

Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Warszawa, 5 grudnia 2017 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 19 grudnia 2017 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

**mgr inż. Janusza Kulpy**

**temat:** „Metody syntezy optymalnych sygnałów w radarach szumowych”

**promotor – dr hab. inż. Mateusz Malanowski, prof. Politechniki Warszawskiej**

**recenzenci:**

**dr hab. inż. Waldemar Susek, prof. Wojskowej Akademii Technicznej**

**dr hab. inż. Wojciech Krzysztofik, prof. Politechniki Wrocławskiej**

Obrona odbędzie się w dniu 19 grudnia 2017 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 12<sup>30</sup>.

Po adresem: [www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje](http://www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje) zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

mgr inż. Janusz Kulpa

tytuł: "Metody syntezy optymalnych sygnałów w radarach szumowych"

Promotor

dr hab. inż. Mateusz Malanowski, prof. Politechniki Warszawskiej

Streszczenie:

W niniejszej rozprawie zaprezentowano metody syntezy sygnałów pseudolosowych na potrzeby radiolokacji szumowej. Główną motywacją podjęcia tej tematyki było poszukiwanie efektywnych metod niwelowania wpływu silnych ech stałych. Obecnie stosowane metody cechują się dużą złożonością obliczeniową, która nie pozwala na pracę radaru w czasie rzeczywistym.

Silne echa w radiolokacji szumowej powodują efekt maskowania ech, uniemożliwiając, bądź utrudniając detekcję słabszych ech pochodzących od innych obiektów. Zastosowanie sygnałów o obniżonym poziomie listków bocznych łagodzi efekt maskowania, pozwalając na wyeliminowanie bloku usuwania ech stałych z łańcucha przetwarzania sygnałów.

W pracy rozwinięto filtracyjną metodę syntezy sygnałów szumowych, uwzględniając obniżanie poziomu listków bocznych zarówno funkcji autokorelacji, wykorzystywanej przy estymacji samej odległości do obiektu, jak i funkcji niejednoznaczności, wykorzystywanej przy estymacji odległości i prędkości obiektów. Opracowano także rozwinięcia tych metod, pozwalając dodatkowo na kształtowanie widma gęstości mocy sygnałów, jak i zwiększanie efektywności wykorzystania nadajnika. Rozważania teoretyczne zostały potwierdzone zarówno w symulacjach, jak i na podstawie rzeczywistych pomiarów dokonanych w terenie.

Słowa kluczowe: Radar szumowy, synteza sygnałów, efekt maskowania

Abstract

Optimal Noise Radar Waveform Design

This work presents the methods of synthesis of pseudo-random waveforms as sounding signals for a noise radar. The main motivation of the work is the high computing complexity and the limitations of existing post-recording clutter removal techniques.

The strong echoes, originating from the ground clutter, or from close objects with high radar cross-section, limit the dynamic range of the radar. Therefore, weak echoes may be completely masked in the processing noise floor introduced by the strong ones. The use of a waveform with reduced correlation sidelobes decreases the impact of the masking effect and may enable the detection of the weak echoes in such scenarios, without the need for an additional clutter removal step.

The filter-based waveform design method, presented in this work, was developed not only to suppress the range-related sidelobes of the auto-correlation function, but also the range-Doppler sidelobes of the ambiguity function. Additionally, the extensions of the method concerning shaping of the power spectrum density of the signal, and the more efficient transmitter usage are presented. Theoretical considerations have been confirmed both by simulation and the results gathered in various measurement campaigns.

Index Terms: Noise Radar, Waveform Design, Masking effect

dr hab. inż. Waldemar SUSEK, prof. WAT  
Wojskowa Akademia Techniczna  
Wydział Elektroniki  
Instytut Radioelektroniki, Zakład Mikrofal

Warszawa, 12 października 2017r.

*KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY  
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ*

Tytuł rozprawy: **Metody syntezy optymalnych sygnałów w radarach szumowych**

Autor rozprawy: **mgr inż. Janusz KULPA**

Recenzję przygotowano zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 650 poz. 595) oraz uchwałą Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej przesłaną przez Dziekana Wydziału prof. dr. hab. inż. Krzysztofa Zarębę pismem z dnia 28 sierpnia 2017r.

