

Podczas oblotu interwencyjnego wykonywanego przez czterowirnikowiec *AtraxASF* dziki są rejestrowane przez znajdującą się na jego pokładzie kamerę termowizyjną KTX. Kamera KTX wykonuje zdjęcia o wysokiej rozdzielczości 1024x768 pixeli z częstotliwością 15 Hz. Obraz z kamery KTX jest przekazywany telemetrycznie na ekran monitora znajdującego w pojeździe interwencyjnego, a wykonywane przez tę kamerę zdjęcia są rejestrowane w pamięci komputera pokładowego. Po zakończeniu misji i wylądowaniu BSP informacje zapisane w komputerze pokładowym przenoszone są z wykorzystaniem pamięci flash do znajdującej się w pojeździe dowodzenia stacji analizy obrazu (SAO). Efektem działania algorytmu stacji SAO jest wygenerowanie automatycznego raportu zawierającego informacje o liczbie wykrytych podczas wykonywania lotu precyzyjnego dzików oraz ilości osobników potencjalnie zainfekowanych wirusem ASF. Raport ten jest generowany w formacie pdf i jest wysyłany za pomocą sieci GSM na skrzynki mailowe odpowiednich służb weterynaryjnych i leśnych.

W artykule przedstawimy wyniki badań w locie systemu *ASFochrona*. Badania odbywały się na terenie wybranych nadleśnictw w różnych rejonach Rzeczpospolitej Polskiej. Badania w locie obejmowały sprawdzenie efektywności działania obu podsystemów:

- $\bullet$ oblotu wielko<br/>obszarowego z zainstalowanym na pojeździe dowodzenia samolotem Neo-<br/> xASF,
- oblotu precyzyjnego z zainstalowanym na pojeździe interwencyjnym czterowirnikowym mikrowiropłatem *AtraxASF*.

Sprawdzeniu podlegały zarówno osiągi BSP oraz ich systemów automatycznego sterowania lotem, jak też poprawność działania naziemnych układów transmisji danych oraz efektywność podsystemów informatycznych. Badania odbywały się w trudnych jesienno-zimowych warunkach pogodowych.

## 2. Implementacja metodyki śledzenia i wykrawania dzików z symptomami ASF w systemie ASFochrona

W celu zwiększenia stabilności klasyfikacji i szybkości działania aplikacji opracowano algorytm śledzenia obiektów sklasyfikowanych jako dziki. W przypadku, gdy dzik zostanie kilkukrotnie dobrze sklasyfikowany, zostaje przypisany mu identyfikator i zaczyna się proces śledzenia. Algorytm śledzący oparty jest na określaniu różnic odległości między środkami śledzonych obiektów w kolejnych klatkach. Najczęściej stosowane w dziedzinie przetwarzania obrazu są filtr Kalmana i algorytm kondensacji, które różnią się sposobem opisu gęstości prawdopodobieństwa stanu. Zastosowanie filtra Kalmana w śledzeniu obiektów na danych obrazowych z kamery termowizyjnej zostało opisane m.in. w pracach [1], [3], [6]. Na bazie zebranych danych pomiarowych z kamer termowizyjnych oraz w oparciu o powyżej opisane metody analizy obrazów termowizyjnych opracowano algorytmy automatycznego wykrywania i wskazywania potencjalnych watah dzików w warunkach naturalnych oraz modele klasyfikacji i identyfikacji osobników z objawami choroby ASF. Do opracowania modeli klasyfikacyjnych wykorzystane zostały najnowsze techniki uczenia maszynowego typu *Deep Learning*, poprzez zintegrowanie ich z klasycznymi metodami analizy obrazu typu *Feature Engineering* w celu redukcji liczby danych wejściowych do sieci neuronowej.

Na podstawie analizy obrazów termowizyjnych ze stanowiska stacjonarnego oraz lotów BSP w naturalnych środowiskach bytowania dzików wysunięto następujące spostrzeżenia:

- Na wiarygodny pomiar za pomocą kamery termowizyjnej wpływają m.in.: nasłonecznienie otoczenia, elementy emitujące promieniowanie, warunki atmosferyczne (wiatr, deszcz, opady śniegu) wpływające na temperaturę powierzchni badanego obiektu.
- 2) Istotnym parametrem mającym wpływ na wyniki badań jest wilgotność powietrza w otoczeniu obiektu obserwacji. Istotne znaczenie odgrywa również odległość kamery termowizyjnej od obiektu obserwacji. Istnieje silna korelacja wielkości obiektu obserwacji z odległością rejestracji kamerą termowizyjną.
- 3) Kamera termowizyjna rejestruje pozorną temperaturę obiektu obserwacji.
- 4) Ze względu na wyższy kontrast temperatury między dzikiem i otoczeniem preferowaną porą pomiarów jest noc.
- 5) Kamera nie powinna rejestrować obrazu dzika w rzucie poziomym. Rejestracja powinna się odbywać za pomocą kamery umieszczonej pod kątem ostrym, tak aby możliwe było zarejestrowanie profilu bocznego dzika. Wyłącznie profil dzika pozwoli odróżnić go od innych zwierząt.

W analitycznych pracach algorytmicznych nad wykrywaniem watah dzików wykorzystano następujące rodzaje algorytmów: ImResA, ImA.\*1.2./1, TopHat & Contrast Adjust.

W algorytmie ImResA realizowana jest funkcja wyostrzania obrazu wejściowego zapisanego w skali szarości. W algorytmie stosowana jest metoda maskowania wyostrzającego. Odchylenie standardowe filtru dolnoprzepustowego Gaussa, określone jako liczba, kontroluje rozmiar obszaru wokół pikseli brzegowych, na który wpływa wyostrzenie. Duża wartość wyostrza szersze obszary wokół krawędzi, a mała wyostrza węższe obszary wokół krawędzi. Zastosowanie nielokalnego filtru opartego na środkach do obrazu w skali szarości usuwa szumy z obrazu wejściowego, ale zachowuje ostrość silnych krawędzi. Funkcja ta wygładza również obszary teksturowane, takie jak trawa na pierwszym planie obrazu, co zobrazowuje mniej szczegółów w porównaniu do obrazu źródłowego. Wykorzystano również operację odwzorowania wartości intensywności obrazu IL w skali szarości na nowe wartości w procedurze ImResA. Ta operacja zwiększa kontrast obrazu wyjściowego ImResA.

W algorytmie ImA. \*1.2./1 użyto na wstępie operację odwzorowania wartości intensywności obrazu w skali szarości na nowe wartości, wykorzystując w tym celu funkcję *imadjust*, a następnie dokonano operacji mnożenia/dzielenia poszczególnych wartości pikseli obrazu przez stałą wartość. Operacja ta powoduje rozjaśnienie obrazu, przy czym poziom tego rozjaśnienia będzie w większym stopniu dostrzegalny w obszarze pikseli bliższych wartości odpowiadającej jaśniejszym elementom obrazu, a więc tym, pod którymi prawdopodobnie zapisany będzie obiekt, który nas interesuje.

W algorytmie *TopHat* & *Contrast Adjust* w pierwszym kroku wykonano morfologiczne filtrowanie *Top-Hat*. Na skali szarości transformacja *Top Hat* jest zdefiniowana jako operacja otwarcia morfologicznego i jest tożsama z nałożeniem operacji dyletacji na wynik erozji obrazu pierwotnego. Operacja otwarcia zachowuje rozmiary obiektów obrazu przy ich jednoczesnym wygładzeniu, czyli usunięciu wszystkich "wystających" elementów. Zwiększanie rozmiaru elementu strukturalnego skutkuje usuwaniem coraz większych detali obrazu oraz upodabnianiem powstałych obszarów do elementu strukturalnego. Dodatkowo operacja otwarcia posiada własność idempotencji, czyli niezmienności wyniku niezależnie od wielokrotności stosowania operacji. Transformacje *Top Hat* ze względu na swoje właściwości stosowane są zazwyczaj do przetwarzania obrazów monochromatycznych w celu wykrycia ekstremów. Dla takich danych obrazowych operacja *Top Hat* pozwala na ujednolicenie ciemnego tła i pozostawienie jasnych obiektów, a operacja *Bottom Hat* pozwala na pozostawienie obiektów ciemniejszych od tła. Ich zestawienie wykorzystano do poprawy kontrastu badanych obrazów.

Powyższe algorytmy wykorzystano do analiz obrazowych termowizyjnych. Analizując uzyskane wyniki, zauważono, że największą skuteczność z punktu widzenia przyjętych kryteriów mają algorytmy ImA.\*1.2./1 oraz TopHat & Contrast Adjust. W przypadku użycia algorytmu ImA.\*1.2./1 otrzymano ewidentne zwiększenie kontrastu, co w znaczący sposób może być przydatne na etapie dalszej obróbki z wykorzystaniem algorytmów  $Machine \ Learning$  zastosowanych do identyfikacji. W przypadku użycia algorytmu TopHat & Contrast Adjust zauważono wygaszenie szczegółów tła. Algorytm ten daje znacznie lepsze efekty przy obrazach mniej wyraźnych oraz na których obiekty są znacznie mniejsze. Wynika to z faktu, że stosunek sygnału pochodzącego od obiektu bardziej wyraźnie odróżnia się od tła i jest bardziej jednolity.

