

prof. dr hab. inż. Edward Sędek
Politechnika Bydgoska
Bydgoszcz, Aleja prof. S. Kaliskiego 7

Warszawa, 25.09.2023.

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu... 29.09.23r.
Numer.....

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Krysika

**pt. Techniki wykrywania i obrazowania obiektów ruchomych
z zastosowaniem radiolokacji pasywnej wykorzystującej
sygnał radiowy telefonii mobilnej GSM**

Recenzję przygotowano na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z dnia 27 czerwca 2023r. oraz pisma tejże Rady z dnia 1. sierpnia 2023r. Do pisma dołączono umowę o dzieło zmagającego - Pana Dziekana Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych prof. dr hab. inż. Michała Malinowskiego.

Rozprawa dotyczy technik zapisanych w tytule wykorzystujących jako niekooperujące źródła oświetlenia obiektów sygnały radiowe telefonii mobilnej GSM w radarach pasywnych. W literaturze szeroko są opisane radary wykorzystujące jako źródła oświetlenia sygnały telewizji cyfrowej naziemnej DVB-T, natomiast w znacznie mniejszym stopniu radary pasywne wykorzystujące sygnały telefonii mobilnej GSM. Należy podkreślić, że o ile sygnały telewizji cyfrowej DBT-T s mają pasma stosunkowo szerokie zapewniające wystarczającą w praktyce zdolność rozróżnialności odległościowej, to dla systemów GSM mamy do czynienia z sygnałami wąskopasmowymi, które tej rozróżnialności nie zapewniają. Autor ten problem analizuje i pokazuje możliwości jego rozwiązania. Gęste rozmieszczenie nadajników z sygnałem GSM pozwala na możliwość wykorzystania do oświetlenia obiektów kilku nadajników GSM jednocześnie. Należy zaznaczyć, że wśród zastosowań takich radarów należy wymienić wykrywanie i śledzenie obiektów latających, monitorowanie ruchu pojazdów naziemnych jak również ich pasywne obrazowanie.

Celem pracy było zbadanie możliwości i ograniczeń wykorzystania nadajników radiowych telefonii GSM jako oświetlaczy radaru pasywnego do detekcji i obrazowania obiektów ruchomych. Autor sformułował również cel dodatkowy

obejmujący analizę wpływu jakości sygnału referencyjnego na wyniki działania algorytmów przetwarzania sygnałów w zastosowanym radarze pasywnym. Doktorant postawił na wstępie dwie tezy, które brzmią następująco:

- *Możliwe jest wykrywanie obiektów ruchomych za pomocą radaru pasywnego wykorzystującego sygnały mobilnej telefonii GSM, w szczególności z zastosowaniem technik korelacyjnych oraz technik wykorzystujących rozpraszanie w geometrii w przód, wspomaganym rekonstrukcją sygnału GSM.*
- *W radarze pasywnym pasma GSM o małej rozdzielności odległościowej istnieje możliwość wykrywania, rozróżniania i obrazowania obiektów z wykorzystaniem dopplerowskich technik przetwarzania sygnałów.*

Zarówno cele rozprawy jak i tezy zostały sformułowane w sposób jasny i przekonujący. Rozprawa składa się z 5. rozdziałów i posumowania oraz Dodatku A zawierającego „Podstawowe funkcje o standardzie GSM”. Liczy w całości 147 stron. Literatura na którą powołuje się doktorant zawiera 101 pozycji w tym w 4. pozycjach Doktorant jest autorem a w 10 pozycjach współautorem w większości na pierwszym miejscu, co stanowi Jego pokaźny dorobek naukowy.