**Pkt 1.**

Mgr inż. Janusz Kulpa w przedstawionej rozprawie doktorskiej „*Metody syntezy optymalnych sygnałów w radarach szumowych*” porusza ważne zagadnienie naukowe związane z syntetyzowaniem sygnału radarowego dla potrzeb unikatowej grupy radarów jakimi są radary z sygnałami szumowymi. Zagadnienie to jest o tyle ważne, że w związku z tym, że sygnałem sondującym jest sygnał losowy, tradycyjne podejście do przetwarzania sygnału w odbiorniku, uwzględniające filtrację dopasowaną realizowaną w czasie rzeczywistym, nie jest możliwe do zastosowania. Problem ten został ujęty w postawionej przez Doktoranta tezie rozprawy a mianowicie: „*Możliwe jest ograniczenie efektu maskowania w systemach radarów szumowych poprzez zastosowanie sygnału sondującego o obniżonych wartościach funkcji niejednoznaczności w zadanym obszarze przesunięć czasowych i częstotliwościowych*”, którą to Autor rozszerza nie tylko na monostatyczne systemy radarowe ale także na systemy wielonadajnikowe. Autor w tezie rozprawy jasno i precyzyjnie formułuje swój problem badawczy, który zakłada poszukiwanie szumowego sygnału sondującego, którego funkcja niejednoznaczności, jako miara stosowalności i jakości sygnału sondującego, będzie się charakteryzowała obniżonymi wartościami dla wybranych komórek odległościowo – częstotliwościowych. Rozprawa w sposób kompleksowy ujmuje problem badawczy od

momentu jego zdefiniowania do jego rozwiązania. Przedstawione w pracy analizy, wnioski i pomiary eksperymentalne nadają pracy charakter teoretyczno – doświadczalny.

## **Pkt 2.**

W rozprawie zamieszczono 75 pozycji literaturowych z czego Doktorant jest autorem 5 i współautorem 11 pozycji. W pracy w sposób jak najbardziej właściwy przywołano poszczególne pozycje literaturowe, korespondują one z treściami zamieszczonymi w rozprawie i pozwalają na rozszerzenie wiedzy z omawianego zagadnienia jak i na weryfikację przekazywanych w rozprawie informacji. Zamieszczona literatura obejmująca 41 pozycji opisuje aktualny, światowy poziom wiedzy w kwestii radarów z sygnałami szumowymi jak i rozwiązań mających na celu modyfikację funkcji niejednoznaczności sygnałów szumowych. Dobrze udokumentowano literaturowo (poz. 42 ÷ 65) opis znanych metod obniżania poziomu korelacyjnych listków bocznych w tym metod optymalizacyjnych tworzenia takich sygnałów. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że Autor rozprawy przeprowadził w sposób właściwy analizę źródeł literaturowych i zapoznał się ze stanem wiedzy w dziedzinie radarów szumowych, co świadczy o posiadaniu przez niego dużego zasobu wiedzy na ten temat. Autor korzystał ze źródeł wszędzie tam, gdzie przedstawiał porównanie wyników własnych z wynikami publikowanymi na świecie czyniąc to w sposób jasny i przekonujący.

## **Pkt. 3.**

Autor rozprawy po zapoznaniu się z istniejącymi metodami kształtowania funkcji niejednoznaczności szumowych sygnałów radarowych (podrozdział 3.2) i po przeanalizowaniu ich zalet i wad z punktu widzenia radaru małego zasięgu z ciągłym sygnałem szumowym przedstawił własne rozwiązanie problemu maskowania słabych sygnałów odbitych od celów stacjonarnych jak i ruchomych przez silne sygnały pochodzące od obiektów usytuowanych w innych niż analizowana komórka odległościowo-dopplerowska. Wykorzystał do tego celu prezentowaną w literaturze przedmiotu ideę obniżenia wartości funkcji autokorelacji w ustalonym punkcie  $\tau_0$  polegającą na odjęciu od oryginalnego sygnału jego kopii przesuniętej w czasie o  $\tau_0$  i przeskalowanej zgodnie z wartością funkcji autokorelacji w punkcie  $\tau_0$ . Autor zdając sobie sprawę z ograniczoności tego rozwiązania dla radarów małego zasięgu z ciągłym sygnałem szumowym (konieczność obniżania wartości funkcji niejednoznaczności w wielu punktach odległościowych  $\tau_i$  przy poruszającym się celu) zaproponował metodę modyfikacji szumowego sygnału szumowego poprzez jego odpowiednią filtrację. Autor zastosował właściwe metody badawcze opierające się na sprawdzonych, potwierdzonych literaturowo metodach badania problemu minimalizacji listków bocznych funkcji niejednoznaczności