W celu przeprowadzenia walidacji opracowanego algorytmu pod kątem wykrywania watah dzików przygotowany został protokół pomiarowy. W ramach protokołu wybrana została grupa reprezentatywnych obrazów zarejestrowanych zgodnie z założonymi parametrami lotu, w szczególności:

- pułap,
- kąt pochylenia głowicy termowizyjnej 40°.

Spośród zebranych obrazów, które nie zostały wykorzystane na etapie treningu algorytmu, wybrano zestaw testowy 1117 zdjęć, które zostały wizualnie przeanalizowane przez wykwalifikowanego eksperta. Rolą eksperta było potwierdzenie, że na mniejszych obrazach przedstawione są dziki.



Rys. 1. Schemat algorytmu zwiększenie skuteczności wykrywania dzików [4]

Zestaw walidacyjny został zapisany w postaci "sklepu" danych obrazowych *ImageDatcislore.* Obiekt tego typu przechowuje wskaźniki do obrazów zamiast całych obrazów oraz posiada zaszyte różne funkcje obsługi plików, łącznie z augmentacją danych (rys. 1).

Na rysunku 2 przedstawiono algorytm wykrywania i klasyfikacji dzików potencjalnie chorych na ASF. Algorytm ten został zaimplementowany w algorytmach obliczeniowych. W algorytmie uwzględniono rozkład średniej względnej wartości różnicy energii na powierzchni obiektu w zależności od jego usytuowania (widok z boku, z góry, od przodu/tyłu) oraz dynamikę obiektu na podstawie jego cech geometrycznych. W celu przeprowadzenia testów poprawnego działania opracowanego modelu obliczeniowego algorytmu z badań zbioru danych obrazowych wybrano grupę reprezentacyjną (testową) czterech obiektów, a następnie za pomocą zaimplementowanego modelu obliczeniowego algorytmu wyznaczono współczynniki cech charakteryzujących badanego obiektu. Współczynniki cech charakteryzujących badane obiekty stanowią dane wejściowe do bloku wnioskowania o przynależności obiektów badanych do danej klasy (dzik zdrowy, dzik chory) [4].



Rys. 2. Algorytm wykrywania anomalii stanu zdrowia dzików na podstawie obrazów termowizyjnych i cech behawioralnych [4]

Na podstawie wartości wyznaczonych współczynników, w wyniku działania bloku wnioskowania (porównanie wyliczonych współczynników cech z wielkościami referencyjnymi) wypracowywana zostaje decyzja na temat każdego z analizowanych przypadków i następuje przyporządkowanie analizowanego przypadku do danej klasy obiektów. Wielkości referencyjne współczynników cech charakterystycznych wyznaczane są w wyniku analizy danych obrazowych dzików z potwierdzoną chorobą ASF (rys. 3) [4].



Rys. 3. Działanie algorytmy wykrywania dzików [4]



Rys. 4. (a) Schemat blokowy przyjętego rozwiązania dla podsystemu analizy danych z oblotów oraz identyfikacji dzików, (b) widok stacji analizy obrazu [4], [5]

Pakiety programów komputerowych przeznaczonych do wykrywania dzików i klasyfikacji osobników potencjalnie chorych na ASF zostały zainstalowane na komputerach: Naziemnej Stacji Kontroli Lotów (NSKL) oraz Stacji Analizy Obrazu (SAO) wchodzących w skład stanowiska koordynatora lotów w pojeździe dowodzenia. Aplikację wraz z komputerami NSKL i SAO tworzy podsystem analizy danych z lotów. Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy podsystemu analizy danych z oblotów z wyróżnieniem jego najważniejszych komponentów.

Elementami oprogramowania specjalistycznego są: dedykowany interfejs użytkownika oraz skompilowane moduły specjalizowane z zaimplementowaną logiką działania aplikacji do wykrywania i klasyfikacji dzików potencjalnie chorych na ASF, do uruchomienia których niezbędne jest wykorzystanie instalatora Matlab Runtime. W skład oprogramowania wchodzą następujące moduły [4]:

- Moduł komunikacyjny (MKOM) stanowi graficzny interfejs użytkownika (ang. *Graphical User Interface* GUI), zapewniający obsługę funkcjonalności oprogramowania specjalistycznego, tj. wczytanie danych obrazowych z oblotów do analizy, uruchomienie analizy danych, generowanie krótkich raportów i zestawień.
- Moduł analizy danych obrazowych z oblotów wielkopowierzchniowych (MADOW) jest odpowiedzialny za wykrywanie i lokalizację watah dzików lub osobników pojedynczych na zdjęciach zarejestrowanych podczas oblotów wielkopowierzchniowych. Zawiera on zaimplementowane algorytmy wykrywania, lokalizacji i zliczania dzików, jak również mechanizmy do zobrazowania wyników działania zaimplementowanych algorytmów bazujące na Google Maps API, do której to aplikacji użytkownik końcowy powinien zapewnić subskrypcję na czas wykonywania oblotów.
- Moduł analizy danych obrazowych z oblotów precyzyjnych (MADOP) jest odpowiedzialny za wykrycie i klasyfikację dzików, w tym osobników potencjalnie chorych na ASF na zdjęciach zarejestrowanych podczas oblotów precyzyjnych. Zawiera on zaimplementowane algorytmy wykrywania lokalizacji i klasyfikacji dzików, w tym osobników potencjalnie chorych na ASF.

Interfejs graficzny umożliwia komunikowanie się użytkownika z oprogramowaniem. Jest on bardzo prosty i czytelny, co ułatwia użytkownikom obsługę systemu. Jest on odporny na możliwe pomyłki użytkownika. Widok interfejsu graficznego oprogramowania został zamieszczony na rysunku 5.



Rys. 5. Okno główne interfejsu graficznego [4], [5]

Głównym elementem interfejsu użytkownika jest Okno główne. Na nim są umieszczone w ustalonych miejscach trzy pola: Zdjęcie, Analiza wielkopowierzchniowa, Analiza precyzyjna. W każdym polu Analiza... umieszczony jest przycisk Wczytaj, który umożliwia użytkownikowi wczytanie zdjęć w poszczególnych trybach analizy. Przycisk Archiwum umożliwia wczytanie historycznych danych z przeprowadzonych oblotów (np. z dnia poprzedniego), których wyszukiwanie będzie możliwe po dacie oblotu.

Należy podkreślić, że pod wieloma względami dane rozwiązanie przewyższa dostępne na rynku rozwiązania, zaproponowanymi funkcjonalnościami. Ponadto dzięki zastosowaniu uniwersalnej struktury oprogramowania będzie ono łatwe w utrzymaniu i dopasowaniu do indywidualnych potrzeb użytkowników.

#### 3. Bezzałogowe statki powietrzne w systemie ASFochrona

System ASFochrona składa się z: podsystemu technicznego NeoxASF przeznaczonego do wykrywania dzików na dużych obszarach lasów i pól oraz podsystemu AtraxASF do lotów precyzyjnych pozwalających na wykrycie chorych na ASF dzików. W tym rozdziale zostaną opisane bezzałogowe statki powietrzne wchodzące w skład systemu [6].

#### 3.1. Samolot NeoxASF

Jednym z zasadniczych elementów wielkoobszarowego podsystemu detekcji i śledzenia watah dzików jest bezzałogowy statek powietrzny klasy mini *NeoxASF* (rys. 6). Samolot ten charakteryzuje się dużym zasięgiem i pułapem operowania oraz możliwością wykonywania lotu z prędkością do 150 km/h. Samolot ten ma następujące parametry techniczne: masa startowa: 16 kg, rozpiętość: 3765 mm, długość: 2375 mm, pułap operacyjny: 100 m, maksymalny czas lotu: 2,5 godz, prędkość lotu: 65-130 km/h. Samolot jest wyposażony w system automatycznego sterowania pozwalający na wykonywanie w pełni autonomicznego lotu.



Rys. 6. Bezzałogowy samolot klasy miniNeoxASF,z lewej stronyNeoxASFna wyrzutni startowej; z prawej strony NeoxASFw locie

Samolot *NeoxASF* spełnia warunki pozwalające na dopuszczenie do autonomicznego lotu poza horyzontem (BVLOS). Zadaniem BSP *NeoxASF* jest przeprowadzenie skanowania obszaru wielkopowierzchniowego w trybie lotu programowego, w wyniku którego zarejestrowany zostanie materiał pozwalający na lokalizację zbiorowisk dzików, a także pojedynczych osobników. Informacje te w postaci zdjęć termowizyjnych wykonanych z określonej wysokości stanowią podstawę identyfikacji, z jakiego typu zwierzętami mamy styczność (rys. 7) [2].

