



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Przemysława Flaka pt. „System radioelektronicznej detekcji i przeciwdziałania bezzałogowym statkom powietrznym”

1 Podstawy formalno-prawne opracowania

- Rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Flaka pt. „System radioelektronicznej detekcji i przeciwdziałania bezzałogowym statkom powietrznym”
- Uchwała nr 118/2025 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej (Monitor Prawny PŚ Poz. 1738)
- Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Adama Gałuszki, prof. PŚ z dn. 12.01.2026 r. (RDAEETK.512.7.2026)
- Ustawa – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.), zwana dalej Ustawą

2 Ocena wyboru tematu rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy dotyczy metod i urządzeń służących do detekcji bezzałogowych statków powietrznych (bsp) i przeciwdziałania skutkom ich obecności. Jak słusznie stwierdza autor, urządzenia te dają nowe możliwości sabotażu i obserwacji obiektów infrastruktury krytycznej. Nawet nieintencjonalne działania ich operatorów mogą być zagrożeniem dla portów lotniczych – pojawienie się niewielkiego drona oznacza ryzyko wypadku lotniczego, a w najlepszym razie konieczność wstrzymania zaplanowanych operacji lotniczych.

Spośród licznych znanych metod detekcji, autor obrał jako przedmiot badań wyłącznie metody radiowe, związane z monitorowaniem sygnałów transmitowanych pomiędzy operatorem a bsp. W tym przypadku wykrycie obecności niepożądanego obiektu polega na zaobserwowaniu charakterystycznego dla tego rodzaju jednostek sygnału w paśmie radiowym. Niestety, rozwiązania te będą zawodne w przypadku profesjonalnych ataków, w których używa się zwykle dronów operujących w tzw. „ciszy radiowej”, a więc poruszających się zaplanowaną z góry trasą, niewymagających łączności z operatorem w trakcie lotu. Rozpatrywane metody detekcji mogą być jednak przydatne do stwierdzenia obecności dronów komercyjnych, wykorzystujących typowe protokoły komunikacyjne, przez co niewątpliwie za-

sługują na uwagę. Oprócz detekcji, autor podejmuje problem zwalczania bsp – także metodami radiowymi. W tym przypadku nie chodzi o fizyczne uszkodzenie statku powietrznego, ale o spowodowanie jego nieprawidłowego działania, np. wymuszenie lądowania lub powrót do bazy.

Ograniczenie zakresu pracy do metod radiowych jest – moim zdaniem – w pełni uzasadnione, bowiem nie sposób rozważyć wszystkie dostępne metody w opracowaniu o charakterze rozprawy doktorskiej. Nawet w tak zawężonym zakresie temat cieszy się w ostatnich latach dużym zainteresowaniem licznych ośrodków naukowych, co świadczy o jego aktualności i wadze, ale – z drugiej strony – coraz trudniej jest zidentyfikować istotny problem badawczy, który może być przedmiotem kolejnej rozprawy doktorskiej.

3 Cele i tezy rozprawy

Autor w podrozdziale 1.3. deklaruje, że „celem (...) rozprawy jest analiza metod rozpoznawania i przeciwdziałania niepożądanym komercyjnym bezzałogowym statkom powietrznym”, w kolejnym zdaniu precyzując: „Praca badawcza obejmie nie tylko ewaluację znanych algorytmów, ale przede wszystkim opracowanie autorskiego rozwiązania, które będzie dostosowane do konkretnego scenariusza operacyjnego”. Uważam, że takie sformułowanie celu nie jest zbyt trafne. Zdecydowanie lepiej główny cel pracy oddaje sam tytuł dysertacji – „System radioelektronicznej detekcji i przeciwdziałania bezzałogowym statkom powietrznym” – który sugeruje (prawidłowo!), że głównym celem autora jest opracowanie modelu lub prototypu urządzenia, dodatkowo określając, o jakie metody taki prototyp ma być oparty. Szkoda, że autor nie sprecyzował celów pośrednich, zamiast nich deklarując na str. 9 „zakres pracy”. Poszczególne cele pośrednie mają za to odzwierciedlenie w tezach rozprawy. Autor postawił ich aż pięć:

