

Warszawa, 20.07.2020

**dr hab. inż. Piotr Sameczyński, prof. uczelni**  
Instytut Systemów Elektronicznych  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Politechniki Warszawskiej  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa

*KWESTIONARIUSZ - RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY DISCYPLINY NAUKOWEJ „AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I  
ELEKTROTECHNIKA”  
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ*

**Tytuł rozprawy:** *Częstotliwościowa synteza sygnału sondującego w radarze penetracji gruntu z wykorzystaniem wąskopasmowych emisji z kodowaniem ciągłym i dyskretnym*

**Autor rozprawy:** mgr inż. Jacek Jendo

**1. Cel badań (w odniesieniu do tezy rozprawy).**

Teza rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Jendo brzmi: „*możliwe jest uzyskanie wysokorozdzielczych zobrazowań georadarowych obiektów o płytkiej lokalizacji, przy pomocy syntezy częstotliwościowej emisji z modulacją kąta*”.

Na podstawie treści postawionej tezy doktorant przeprowadził analizę następujących zagadnień badawczych:

- przeprowadzenie szczegółowych studiów literaturowych polegających na przeglądzie istniejących w radiolokacji metod możliwych do zastosowania w wysokorozdzielczych zobrazowaniach georadarowych;
- przeprowadzenie weryfikacji działania wybranych metod ze schodkową modulacją częstotliwości SF (ang. *stepped frequency*) w poszukiwaniu obiektów o płytkiej lokalizacji umieszczonych w glebie;
- Sprawdzenie możliwości generacji zobrazowań georadarowych w oparciu o sygnały z modulacją SF ze szczególnym uwzględnieniem kodowania ciągłego i dyskretnego;
- badanie możliwości uwzględnienia technik poprawiających jakość zobrazowania w radarze penetracji gruntu GPR (ang. *ground penetration radar*) bez znacznej

degradacji rozróżnialności z wykorzystaniem schodkowej modulacji częstotliwości;

- porównanie wybranych sygnałów SF do właściwości pobudzeń powszechnie stosowanych w GPR w kontekście oceny jakości zobrazowania;

Cel pracy w postaci badania sygnałów w zastosowaniu do radiolokacji w ośrodkach o złożonej strukturze wewnętrznej oraz próba zastosowania specyficznych sygnałów sondujących ze schodkową modulacją częstotliwości do poprawy jakości zobrazowań georadarowych ze szczególnym uwzględnieniem polepszenia rozróżnialności odległościowej został jasno sformułowany w rozprawie. Dodatkowo na koniec pracy teza została prawidłowo poparta szeregiem wyników symulacyjnych i badaniami laboratoryjnymi z wykorzystaniem rzeczywistych sygnałów radarowych oraz wskazaniem przez autora potencjalnych ograniczeń w praktycznej implementacji sygnałów SF z kodowaniem ciągłym i dyskretnym do sondowania georadarowego.

## 2. Charakter rozprawy.

W pracy autor przedstawił teoretyczne podstawy techniki georadarowej z uwzględnieniem technik modelowania propagacji fala elektromagnetycznych wykorzystywanych w tej technice prezentując przy tym przegląd metod stosowanych w symulacji elektromagnetycznej wybranych właściwości gruntu. W rozprawie przedstawiono także szeroki przegląd sygnałów sondujących stosowanych w technikach radarowych, w tym również w technice georadarowej. W pracy autor największą uwagę poświęcił na problematykę sygnałów ze schodkową modulacją częstotliwości. Na podstawie dokonanej przez doktoranta analizy literaturowej wyciągnięty został wniosek, że podstawowym rodzajem pobudzenia w radarach GPR jest sygnał impulsowy. Obok niego najczęściej stosuje się sygnał ze schodkową modulacją częstotliwości falą ciągłą SFCW (ang. *stepped-frequency continuous wave*). Natomiast rzadziej lub wcale są stosowane w GPR znane z innych aplikacji radarowych sygnały SF w których wykorzystano subimpulsy z modulacją kąta. Należą do nich sygnały ze schodkową modulacją częstotliwości sygnałami z liniową modulacją częstotliwości SF-LFM (ang. *stepped frequency linear frequency modulation*) oraz sygnały ze schodkową modulacją częstotliwości sygnałami z manipulacją fazy SF-PC (ang. *stepped frequency phase coded*). W pracy autor poświęcił się badaniom możliwości wykorzystania w technice GPR sygnałów stosowanych w innych aplikacjach radarowych i z tego powodu główny nacisk położył na badania klasy sygnałów SF-PC. Przebadał również właściwości schodkowej modulacji częstotliwości wycinkami transformaty fourierowskiej SF-DFT (ang. *stepped frequency discrete Fourier transform*) które nie były do tej pory stosowane w GPR w opisanej w rozprawie postaci.