Po zakończeniu oblotu wielkopowierzchniowego zarejestrowane zostają następnie poddane dalszej obróbce pozwalającej na detekcję i lokalizację dzików. W przypadku rozpoznania zwierząt jako watahy dzików bądź pojedynczych osobników miejsce odpowiadające ich lokalizacji zostaje oznaczone na mapie operacyjnej. Następnie w oznaczony rejon zostaje wysłany pojazd interwencyjny z czterowirnikowcem *AtraxASF*, przeznaczonym do precyzyjnych inspekcji w celu zebrania dokładnego materiału zdjęciowego do identyfikacji i weryfikacji zlokalizowanych osobników pod względem występowania u nich objawów charakterystycznych dla ASF.

Samolot NeoxASF jest wyposażony w średniofalową kamerę obserwacyjną KTCH specjalnie zaprojektowaną i wykonaną (na potrzeby projektu) we współpracy z firmą polską Etronika



Rys. 7. Skanowanie terenu podczas oblotu wielkopowierzchniowego przez bezzałogowy samolot klasy mini



Rys. 8. (a) Średniofalowa głowica termowizyjna KTCH, (b) Detektor Sparrow-Blackbird 640 zastosowany w kamerze termowizyjnej KTCH

(rys. 8a). Termowizyjna kamera średniofalowa KTCH wyposażona jest w detektor Sparrow-Blackbird 640 (rys. 8b). Podstawowe parametry techniczne termowizyjnej kamery średniofalowej KTCH: rozdzielczość 640x512 pikseli, liczba klatek na sekundę 60 Hz, czułość termiczna 28 mK, wymiary  $58 \times 62 \times 42$  mm, masa mniejsza niż 1,0 kg.

Kamera KTCH jest zamocowania na pokładzie samolotu w stabilizacyjnej trójosiowej głowicy (rys. 9).

Głowica stabilizacyjna dedykowana do kamery termowizyjnej KTCH wyposażona jest w specjalnie zaprojektowany mechanizm wciągający (rys. 10) umożliwiający chowanie głowicy z kamerą termowizyjną w kadłub BSP *NeoxASF*. Widok modelu kadłuba BSP *NeoxASF* wraz z kamerą termowizyjną KTCH zaprezentowano na rysunku 10.

Głowica stabilizacyjna kamery termowizyjnej KTCH jest wyposażona w trzy bezszczotkowe silniki i ma możliwość utrzymywania kamery termowizyjnej w poziomie na wszystkich osiach (odchylenie, nachylenie i przechylenie), gdy występuje jakikolwiek ruch BSP. Wyposażona jest w inercyjną jednostkę pomiarową (IMU), która reaguje na ruch i wykorzystuje trzy oddzielne silniki do stabilizacji kamery termowizyjnej. IMU wykorzystuje zaprogramowane algorytmy, które zapewniają stabilizację i zapewniają operatorowi swobodną kontrolę. Głowica tłumi średnie i wysokie częstotliwości drgań z BSP docierające do kamery, jednocześnie umożliwia rzeczywisty



Rys. 9. Widok głowicy stabilizacyjnej dedykowanej do kamery termowizyjnej KTCH do BSP NeoxASF



Rys. 10. Widok modelu kadłuba BSP NeoxASF wraz z kamerą termowizyjną KTCH [6]

ruch kamery. Amortyzator głowicy pomiarowej z kamerą termowizyjną został wykonany z włókna węglowego z płytą antywibracyjną z 4 gumowymi kulkami specjalnie zaprojektowanymi do głowicy. Głowica stabilizacyjna zapewnia niezależność fotografowania lub filmowania kamerą termowizyjną bez wibracji lub wstrząsów kamery.

Głowica stabilizacyjna wyposażona jest w mikroprocesor, który pobiera dane z żyroskopów i reaguje, informując silniki głowicy, w którym kierunku mają się poruszać. Moduł ten łączy się i komunikuje z systemem kontroli lotu, aby pomóc w kontrolowaniu głowicy stabilizacyjnej. Jednocześnie wysyła informacje wideo do łącza w celu transmisji wideo. Głowica stabilizacyjna wyposażona jest w moduł zasilania elektrycznego (baterie 3S LiPo). Zapewniają one zasilanie kamery termowizyjnej i głównego kontrolera. Głowica stabilizacyjna ma odpowiednie mocowania, śruby i przewody elektryczne do podłączenia kamery termowizyjnej do BSP.

Sygnały z zestawu czujników współpracujących z układem sterowania autopilota przy wykorzystaniu algorytmów obliczeniowych zaprogramowanych w głównym procesorze układu sterowania pozwalają na wyznaczenie kątów orientacji, pozycji, wysokości oraz stanu (wektory prędkości i przyspieszeń) BSP. Dokładność i częstość wyznaczonych parametrów uzależniona jest od możliwości obliczeniowych procesora, zastosowanych algorytmów oraz cech czujników. Ten sam fragment oprogramowania z racji korzystania z sygnałów z odbiornika GPS odpowiada za nawigację we wszystkich trybach lotu. Za wypracowywanie sygnałów sterowania odpowiada fragment oprogramowania realizujący prawa sterowania, czyli obliczający sygnały wyjściowe sterowania do zadanych parametrów lotu (zadanych przez operatora z pulpitu sterowania). Ten fragment oprogramowania (a konkretnie współczynniki regulatorów PID wyróżnionych równań) jest ściśle związany z BSP (kinematyką układu sterowania, cechami dynamicznymi i aerodynamicznymi oraz napędem).

Do komunikacji z układami wykonawczymi BSP oraz systemami zdalnego sterowania układu sterowania służy system elektronicznego miksowania funkcji sterowania TH-2 Mikro oraz specjalny moduł umożliwiający podłączenie odbiornika zdalnego sterowania oraz elektrycznych silników wykonawczych. Fragment programu procesora odpowiadający za tę komunikację zarządza konwersją sygnałów sterujących z odbiornika zdalnego sterowania oraz wypracowanych przez układ sterowania automatycznego do postaci odpowiedniej dla elektrycznych silników sterujących elementami wykonawczymi platformy latającej. Duża część tego fragmentu programu jest ściśle związana z geometrią kinematyki układu sterowania.

Za komunikację ze stacją naziemną z wykorzystaniem radiomodemów (urządzenia do cyfrowej transmisji danych) odpowiada fragment programu zarządzającego transmisją szeregową do i z urządzeń zewnętrznych poprzez sprzętowe porty UART procesora. Konfigurację portów w zakresie: przypisania wejść/wyjść, prędkości transmisji, zdefiniowania liczby bitów, bitów stopu, parzystości, sposobu obliczania sumy kontrolnej oraz typu protokołu odpowiada ten sam fragment oprogramowania z wykorzystaniem dodatkowego pliku konfiguracyjnego łatwego do modyfikacji w miare bieżących potrzeb konfiguracji platformy latającej oraz wykonywanego zadania. Dla ułatwienia i zwiększenia dokładności regulacji i programowania układu sterowania automatycznego istnieje możliwość korzystania z zapisu parametrów oraz stanu pracy układu. Za wybór parametrów, ustawienie cyklu czasowego oraz format zapisu odpowiada fragment oprogramowania, do którego najwygodniejszy dostęp można uzyskać przez plik konfiguracyjny. Realizacja wszystkich obszarów programu (watków programu) wykonywana jest z zachowaniem zadanych, stałych przedziałów czasowych, charakterystycznych dla poszczególnych watków. Wątkom nadane są priorytety, tak aby obsługa przerwań procesora realizowana była poprawnie z ewentualną utratą procesów mniej kluczowych dla bezpieczeństwa lotów platformy latającej. Tym niemniej do prawidłowego zaprogramowania układu sterowania automatycznego realizowana jest bieżąca kontrola stopnia zajętości ramki czasowej, tak aby nie doprowadzić do zerwania ciągłości procesów.

Program napisany dla procesora głównego autopilota układu sterowania realizuje jednocześnie kilka wątków obejmujących główne procesy obliczeniowe:

- odczyt, filtrowanie i interpretacja sygnałów z czujników,
- odczyt sygnałów sterujących z odbiornika zdalnego sterowania,
- obliczenia kątów orientacji i stanu platformy,
- obliczenia nawigacyjne,
- obliczenia praw sterowania,
- obliczenia sygnałów sterujących,
- generowanie sygnałów sterujących dla serwomechanizmów wykonawczych,
- odczyt i generowanie cyfrowej transmisji danych z naziemną stacją sterowania.

