

Białystok, 15 lipca 2020 r.

Dr hab. inż. Ewa Świercz, prof. PB
Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Świetlnej
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY Automatyka, Elektronika
i Elektrotechnika WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ*

(zlecenie nr 36/RDN AEE/2020 na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny AEE Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 20 maja 2020 r.)

Tytuł rozprawy

**CZĘSTOTLIWOŚCIOWA SYNTEZA SYGNAŁU SONDUJĄCEGO W RADARZE
PENETRACJI GRUNTU Z WYKORZYSTANIEM WĄSKOPASMOWYCH EMISJI
Z KODOWANIEM CIĄGŁYM I DYSKRETNYM**

Autor rozprawy

Jacek Jendo

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy/teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Teza rozprawy doktorskiej zawarta w zdaniu: *możliwe jest uzyskanie wysokorozdzielczych obrazów georadarowych obiektów o płytkiej lokalizacji, przy pomocy syntezy częstotliwościowej emisji z modulacją kąta* jasno i precyzyjnie formułuje problem badawczy, który zakłada poszukiwanie sygnału sondującego georadaru o określonych właściwościach widma i właściwościach funkcji niejednoznaczności radarowej RAF, jako miary jakości obrazów. W celu udowodnienia tezy pracy doktorskiej autor przeprowadził wiele wnikliwych rozważań teoretycznych w oparciu o bogatą literaturę i dokonał syntezy reprezentatywnych typów sygnałów sondujących, z których mogą być budowane wysokorozdzielcze profile odległościowe.

Tradycyjne systemy GPR wykorzystują sygnały proste, którymi są proste impulsy o szerokim widmie oraz sygnały złożone. Sygnały złożone to głównie ciągłe sygnały z modulacją częstotliwości FMCW lub impulsy SF ze schodkową modulacją częstotliwości SFCW. Najpopularniejszym rozwiązaniem jest sygnał SF z liniową modulacją częstotliwości (ang. SF-LFM). Drugą grupę emisji SF stanowią sygnały modulowane subimpulsami z manipulacją fazy (ang. SF-PC), które są mniej poznane i znacznie rzadziej wykorzystywane w systemach GPR. Doktorant zbadał zarówno sygnały proste jak i sygnały złożone, wykorzystując dodatkowe modyfikacje tych sygnałów prowadzące do poprawy ich własności widmowych i korelacyjnych. Problemem jest nie tylko dobór najlepszych sygnałów

sondujących, ale również ustalenie warunków transmisji sygnałów sondujących w trudnym środowisku jakim jest grunt i warunków odbioru sygnałów echa w celu uzyskania dokładnego zobrazowania georadarowego. Dlatego też rozważania o sygnałach sondujących należy powiązać z możliwościami generacji sygnału, jego transmisji w określonym środowisku i odbioru echa od obiektów przez układ odbiorczy realizujący odbiór korelacyjny lub filtrację dopasowaną. Tak więc dopiero badania w pełnym systemie radarowym dają odpowiedź co do użyteczności wykorzystanych sygnałów sondujących.

Doktorant w swojej pracy doktorskiej podjął się próby zbudowania prototypu systemu GPR na bazie radia programowalnego bladeRF 2.0 micro xA4. Środowisko penetracji radaru, będące jedynie modelem realistycznego gruntu, zrealizowano symulacyjnie metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), z wykorzystaniem oprogramowania gprMax.

Recenzowaną pracę można więc zaliczyć do kategorii prac teoretyczno-doświadczalnych.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł/ w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadcząco o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Recenzowana rozprawa zawiera 206 pozycji literatury z zakresu tematyki realizowanej w pracy doktorskiej. Dobór pozycji literaturowych Recenzent uważa za reprezentatywny w odniesieniu do zagadnień realizowanych w ramach doktoratu.

Dorobek Autora liczy 4 publikacje – 3 referaty na renomowanych konferencjach międzynarodowych i jedna publikacja w punktowanym czasopiśmie z listy ministerialnej czasopism. Po ocenie przytoczonych pozycji literaturowych nie ma wątpliwości, że wiedza Autora i rozeznanie aktualnego stanu badań jest bardzo duże.

Wnioski z przeglądu literatury są formułowane w sposób przekonujący i wskazują na umiejętność korzystania z odpowiednich źródeł literaturowych.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Słuszność postawionej w rozprawie tezy *możliwe jest uzyskanie wysokorozdzielczych zobrazowań georadarowych obiektów o płytkiej lokalizacji, przy pomocy syntezy częstotliwościowej emisji z modulacją kąta* Doktorant potwierdził w bogatym scenariuszu badań symulacyjnych nad sygnałami możliwymi do wykorzystania w systemach GPR.