Dodatkowo do rozważań teoretycznych w pracy zaprezentowano szereg wyników symulacyjnych dla badanych sygnałów pod kątem efektywności ich użycia w technice GPR. Na koniec autor potwierdził możliwość ich użycia eksperymentalnie z wykorzystaniem opracowanego na potrzeby pracy prostego radaru programowalnego zbudowanego w oparciu o dostępne na rynku elementy typu COTS (ang. *Commercial off-the-shelf*). Badania przedstawione w rozprawie dotyczą zarówno rozważań teoretycznych, jak i podstawowej

analizy stosowalności sygnałów w radarze programowalnym i na tej podstawie rozprawę doktorską mgr inż. Jacka Jendo można zaliczyć do prac o charakterze teoretyczno-symulacyjnym z uwzględnieniem również wątku implementacyjnego w postaci wykonania demonstratora radaru opartego o architekturę radia programowalnego

### **3. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł. Sposób formułowania wniosków wynikających z analizy źródeł.**

W pracy zamieszczono odwołania do 206 pozycji opublikowanych w kraju i za granicą. Stanowią one obszerne źródło informacji o zagadnieniach poruszanych w rozprawie. W pierwszym rozdziale pracy Autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w dziedzinie rozprawy. W analizie tej przedstawiony został przegląd metod syntezy sygnałów stosowanych powszechnie w technikach radarowych, w tym w georadarach. Przedstawiona w pracy bibliografia zawiera odwołania do literatury światowej zawierającej zarówno pionierskie rozwiązania w tematyce z lat 70-tych XX wieku, jak również najnowsze publikacje z ostatnich lat, co świadczy o przeprowadzeniu przez Autora bardzo dokładnych studiów literaturowych w trakcie realizacji rozprawy.

Wśród wszystkich 206 pozycji bibliografii można znaleźć 4 odwołania do prac Autora w tematyce rozprawy, w tym 3 referaty opublikowane w materiałach międzynarodowych konferencji (1 referat w Signal Processing Symposium (SPSympo), Kraków, 2019; 1 referat w International Radar Symposium (IRS), Bonn, 2018; 1 referat w Radioelectronic Systems Conference, Jachranka 2017,) oraz 1 artykuł w czasopiśmie krajowym Przegląd Elektrotechniczny, tom 95, nr 9, 2019 – 20pkt MNiSW wg. wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych z dnia z dnia 31 lipca 2019. Dorobek publikacyjny autora spełnia minimalne wymagania na uzyskanie tytułu doktora nauk technicznych. Natomiast na liście dorobku publikacyjnego zauważalny jest brak chociaż jednej publikacji Autora w prestiżowym wysoko punktowanym czasopiśmie wg. listy MNiSW czy z tzw. listy JCR (ang. Journal Citation Report). Na uwagę zasługuje jednak fakt, że pomimo braku publikacji z listy JCR dorobek doktoranta został zauważony na świecie w ostatnich doniesieniach prasowych, które opublikowane zostały w lutym 2020 na takich stronach jak: <https://www.rtl-sdr.com/>; <https://www.hackster.io/>, czy <https://cyberdynesystems.ai/> pod odpowiednio następującymi linkami:

- <https://www.rtl-sdr.com/creating-a-low-cost-ground-penetrating-radar-with-two-hackrfs/> artykuł pt. „Polish Researchers Tap the Open Source HackRF SDR for Low-Cost Ground-Penetrating Radar Prototype”
- <https://www.hackster.io/news/polish-researchers-tap-the-open-source-hackrf-sdr-for-low-cost-ground-penetrating-radar-prototype-e951898c3fb0>, artykuł pt. „Creating a low cost ground penetrating radar with two HackRFs”
- <https://cyberdynesystems.ai/creating-a-low-cost-ground-penetrating-radar-with-two-hackrfs/> , artykuł pt. „Creating a Low Cost Ground Penetrating Radar with Two HackRFs”

W powyższych materiałach prasowych, które są publicznie dostępne w sieci internet docenione zostały umiejętności konstrukcyjne doktoranta, który do konstrukcji prostego

radaru opartego o elementy COTS wykorzystał układ HackRF. Opisane w prasie rozwiązanie z wykorzystaniem HackRF jest bardzo podobnym rozwiązaniem do układu bladeRF, który wykorzystany został przez autora do badań w prezentowanej rozprawie doktorskiej. Fakt ten podkreśla duży potencjał aplikacyjny niniejszej rozprawy.

#### 4. Rozwiązanie przedstawionego zadania, właściwości przyjętych metod i założeń.

Autor rozprawy do rozwiązania przedstawionego zadania, którym było potwierdzenie tezy, że możliwe jest uzyskanie wysokorozdzielczych zobrażeń georadarowych obiektów o płytkiej lokalizacji, przy pomocy syntezy częstotliwościowej emisji z modulacją kąta, wykorzystał rozważania teoretyczne, symulacje oraz częściowo praktyczną weryfikację. W toku realizacji pracy Autor przeanalizował aspekty związane z odpowiednim doбором emisji wąskopasmowych stanowiących subimpulsy sekwencji SF. Przedstawił, że w radarach GPR oprócz najczęściej stosowanego sygnału LFM (ang. *linear frequency modulation*) możliwe jest wykorzystanie sekwencji z kodowaniem fazy w sposób dyskretny wykorzystujących modulację BPSK, a w przypadku kodów polifazowych modulację PSK (ang. *phase shift keying*). W rozprawie przebadana została możliwość zapewnienia ciągłego kodowania fazy w oparciu o popularną w radiolokacji transformację BTQ (ang. *biphase-to-quadriphase*). W wyniku badań przedstawionych w pracy potwierdzono że właściwości zastosowania emisji SF-PC-BTQ pozwalają na uzyskanie zbliżonego poziomu jakości zobrażeń jak w przypadku zastosowania kodu SF-PC-BPSK.

W pracy Autor przebadął trzy podstawowe metody generacji profilu odległościowego – najszybszą: opartą na IFFT (ang. *inverse fast Fourier transform*), wymagającą najwięcej pamięci komputera do obliczeń, ale w wielu przypadkach generującą wierniejsze profile: TD (ang. *time domain*) oraz szybką i wiernie opisującą profil: FD (ang. *frequency domain*). Dodatkowo, w ramach przeprowadzonych badań i studiów literaturowych Autor zwrócił uwagę na możliwość poprawy zobrażenia przez zastosowanie algorytmów opartych na filtracji niedopasowanej. Autor wykazał także, że do poprawy uzyskiwanego w georadarach z sygnałami SF zobrażenia można zastosować kodowanie międzyimpulsowe. Najlepszy wynik uzyskany został przy zastosowaniu nieliniowej modulacji częstotliwości.