- (Teza 1.) *Możliwa jest realizacja układu detekcji oraz zakłócania operacji bezzałogowych statków powietrznych na podstawie informacji z modułu radia definiowanego programowo.*
- (Teza 2.) *Możliwa jest realizacja systemu detekcji oraz zakłócania komercyjnych dronów, bazującego na gotowych układach elektronicznych i modyfikacji oryginalnego oprogramowania.*
- (Teza 3.) *Zastosowanie architektury sprzętowo-programowej i zwiększenie udziału macierzy programowalnych bramek logicznych w przetwarzaniu sygnałów, w porównaniu do klasycznej koncepcji radia programowalnego, pozwoli na optymalizację procesu detekcji oraz zakłócania.*
- (Teza 4.) *Optymalizacja procesu detekcji, pod względem minimalizacji czasu przetwarzania, może zostać zrealizowana dzięki analizie tylko fragmentów ramek radiowych.*
- (Teza 5.) *System rozproszonej detekcji będzie miał przewagę w terenie zabudowanym nad systemem z detektorem centralnym oraz pozwoli na stworzenie skalowalnej sieci automatycznego nadzoru.*

Tezy 1. i 2. nie budzą wątpliwości. Natomiast w Tezach 3. i 4. – moim zdaniem – autor niezbyt ostrożnie użył słowa „optymalizacja”, tzn. w jej potocznym rozumieniu, jako „ulepszenie”. Jednak nawet z tym zastrzeżeniem, w Tezie 3. nie sprecyzował, na czym taka optymalizacja ma polegać, a tym bardziej jakiego wymiernego efektu chce dowieść. „Minimalizacja” z Tezy 4. już jawnie sugeruje, że autor zamierza uzyskać najkorzystniejsze rozwiązanie, co wymagałoby przedstawienia jednoznacznego dowodu jego optymalności. Nawet mniej kategoryczna „przewaga” z Tezy 5. wciąż domaga się określenia kryteriów, wedle których poszczególne rozwiązania miałyby być analizowane, jak i przyjętych założeń. Na marginesie, w Tezie 3. autor najprawdopodobniej popełnił błąd przy odmianie wyrazu „optymalizacja”, który wypacza sens zdania (kilka optymalizacji?). Pomimo wymienionych uchybień, wspomniany wcześniej „zakres pracy” bardzo dobrze odpowiada zidentyfikowanym problemom badawczym i przedstawia prawidłowy tok postępowania dla osiągnięcia głównego celu, jakim jest stworzenie funkcjonalnego prototypu urządzenia.

nieodpowiednie do realizacji w prototypie ze względu na nieakceptowalnie długi czas przetwarzania. Dlatego autor zdecydował o zastosowaniu w budowanym prototypie rozwiązania niejednorodnego, złożonego z detektora energii (dla wstępnego rozróżnienia sygnału użytecznego od szumu) i klasyfikatora, zrealizowanego przy użyciu prostej sieci neuronowej. Z detekcją energii wiąże się konieczność bieżącego ustalenia optymalnej wartości progu – autor zaimplementował w tym celu algorytm NPAQM (*Non-parametric Amplitude Quantization Method*). Dla zmniejszenia prawdopodobieństwa fałszywych alarmów użył też gaussowskiego filtra wygładzającego, który może być efektywnie zrealizowany w warstwie sprzętowej FPGA. Poza tym spektrogram został poddany typowym operacjom morfologicznym, znanym z przetwarzania obrazów. Autor rozważył wpływ kolejności wykonywania poszczególnych operacji morfologicznych, jak i rozmiar maski filtra wygładzającego na prawdopodobieństwo detekcji, w zależności od wartości SNR. Pomysłem doktoranta na dostosowanie procedury do realizacji w systemie wbudowanym jest ograniczenie obszaru analizowanego spektrogramu. Autor porównał też dokładność zaproponowanej sieci neuronowej z innymi modelami. Okazało się przy tym, że użycie znanych baz danych podczas jej trenowania prowadzi do nieprawidłowej klasyfikacji dronów ze względu na inną częstotliwość próbkowania. Autor dokonał więc pomiarów sygnałów sześciu modeli dronów, tworząc w ten sposób własną bazę sygnatur dronów i na jej podstawie wykazał, że powstały prototyp oferuje dużą dokładność klasyfikacji. W **rozdziale siódmym** doktorant przedstawił wyniki badań w zakresie zwalczania dronów, w pierwszej części koncentrując się na zagłuszaniu sygnału nawigacji satelitarnej. Najpierw, korzystając z metody śledzenia promieni, ustalił wartości współczynnika JSR osiągalne przy użyciu zaprojektowanego prototypu w różnych lokalizacjach na terenie chronionego obiektu. Na ich podstawie przeprowadził laboratoryjny eksperyment zagłuszania sygnału nawigacji satelitarnej poszczególnych systemów (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), uwzględniając różne postacie sygnału zagłuszającego. Uzyskane wyniki sugerują, że urządzenie jest w stanie zakłócić działanie drona znajdującego się w pobliżu chronionego celu, a także w określonej odległości od niego, zależnie od ścieżki podejścia. Ostatni rodzaj badań dotyczył zakłócania sygnałów transmitowanych pomiędzy dronem i operatorem. Podobnie jak poprzednio, w pierwszej kolejności doktorant oszacował współczynnik JSR a następnie przeprowadził eksperyment laboratoryjny zakłócania, założywszy, że transmisja sygnałów pomiędzy dronem a operatorem odbywa się zgodnie z protokołem standardu 802.11n. Ostatecznie autor wykorzystał mechanizm estymacji stanu kanału, który jest zaimplementowany w systemach dronowych, do obserwacji wpływu zakłócania na jakość użytecznego sygnału, uzyskując eksperymentalne potwierdzenie skuteczności takiego działania.