#### 3.2. Czterowirnikowy mikrowiropłat AtraxASF

Bezzałogowe statki powietrzne typu wielowirnikowych mikrowiropłatów wykazują się mniejszym zasięgiem i pułapem operowania niż typu BSP samolotowego, lecz dzięki swojej konstrukcji umożliwiają lot z małą prędkością, pionowy start i lądowanie oraz zawis nad obiektem. Wielowirnikowy mikrowiropłat *AtraxASF* przedstawiono na rysubku 11. Mikrowiropłat *AtraxASF* ma następujące parametry techniczne:

- masa startowa: 10,5 kg,
- prędkość lotu: 0-50 km/h,
- maksymalny czas lotu:  $50\,\mathrm{min},$
- $\bullet\,$ zasięg lotu: 3,5 km (w zależności od uksztaltowania terenu),
- start/lądowanie: system pionowego startu/system pionowego lądowania,
- wymiary po spakowaniu (do transportu):  $636\times430\times172\,\mathrm{mm}.$



Rys. 11. Widok BSP typu wielowirnikowego AtraxASF z głowicą pomiarową wyposażoną w kamerę termowizyjną wraz z elementami mocowania głowicy pomiarowej do kadłuba

Do kontrolowania lotu BSP zaprojektowano system składający się z układów pokładowych oraz układów naziemnej stacji kontroli lotu ściśle ze sobą związanych przy pomocy łączy radiowych i wzajemnie uzależnionych od bezprzewodowej wymiany danych. Do sterowania lotu BSP wykorzystywany jest jeden z dwóch podstawowych systemów sterowania:

- sterowanie zdalne drogą radiową z wykorzystaniem aparatury RC z bezpośrednią, wzrokową obserwacją BSP (system sterowania zewnętrznego),
- sterowanie automatyczne (programowe), poprzez stację naziemną NSKL z wykorzystaniem w locie nawigacji GPS.

Dla zapewnienia zdalnego pilotowania BSP autopilota zaprojektowano tak, aby: wykonać pomiar niezbędnych przyspieszeń i prędkości kątowych i kątów orientacji przestrzennej, zapewnić stabilizację platformie (w pętli sprzężenia zwrotnego), chroniąc przed szybkimi zakłóceniami typu podmuch, turbulencja itp., mierzyć kurs (kompas magnetyczny) w celu orientacji platformy podczas zawisu, mierzyć precyzyjnie wysokość (szczególnie ważne podczas automatycznego lądowania), posiadać informację o swoim położeniu, położeniu punktu docelowego oraz odpowiednio przeliczać te dane (informacja o położeniu z odbiornika GPS), utrzymywać łączność ("data link") ze stacją naziemną NSKL, z której nadzorowany jest lot platformy.

BSP AtraxASF umożliwia wykonywanie lotów automatycznych poza zasięgiem wzroku (BVLOS). Z tego względu zgodnie z obowiązującymi przepisami lotniczymi dotyczącymi BSP przeprowadzona została procedura rejestracji urządzenia w Urzędzie Lotnictwa Cywilnego (ULC). Bezzałogowe statki powietrzne o numerach fabrycznych AtraxASF-1 i AtraxASF-2 otrzymały kolejno znaki rozpoznawcze SP-YASA oraz SP-YASB. Dodatkowo AtraxASF-1 uzy-skał zgodę (nr 100/A/2020) na wykonywanie lotów automatycznych poza zasięgiem widoczności

wzrokowej BVLOS. Ponadto przeprowadzone zostały pomiary natężenia dźwięku generowanego przez bezzałogowe statki powietrzne (*AtraxASF* oraz *NeoxASF*). Celem pomiarów było określenie poziomu natężenia dźwięku generowanego przez BSP w aspekcie potencjalnego wpływu na środowisko. Wyniki pomiarów natężenia dźwięku dla *AtraxASF* (54 dB) oraz *NeoxASF* (53 dB) nie przekroczyły poziomu tła akustycznego (54 dB). Otrzymane wartości natężenia dźwięku jednoznacznie świadczą o neutralnym wpływie badanych bezzałogowych statków powietrznych dla środowiska.

Kluczowymi w wyborze kamer termowizyjnych były ich parametry funkcjonalne. Przeprowadzono dialog techniczny z potencjalnymi producentami takich kamer. Na tej podstawie wybrano rozwiązania najkorzystniejsze z punktu widzenia realizacji celów projektowych. Czterowirnikowiec *AtraxASF* został wyposażony w kamerę długofalową KTX. Kamera termowizyjna ma interfejs i protokół komunikacyjny: Gigabit Ethernet oraz UART, zestaw bibliotek SDK (Software Development Kit), oprogramowanie wraz z kodem źródłowym do odbioru strumienia wideo po protokole UDP oraz oprogramowanie do konfiguracji kamery. Kamera jest osadzona w trójosiowej głowicy stabilizacyjnej. Widok głowicy stabilizacyjnej dedykowanej do kamery termowizyjnej KTX przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Widok głowicy pomiarowej do kamery termowizyjnej KTX

Głowice stabilizacyjne kamer termowizyjnych wyposażone są w trzy bezszczotkowe silniki i mają możliwość utrzymywania kamery termowizyjnej w poziomie na wszystkich osiach (odchylenie, nachylenie i przechylenie), gdy występuje jakikolwiek ruch BSP. Wyposażone są w inercyjną jednostkę pomiarową (IMU), która reaguje na ruch i wykorzystuje trzy oddzielne silniki do stabilizacji kamery termowizyjnej. IMU wykorzystuje zaprogramowane algorytmy, które zapewniają stabilizację i zapewniają operatorowi swobodną kontrolę. Głowica tłumi średnie i wysokie częstotliwości drgań z BSP docierające do kamery, jednocześnie umożliwia rzeczywisty ruch kamery. Amortyzator głowicy pomiarowej z kamerą termowizyjną został wykonany z włókna węglowego z płytą antywibracyjną z 4 gumowymi modułami łącznymi o specjalnie dobranych do głowicy charakterystykach. Głowica stabilizacyjna zapewnia niezależność fotografowania lub filmowania kamerą termowizyjną bez wibracji lub wstrząsów kamery.

Głowica stabilizacyjna wyposażona jest w mikroprocesor, który pobiera dane z giroskopów i reaguje, informując silniki głowicy, w którym kierunku mają się poruszać. Moduł ten łączy się i komunikuje z systemem kontroli lotu, aby pomóc w kontrolowaniu głowicy stabilizacyjnej. Jednocześnie wysyła informacje wideo do łącza w celu transmisji wideo. Głowica stabilizacyjna wyposażona jest w moduł zasilania elektrycznego – baterie 3S LiPo. Zapewniają one zasilanie kamery termowizyjnej i głównego kontrolera. Głowica stabilizacyjna ma odpowiednie mocowania, śruby i przewody do podłączenia kamery termowizyjnej do BSP.

Widok BSP typu wielowirnikowego *AtraxASF* z głowicą pomiarową wyposażoną w kamerę termowizyjną wraz z elementami mocowania głowicy pomiarowej do kadłuba *AtraxASF* przedstawiono na rysunku 7.

Procesor graficzny głowicy pomiarowej przetwarza (nieskompresowany) strumień danych fotograficznych z kamery termowizyjnej i wykonuje algorytmy rozpoznawania i śledzenia obiektów (zwierząt). Procesor przeprowadza całe przetwarzanie fotograficzne bezpośrednio w głowicy pomiarowej, a mianowicie kompresuje duże ilości informacji i przesyła skompresowany strumień przez kanał Ethernet 100 Base-tx do zewnętrznego modemu pokładowego. Taka konfiguracja pozwala na synchronizację z danymi pokładowego systemu nawigacyjnego BSP.

Sygnały z zestawu czujników współpracujących z układem sterowania autopilota przy wykorzystaniu algorytmów obliczeniowych zaprogramowanych w głównym procesorze układu sterowania pozwalają na wyznaczenie kątów orientacji, pozycji, wysokości oraz stanu (wektory prędkości i przyspieszeń) BSP. Dokładność i częstość wyznaczonych parametrów uzależniona jest od możliwości obliczeniowych procesora, zastosowanych algorytmów oraz cech czujników. Ten sam fragment oprogramowania, z racji korzystania z sygnałów z odbiornika GPS odpowiada na nawigację we wszystkich trybach lotu. Za wypracowywanie sygnałów sterowania odpowiada fragment oprogramowania realizujący prawa sterowania, czyli obliczający sygnały wyjściowe sterowania do zadanych parametrów lotu (zadanych przez operatora z pulpitu sterowania). Ten fragment oprogramowania (a konkretnie współczynniki regulatorów PID wyróżnionych równań) jest ściśle związany z BSP (kinematyką układu sterowania, cechami dynamicznymi i aerodynamicznymi oraz napędem).