W pracy doktorant przeprowadził szereg symulacji z wykorzystaniem różnych rodzajów modeli gruntu i kontroli w nich propagacji sygnałów SF. Symulacje przeprowadzone zostały dla różnych ustawień obejmujących różną separację anten w systemie bistatycznym, wysokość zawieszenia anten oraz głębokość zakopania miny. W ramach tych badań autor opracował statystyki jakości zobrażeń georadarowych wykorzystując wiele miar jakości dla badanych sygnałów sondujących SF, których celem było potwierdzenie że znane z innych aplikacji radarowych sygnały zapewniają również odpowiedni poziom jakości zobrażeń do zastosowań w aplikacjach georadarowych. Przeprowadzone badania symulacyjne wykonane zostały zgodnie z przyjętymi standardami metod badawczych. Niestety w rozprawie zabrakło pełnego potwierdzenia uzyskanych wyników badań symulacyjnych w praktyce. Autor przeprowadził co prawda eksperymenty pomiarowe z użyciem autorskiego prototypu georadaru programowalnego z pobudzeniami typu SF. Przeprowadzone testy dowiodły, że sygnały z modulacją SF umożliwiają generowanie profili odległościowych w oparciu o architekturę SDR (ang. *Software Defined Radio*). Natomiast przyjęte scenariusze pomiarowe były dalekie od rzeczywistych

warunków pracy georadarów. Na potrzeby walidacji opracowanych metod syntezy, Autor skonstruował scenę pomiarową, gdzie obiektem badanym była metalowa puszka, a ośrodkiem w którym był schowany/ukryty obiekt był regał drewniany. Ten scenariusz jest daleki od scenariuszy symulacyjnych przedstawionych we wcześniejszym rozdziale rozprawy, gdzie badanym obiektem był model miny przeciwpiechotnej umieszczony w różnych rodzajach gleb o różnych właściwościach propagacyjnych fal elektromagnetycznych. Przedstawiona w pracy weryfikacja z wykorzystaniem rzeczywistych pomiarów nie koresponduje i nie potwierdza wyników wykonanych symulacji, co niestety jest wadą przyjętego podejścia badawczego.

## **5. Oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek autora, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziom techniki) prezentowanego w literaturze światowej.**

Do najważniejszych elementów stanowiących oryginalny i twórczy wkład Autora rozprawy zaliczyć należy:

- analizy teoretyczne i porównanie różnych sygnałów ze schodkową modulacją częstotliwości pod kątem zastosowania w georadarach;
- przeprowadzenie badań symulacyjnych i na ich podstawie ocenę możliwości wykorzystania sygnałów SF dla sondowań georadarowych w zakresie częstotliwości pracy od ok. 750 MHz do ok. 4 GHz;
- Opracowanie w oparciu o technikę SDR prototypu georadaru umożliwiającego wykorzystanie sygnałów SF z wąskopasmowymi emisjami z kodowaniem ciągłym i dyskretnym;

W przypadku ostatniego elementu pracy należy podkreślić, że rozwiązania konstrukcyjne autorstwa mgr inż. Jacka Jendy zostały docenione na świecie i szeroko opisane w internetowych źródłach prasowych, które przytoczone zostały w pkt. 3 niniejszej recenzji.

## **6. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna).**

Autor w sposób poprawny przedstawił uzyskane wyniki badań symulacyjnych. Wadą jest wspomniany w pkt. 4 recenzji brak korelacji badań eksperymentalnych z badaniami symulacyjnymi. Opis umieszczony w pracy jest odpowiednio zwięzły i jasny. Układ pracy jest prawidłowy. Na początku Autor dokonuje przeglądu stanu wiedzy w tematyce rozprawy, który został przedstawiony w sposób bardzo rzetelny, gdzie znajdujemy liczne odwołania do światowej literatury ze zwięzłym opisem każdej analizowanej metody. Następnie Autor określił cel i zakres pracy formułując jednocześnie tezę, której będzie bronił w następnych etapach pracy. Następnie wprowadza czytelnika do tematyki techniki georadarowej, gdzie w rozdziale 2 przedstawia podstawowe zagadnienia związane z radarami GPR. W kolejnym 3-cim rozdziale przedstawiona została analiza sygnałów sondujących stosowanych powszechnie w radiolokacji. Rozdział 4 przedstawia w sposób szczegółowy opis badanych eksperymentalnie w rozdziale 5 sygnałów ze schodkową modulacją częstotliwości.