Struktura pracy jest zasadniczo poprawna i zawiera elementy typowe dla dysertacji doktorskich. Brakuje zwyczajowo umieszczonego spisu oznaczeń, jednak ze względu na niewielką liczbę wzorów nie utrudnia to czytania pracy. Treść dotycząca metod radiowych detekcji bsp mogłaby być lepiej usystematyzowana (część zagadnień jest opisana w rozdziale 3., a reszta w 4.). Poza tym tytuł rozdziału 4. niezbyt dobrze oddaje jego zawartość. Podrozdział 5.3.6., w którym zademonstrowano zastosowanie zbudowanego sensora do obserwacji intensywności ruchu sieciowego 4G/LTE, nie przystaje do koncepcji prototypu, zdolnego do samodzielnej detekcji i klasyfikacji sygnałów dronów, bowiem autor nie przedstawił tutaj żadnej metody klasyfikacji, każąc użytkownikowi monitorować wolumen ruchu sieciowego. Ten podrozdział mógłby zostać usunięty z rozprawy z korzyścią dla jej spójności.

Autor używa poprawnego, właściwego dla prac naukowych języka. W kilku przypadkach, które wymieniam w punkcie „Usterki”, ma jednak problem z prawidłowym określeniem pojęć należących do dyscypliny telekomunikacja. W całej dysertacji znalazłem jedynie kilka błędów stylistycznych i gramatycznych. Wszystkie rysunki są czytelne, a znaczenie wzorów (z pojedynczymi wyjątkami) jest poprawnie wyjaśnione.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska ma formę monografii liczącej 189 stron, złożonej z ośmiu rozdziałów, zawierającej dodatkowo streszczenia (w j. polskim i – wymagane Ustawą – w j. angielskim), spisy: tabel, rysunków i skrótów oraz bogatą bibliografię, liczącą 203 pozycje, z czego jedynie kilka jest starszych niż 5 lat. Pozycje literaturowe są adekwatne do tematu rozprawy i świadczą o dobrej orientacji autora o aktualnym stanie wiedzy.