W kolejnych rozdziałach autor rozpatruje i opisuje kroki zapewniające rozwiązania kolejnych problemów zawartych w postawionych tezach. W pierwszej kolejności Doktorant rozpatruje zagadnienie naukowe dotyczące opracowania koncepcji radaru pasywnego wykorzystującego sygnały telefonii GSM. Przeprowadza szczegółową analizę parametrów sygnału GSM i proponuje oryginalne techniki wykrywania i obrazowania obiektów ruchomych. Dużą uwagę poświęca analizie sygnałów referencyjnych. Ocenia jakość sygnału referencyjnego jako najważniejszego w procesie przetwarzania korelacyjnego oraz filtracji składowych niepożądanych, odpowiadających za poprawność pracy radaru. Analiza ta nie była dotychczas kompleksowo przebadana. Przeprowadza również analizę wpływu szumu oraz ech w sygnale referencyjnym na działanie algorytmów przetwarzania sygnałów w radarze. Wyprowadza zależności opisujące maksymalny wpływ szumu na poprawność przetwarzania w rzeczywistym radarze. W celu uzyskania poprawy jakości sygnału referencyjnego autor wykorzystuje metodę jego rekonstrukcji. W dalszej części rozprawy Doktorant analizuje możliwość wykorzystania radaru wykorzystującego sygnały telefonii GSM do obrazowania obiektów ruchomych. Proponuje metodę wąskopasmowego obrazowania obiektów ruchomych z wykorzystaniem sygnałów

GSM. Metoda ta jest oparta na wykorzystaniu jedynie informacji o częstotliwości Dopplera poruszających się obiektów. Autor nie wykorzystuje tutaj kompresji sygnału w odległości, co jest stosowane w klasycznych radarach obrazujących. Drugim praktycznym zastosowaniem radaru GSM było monitorowanie ruchu pojazdów. Podobnie jak poprzednio technika zobrazowania także jest oparta na analizie zmian częstotliwości Dopplera w czasie. Obie metody zostały potwierdzone w kompleksowych badaniach symulacyjnych i na ich podstawie zaplanowanych i wykonanych badaniach terenowych. Rozdział 3 jako główny zawiera prace koncepcyjne i analityczne dotyczące radaru pasywnego GSM. Autor przedstawia koncepcję radaru, analizuje zasady transmisji GSM z punktu widzenia radaru pasywnego, analizuje wpływ jakości sygnału referencyjnego na przewarżanie sygnału i omawia między innymi poprawę jakości sygnału referencyjnego za pomocą rekonstrukcji. Przedstawia szereg czytelnych wykresów pozwalających ocenić wyniki analizy. Ważną częścią rozprawy jest przeprowadzona analiza i symulacja wąskopasmowego obrazowania obiektów za pomocą radaru GSM. Omawia również szczegółowo koncepcję radaru pasywnego wykorzystującego metodę rozpraszania w przód. Zastosowane w analizach metody, według opinii recenzenta, są poprawne i nie budzące zastrzeżeń. Na podstawie przeprowadzonych analiz Doktorant zaproponował oryginalne techniki wykrywania i obrazowania obiektów ruchomych.. Dokonuje oceny poprawności zaproponowanych metod przetwarzania sygnałów i potwierdza praktyczną możliwość realizowalności radaru pasywnego GSM. Ostatni rozdział 5 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Do oryginalnego dorobku naukowego autora należy zaliczyć:

- analizę i określenie wpływu jakości sygnału referencyjnego na wyniki przetwarzania sygnału w radarze pasywnym i wyprowadzenie zależności analitycznych górnych granic wpływu szumu w sygnale referencyjnym. Zagadnienia te autor omawia w opublikowanych pracach [47, 54, 44],
- opracowanie metody poprawy jakości sygnału referencyjnego generowanego przez nadajniki GSM opartej na jego rekonstrukcji opisanej w pracy [45],
- przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych potwierdzających możliwości wykorzystania sygnałów GSM do detekcji pojazdów opisanych w pracach [49, 80] i obiektów latających [52],
- opracowanie nowej (innowacyjnej), metody wąskopasmowego obrazowania obiektów [51],