sygnałów szumowych pochodzących od obiektów stałych. W związku z powyższym przyjęte założenia co do konstrukcji autorskiego algorytmu filtracji szumowego sygnału sondującego radaru są jak najbardziej uzasadnione. W zastosowanej metodologii badawczej autor uwzględnił weryfikację praktyczną opracowanych algorytmów filtracji poprzez wykonanie serii pomiarów eksperymentalnych, których wyniki przedstawił w rozdziale 5. Wyniki te potwierdziły poprawność przyjętych założeń i poprawność pracy algorytmu filtracji sygnału sondującego ze względu na minimalizację listków bocznych funkcji niejednoznaczności.

#### **Pkt 4.**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Janusza Kulpy jest niewątpliwie rozprawą oryginalną. Oryginalność ta przejawia się przede wszystkim w tym że:

- opracowano i opisano nowatorską metodę syntezy radarowego sygnału losowego polegającą na filtracji za pomocą filtrów SOI realizacji gaussowskiego procesu losowego o równomiernym rozkładzie gęstości mocy,
- przedstawiono sposoby optymalizacji takiego sygnału ze względu na minimalizację listków bocznych funkcji niejednoznaczności dla celów ruchomych i systemów MIMO,
- zaproponowano sposób optymalizacji sygnału losowego ze względu na parametr PAR i kształt widma sygnału
- zaplanowano i przeprowadzono serie pomiarów eksperymentalnych, oraz porównano wyniki uzyskane na podstawie autorskiej metody Doktoranta z wynikami uzyskanymi za pomocą uznanego w literaturze światowej algorytmu filtru kratowego. Z przeprowadzonego porównania wynika, że filtracja zaproponowana przez Autora dla obiektów stałych dorównuje filtrowi kratowemu i go przewyższa jeżeli chodzi o zmniejszenie efektu maskowania w przypadku silnych ech od celów ruchomych.

Analizy i wyniki analiz przedstawione w rozdziale 4 stanowią samodzielny i oryginalny dorobek Autora rozprawy, które ponad to zostały udokumentowane szeregiem publikacji (poz. bibliografii od 66 do 73) z których szczególnie dwie (69 i 71) były publikowane w renomowanych czasopismach z listy A wykazu MNiSW (sumaryczny IF = 1.92). Rozprawa doktorska mgr. inż. Janusza Kulpy stanowi ważną pozycję wyraźnie rozszerzającą stan wiedzy i poziom techniki raportowany w literaturze światowej, a dotyczący tematyki minimalizacji listków bocznych funkcji niejednoznaczności sygnałów losowych. Analizując literaturę

światową stwierdzam, że publikacje w których autorem lub współautorem jest Doktorant stanowią jej znaczącą pozycję.

#### **Pkt 5.**

Rozprawa napisana jest językiem zwięzłym i czyta się ją z wyraźną przyjemnością, szczególnie jeżeli weźmie się pod uwagę złożoność zagadnienia naukowego. Rozdziały i treści w nich zawarte są prawidłowo dobrane i w sposób logiczny przedstawiają poszczególne etapy procesu badawczego jaki przeprowadził Doktorant. Zawierają więc wstęp w którym Autor definiuje swój problem naukowo-badawczy, następnie w rozdziale 2 wprowadza nas w tematykę radarów z sygnałem szumowym. W rozdziale 3 definiuje kryteria oceny sygnałów radiolokacyjnych niezbędne do przeprowadzenia procesu optymalizacji by w rozdziale 4 przedstawić autorską metodę optymalizacji sygnału szumowego. W rozdziale 5 natomiast przedstawia wyniki pomiarów eksperymentalnych oraz porównuje je z wynikami raportowanymi w literaturze światowej. W związku z powyższym wysoko oceniam edycyjną stronę pracy. Podsumowując, zwięzłość przekazywanych informacji, jasność formułowanych założeń i wyciąganych z analiz wniosków, jak również poprawność redakcyjna rozprawy nie budzą zastrzeżeń.