W **rozdziale pierwszym** pan mgr inż. Przemysław Flak przedstawił rys historyczny rozwoju technologii bsp i określił zagrożenia, związane z ich użyciem. Określił w nim także cele i tezy rozprawy, a także przedstawił swój dorobek naukowy. **Rozdział drugi** ma charakter przeglądu – przedstawiono w nim, w podziale na grupy, różne metody detekcji i zwalczania bsp. **Rozdział trzeci** to kolejny rozdział o charakterze wprowadzającym do tematyki rozprawy. Znaleźć w nim można definicje podstawowych terminów związanych z przetwarzaniem sygnałów, model kanału radiowego, ale także syntetyczny opis różnych strategii detekcji i klasyfikacji sygnałów radiowych, nie pomijając zastosowań sztucznej inteligencji. Omówiono w nim również wybrane strategie zakłócania sygnału radiowego. **Rozdział czwarty** ma znów charakter przeglądu. Sklasyfikowano w nim drony komercyjne pod względem masy i ograniczeń w ich użyciu, opisano przykładowe znane protokoły komunikacyjne warstwy fizycznej dronów, a także techniki stosowane w systemach nawigacji satelitarnej. Następnie autor dokonał przeglądu literatury, prezentując wyniki z publikacji dotyczących radiowych metod detekcji i zwalczania dronów. Wyróżnił przy tym metody detekcji opierające się na analizie przebiegu czasowego sygnału i takie, które analizują obraz spektrogramu z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. W zakresie przeciwdziałania dronom autor skupił się na metodach zakłócania bądź sygnału nawigacji satelitarnej, bądź sygnałów telemetryczno-sterujących. Niektóre rezultaty omówione w tym rozdziale posłużą w rozdziałach kolejnych jako punkt odniesienia dla wyników badań przez autora. **Rozdział piąty** dokumentuje prace doktoranta nad prototypem urządzenia służącego do wykrywania obecności i zwalczania dronów metodami radiowymi. W pierwszej kolejności autor opisał budowę wewnętrzną wybranych urządzeń realizujących założenia radia programowalnego (*Software-Defined Radio*, SDR) i dokonał wyboru platformy do realizacji prototypu. Następnie przedstawił opracowane przez siebie sposoby efektywnej realizacji wybranych obliczeń i sterowania końcówką analogową przy użyciu warstwy sprzętowej FPGA (*Field Programmable Gate Array*), które rozwiązują zidentyfikowany problem niewystarczającej prędkości transmisji danych interfejsu USB. Kolejny problem stanowiło dostosowanie prototypu do działania w roli szerokopasmowego analizatora widma (w technice zwanej *swept FFT*). Na przeszkodzie stoi tutaj długi czas strojenia pętli PLL (*Phase Locked Loop*) i reakcji układu automatycznej regulacji wzmocnienia (ARW) w trakcie zmiany częstotliwości nośnej. Autor w wyniku badań ustalił, że przyczyną tych niedogodności jest znów ograniczona prędkość transmisji danych interfejsu USB. Dzięki wykorzystaniu procesora systemu wbudowanego i przeniesieniu kolejnych elementów sterowania końcówką analogową do warstwy FPGA udało się istotnie ograniczyć czas przestrajania parametrów układu. Autor opracował także sposób umożliwiający pracę detektora w dwóch zakresach (2,4 GHz i 5,8 GHz), jak i jednoczesne działanie w różnych zakresach torów *downlink* i *uplink*; użył w tym celu przemiennej częstotliwości. Istotne zmiany nie ominęły toru nadawczego. **Rozdział szósty** rozpoczyna się opisem przeprowadzonego przez autora eksperymentu symulacyjnego, w którym przeanalizował on (metodą śledzenia promieni) rozkład przestrzenny mocy sygnału nadawanego przez dron zbliżający się do dużego zakładu przemysłowego. W dalszej części rozdziału doktorant dokonał przeglądu dostępnych baz danych, zawierających sygnatury popularnych dronów komercyjnych, stwierdzając, że wiele z nich nie nadaje się do trenowania modeli klasyfikatorów ze względu na ubytki próbek. Następnie zbadana została skuteczność algorytmów detekcji i klasyfikacji dronów przy podziale na metody jednorodne i niejednorodne. W zakresie tych pierwszych autor rozważał w szczególności użycie popularnych modeli zaawansowanych sieci neuronowych, działających zgodnie z ideą YOLO (*You Only Look Once*). Okazały się one