W rozprawie doktorskiej określono i przebadano klasę sygnałów sondujących o cechach sygnałów szerokopasmowych, do których należą zarówno proste impulsy o bardzo krótkim czasie trwania, jak również sygnały złożone ultraszerokopasmowe UWB. Szczególną klasę sygnałów ultraszerokopasmowych stanowią sygnały ze skokami częstotliwości SF, które były szczególnie wnikliwie analizowane w rozprawie doktorskiej pod kątem możliwości uzyskania wysokorozdzielczych zobrazowań w radarach GPR. Autor zwrócił szczególną uwagę na sygnały SF-PC, które w technice georadarowej występują rzadko i nie są do końca dobrze przebadane w tych zastosowaniach.

Jakość zobrazowania jest oceniana na podstawie profilu odległościowego, który jest pomiarem odbicia sygnału sondującego od obiektu i który przekazuje informację o strukturze

i lokalizacji poszukiwanego obiektu. Poprawa jakości zobrazowania to zapewnienie wysokiej rozróżnialności odległościowej w profilu odległościowym uwarunkowanej dużą szerokością pasma sygnału sondującego.

Profil odległościowy determinujący rozróżnialność może być definiowany w zależności od sygnału sondującego i od sposobu odbioru sygnału odbitego od obiektu. Ocena profilu odległościowego dla sygnałów prostych to ocena poprzez wybrane przez Doktoranta parametry ISL, PSL i ML odniesione do przekroju radarowej funkcji nieoznaczoności RAF dla zerowej częstotliwości Dopplerowskiej $v_D=0$. Idea uzyskania profilu odległościowego dla sygnałów SF jest bardziej zróżnicowana i jest głównie oparta o metodę IFFT polegającą na akwizycji zbioru reprezentatywnych próbek N_c , gdzie profil odległościowy jest odwrotną transformatą Fouriera odebranego zbioru danych. Dla sygnałów SF są również obliczane profile TD w dziedzinie czasu i profile FD w dziedzinie częstotliwości poprzez rekonstrukcję sygnału SF z subimpulsów transmitowanych wielokanałowo. Tak otrzymane profile są również przedmiotem badań i oceny w rozprawie doktorskiej.

Autor wprowadza reprezentatywne modyfikacje sygnałów złożonych kształtujące pożądane właściwości pasmowe i korelacyjne. Do tych modyfikacji należą między innymi poszerzenie pasma subimpulsu, wewnątrzimpulsowe kodowanie kąta subimpulsu, dodatkowe zagnieżdżanie kodów fazowych subimpulsu, transformacje BTQ, międzyimpulsowe kodowanie kąta, filtracja niedopasowana, korekcja kształtu subimpulsów poprzez zastosowanie okien wagowych, jak również nieliniowa funkcja zmiany skoku Δf częstotliwości w radarach SF w kolejnych subimpulsach.

O jakości zobrazowania decydują również warunki sondowania uzależnione od własności fizyko-chemicznych ośrodka propagacji fali elektromagnetycznej, które również zostały przez Autora przeanalizowane.

Przyjęty przez autora wybór sygnałów do badań jest uzasadniony a zaproponowana metodologia badań jest właściwa.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalny dorobek Autora obejmuje:

- Krytyczną analizę literatury związanej z sygnałami sondującymi w radarach GPR.
- Kompleksową ocenę szerokopasmowych sygnałów sondujących (zarówno sygnałów prostych jak i złożonych), co tworzy swoiste kompendium wiedzy o sygnałach szerokopasmowych do wykorzystania w wysokorozdzielczym zobrazowaniu georadarowym.
- Rozszerzone badania profili odległościowych z wykorzystaniem stosunkowo rzadko stosowanych w technice GPR sygnałów SF-PC z kodowaniem kąta subimpulsu i z zaproponowanymi, dodatkowymi modyfikacjami kształtującymi pożądane właściwości widmowe w symulacyjnym środowisku jednorodnym oraz porównanie tej grupy sygnałów z często wykorzystywanymi w technice GPR sygnałami SF_LMF, SF-DFT.