W ostatnim rozdziale Autor podsumował przedstawione w pracy rozważania i wyniki. Praca została napisana starannie pod względem redakcyjnym i ciężko w niej znaleźć większe błędy redakcyjne. Wszystkie zaprezentowane w pracy rysunki i wykresy przedstawiające wyniki badań są bardzo czytelne i staranne. Z drobnych uwag edycyjnych zauważyć można jedynie niespójność niektórych oznaczeń występujących w spisie symboli i akronimów. Wydaje się, że część oznaczeń takich jak np. EIRP, ISL, PAPR, SNR, czy SPSL właściwiej byłoby umieścić w wykazie akronimów, aniżeli wykazie oznaczeń. Format równań i wzorów jest wykonany w pracy bardzo starannie, chociaż zdarzają się drobne błędy edycyjne czcionek, jak np. wzór (3.11), który jest wydrukowany dwa razy większą czcionką niż pozostałe w pracy równania. Te dwie naprawdę drobne uwagi nie rzutują na ocenę całości pracy, która w mojej opinii została przygotowana przez Autora bardzo starannie.

## 7. Słabe strony rozprawy, jej główne wady.

Praca charakteryzuje się logicznym tokiem wywodu i trudno wskazać w niej istotne wady merytoryczne. Do zauważalnych słabych stron pracy można zaliczyć natomiast:

1. Źle dobrane scenariusze pomiarowe, które nie korespondują do wcześniej przedstawionych scenariuszy symulacyjnych. Badania z wykorzystaniem prototypu georadaru zbudowanego w oparciu o technologie SDR potwierdzają możliwość wykorzystania sygnałów SF z wąskopasmowymi emisjami z kodowaniem ciągłym i dyskretnym do detekcji obiektu w postaci puszki metalowej przysłoniętego przeszkodą w postaci drewnianej półki regału. Natomiast ten scenariusz pomiarowy jest daleki do badań symulacyjnych, które wykonane zostały z wykorzystaniem modelu miny przeciwpiechotnej umieszczonej w różnych rodzajach symulowanych gleb. Podobny scenariusz oczekiwany byłby również z wykorzystaniem rzeczywistych pomiarów, co w pełni potwierdziłoby postawioną tezę pracy, że możliwe jest uzyskanie wysokorozdzielczych obrazów georadarowych obiektów o płytkiej lokalizacji.
2. We wstępie Autor napisał: *„Zasadniczym celem próby zastosowania specyficznych sygnałów sondujących ze schodkową modulacją częstotliwości jest poprawa jakości obrazowań georadarowych ze szczególnym uwzględnieniem **poprawy rozróżnialności pionowej (odległościowej)**.”* W podsumowaniu Autor napisał także: *„Podstawę większości rozważań stanowiła **poprawa rozróżnialności odległościowej**.”* Pierwszy cel pracy w postaci *„poprawy jakości obrazowań georadarowych”* został potwierdzony. W pracy autor wykazał z wykorzystaniem licznych miar jakości (takich jak SSIM, ISL) obrazowań georadarowych możliwość poprawy jakości tych obrazowań. Niestety w żadnych przedstawionych w pracy wynikach eksperymentów, ani symulacyjnych ani z wykorzystaniem pomiarów nie znalazłem wyniku gdzie pokazana byłaby poprawa rozróżnialności odległościowej z zastosowaniem badanych metod syntezy sygnału, zdefiniowana jako drugi cel pracy. Rozróżnialność odległościowa definiowana jest jako możliwość rozróżnienia w odległości dwóch obiektów, co jest określane jako szerokość listka głównego po kompresji w odległości przy spadku 3dB lub 4dB w zależności od definicji. Natomiast w żadnym z wyników eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale 5 nie znalazłem poprawy szerokości listka głównego. Dla wszystkich badanych technik szerokość listka głównego jest taka

sama, zatem nie widzę tutaj poprawy rozróżnialności odległościowej o której autor pisze w podsumowaniu. Ta poprawa jest natomiast widoczna w przedstawionych rozważaniach teoretycznych w rozdziale 4. Nasuwa się pytanie dlaczego badania eksperymentalne tego nie potwierdziły?