#### **Pkt 6.**

Rozprawa jako całość nie zawiera istotnych wad czy błędów merytorycznych. Daje się jednak zauważyć pewne mankamenty np. zaczynając już od tytułu rozprawy brakuje na wstępie wyraźnego, jednoznacznego zdefiniowania kryterium lub kryteriów optymalności sygnałów w radarze szumowym. Można oczywiście domyślić się, analizując tezę rozprawy, że jednym z nich jest minimalna wartość listków bocznych funkcji niejednoznaczności losowego sygnału sondującego. Dalej, zapoznając się z rozdziałem 3 poznajemy pozostałe kryteria. Pozostając jeszcze przy tytule rozprawy, przymiotnik *szumowy* odnosi się raczej do sygnału sondującego a nie do radaru, można to jednak zaakceptować mając na uwadze literaturę anglojęzyczną w której tego typu radary określane są mianem *Noise Radar*.

Autor dość często zamiennie używa pojęcia funkcji niejednoznaczności i funkcji korelacji. Nie popełnia w tych przypadkach błędu formalnego, gdyż pierwszego pojęcia używa zawsze przy ocenie sygnałów przeznaczonych do detekcji ech odbitych od celów ruchomych natomiast drugiego do detekcji ech odbitych od obiektów stałych lub wolno poruszających się. Nie mniej jednak, funkcją pozwalającą ocenić jakość sygnału sondującego, ze względu na zastosowanie systemu radarowego, jest funkcja niejednoznaczności nawet wtedy, gdy sprowadza się ona do funkcji autokorelacji czy korelacji wzajemnej.

Poniżej przedstawiam kilka zwrotów, które w mojej ocenie, mają charakter nieprecyzyjny lub żargonowy:

- str. 24, 17 wiersz od góry: chodzi tu raczej o wielkość *proporcjonalną* do energii sygnału
- str. 25, 2 wiersz od dołu: powinno być *liniowej modulacji częstotliwości*, podobnie jest na str. 45, wiersz 13 od dołu. Autor trochę przewrotnie, jak się wydaje, na str. 49 wyjaśnia tę sytuację przyjmując, że sygnał z liniową modulacją fazy to taki, którego faza w funkcji czasu zmienia się kwadratowo?
- wzór (2.16) jest słuszny dla przypadku, gdy temperatura szumów anteny podłączonej do odbiornika jest równa standardowej temperaturze szumów  $T_0 = 290$  K. Jeżeli natomiast temperatura szumów anteny różni się znacznie od  $T_0$  to wyliczona moc szumów ze wzoru (2.16) różnić się będzie o wartości rzeczywistej,
- w tabelicy 2.1. Doktorant podaje możliwy do uzyskania zysk integracyjny dla różnych poruszających się obiektów, gdzie zysk ten określa w tabeli jako  $Bt_p$  i jednocześnie stwierdza w 3 wierszu od góry na str. 31, że *zysk integracyjny nie zależy od pasma sygnału*. Stwierdzenie to wymaga wyjaśnienia.
- str. 32, wiersz 1 od góry, stwierdzenie: *średni poziom podłogi szumowej wynosi  $2Bt_p$* , z czym ni można się zgodzić, ponieważ poziom podłogi szumowej ma wymiar mocy lub wielkości do mocy proporcjonalnej a więc nie może równać się wielkości niemianowanej jaką jest  $2Bt_p$ . Prawdopodobnie autorowi chodziło tu o poziomy względne,
- str. 49, rys. 3.5 oznaczenia przebiegów w legendzie rysunku są takie same,
- str. 54, wiersz 10 od góry znajduje się stwierdzenie: *...i białym widmie gęstości mocy*. Określenie *biały* odnosi się raczej do opisu właściwości sygnału losowego np. szum biały co oznacza, że podobnie jak światło białe, ma on równomierny rozkład gęstości widmowej mocy. Użycie pojęcia białego widma zamiast równomiernego widma jest w mojej ocenie daleko idącym skrótem myślowym.

Wymienione słabe strony rozprawy nie zmniejszają jednak jej waloru naukowego oraz wartości uzyskanych z dobrze przeprowadzonego i udokumentowanego projektu badawczego zakończonego przedstawioną do recenzji dysertacją.