- Wielokryterialne zbadanie modeli środowiska niejednorodnego z obecnością obiektów natury militarnej metodą FDTD z wykorzystaniem środowiska gprMax do symulacji propagacji fali elektromagnetycznej w tym środowisku, z sondowaniami sygnałami SF i przedstawieniem wyników w interpretowalnej formie obrazowej w postaci B-skanów.
- Opracowanie prototypu bistatycznego radaru programowalnego w technice SDR bladeRF 2.0 micro xA4 z modelem środowiska propagacji, pozwalającego na praktyczną weryfikację postawionej tezy.
- Wykonanie przykładowych rzeczywistych pomiarów sondowań wybranymi sygnałami SF z wykorzystaniem radaru programowalnego.

Wszystkie zawarte w pracy wyniki symulacyjne, zarówno do prezentacji treści teoretycznych jak i wyniki nowatorskich eksperymentów numerycznych, składają się na oryginalny dorobek Autora.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/

Autor rozprawy przedstawia wyniki swoich prac w sposób poprawny i przekonujący. Rozprawa ma wyraźny podział na część wprowadzającą, część teoretyczną, część doświadczalną, wnioski, literaturę oraz Załącznik składający się z trzech dodatków zawierających opis metody FDTD. Rozdział pierwszy zawiera cel i zakres pracy oraz stan wiedzy w obszarze, którego dotyczy tematyka rozprawy. Rozdział drugi dokonuje przeglądu podstawowych zagadnień z techniki georadarowej. W rozdziale trzecim i czwartym przedstawiono charakterystykę sygnałów sondujących. W rozdziale piątym Autor przedstawia wyniki obliczeniowe symulacyjnych systemów GPR z wykorzystaniem badanych sygnałów sondujących. Wyniki w postaci profili odległościowych i wizualizacji obrazowej są uzupełnione zbiorem reprezentatywnych tablic z rezultatami numerycznymi wraz z ich krytycznym omówieniem. Taka forma prezentacji znakomicie ułatwia porównanie wielowariantowych badań. We wnioskach Autor dokonuje syntetycznego przeglądu zawartości pracy i jeszcze raz powtarza cel pracy oraz podkreśla własne dokonania.

Zdaniem recenzenta, przyjęty przez Doktoranta układ treści rozprawy jest wystarczająco jasny i klarowny, a podział rozprawy na rozdziały jest prawidłowy.

Pomimo poprawnej struktury rozdziałów i podziału treści, redakcja treści rozprawy zawiera niedociągnięcia, które nie dotyczą merytorycznej zawartości rozprawy, ale dają pewien niedosyt. Recenzent zwrócił uwagę na zbyt ogólnikowe przedstawianie niektórych opisów, które natychmiast rodzą pytania, czego dotyczy opis - na przykład:

- *Rozprawa w szczególności obejmuje wspomniane dotąd aspekty.*
- *wykorzystanie różnego rodzaju transformacji [16, 79],*
- *Wspomniane metody realizują pewne operacje matematyczne, które mogą być implementowane w praktyce na różne sposoby.*
- *Metody przetwarzania sygnałów mogą obejmować wszystkie rodzaje zobrazowań.*
- *Do bardziej zaawansowanych technik redukcji tła można zaliczyć metody wykorzystujące różne transformacje w sposób....*
- *Zawartość energetyczna widma w obrębie pewnej częstotliwości jest relatywnie wysoka,*

jeśli szybkość zmian tej częstotliwości jest odpowiednio...

- Istnieją różne podejścia do generacji kodów cechujących się korzystnymi właściwościami ACF i PACF.

W kilku fragmentach pracy Autor zbyt rzadko powołuje się na pozycje bibliograficzne, co utrudnia ocenę, które wyprowadzenia wzorów stanowią klasykę i nie wymagają żadnych odwołań do literatury, a które wyprowadzenia są czysto autorskie lub przez autora modyfikowane.

Niedoskonałości natury redakcyjnej przedstawione w następnym punkcie nie podważają merytorycznej wartości rozprawy ani jej waloru naukowego.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W obszernej pracy przedstawionej do recenzji Autor nie ustrzegł się błędów redakcyjnych i nieścisłości wymienionych poniżej, co prowadzi do zamieszczonych poniżej pytań i uwag polemicznych.

Str. 44. Na Rys. 2.31 pokazany jest moduł falki Rickera $u(t)$. Mylące jest odwołanie do wzoru (3.12), w którym $u(t)$ jest modułem sygnału analitycznego.

Str. 46. Niefortunny jest termin 'dekonwolucja'. Należałoby raczej użyć terminu 'rozplatanie', ponieważ ten termin jest częściej stosowany w nazewnictwie polskim – na przykład w pozycji [181].