- opracowanie metody monitorowania gęstości ruchu pojazdów z wykorzystaniem techniki opartej na analizie zmian częstotliwości Dopplera w czasie, dla pojedynczej komórki odległościowej [53,16],
- wykonanie badań pracy radaru pasywnego GSM w geometrii rozpraszaniem w przód (autor omawia w rozprawie ten tryb pracy) [50]

Wymienione oryginalne osiągnięcia zostały zweryfikowane praktycznie podczas badań pomiarowych na sygnałach zarejestrowanych przez autora. Badania te autor omawia szczegółowo w rozdziale 4. rozprawy. I tak przeprowadził szereg eksperymentów dotyczących efektywności radaru pasywnego GSM w zastosowaniach radiolokacyjnych. W eksperymencie przeprowadził możliwości wykrywania ultralekkiego, wolno latającego samolotu Delphin o skutecznej powierzchni odbicia ($1 - 10 \text{ m}^2$) należącego do instytutu badawczego FHR na lotnisku Monchsheide w Niemczech. Na potrzeby eksperymentu autor opracował demonstrator technologii radaru pasywnego zawierającego odbiorniki radia programowalnego SDR. Uzyskał i przedstawił pozytywne wyniki pomiarów ilustrując je w postaci wykresu. Następnie przeprowadził badania wykrywalności szybko manewrujących myśliwców. W czasie eksperymentu rejestrował echa myśliwców F-16 oraz MIG-29. Do celów pomiarowych opracował również demonstrator radaru pasywnego w którym zastosował elementy dostępne komercyjnie. Jako rejestrator sygnałów dla radaru wykorzystał wektorowy analizator sygnałów Agilent VSA 89600 posiadający dwa kanały odbiorcze. W obu kanałach odbiorczych referencyjnym i pomiarowym zastosował anteny logoperiodyczne. Latające myśliwce poruszały się w odległości bistatycznej około 5 – 10 km od radaru, zaś nadajnik GSM zlokalizowany był około 200 m od niego. Uzyskane wyniki pomiarowe potwierdziły możliwość wykrywania myśliwców. Autor opisał również wąskopasmowe obrazowanie pojazdów służące do zarządzania ich ruchem. Udowodnił, że obrazowanie pojazdów poruszających się po drogach za pomocą radaru pasywnego GSM jest możliwe. Przeprowadził także eksperymenty monitorowania ruchu pojazdów umożliwiające jego usprawnienie. Na koniec przeprowadził pomiary detekcji obiektów z wykorzystaniem radaru pasywnego GSM pracującego w geometrii *forward scatter* (rozpraszanie do przodu) [50]. Zaprezentowane w rozprawie wyniki wykrywania obiektów latających stanowiły podstawę do wykorzystania pasm GSM w radarze pasywnym PET/PCL opracowywanym w konsorcjum PIT-RADWAR - PW. Autor opracował część końcowych algorytmów przetwarzania, które zostały zastosowane w tym radarze. Na

koniec warto zwrócić uwagę na fakt pojawienia się kolejnych generacji telefonii mobilnej 4G i 5G, które charakteryzują się szerszymi pasmami pracy w porównaniu do systemu GSM drugiej generacji, który autor szczegółowo omawia w rozprawie. Wydaje się, że systemy te w przyszłości staną się bardziej przydatne do wykorzystania w radarach pasywnych. Nie mniej systemy pracujące w paśmie GSM będą nadal rozwijane. Należy pamiętać, że radiolokacja będzie bardziej skuteczna, gdy będziemy stosować jednocześnie rozwiązania aktywne, pasywne, laserowe, szumowe i inne.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Krysika spełnia z nadmiarem wymagania stawiane przez obowiązujące przepisy ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i jako taka kwalifikuje się do publicznej obrony. Ponadto wnioskuję o zaliczenie rozprawy do kategorii wybitnie dobra i przyznanie jej wyróżnienia.



Edward Sędek