Do komunikacji z układami wykonawczymi BSP oraz systemami zdalnego sterowania układu sterowania służy system elektronicznego miksowania funkcji sterowania TH-2 Mikro oraz specjalny moduł umożliwiający podłączenie odbiornika zdalnego sterowania oraz elektrycznych silników wykonawczych. Fragment programu procesora odpowiadający za tę komunikację zarządza konwersją sygnałów sterujących z odbiornika zdalnego sterowania oraz wypracowanych przez układ sterowania automatycznego do postaci odpowiedniej dla elektrycznych silników sterujących elementami wykonawczymi platformy latającej. Duża część tego fragmentu programu jest ściśle związana z geometrią kinematyki układu sterowania.

Za komunikację ze stacją naziemną z wykorzystaniem radiomodemów (urządzenia do cyfrowej transmisji danych) odpowiada fragment programu zarządzającego transmisją szeregową do i z urządzeń zewnętrznych poprzez sprzętowe porty UART procesora. Konfigurację portów w zakresie: przypisania wejść/wyjść, prędkości transmisji, zdefiniowania liczby bitów, bitów stopu, parzystości, sposobu obliczania sumy kontrolnej oraz typu protokołu odpowiada ten sam fragment oprogramowania z wykorzystaniem dodatkowego pliku konfiguracyjnego łatwego do modyfikacji w miarę bieżących potrzeb konfiguracji platformy latającej oraz zadania. Dla ułatwienia i zwiększenia dokładności regulacji i programowania układu sterowania automatycznego istnieje możliwość korzystania z zapisu parametrów oraz stanu pracy układu. Za wybór parametrów, ustawienie cyklu czasowego oraz format zapisu odpowiada fragment oprogramowania, do którego najwygodniejszy dostęp można uzyskać przez plik konfiguracyjny. Realizacja wszystkich obszarów programu (watków programu) wykonywana jest z zachowaniem zadanych, stałych przedziałów czasowych, charakterystycznych dla poszczególnych watków. Watkom nadane są priorytety, tak aby obsługa przerwań procesora realizowana była poprawnie z ewentualną utratą procesów mniej kluczowych dla bezpieczeństwa lotów platformy latającej. Tym niemniej do prawidłowego zaprogramowania układu sterowania automatycznego realizowana jest bieżaca kontrola stopnia zajętości ramki czasowej, tak aby nie doprowadzić do zerwania ciągłości procesów.

Program napisany dla procesora głównego autopilota układu sterowania realizuje jednocześnie kilka wątków obejmujących główne procesy obliczeniowe:

- 1) odczyt, filtrowanie i interpretacja sygnałów z czujników,
- 2) odczyt sygnałów sterujących z odbiornika zdalnego sterowania,
- 3) obliczenia kątów orientacji i stanu platformy,
- 4) obliczenia nawigacyjne,
- 5) obliczenia praw sterowania,
- 6) obliczenia sygnałów sterujących,
- 7) generowanie sygnałów sterujących dla serwomechanizmów wykonawczych,
- 8) odczyt i generowanie cyfrowej transmisji danych z naziemną stacją sterowania.

#### 4. Badania w locie systemu ASFochrona

Ostatecznym potwierdzeniem poprawności działania systemu ASFochrona były badania w locie. Loty były wykonywane nad terenami leśnymi, polami uprawnymi oraz łąkami, czyli w rzeczywistym środowisku bytowania dzików. Badania te miały za zadanie potwierdzenie trafności założeń konstrukcyjnych i osiągów bezzałogowych statków powietrznych NeoxASF i AtraxASF, stwierdzenie poprawności działania podsystemów obu typów BSP, wykazanie praktycznych możliwości wykrywania dzików oraz identyfikacji chorych na ASF osobników. W trakcie lotów uzupełniano także bazę zdjęć termowizyjnych dzików. Zdjęcia te wykorzystywano do ciągłego treningu sieci neuronowej oprogramowania wykrywającego dziki oraz identyfikującego zwierzęta z objawami ASF. Loty odbywały się w różnych rejonach Polski, w rzeczywistych warunkach środowiskowych bytowania dzików, różnych warunkach pogodowych oraz różnych porach roku.

#### 4.1. Badania podsystemu NeoxASF

W tabeli 1 zestawiono przykłady badań terenowych podsystemu *NeoxASF*. Poszczególne kolumny tabeli 1 zawierają: datę wykonania lotu, godzinę startu, długotrwałość lotu, pokonany w trakcie lotu dystans, miejsce oblotu (numer obwodu łowieckiego) oraz powierzchnię zeskanowanego w trakcie lotu terenu. W dniu 3.02.2021 loty się nie odbyły z powodu minimalnych do wykonywania lotów warunkach atmosferycznych.

Lot	Data	Start [hh:min]	Czas lotu [min]	Dystans [km]	Obwód nr	$\mathcal{A}$	Pow. [km <sup>2</sup> ]
1	2.02.2021	18:50	75	84	261	10/0	6
2	2.02.2021	22:50	63	69	261	21/0	0
3	4.02.2021	06:25	74	81	291	3/3	4
4	4.02.2021	19:20	75	84	274	125/37	8
5	4.02.2021	21:20	75	82	274	9/9	0
6	5.02.2021	00:35	76	81	262	19/19	4
			438			187/68	22

**Tabela 1.** Zestawienie lotów wykonanych systemem *NeoxASF* podczas badań w terminie 2-5.02.2021 r.

 $\mathcal{A}$  – Liczba zaobserwowanych zwierząt/dzików

Na podstawie zawartych w tabeli 1 danych, w ciągu 6 lotów samolot NeoxASF był w powietrzu 7 godzin i 18 minut oraz zeskanował obszar 22 km<sup>2</sup>. W trakcie wykonywania lotów wykryto



Rys. 13. Trasy lotów wykonywanych przez BSP *NeoxASF* oraz *AtraxASF*: (a) loty wykonane w dniu 2.03.2021; (b) lot wykonany w dniu 5.02.3021; (c) mapa terenów, nad którymi wykonano loty. Żółte linie oznaczają trasy lotów samolotu *NeoxASF*, białe kółka oznaczają lokalizacje zaobserwowanych i zarejestrowanych przez kamery BSP zwierząt (dzików, ale także saren, łosi, wilków), czerwone linie oznaczają trasy lotu czterowirnikowca *AtraxASF*, fioletowe linie oznaczają granice obwodów łowieckich

187 zwierząt, w tym 68 dzików. Na rysunku 13 przedstawiono mapy obszarów, nad którymi odbywały się loty. Na mapie (rys. 13c) wraz z zaznaczonymi obszarami obwodów łowieckich oznaczono także miejsca lotów samolotu NeoxASF i czterowirnikowca AtraxASF. Zadaniem samolotu NeoxASF było wykonanie serii zdjęć termowizyjnych. Wykonywane z częstotliwością 60 Hz przez kamerę KTCH zdjęcia termowizyjne były rejestrowane w pamięci komputera pokładowego BSP oraz przekazywane telemetrycznie z pokładu BSP na ekran znajdującej się w pojeździe dowodzenia stacji kontroli lotu. Działające w oparciu o sieci neuronowe oprogramowanie komputera BSP NeoxASF analizowało zdjęcia i wykrywało dziki, podając jednocześnie ich lokalizację w oparciu w dane systemu GPS. Dane te były przesyłane telemetrycznie do stacji kontroli lotu. Samolot NeoxASF wykonywał oblot wielkoobszarowy w trybie automatycznym (BVLOS). Trajektoria tego w pełni automatycznego lotu jest charakterystyczna dla lotów aerofotogrametrycznych. W trakcie wykonywania lotu aerofotogrametrycznego samolot leci wzdłuż linii prostej, wykonując serię zdjęć. Po pokonaniu założonego przed startem dystansu lotu prostoliniowego samolot wykonuje zakręt o 180° i kontynuje lot powrotny po linii prostej do następnego punktu zwrotnego. Przykładowe trasy lotów aerofotogrametrycznych BSP NeoxASF są przedstawione na rys. 13a i rys. 13b.

Jednym z elementów badań było sprawdzenie czasu wznoszenia na zadany pułap wykonywania lotu aerofotogrametrycznego wynoszącego 100 m oraz pożądanej prędkości lotu 65 km/h. Na rysunku 14 przedstawiono przebiegi zarejestrowanych przez sensory pokładowe BSP prędkości i wysokości lotu podczas startu z wyrzutni (rys. 14a) oraz podczas trwającego 1 godzinę automatycznego lotu BVLOS (rys. 13b). Samolot *NeoxASF* w locie automatycznym utrzymuje pożądaną wysokość lotu (100 m) oraz prędkość przelotową (65 km/h).