#### **Pkt 7.**

Stwierdzam z całą pewnością, że przedstawiona dysertacja ma bardzo duże znaczenie dla nauk technicznych. Od dawna wiadomym jest, że radary z sygnałami szumowymi mają wielki

potencjał jeżeli chodzi o ich zastosowania zarówno wojskowe jak i cywilne. W pierwszym przypadku ze względu na możliwość budowy radarów klasy LPI a w drugim ze względu na ortogonalność sygnałów sondujących. Istnieje jednak poważne ograniczenie związane z występowaniem tzw. poziomu *noise floor* w funkcji niejednoznaczności, który ogranicza czułość odbiornika korelacyjnego sygnałów szumowych. Przedstawiona przez autora metoda obniżenia tego poziomu, która jest efektywna dla detekcji obiektów stałych jak i ruchomych, zarówno w konfiguracji jedno- jak i wielonadajnikowej, stanowi istotne rozwiązanie problemu maskowania występującego w technice radarów z sygnałami szumowymi.

#### **Pkt 8.**

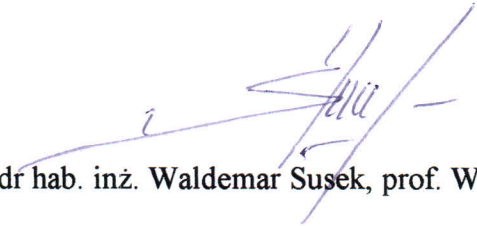
Rozprawę zaliczam do następującej kategorii:

- a) ~~nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~
- b) ~~wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~
- c) ~~spełnia wymagania~~
- d) **spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem**
- e) ~~wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie~~

#### **Podsumowanie**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Janusza Kulpy spełnia kryteria oryginalności rozwiązania problemu naukowego i umiejętności prowadzenia pracy badawczej sformułowane w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Doktorant wykazała się wysokim poziomem wiedzy teoretycznej, oraz wysokimi kompetencjami badawczymi. Wysoki poziom wiedzy oraz kompetencje badawcze potwierdza fakt, że Doktorant jest laureatem programu „Diamentowy Grant” z edycji 2012r. Warto podkreślić, że wynikiem prowadzonych przez Doktoranta prac są w pełni działające algorytmy filtracji sygnału sondującego obniżające listki boczne w funkcji niejednoznaczności. Algorytmy te są gotowe do zaimplementowania w systemach radarów z sygnałem szumowym.

Mając powyższe na uwadze wnoszę o dopuszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Janusza Kulpy do publicznej obrony.

  
dr hab. inż. Waldemar Susek, prof. WAT



**Politechnika Wroclawska**  
Wydział Elektroniki  
Wyrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

.....  
*miejsce pracy*

***KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY  
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ***

Tytuł rozprawy: **METODY SYNTEZY OPTYMALNYCH SYGNAŁÓW W RADARACH SZUMOWYCH**

Autor rozprawy: **mgr inż. Janusz Kulpa**

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)?

Idea radaru szumowego pojawiła się w 1959 roku, w artykule B. M. Horton **“Noise-modulated distance measuring systems”**, *Proceedings of the IRE*, vol. 47, nr 5, May 1959, ss. 821–828. Radary szumowe wykorzystują sygnały losowe lub pseudolosowe do oświetlania obiektów. Sygnały takie są szerokopasmowe zapewniają dużą czułość urządzeń odbiorczych przy małej gęstości widmowej mocy sygnału sondującego. Podstawowym elementem odbiornika jest układ korelacyjnej detekcji koherentnej sygnału echa odnoszonego do sygnału referencyjnego z nadajnika. Odbiorniki korelacyjne mogą być analogowe, analogowo-cyfrowe lub cyfrowe.

Radary szumowe mają kilka zalet w stosunku do klasycznych radarów impulsowych, impulsowo-Dopplerowskich i radarów z modulowaną FM falą ciągłą. Zastosowanie sygnału szumowego eliminuje niejednoznaczności określania odległości obiektu i różnicy częstotliwości Dopplera dla obiektów ruchomych. Niski poziom mocy sygnału sondującego zapewnia bardzo dobrą kompatybilność elektromagnetyczną z innymi systemami pracującymi na zbliżonych zakresach częstotliwości. Radary te są „niewidoczne” dla systemów przeciwdziałania elektronicznego.

Do wad należy bez wątpienia zaliczyć znacznie bardziej skomplikowane przetwarzanie sygnału w radarach szumowych w porównaniu do odpowiedniego radaru impulsowego. Wymagana jest duża moc obliczeniowa, co trudno zrealizować w czasie rzeczywistym, szczególnie dla radarów szerokopasmowych. Występują tutaj również problemy z przysłanianiem słabych sygnałów echa, pochodzących od dalekich obiektów, przez sygnały odbite od ziemi i otoczenia odbiornika radarowego.