W mojej opinii najważniejszym i najlepiej udokumentowanym osiągnięciem doktoranta, jest opracowanie założeń, a następnie wykonanie prototypu taniego, opartego o dostępne komponenty radia programowalnego (SDR), urządzenia służącego do wykrywania i zakłócania działania dronów. Krytycznym problemem w implementacji takiego układu okazał się zbyt wolny interfejs służący do przesyłania próbek IQ sygnału, a także nieakceptowalnie duży czas przestrajania częstotliwości środkowej w trakcie obserwacji sygnału w trybie *swept FFT*. Autor umiejętnie wykorzystał dostępne zasoby FPGA dla realizacji niektórych operacji przetwarzania sygnałów. W rezultacie do klasyfikatora sygnałów, zrealizowanego jako *software*, zamiast strumienia surowych próbek IQ o dużej przepływności, trafiają już odpowiednio przygotowane próbki spektrogramu. Dzięki wnikliwym badaniom autor ustalił przyczynę zbyt wolnej aktualizacji rejestrów decydujących o nastawach układów ARW i częstotliwości środkowej, a następnie wyeliminował problem, tworząc automat sterujący tymi nastawami w warstwie FPGA. Znacznych modyfikacji dokonał także w torze nadawczym, czyniąc pożytek z dostępnych, lecz oryginalnie nieużywanych komponentów, jak oscylator numeryczny. Przedstawione rozwiązania skutecznie rozwiązują zidentyfikowane problemy, jednak – być może – części z nich można by w ogóle uniknąć używając urządzeń wyższej klasy. Co prawda autor od początku zakładał stworzenie urządzenia taniego, dostępnego dla osób prywatnych, a jednak w dalszej części pracy skupił się na ochronie obiektów krytycznych, w przypadku których koszt nie będzie decydującym kryterium wyboru konkretnego rozwiązania. **Proszę więc autora o wyjaśnienie podczas obrony, dlaczego skupił się na zastosowaniu układów z rodziny LimeSDR?**

Pragnę podkreślić, że realizacja obliczeń w warstwie sprzętowej (FPGA) wymaga doskonałej znajomości specyfiki układów cyfrowych i znacznie większych umiejętności niż tworzenie programu na mikroprocesor. W szczególności należy uwzględniać opóźnienia propagacyjne logiki kombinacyjnej i ścieżek, realizować przetwarzanie potokowe, racjonalnie planować stałoprzecinkową reprezentację liczb, unikać operacji zużywających dużą liczbę elementów cyfrowych (jak mnożenie, pierwiastkowanie), zastępując je metodami aproksymacyjnymi, ostatecznie tablicując wyniki, itd. W tym zakresie autor wykazał się bardzo dobrą znajomością tematu i umiejętnością wykorzystania struktur FPGA, a przedstawione rozwiązania można uznać za dowód Tez 1.-3. (z zastrzeżeniem, że w Tezie 3. słowo „optymalizacja” jest rozumiana w sposób potoczny – jako ulepszenie).

Doktorant przeprowadził ewaluację i kalibrację zbudowanego modelu, które potwierdziły jego przydatność. Nie wyjaśnił jednak przekonująco, **dlaczego podczas implementacji klasyfikatora w prototypie część algorytmów, które z powodzeniem i niemalym wysiłkiem zostały już poprawnie zaimplementowane sprzętowo, przeniesiono do warstwy programowej.** W dysertacji **zabrakło też wyjaśnienia, czy algorytm FFT został oprogramowany przez autora, czy też skorzystał on z gotowego bloku *IP core*.** Uzasadnienia wymaga też **użycie sygnału z modulacją GFSK podczas kalibracji odbiornika prototypu** (rys. 5.13).

Autor wykazał, że zaproponowany algorytm klasyfikacji sygnałów dronów, w którym sieć neuronalna przetwarza jedynie fragmenty ramki radiowej zawierające preambułę, może być zrealizowany w czasie rzeczywistym. W pewnym stopniu potwierdza to Tezę 4., jednak jednoznacznego dowodu na to, że proponowane rozwiązanie jest optymalne, w pracy nie ma. Niemniej, osiągnięcie autora w zakresie rozwoju algorytmów klasyfikacji uważam za znaczące. Zaproponowane podejście ma charakter przetwarzania brzegowego (*edge computing*) i istotnie zmniejsza wymagania na prędkość transmisji danych w sieci komputerowej, która w rozwiązaniu tradycyjnym byłaby obciążona dużym wolumenem surowych próbek IQ, przesyłanych do węzła centralnego. W autorskim rozwiązaniu transmitowany jest znacznie mniejszy strumień, na który składa się jedynie wycinek spektrogramu i to tylko w sytuacji po-