Rys. 14. (a) Wysokość lotu [m], zadana wysokość lotu [m] oraz prędkość powietrzna [km/h] w trakcie startu (parametry zarejestrowane na pokładzie BSP). Wysokość lotu [m], zadana wysokość lotu [m], prędkość powietrzna [km/h] zarejestrowane na pokładzie BSP

Większość lotów badawczych systemu *ASFochrona* wykonywano w porach: wieczorno-nocnej, nocnej lub rannej. Loty odbywały się w obszarach zapowietrzonych ASF. Celem badań w locie było wykazanie skuteczności wykrywania dzików, ocena ich liczebności oraz identyfikacji dzików z objawami ASF. Na rysunku 15 przedstawiono przykładowe zrzuty ekranu z działającą aplikacją do przetwarzania danych z BSP *NeoxASF*.



Rys. 15. Przykładowy zrzut ekranu stacji wstępnego przetwarzania obrazu z działającą aplikacją do przetwarzania danych z BSP *NeoxASF* w czasie rzeczywistym

Przykładowe zdjęcia zwierząt uzyskanych z lotów BSP NeoxASF lecącego na wysokości 100 m przedstawiono na rys. 16. Lokalizację zaobserwowanych zwierząt w trakcie lotów BSP NeoxASF przedstawiono na rys. 17.



Rys. 16. Przykładowe zdjęcia zwierząt uzyskanych w czasie lotów BSP $\mathit{NeoxASF}$ 

Podsumowując wyniki badań podsystemu NeoxASF, można stwierdzić, że samolot umożliwia dokładne oblatanie dużych powierzchni. Średnio w ciągu 1 godziny lotu samolot NeoxASF skanuje ponad 3 km<sup>2</sup> terenu, bez względu na jego konfigurację i zalesienie. W trakcie oblotu NeoxASF przesyła do pojazdu dowodzenia informacje o rejonach występowania dzików. Należy podkre-



Rys. 17. Lokalizacja zaobserwowanych zwierząt w trakcie lotów BSP NeoxASF

ślić, że wstępny postprocessing rejestrowanych przez kamerę KRCH zdjęć termowizyjnych na komputerze pokładowym samolotu *NeoxASF* umożliwia przesyłanie alertu związanego z wykryciem dzików oraz tagowanie (oznaczenie) zebranego materiału. Umożliwia to szybkie wysłanie w miejsce występowania dzików wielowirnikowca *AtraxASF* w celu stwierdzenia potencjalnego zagrożenia ASF.

#### 4.2. Badania podsystemu AtraxASF

W celu określenia charakterystyk BSP *AtraxASF* wyposażonego w głowicę pomiarową z termowizyjną kamerą KTX firmy Etronika wykonano serię lotów kontrolnych na różnych wysoko-

ściach z różnymi prędkościami lotu BSP. Loty kontrolne BSP AtraxASF X wykonywano zgodnie z "Metodyką badań nr01/BSP/AtraxASF/2020", (opracowanie ITWL). W czasie badań w locie określono jego zachowanie się BSP AtraxASF w:

- typowych stanach lotu: start, wznoszenie, lot poziomy, lot w zakręcie, opadanie, lądowanie,
- lotach w trybie automatycznym (poza widocznością),
- oraz oceniono jego sterowność, manewrowość i długotrwałość lotu, a także funkcjonalność głowicy pomiarowej z kamerą termowizyjną na różnych wysokościach z różnymi prędkościami jego lotu.

Dane o trasie lotu BSP *AtraxASF*, jego aktualnym położeniu, prędkości i wysokości lotu, kątach pochylenia, przechylenia i odchylenia, mocy odbioru sygnału GPS rejestrowane były w rejestratorze parametrów lotu BSP.

Na rysunkach od 18-22 przedstawiono przykładowe trasy lotów kontrolnych BSP AtraxASF oraz charakterystyki tego czterowirnikowca zarejestrowane podczas tych lotów. Na rysunku 22c przedstawiono charakterystykę prądową BSP AtraxASF oraz osiąganą długotrwałość lotu.



Rys. 18. (a) Trasa lotu nr 1 BSP *AtraxASF* w trybie automatycznym (poza widocznością BVLOS); (b) wysokość i prędkość lotu BSP *AtraxASF* zarejestrowane podczas lotu nr 1



Rys. 19. Kąty pochylenia, przechylenia i odchylenia BSP AtraxASF zarejestrowane w locie nr 1 oraz prędkość wznoszenia i opadania BSP AtraxASF zarejestrowane w locie nr 1

Na podstawie wyników badań w locie BSP A trax ASFz głowicą pomiarową można stwierdzić co następuje:

- *AtraxASF* jest sterowalny i wykazuje odpowiednią manewrowość w locie ustalonym oraz w typowych manewrach zawierających start, zawis, manewry przyziemne zawierające obroty oraz przemieszczenia we wszystkich kierunkach, wznoszenie, lot poziomy, zakręty i lądowanie.
- W locie poziomym, wznoszeniu, opadaniu, podczas wykonywania ustalonych zakrętów z kątami przechylenia do 30° w lewo lub w prawo zapasy sterowania cyklicznego i kierunkowego są wystarczające (nie mniej niż 20%).



Rys. 20. (a) Moc odbioru sygnału GPS w czasie lotu nr 1 BSP *AtraxASF*; (b) trasa lotu nr 2 BSP *AtraxASF* w trybie automatycznym (poza widocznością BVLOS)



Rys. 21. (a) Wysokość i prędkość lotu BSP AtraxASF w locie nr 2, (b) kąty pochylenia, przechylenia i odchylenia BSP AtraxASF w locie nr 2



Rys. 22. (a) Prędkość wznoszenia i opadania BSP AtraxASF zarejestrowane podczas lotu nr 2; (b) moc odbioru sygnału GPS w czasie lotu nr 5 BSP AtraxASF; (c) parametry prądowe BSP AtraxASF w czasie lotu na długotrwałość lotu

- W ocenie pilota-operatora podczas wykonywania zakrętów z kątami przechylenia do  $30^{\circ}$  AtraxASF zachowuje odpowiednią sterowność i manewrowość oraz ma wystarczające zapasy sterowania dla bezpiecznego wykonania manewrów.
- *AtraxASF* może przemieszczać się do przodu z maksymalną prędkością wynoszącą 80 km/h, w bok (w lewo i w prawo) z prędkością do 20 km/h oraz do tyłu z prędkością do 20 km/h.
- Maksymalny czas lotu BSP A trax ASF wynosi około 50 min, a maksymalny zasięg lotu 3,5 km.
- Maksymalna wysokość lotu operacyjnego wynosi około 350 m.

W celu określenia funkcjonalności głowic pomiarowych z kamerą termowizyjną zabudowanych na BSP przeprowadzono loty rozpoznawcze (zadaniowe) na BSP AtraxASF w naturalnym terenie występowania dzików oraz BSP NeoxASF w lotach wielkoobszarowych. Charakterystyki przykładowych lotów rozpoznawczych BSP NeoxASF przedstawiono w punkcie 4.1. Poniżej zostaną omówione charakterystyki przykładowych lotów rozpoznawczych BSP AtraxASF z kamerą termowizyjną KTX. Loty wykonywano w porze wieczorno-nocnej. Na rysunkach od 23 do rys. 28 przedstawiono przykładowe zdjęcia termowizyjne zarejestrowane przez kamerę KTX podczas dwu wybranych lotów badawczych mających na celu sprawdzenie funkcjonalności głowicy termowizyjnej czterowirnikowca AtraxASF.



Rys. 23. Trasa lotu rozpoznawczego nr 1 BSP A trax ASFz kamerą termowizyjną w porze nocnej (prawy wykres w siatce metrycznej)



Rys. 24. Profil z nocnego lotu rozpoznawczego nr 1; kolor zielony – profil terenu, wysokość nad poziomem morza; niebieski – zarejestrowana wysokość barometryczna względem miejsca startu; czerwony – rzeczywista wysokość BSP nad poziomem morza odczytana z danych GPS

Na podstawie badań funkcjonalności głowic pomiarowych z kamerą termowizyjną zabudowanych na BSP A traxASF oraz analiz obrazów termowizyjnych z lotów BSP A traxASF wysunięto następujące spostrzeżenia:

• Podczas lotu BSP *AtraxASF* operator może w dowolnej chwili rozpocząć i zakończyć rejestrację kamerą KTX. Istnieje również możliwość zmiany parametrów częstotliwości zapisu,



Rys. 25. Obrazy z kamery termowizyjnej z nocnego lotu rozpoznawczego nr 1: pojedynczy dzik w pobliżu wody (lewe zdjęcie); uciekająca wataha dzików (prawe zdjęcie)



Rys. 26. Trasa lotu rozpoznawczego nr 2 BSP *AtraxASF* z kamerą termowizyjną w porze nocnej (prawy wykres w siatce metrycznej)



Rys. 27. Profil z nocnego lotu rozpoznawczego nr 2; kolor zielony – profil terenu, wysokość nad poziomem morza; niebieski – zarejestrowana wysokość barometryczna względem miejsca startu; czerwony – rzeczywista wysokość BSP nad poziomem morza odczytana z danych GPS



Rys. 28. Obrazy z kamery termowizyjnej z nocnego lotu rozpoznawczego nr 2: góra lewe zdjęcie, wataha dzików w pobliżu wody (lewe zdjęcie); wataha dzików na obrzeżu lasu; zdjęcia poniżej: lewe zdjęcie trzy dziki w młodniku iglastym; prawe zdjęcie wataha dzików w młodniku iglastym



Rys. 29. Przykład rejestracji obrazów termowizyjnych ze stanowiska stacjonarnego w porach dziennych [4]



Rys. 30. Przykład rejestracji obrazów termowizyjnych ze stanowiska stacjonarnego w porach nocnych [4]

co zostało przećwiczone dla zapisów z częstotliwością 30, 10 i 5 klatek/s. W czasie oblotów zapewniony jest również pełny monitoring parametrów zapisu danych na BSP z bieżącą oceną wolnego miejsca na dysku urządzenia zapisującego obraz z kamery termowizyjnej.