Rozwój technologii cyfrowych układów zintegrowanych w elektronice, opracowanie szybkich algorytmów przetwarzania sygnałów oraz zwiększenie mocy obliczeniowych systemów informatycznych spowodował wzmożone zainteresowanie radarami szumowymi, obserwowane od końca XX wieku. Rocznie ukazuje się kilkadziesiąt artykułów na temat koncepcji budowy, analizy i metod przetwarzania sygnałów w radarach szumowych

W świetle tego należy uznać za bardzo „na czasie” oraz użyteczne wybranie tematu Rozprawy Doktorskiej oraz zamiar udowodnienia postawionej tezy:

- „*Możliwe jest ograniczenie efektu maskowania w systemach radarów szumowych poprzez zastosowanie sygnału sondującego o obniżonych wartościach funkcji niejednoznaczności w zadanym obszarze przesunięć czasowych i częstotliwościowych*”,
- *z rozszerzeniem tych możliwości na systemy z wieloma nadajnikami i wieloma odbiornikami.*

Praca ma w zasadzie charakter teoretyczny, część eksperymentalna, mająca potwierdzić słuszność postawionej tezy oraz wyniki symulacji komputerowych, przedstawiona na 17 stronach, stanowi zaledwie 15 % objętości rozprawy.

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

W bibliografii zamieszczono 75 pozycji z literatury światowej i krajowej, w tym 10 pozycji opisujących wyniki prac Autora i Zespołu. W przedstawionym wykazie można zauważyć trwające ponad 10 lat zainteresowanie Autora wybraną tematyką.

Mając na uwadze liczbę publikacji na temat radarów szumowych pojawiających się w literaturze światowej nie jest to na pewno obraz pełny. Brakuje zwłaszcza pozycji, można by rzec „sztandarowej”, za jaką należy uznać książkę profesora **Krzysztofa Kulpy** „**Signal Processing in Noise Waveform Radar**”, **Artech House, Boston, MA, USA, 2013**. Książka ściśle dotyczy tematyki Rozprawy, wiele elementów z niej zaczerpnięto, a nie powołano się na nią i nie wykazano w wykazie?!

Można było jeszcze powołać się, oprócz [28], na inną **pozycję Sune R.J. Axelsson** „**Noise Radar For Range /Doppler Processing And Digital Beamforming Using Low-Bit ADC**”, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, VOL. 41, NO. 12, December 2003, pp. 2703-2720**, która też dotyczy analizy sygnałów w radarze szumowym. Nie wyczerpuje to oczywiście listy „nieobecnych”.

Praca jest napisana poprawnym językiem, ale czasami „skażonym” żargonem zawodowym (patrz Pkt. 6), z właściwym nawiązaniem do istniejącego stanu wiedzy. Ale, na leży zwrócić uwagę, że Autor w wielu miejscach swojej monografii nie zawsze cytuje źródła, skąd zaczerpnął: wykresy (np. Rys. 3.1, 3.4, 3.5, 4.14, 5.21, ...), wzory ( w Rozdz. 2, 3 i 4), określone pojęcia, tak jakby wszystko „narodziło się” w Jego głowie.

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

Autor w kolejnych rozdziałach przedstawia krótki rys historyczny rozwoju radarów szumowych, ich parametry, zjawiska towarzyszące odbiorowi sygnałów echa, stosowane miary dla oceny przydatności stosowanych sygnałów sondujących oraz znane metody syntezy optymalnych sygnałów pseudolosowych stosowanych w radarach szumowych do sondowania przestrzeni.

Rozdział 4, na 26 stronach (24 % objętości Rozprawy) przedstawia opis i zastosowanie metod kształtowania szumowych sygnałów losowych z zastosowaniem filtrów o skończonej odpowiedzi dla uzyskania oczekiwanych kształtów funkcji korelacji i funkcji niejednoznaczności, zapewniających eliminację ech stałych od niepożądanych obiektów w sygnale odebrany. Zaproponowane metody stanowią oryginalny wkład autora w opracowaniu metod formowania szumowych sygnałów sondujących, zapewniających funkcje korelacji o pożądanym niskim poziomie listków bocznych.

Zagadnienia te wiążą się bezpośrednio usprawnieniem pracy radaru szumowego i doprowadzeniem do jego realizacji w czasie rzeczywistym.

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?