dejrzenia wykrycia bsp. Pewien niedosyt pozostawia za to ta część rozdziału szóstego, która dotyczy badań klasyfikatora w środowisku rzeczywistym (podrozdz. 6.2.4.). Autor stwierdził, że referencyjne bazy sygnatur dronów okazały się nieprzydatne do wytrenowania zrealizowanego modelu sieci neuro- nowej ze względu na inną częstotliwość próbkowania sygnału, a zapewne także inną zawartość anali- zowanych wycinków spektrogramu. Dlatego stworzył własną bazę sygnatur, a następnie przeprowadził badania dokładności klasyfikacji. Zakres przedstawionych w pracy wyników jest jednak bardzo ograni- czony: pokazano jedynie macierze pomyłek dla dwóch odległości, przy okazji nie zauważając, że odle- głość „do 150 m” mieści się jednocześnie w kategorii „do 350 m”. Nie określono, jakie modele dronów zostały wykorzystane w trakcie trenowania sieci i podczas klasyfikacji. Nie jest jasne, co w istocie ozna- cza przypadek „fałszywego alarmu”. Termin ten zdefiniowano w rozdziale trzecim, gdzie dotyczył on detekcji sygnału w obliczu szumu. Na etapie klasyfikacji zdaje się, że badanym aspektem powinna być zdolność algorytmu do rozróżnienia sygnału drona od sygnału Wi-Fi czy Bluetooth, a nie od szumu – przypadki odbioru wyłącznie szumu w przyjętej architekturze powinny być wykluczone już na etapie detekcji (również z określonym prawdopodobieństwem sukcesu). **Proszę więc o doprecyzowanie znaczenia danych w macierzy pomyłek z rys. 6.17.**

W zakresie badań metod jednorodnych **proszę autora o skomentowanie obecności pików w wynikach dokładności i precyzji klasyfikacji dla SNR = -6 dB na rys. 6.15 i 6.16.**

Część pracy, która dotyczy stworzenia systemu zautomatyzowanej detekcji i zwalczania dronów w oparciu o system rozproszonych czujników i efektorów uznaję za niedokończoną. Potwierdzeniem Tezy 5. jest obserwacja, że użycie większej liczby czujników i efektorów zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia drona i uzyskania wartości JSR wystarczającej do zakłócenia jego działania. Autor nie przed- stawił jednak żadnych reguł, według jakich miałyby działać „skalowalna sieć automatycznego nadzoru”; zaprojektował elementy takiego systemu (detektor i efektor), ale sposób zarządzania nimi stanowi wciąż otwarty, interesujący problem (np. w zakresie oddziaływania sygnałów zakłócających, nadawa- nych przez efektor, na detektor zlokalizowany w tym samym lub innych przyrządach).

Eksperyment laboratoryjny, w którym zagłuszano sygnały nawigacji satelitarnej zbudowanym pro- totypem dowiódł, że (w założonych warunkach) urządzenie jest w stanie zakłócić proces określania swojego położenia przez bsp. Nie zbadano jednak wpływu zakłócenia sygnałem kombinowanym na odbiornik korzystający z kilku systemów nawigacji, więc ostateczny wniosek nt. skuteczności efektora powinien być sformułowany ostrożniej. Szkoda, że autor nie podjął się interpretacji uzyskanych wyni- ków, tzn. nie uzasadnił, **dlaczego konkretne przyjęte wzory przestrajania fal zakłócających dają lepsze rezultaty, niż inne. Brakuje też wyjaśnienia, dlaczego użycie dwóch fal zakłócających wy- magało zwiększenia szerokości pasma z 51 MHz do 96 MHz, zmiany częstotliwości środkowej i operacji w Matlabie.**

Ocenę wpływu efektora na sygnały „komunikacyjne” (jak rozumiem, chodziło tutaj o sygnały: ste- rujący i telemetryczny, a nie sygnał wideo), wykonano przy założeniu, że transmisja odbywa się zgodnie ze standardem 802.11n. Autor przyjął taką metodę, chcąc określić wpływ zakłócenia na przepływność łącza przy użyciu posiadanych ruterów Wi-Fi. Moim zdaniem wyniki uzyskane w symulacji nie przystają do rezultatu eksperymentów z użyciem sprzętu (rys. 7.11), gdyż w symulacji autor założył wykorzysta- nie modulacji 64-QAM. Tymczasem urządzenia Wi-Fi automatycznie redukują wartościowość modulacji i sprawność kodowania w przypadku pogarszających się warunków transmisji. Można więc przypusz- czać, że dla największych rozpatrywanych wartości JSR nadajnik używał najbardziej odpornej na błędy transmisji modulacji BPSK. Co jednak ważniejsze, uważam, że w przypadku strumieni sygnałów: sterują- cego i telemetrycznego maksymalizacja przepływności jest bezcelowa (chodzi raczej o zwiększenie zasięgu bezbłędnej transmisji), więc **poddaję pod dyskusję sens pomiaru tej wielkości.** Ponadto nie jest jasne, jakiej warstwy systemu telekomunikacyjnego dotyczą wyniki z rys. 7.11. **Czy prezentowane**

liczby uwzględniają retransmisję pakietów, których odbioru nie potwierdzono? Brak szczegółowych informacji na ten temat każe traktować te wyniki z dużą rezerwą.