- W czasie badań zebrano materiał, z którego wybrano zbiór przeszło 3000 zdjęć, które posłużą do trenowania (douczenia) i testowania algorytmu wykrywania.
- Nieruchome nogi podstawy BSP *AtraxASF* w niektórych fazach lotu zakłócają rejestrację z kamery KTX (pojawia się prześwietlenie obrazu). Dlatego też podczas rejestracji dzików operator BSP *AtraxASF* powinien obracać BSP w taki sposób, aby kamerę utrzymywać nieruchomo w jednej z dogodnych pozycji.

W ramach realizacji badań ponadto przeprowadzono:

- analizę parametrów technicznych kamer termowizyjnych jako źródła danych obrazowych, w tym emisyjność i rejestrację promieniowania podczerwonego;
- wykonano badania kamer termowizyjnych oraz rozkładu temperatur obiektów i otoczenia, w tym badanie jakości rejestracji kamery KTX, rejestrację obrazów termowizyjnych ze stanowiska stacjonarnego, rejestrację obrazów termowizyjnych z BSP;
- analityczne prace algorytmiczne nad wykrywaniem watah dzików, w tym klasyfikacja osobników potencjalnie chorych na ASF. Opracowano algorytm wykrywania dzików na obrazach termowizyjnych z wykorzystaniem modelu sieci neuronowej i cech behawioralnych;
- badania terenowe i gromadzenie zbiorów danych obrazowych;
- algorytm lokalizacji dzików wykrytych z uwzględnieniem danych z GSP i danych z oblotów terenowych i jego weryfikację.

Przykłady rejestracji obrazów termowizyjnych ze stanowiska stacjonarnego w porach dziennych przedstawiono na rysunku 29, a w porach nocnych na rysunku 30.

Na rysunku 31 przedstawiono obrazy termowizyjne zarejestrowane przez kamerę termowizyjną uzyskane w czasie zawisu BSP AtraxASF na wysokościach 120 m, 100 m, 60 m i 50 m. Na obrazach widoczne są dwa dziki oznaczone Bx1 i Bx2.

Analizując uzyskane obrazy termowizyjne, można zauważyć silną korelację wielkości zwierząt z wysokością, z jakiej realizowana była rejestracja. Przy wysokości zawisu BSP *AtraxASF* powyżej 60 m obrazy termowizyjne stają się niejednoznaczne pod względem identyfikacji obiektów znajdujących się w polu widzenia. Rysunek 32 przedstawia przykład rejestracji obrazu widoczny w aplikacji stacji naziemnej NSKL.



Rys. 31. Przykład rejestracji obrazów termowizyjnych z termowizyjnej kamery zabudowanej na czterowirnikowcu wykonane z wysokościach  $120\,{\rm m},\,100\,{\rm m},\,60\,{\rm m}$ i $50\,{\rm m}$ [4]



Rys. 32. Przykład rejestracji obrazu widoczny w aplikacji stacji naziemnej stacji kontroli lotu (NSKL)

Na bazie zebranych danych pomiarowych z kamery termowizyjnej opracowano modele algorytmów automatycznego wykrywania i wskazywania potencjalnych watah dzików w warunkach naturalnych, modele klasyfikacji i identyfikacji osobników z objawami chorobowymi i ich zliczanie.

W ramach badań końcowych systemu *AtraxASF* wykonano loty w porze wieczorno-nocnej, nocnej i rannej w obszarach zapowietrzonych afrykańskim pomorem świń (rys. 33).



Rys. 33. Po lewej miejsce badań końcowych; po prawej przygotowania BSP AtraxASF do badań końcowych systemów ASFochrona

Trasy wykonanych lotów BSP AtraxASF wraz z profilem lotu przedstawiono na rys. 34.

Przykładowe zrzuty ekranu z działającą aplikacją do przetwarzania danych z BSP AtraxASF przedstawiono na rys. 35.

Przykładowe zdjęcia zwierząt uzyskanych z lotów BSP *AtraxASF* na wysokości 50 m przedstawiono na rys. 36. Dziki niewykazujące oznak zakażenia wirusem ASF oznaczone są zieloną ramką. Dzik wykazujący anomalię temperaturowe i behawioralną został oznaczony ramką czerwoną. Na zdjęciu jest widoczny myśliwy oznaczony zieloną ramką.

Podsumowując badania terenowe, można stwierdzić, że podsystem techniczny AtraxASF umożliwia wykonanie przeszukań terenów trudnodostępnych dla ludzi, w nocy, z wydajnością ponad  $10 \text{ km}^2/\text{lot}$ . Przeszukiwanie terenów w celu detekcji dzików z dobrymi efektami, ze względu na ponadprzeciętne charakterystyki sensora, możliwe jest nawet w warunkach wysokiej temperatury zewnętrznej oraz gęstej roślinności.

W tabeli na rys. 37 zestawiono badania terenowe systemu przeprowadzone w 2020 i 2021 roku. Podczas lotów testowych system automatycznie wykrył 166 dzików oraz zidentyfikował 9 dzików potencjalnie zakażonych wirusem ASF. W 7 przypadkach podejrzane zwierzęta zostały odstrzelone i po zbadaniu w laboratoriach weterynaryjnych potwierdzono zakażenie wirusem ASF oraz występowanie przeciwciał. Dwa dziki zidentyfikowane przez system jako osobniki chore nie udało się odstrzelić, że względu na bardzo trudne warunki terenowe (loty w dniach 25-29 kwietnia w powiecie zielonogórskim). W lotach od grudnia 2020 roku do marca 2021 chorych na ASF dzików system jeszcze nie wykrywał, trwały prace nad systemem komputerowym stacji analizy obrazu. Na rysunku 38 przedstawiony jest przykładowy raport generowany przez oprogramowanie stacji analizy obrazu.

Na rysunku 39 przedstawiono zaznaczone ma mapie Google lokalizacje innych zwierząt na terenach objętych lotami badawczymi. Na mapie zaznaczono miejsce startu podsystemu *AtraxASF* oraz godziny startów.



Rys. 34. Trasy lotów BSP AtraxASF wraz z profilem lotu realizowanych w ramach badań końcowych. Kolor zielony oznacza profil terenu, wysokość nad poziomem morza; kolor niebieski oznacza zarejestrowana wysokość barometryczną lotu względem miejsca startu; czerwony oznacza rzeczywistą wysokość BSP nad poziomem morza odczytaną z danych GPS



Rys. 35. Przykładowy zrzut ekranu z działającą aplikacją do przetwarzania danych z BSP ${\it AtraxASF}$ 



Rys. 36. Przykładowe obrazy z kamery termowizyjnej zarejestrowane podczas lotów końcowych BSP AtraxASF. Po prawej dzik z objawami ASF wytypowany do odstrzału. Na prawym zdjęciu zieloną ramką oznaczono myśliwego

L.p.	Miejsce	Termin	Przeszukana powierzchnia [km²]	Liczba dzików [szt.]	Liczba dzików potencjalnie chorych na ASF [szt.]
1	pow. ostrowiecki woj. świętokrzyskie	28-29.09.2021r.	17,6	18	5*
2	pow. mielecki i pow. stalowowolski woj. podkarpackie	06-10.09.2021r.	101,5	0	0
3	pow. hrubieszowski woj. lubelskie	26-29.07.2021r.	54,0	0	0
4	pow. mielecki woj. podkarpackie	04-08.07.2021r.	67,9	9	2*
5	pow. zielonogórski <b>woj. lubuskie</b>	25-29.04.2021r.	32,1	9	2**
6	pow. Gorlicki i Magurski PN woj. podkarpackie i małopolskie	22-26.03.2021r.	17,3	0	0
7	pow. kraśnicki <b>woj. lubelskie</b>	05-08.03.2021r.	42,0	12	b.d.
8	pow. piaseczyński woj. mazowieckie	23-25.02.2021r.	18,0	8	b.d.
9	pow. gryfiński woj. zachodniopomorskie	02-05.02.2021r.	65,0	59	b.d.
10	pow. ostródzki i powiat iławski woj. warmińsko-mazurskie	14-18.12.2020r.	27,1	51	b.d.
		ŁĄCZNIE:	<b>442,5</b> (44.250,0 ha)	166	