Str. 47. Jak jest definiowana średnia trasa S_{avg} ?

Str. 48. Uwaga dotyczy tekstu: *Na podstawie wybranej liczby N_{pca} największych wartości własnych ustala się macierz.* Jakie jest kryterium wyboru N_{pca} ?

Czy wzór 2.39 został opracowany przez Doktoranta?

Str. 49. Uwaga dotyczy tekstu: *Pomocnym narzędziem służącym do ich eliminacji są migracje, które powodują zwinięcie ramion hiperboli do wierzchołka, co w większym stopniu oddaje naturę obiektu punktowego.* Nie wiadomo o jakim wierzchołku wspomina Autor.

Uwaga dotyczy tekstu: *W środowiskach o wysokiej wariancji prędkości propagacji stosowanie migracji nie jest efektywne.* Nie jest zrozumiałe sformułowanie wariancja prędkości.

Str. 52. Uwaga dotyczy błędnie zapisanego warunku we fragmencie tekstu: *a kształt widma nie musi być symetryczny względem składowej stałej $S(\omega) \neq S^*(\omega)$...* Powinno być $S(\omega) \neq S^*(-\omega)$.

Str. 59. Z zapisu zdania: *W zastosowaniach optymalizacyjnych dokonywana jest często modyfikacja sposobu kalkulacji PSL i ISL polegająca na dodaniu wag odwołujących się do konkretnego opóźnienia* wynika, że dodawane są wagi. We wzorze (3.20) nie widać dodanych wag, więc jak zmieni się zapis tego równania po dodaniu wag.

Str. 60. Uwaga dotyczy tekstu: *Najwięcej energii skupia się na częstotliwości $f_{cgl} = 1/(2\pi\chi)$.* Zdanie jest nieprecyzyjne ponieważ energia nie może się skupiać na częstotliwości. Dla tej częstotliwości funkcja widmowa osiąga maksimum.

Str. 64. W tekście pojawia się zdanie: *Kolejna zaleta dotyczy eliminacji wpływu zakłóceń występujących na określonych częstotliwościach w oparciu o oszczędne próbkowanie (ang. compressed sensing) [135].* To zdanie jest oderwane od wcześniejszego tekstu i powinno być precyzyjnie wyjaśnione, na czym polegają zalety compressed sensing w eliminacji zakłóceń.

Str.69. Czy wzory 4.7 - 4.26 są autorstwa Doktoranta?

Str. 74. Jaka jest interpretacja wielkości Δt wprowadzonej w liczniku i mianowniku wzoru 4.32?

Jaka jest interpretacja częstotliwości f_s związanej z odbiciem od obiektu w odległości R we wzorze (4.33) ?

Str. 77. Opis etapu c) na Rys. 4.8 jest bardzo powierzchowny. Autor ograniczył się do zapisu: *Etap c) dotyczy odpowiedniego przesunięcia w dziedzinie częstotliwości i korekcji fazy nadpróbkowanych subimpulsów.* Nie wiadomo jakiego przesunięcia częstotliwości dokonano i jaką korekcję fazy przeprowadzono, aby otrzymać Rys. 4.8 c.

Str. 78. Podobnie powierzchowny jest opis metody FD: *Metoda FD polega na odpowiednim przesunięciu sygnałów w dziedzinie częstotliwości zgodnie z częścią b) Rys. 4.9, z zachowaniem odpowiednich relacji fazowych.*

Str. 83. Dotyczy zdania: *Podstawowym kodem jest kod bifazowy, dla którego $\Phi_K = 2$.* W przytoczonym zdaniu Φ_K jest zbiorem 2-elementowym.

Zakres częstotliwości, w którym zawarta jest znaczna część energii sygnału obejmuje dwukrotność czasu trwania pojedynczego bitu. Na Rys 4.14 pokazany jest zakres częstotliwości $-1/T_{sym}$ do $1/T_{sym}$, a nie przedział czasowy bitu.

Str. 89. Z opisu Autora wynika, że szereg jest zbiorem szeregów. *Szereg o wyrazach zespolonych o k_x -tym elemencie $c_i(k_x)$ tworzy zbiór komplementarny, jeżeli suma $Z_x(p)$ (4.43) aperiodycznych funkcji autokorelacji $R_{c,i}$ wszystkich szeregów ze zbioru jest równa zero dla wszystkich niezerowych przesunięć.*

Str. 105. W jakim środowisku programistycznym zrealizowano symulacje doświadczeń opisanych w podrozdziale 5.1?