Bardziej przekonujące są wyniki ostatniego rodzaju badań (rys. 7.13), gdzie autor obserwował miary jakości sygnału, wyświetlane na panelu sterującym operatora drona. W eksperymentach, oprócz wcześniej rozważanych przebiegów, uwzględniono nowy rodzaj sygnału zakłócającego: sekwencyjnie przestrajanej nośnej, zmodulowanej przebiegiem QPSK (**dlaczego nie użyto takiego sygnału wcześniej?**). Wyniki – ze swej natury tylko jakościowe – potwierdzają, że przy umieszczeniu efektora w pobliżu bsp istnieje możliwość skutecznego zakłócania sygnałów, przy czym maksymalna odległość silnie zależy od rodzaju badanego drona. W pracy nie znalazłem jednak kluczowej informacji o tym, **którego sygnału dotyczy wynik, prezentowany na panelu operatora drona – sterującego, telemetrycznego, czy też wideo?** Zabrakło także danych na temat środowiska, w jakim wykonano pomiar. W tym kontekście przeliczenie odległości na wartości JSR może być niemiarodajne.

Poza kilkoma, wyżej wyartykułowanymi uwagami, nie mam zastrzeżeń wobec stosowanych metod i narzędzi badawczych (m.in. analiza stanów logicznych, metoda śledzenia promieni, pomiary z użyciem analizatora widma, miary stosowane do scharakteryzowania sieci neuronowych). Zasadniczo autor wyciąga z badań właściwe wnioski i poddaje je krytycznej ocenie, co świadczy o umiejętności prowadzenia badań naukowych.

6 Usterki

Niestety, praca nie jest wolna od błędów i usterek. Najważniejsze uwagi w tym zakresie dotyczą terminologii związanej z modelowaniem kanału telekomunikacyjnego. Przykładowo, w podrozdziale 3.3.1. nie określono, jakich zmiennych losowych dotyczą w istocie rozkłady Rayleigha lub Rice'a. Niepoprawne jest stwierdzenie, że sygnał propagujący przez kanał AWGN „dociera do odbiornika pomniejszony o wartość tłumienia ścieżki i zniekształcony przez dodanie pewnej porcji szumu” (ze swojej definicji kanał AWGN nie uwzględnia tłumienia). Nie wiadomo zresztą, co należy rozumieć przez „wartość tłumienia ścieżki”. W podrozdziale 3.3.2. autor nie wyjaśnia, jaka zmienna losowa ma rozkład Gaussa. Ograniczenie pasma szumu AWGN nie wynika z jego „przejścia przez kanał”, a raczej z filtracji w odbiorniku. Ponadto, zdaje się, że autor nie ma świadomości, że innego aparatu matematycznego wymagają sygnały deterministyczne, a innego stochastyczne – stąd niezręczne określenie współczynnika SNR w równaniach (3.15) i (3.16). Powyższe błędy w części opisowej pracy nie wpłynęły na sposób prowadzenia eksperymentów i interpretację uzyskanych wyników. Pozostałe, mniej istotne usterki przedstawiam w punktach:

- Choć intuicyjnie zrozumiałe, wątpliwe formalnie jest określenie „metryk” prawdopodobieństwa poprawnej detekcji, fałszywego alarmu, itd. (wzory (3.19)-(3.22)). Co więcej, w statystyce „szansa” jest odrębnym pojęciem i nie należy mylić go z prawdopodobieństwem zdarzenia.
- W podrozdziale 3.4.2. autor nieprawidłowo scharakteryzował autokorelacyjną metodę detekcji ramki.
- W rozdziale 3.6., definiując stosunek JSR, doktorant niepotrzebnie używa nowego terminu „fala” zamiast „sygnał”.
- W podrozdziale 4.1.2. nie dość precyzyjny jest opis roli prefiksu cyklicznego i przedziału ochronnego w strukturze ramki WLAN.
- W zdaniu na str. 59 autor „sumuje analogowo” sygnał z generatorem.
- Na str. 63 autor żargonowo pisze o „przycięciach” obrazu.
- W pierwszym akapicie podrozdz. 5.2.1. (str. 73) brakuje odnośników literaturowych do artykułów, w których przedstawiono rozwiązanie z dwoma urządzeniami i podziałem pasma na część górną i dolną.