Rys. 37. Badania terenowe systemu przeprowadzone w 2020 i 2021 roku

#### RAPORT Z BADAN TERENOWYCH DETEKCJA, LOKALIZACJA i ZLICZANIE DZIKÓW: Wyniki analizy danych pozyskanych podczas oblotów

Published 07-Jul-2021 18:02:08

#### Abstract

RAPORT Z BADAN TERENOWYCH DETEKCJA, LOKALIZACJA i ZLICZANIE DZIKÓW Niniejszy Raport jest dokumentem opracowanym i generowanym w sposób automatyczny na podstawie danych (obrazy termowizyjne i parametry lotu nosiciela) z badan terenowych. Opracowane oprogramowanie powstalo w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badan i Rozwoju w ramach programu "Zastosowanie innowacyjnych i efektywnych metod i technologii umozliwiajacych wykrycie watah dzików, identyfikacji osobników z objawami klinicznymi ASF w naturalnym terenie ich wystepowania. Celem projektu bylo opracowanie innowacyjnych i efektywnych metod i technologii umozliwiajacych prowadzenie zdalnej obserwacji w celu wykrycia watah dzików, identyfikacji osobników z objawami klinicznymi ASF w naturalnym terenie ich wystepowania oraz okreslenia ich liczebnosci i monitorowania dróg przemieszczania sie i tym sposobem ograniczenie transmisji ASF do populacji swin. Raport prezentuje wyniki analizy danych pozyskanych z oblotów i rejestracji obrazów termowizyjnych. Opracowane wyniki olokalizacji, jak równicz wystepowania otencjalnych anomalii temperaturowo-behawioralnych, mogacych swiadczyc o potencjalnym nosicielstwie ASF.

#### Wyniki detekcji anomalii

W wyniku przeprowadzonych analiz danych otrzymanych podczas oblotów wykryto dziki. Osobniki niewykazujące oznak wskazujących na zakażenie ASF zaznaczone są na zalaczonych przykładowych obrazach kolorem zielonym zaś osobniki wykazujące anomalie temperaturowe i behawioralne, kolorem czerwonym.

Dane o lokalizacji oraz godzinie wykonania zdjęcia zawarto w poniższej tabeli.

#### Table 1.2. Wynik procesu wykrywania dzikow, lokalizacji i detekcji anomalii ASF

Folder	Image	Gru p	Latitude	Longitud e	D_Time	Dt	Ano maly
E:\04-08.07.2021\2021-07-0 6T221446\log.txt	2021 07 06 22 1 5 41 004.tiff	1	50.2300	21.3300	06-Jul-2021 22: 15:41	0	1

### Chapter 1. Wyniki przeprowadzonych analiz

#### Wyniki procesu lokalizacji i zliczania dzików

Wykryto 1 grup dzików zlokalizowanych w miejscach przedstawionych na mapie i wskazanych przez współrzedne zawarte w tabeli

#### Table 1.1. Wynik procesu wykrywania, lokalizacji i zliczania

Grup	Latitude	Longitude	Abundance	D_Time	Dt	DtT
1	50.2300	21.3300	1	06-Jul-2021 22:15:41	0	78.3362

Chapter 1. Wyniki przeprowadzonych analiz



Wynik procesu lokalizacji, zliczania oraz analizy i detekcji anomalii

Rys. 38. Przykładowy raport generowany przez oprogramowanie stacji analizy obrazu



Rys. 39. Inne zwierzęta wykryte przez system ASFochrona podczas lotów końcowych

#### 5. Podsumowanie

W ramach badań w locie systemu *ASFochrona* przeszukano łącznie 442,5 km<sup>2</sup> (44 250,0 ha). BSP wykonywały misje, przebywając w powietrzu ponad 150 godzin. Podczas lotów testowych system ASF ochrona wykrył 166 dzików oraz zidentyfikował 9 chorych na ASF osobników, 7 przypadków zostało potwierdzonych.

Należy podkreślić, że w przypadku trudnego terenu, zwartej i gęstej roślinności, bez systemu *ASFochrona* (lub podobnego), poszukiwanie chorych na ASF dzików oraz liczenie ich pogłowia jest niezwykle trudne i czasochłonne, a czasami wręcz niemożliwe (np. w przypadku niebezpiecz-nych bagnistych trenów).

Materiał z przeszukania analizowany jest w "postprocessingu" automatycznie za pomocą specjalnie opracowanego oprogramowania i algorytmów opracowanych w ramach realizacji Projektu. Istnieje możliwość generowania raportu z przeszukania za pomocą opracowanej aplikacji.

Opracowany w ramach realizacji projektu badawczego pt. "Zastosowanie innowacyjnych i efektywnych metod i technologii umożliwiających wykrycie watah dzików, identyfikacji osobników z objawami klinicznymi ASF w naturalnym terenie ich występowania", nr umowy DOB-BIO9/30/01/2018, system ASF ochrona umożliwia także wyszukiwanie oraz identyfikację innych zwierząt. Badania wykazały, że kamery podczerwieni, a w szczególności kamera o wysokiej rozdzielczości KTX umożliwia rozpoznanie nie tylko dużych zwierząt, takich jak dziki, sarny, jelenie czy łosie, ale umożliwia także wykrycie zwierząt mniejszych – zajęcy czy też bobrów.

#### Bibliografia

- CANNY J., A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis* and Machine Intelligence, PAMI-8, 6, 679-698, Nov. 1986, DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
- KACPRZAK M., WODZIŃSKI K., Realizacja misji fotolotniczych z wykorzystaniem załogowych i bezzałogowych statków powietrznych, Prace Instytutu Lotnictwa, 243, 2, 130-141, DOI: 10.5604/05096669.1205269
- OISHI Y., OGUMA H., TAMURA A., NAKAMURA R., MATSUNAGA T., Animal detection using thermal images and its required observation conditions, *Remote Sens.*, 10, 10, 1050, 2018, DOI: 10.3390/rs10071050
- 4. KOWALSKI M., PANASIUK J., Załączniki sprawozdania merytorycznego z wykonanych badań naukowych i prac rozwojowych: Z.1 Dokumentacja techniczna algorytmu; Z.2 Dokumentacja techniczna algorytmu grupowania, lokalizacji, zliczania dzików oraz detekcji anomalii wskazujących na objawy ASF; Z.3 Instrukcja obsługi oprogramowania ASF\_detect; Z.4 Metodyka badań algorytmu wykrywania dzików, algorytmu wykrywania dzików potencjalnie chorych na ASF oraz aplikacji ASF\_detect, Sprawozdanie wewnętrzne GIGACO Sp. z o.o dla Lidera projektu ASFochrona/2021 Warszawa, 2021 (niepublikowane)
- 5. SZCZEPANIK P., UŁANOWICZ L., SIBILSKI K., NOWAKOWSKI M. I INNI, Sprawozdanie końcowe realizacji projektu badawczego pt. pt. "Zastosowanie innowacyjnych i efektywnych metod i technologii umożliwiających wykrycie watah dzików, identyfikacji osobników z objawami klinicznymi ASF w naturalnym ter enie ich występowania", nr umowy DOB-BIO9/30/01/2018, Sprawozdanie Nr BK/ASFochrona/2021, ITWL, Warszawa, ITWL 2021 (niepublikowane)
- TADEUSIEWICZ R., KOROHODA P., Computer Image Analysis and Processing, Publishing House of the Telecommunications Progress Foundation, Kraków, 1997

W artykule przedstawiono efekty realizacji projektu badawczego pt. "Zastosowanie innowacyjnych i efektywnych metod i technologii umożliwiających wykrycie watah dzików, identyfikacji osobników z objawami klinicznymi ASF w naturalnym terenie ich występowania", nr umowy DOB-BIO9/30/01/2018, realizowanego w ramach projektu na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa KONKURS 9/2018, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

# Application of aerophotogrammetry in infrared to track wild boars in their natural environment and identify individuals infected with African swine fever. Part II – Evaluation of the ASFochrona system

This article presents the results of flight tests conducted on the *ASFochrona* technical system, which was developed as a part of a research and development project supported by the National Center for Research and Development. The study evaluates the performance of the NeoxASF and AtraxASF unmanned aerial vehicles and their subsystems, which are designed for detecting wild boars in their natural environment and for identifying those infected with the African swine fever. The article provides a detailed description of the flight tests conducted and presents the findings and conclusions resulting from these tests. The article aims to contribute to the development of effective management strategies for wild boar populations and to control the African swine fever in natural conditions.