Str. 114. Jakie były kryteria wygenerowania B-skanu odniesienia X_{ref} w eksperymentach na str. 114?

Doktorant wiele wysiłku włożył w opracowanie warunków eksperymentu w technologii radia programowalnego realizującego prototyp radaru GPR. Technologia SDR zapewnia nowe możliwości oceny projektów bez budowy kosztownego radaru, a zaprojektowany przez Autora radar pozwala na rzeczywiste przeprowadzenie badań z modelami sygnałów sondujących będących przedmiotem analizy w rozprawie doktorskiej.

Recenzentowi brakuje jednak bardziej szczegółowego opisu realizacji radaru programowalnego, na przykład ogólnego schematu pokazującego bloki przetwarzania sygnałów w technologii SDR.

Autor stwierdza, że *głównym zamiarem było sprawdzenie na ile w nielaboratoryjnych*

warunkach profile oparte o transmisje SF-PC-BPSK i SF-PC-BTQ różnią się od SFCW. Ocena tego eksperymentu jest powierzchowna i zawarta w zdaniu, że uzyskano zobrazenia zbliżone lub lepsze niż uzyskane techniką SFCW. Brakuje dobrze zdefiniowanej miary oceny, na ile otrzymane zobrazenia są lepsze i dlaczego. Recenzent uważa, że ocena tego eksperymentu jest zbyt uproszczona.

Str. 131. Uwaga dotyczy zdania: *Przegląd i fuzję rzeczywistych modeli gruntu umożliwiających symulację rzeczywistej gleby w zakresie częstotliwości od ok. 750 MHz do ok. 4 000 MHz.* Czy ten zakres częstotliwości jest związany z zakresem częstotliwości sygnałów sondujących? To zdanie wymaga uzupełnienia.

Recenzent proponuje, aby Autor podczas obrony rozprawy odniósł się do uwag i wskazanych wyżej nieścisłości w tekście rozprawy.

Recenzent proponuje również, aby podczas publicznej obrony rozprawy Autor ustosunkował się do poniższych pytań:

- Czy Autor mógłby podać założenia realizacji filtracji niedopasowanej przy generacji przykładowych sygnałów: NSF-PC-BTQ-MMF-TD, NSF-PC-BTQ-MMF-FD?
- Czy Autor mógłby pokazać bardziej szczegółowo cały proces tworzenia przykładowych sygnałów: NSF-PC-BTQ-MMF-TD, NSF-PC-BTQ-MMF-FD, SF-PC-COCS-FD?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Przydatność rozprawy w naukach technicznych jest bardzo duża. Wykrycie i monitorowanie obiektów militarnych, na przykład min umieszczonych blisko pod powierzchnią ziemi lub na niej, ma kolosalne znaczenie w ochronie życia ludzi zwłaszcza w warunkach konfliktów zbrojnych. Trudna wykrywalność takich obiektów jest wyzwaniem dla projektantów systemów ochrony życia ludzkiego. W recenzowanej rozprawie doktorskiej podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy możliwe jest wykorzystanie klasy zmodyfikowanych sygnałów SF-PC do uzyskania bardziej dokładnych zobrażeń obiektów ukrytych w gruncie. Lepsza jakość zobrażeń trudno wykrywalnych obiektów może pozwolić na wypracowanie lepszej strategii ochrony przed skutkami działania niebezpiecznych dla życia ludzkiego obiektów. Dlatego też Recenzent uważa, że podjęty przez Autora temat badań naukowych jest bardzo ważny i wymagający dalszych intensywnych badań.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) niespełniająca wymagań,
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c) spełniająca wymagania,
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- e) wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

Zadania badawcze, które postawił przed sobą Doktorant, charakteryzują się bardzo dobrym poziomem merytorycznym i zostały w sposób poprawny sformułowane i rozwiązane. Doktorant dobrał właściwe, nowoczesne i zaawansowane metody osiągnięcia zamierzonych celów rozprawy. Biorąc pod uwagę powyższą opinię proponuję zaliczenie rozprawy do

kategorii

e) - wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

Zgodnie z zaprezentowaną powyżej oceną merytoryczną rozprawy Pana mgr inż. Jacka Jendo stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Artykule 13, ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 z 2003 r., poz. 595 z późn. zm.) oraz stosownych przepisach wykonawczych wydanych na podstawie w/w Ustawy.

W związku z Art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669) stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Jendo do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

Ewa Śmiełowa