Powyżej wymienione słabe strony rozprawy nie zmieniają mojej opinii o wartości całej pracy, którą oceniam w kategorii dobrych praktycznych prac doświadczalno-implémentacyjnych.

#### **8. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju, itp.**

Przedstawiona praca ma duże znaczenie aplikacyjne w tematyce radarów penetracji gruntu. Przeprowadzone przez Autora oryginalne wyniki badań symulacyjnych potwierdzają możliwość zastosowania technik syntezy częstotliwościowej emisji z modulacją kąta w georadarach. Dodatkowo, uzyskane przez doktoranta wyniki wstępnych badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem opracowanego demonstratora radaru potwierdziły możliwość wykorzystania sygnałów SF z wąskopasmowymi emisjami z kodowaniem ciągłym i dyskretnym w aplikacjach do detekcji obiektów o płytkiej lokalizacji. Badania z wykorzystaniem rzeczywistych scenariuszy wymagają wciąż dalszych prac do potwierdzenia przedstawionej tezy pracy w warunkach poligonowych, natomiast przedstawione wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych pokazują duże szanse na powodzenie użycia przedstawionych metod w przyszłych aplikacjach georadarowych.

Tematyka rozprawy wpisuje się również w obszar badań nt. wielopasmowych radarów aktywno-pasywnych, w tym radarów służących do obserwacji sytuacji/obiektów za przeszkodą, w tym radary penetracji gruntu, z zakresu Sensory i Obserwacja, przedstawionym przez Departament Nauki i Szkolnictwa Wojskowego Ministerstwa Obrony Narodowej w dokumencie pt. „Priorytetowe kierunki badań w resorcie obrony narodowej na lata 2013-2022”. Dokument ten został wprowadzony w celu zidentyfikowania priorytetowych obszarów badawczych i technologii w zakresie bezpieczeństwa państwa, umożliwiającym ukierunkowanie środków finansowych dla jak najlepszego zabezpieczenia potrzeb Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej.

#### **9. Podsumowanie (czy rozprawa spełnia wymagania przez obowiązujące przepisy).**

Przedstawiona przez mgr inż. Jacka Jendo rozprawa doktorska pt. „*Częstotliwościowa synteza sygnału sondującego w radarze penetracji gruntu z wykorzystaniem wąskopasmowych emisji z kodowaniem ciągłym i dyskretnym*” spełnia wszystkie wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Rozprawę zaliczam do kategorii spełniająca wymagania. Ocenę tę uzasadniam:

- wysokim poziomem redakcji pracy i przeglądu istniejących metod syntezy sygnału możliwych do zastosowania w radiolokacji wysokorozdzielczej,
- zaproponowaniem przez Autora wykorzystania w georadarach technik syntezy sygnału z wykorzystaniem wąskopasmowych emisji z kodowaniem ciągłym i dyskretnym,

- zweryfikowaniem słuszności zaproponowanego rozwiązania z wykorzystaniem badań symulacyjnych i laboratoryjnych,
- badaniami nad unikatową w skali kraju technologią wpisującą się w tematykę „Priorytetowe kierunki badań w resorcie obrony narodowej na lata 2013-2022” opublikowaną decyzją nr 4/NSzw Ministra Obrony Narodowej z dnia 22.03.2013 r.

Na podstawie analizy pracy można stwierdzić, że doktorant posiada bardzo duży zasób wiedzy w tematyce rozprawy, który spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgr inż. Jacka Jendo do publicznej obrony.



/podpis/