- Na str. 103 autor błędnie użył sformułowania „narost sygnału radiowego”.
- Niedostatecznie wyjaśniono znaczenie zbioru γ_i we wzorze (6.7) na str. 108. Na tej samej stronie wątpliwość budzi stwierdzenie, że $P_s(\gamma_i)$ „jest prawdopodobieństwem dla wystąpienia sygnału” (chodzi o prawdopodobieństwo wystąpienia sygnału czy też o prawdopodobieństwo podjęcia decyzji na temat obecności sygnału na podstawie analizowanych próbek?).
- Niepotrzebnie autor nazywa splot obco brzmiącą konwolucją (str. 109) i – podobnie – splotowe sieci neuronowe określa mianem sieci konwolucyjnych.
- Definiując na str. 110 dylatację i erozję, autor nie określił znaczenia symboli $(B)_z$ i $(B)_z$.
- W podrozdz. 6.2.2. na str. 113 autor nie wyjaśnił, co rozumie przez skalowanie spektrogramu w dół.
- Na rys. 6.16(b) błędny opis osi rzędnych.
- Na str. 131 brakuje wyjaśnienia, że wartość C/N_0 , udostępniana operatorowi drona, jest w istocie jedynie estymatą (wcześniej autor zdefiniował w taki sposób wartość prawdziwą).
- Na str. 140 doktorant podał przykładowe wartości SNR w zależności od zastosowanej modulacji, zaczerpnięte z pracy [198]. Dane takie nie mają żadnego znaczenia, bowiem wymagany stosunek SNR nie tyle jest „indywidualną cechą odbiornika”, co zależy od pożądanej wartości bitowej bądź ramkowej stopy błędów i zastosowanego kodu korekcyjnego.
- Użyty na rys. 7.10 symbol sumatora sugeruje, że analizator widma jest źródłem sygnału.
- W rozdziale 7. autor zamiennie używa pojęć przepływności i przepustowości (nie są one tożsame), nieraz stosując jeszcze inny wyraz – transfer.

7 Konkluzja

Budowa taniego prototypu urządzenia do wykrywania i zakłócania operacji bezałogowych statków powietrznych metodami radiowymi stanowi istotny problem naukowy. Dla jego rozwiązania pan mgr inż. Przemysław Flak przeanalizował niedostatki dostępnych urządzeń SDR i zaproponował oryginalne algorytmy sterowania końcówką analogową w warstwie sprzętowej FPGA. Następnie sformułował skuteczne, ale i oszczędne obliczeniowo algorytmy detekcji i binarnej klasyfikacji sygnałów dronów, wykorzystujące m.in. sieci neuronowe. Przeprowadził też szeroko zakrojone badania skuteczności detekcji i zakłócania pracy dronów, wykorzystując m.in. metodę śledzenia promieni. Co warto podkreślić, oprócz badań symulacyjnych, doktorant dokonał licznych pomiarów w warunkach laboratoryjnych i terenowych, które potwierdziły umiejętność korzystania z profesjonalnego sprzętu pomiarowego.

Efektom badań autora jest prototyp urządzenia, toteż uzyskane wyniki mają niewątpliwie walor praktyczny. Co więcej, wygenerowana nowa baza sygnatur dronów może być wykorzystana w przyszłych zadaniach trenowania sieci neuronowych.

Wyniki badań będących przedmiotem niniejszej rozprawy zostały opublikowane w postaci trzech artykułów w czasopiśmie *IEEE Access*, cieszącego się dobrą reputacją (w dwóch przypadkach p. Przemysław Flak był jedynym autorem, a w trzecim – pierwszym autorem). Świadczy to o pozytywnym odbiorze działalności badawczej doktoranta przez środowisko naukowe.

Jestem przekonany, że recenzowana rozprawa doktorska **spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy**, tzn. stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Moja ocena, pomimo przedstawionych w recenzji uwag krytycznych, jest jednoznacznie pozytywna i wobec tego wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.