Po dokonaniu, w rozdziale 3, przeglądu znanych metod tworzenia sygnałów o niskim poziomie korelacyjnych listków bocznych Autor, w rozdziale 4, wybrał metody optymalizacji szumowych sygnałów sondujących za pomocą odpowiednio zaprojektowanych filtrów, realizowanych softwarowo, zerujących (minimalizujących) wybrane punkty (przedziały) funkcji niejednoznaczności.

Metoda ta polega na odjęciu od oryginalnego sygnału jego kopii przesuniętej o  $m_0$  próbek ( $m_0$  jest punktem, w którym minimalizujemy funkcję autokorelacji). Zagadnienie to wiąże się z rozwiązywaniem układu równań kwadratowych z dwiema niewiadomymi współczynnikami filtru. Przy

wielu punktach  $m_k$  rozwiązanie to staje się bardzo skomplikowane. Autor zaproponował rozwiązania uproszczone, wynikające z pominięcia pewnych składników (wzory (4.6) i (4.8), (4.13), (4.14)). Parametry funkcji autokorelacji i miara  $MWISL$  (ważony poziom listków bocznych) zostały przedstawione, odpowiednio na Rys. 4.2 i Rys. 4.3. Poziom listków bocznych funkcji autokorelacji jest poniżej 70 dB dla 1-szej iteracji rozwiązania  $i < 160$  dB dla 2-giej. I tutaj pojawiają się wątpliwości recenzenta, po co zwiększać liczbę iteracji powyżej 2, dających  $MWISL < -150$  do  $-350$  dB (rys. 4.3, Rys. 4.4), skoro w praktyce osiągalne poziomy listków bocznych rzędu  $-50$  do  $-85$  dB są szczytem możliwości (rys. 5.4, Rys. 5.10) ? Przy największej zakładanej liczbie punktów optymalizacji  $M_L = 1000$ , poziom  $-150$  przy 5 - iteracjach.

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

Tak wykazał się. Praca jest napisana i zredagowana w sposób przejrzysty, wskazując dobrą znajomość i swobodę w poruszaniu Autora się w rozważanej tematyce.

Przedstawiona monografia, na **110** stronach, podzielonych na **6**-rozdziałów, z **2**-dodatkami, wykazem skrótów i najważniejszych symboli, została zilustrowana **64** rysunkami i **2** tabelami oraz zakończona wykazem literatury z **75** pozycjami. Doktorant wykazał **10** własnych publikacji: **7** Konferencyjnych ( w tym **2** jedno autorskie) oraz **3** w czasopismach zagranicznych (w tym **2** jedno autorskie).

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

Autor nie uniknął błędów, niejasności, czy niedoskonałości edycyjnych pracy:

- a) W streszczeniu pisze:

- „ Silne echa w radiolokacji powodują efekt maskowania ech ...”,
- „ Zastosowanie sygnałów o obniżonym poziomie listków bocznych łagodzi ...” – jakich listków?
- „... na podstawie rzeczywistych pomiarów ...” – a czy są nierzeczywiste?

- b) W spisie treści, punkt 5 „Pomiary rzeczywiste” – j.w.

- c) Wykaz stosowanych skrótów:

- „przetwornik cyfrowy-analogowo” – powinno być cyfrowo-analogowy
- „radar ze zmodulowaną falą ciągłą” – powinno być modulacja częstotliwości fali ciągłej
- „ISL -miara całkowitego poziomu ...” powinno być ISL - całkowity poziom listków bocznych
- Podobnie LFM -, LPD -, LPI -, OFDM -, i inne – tłumaczymy akronim bez komentarza
- Można dodać brakujące skróty: MultiCAO, WeCAN

- d) Wykaz najważniejszych symboli

- Lepiej się korzysta, gdy jest podany w porządku alfabetycznym
- „częstotliwość nośna sygnału” – powinno być częstotliwość fali nośnej sygnału
- „przesunięcie w częstotliwości Dopplera” – powinno być: częstotliwość Dopplera, będąca różnicą częstotliwości fali wysyłanej przez źródło oraz fali odbitej od obiektu poruszającego się względem źródła
- „ ... znormalizowane do cz. próbkowania” – powinno być: znormalizowane względem częstotliwości próbkowania
- Podobnie w  $m$ -,  $m_{ML}$ -,  $v_{ML}$  (w k. – powinno być: względem (?) komórek ...
- $\sigma$  - litera alfabetu greckiego, która w Rozprawie ma wiele znaczeń: skuteczna powierzchnia odbicia (np. RCS), moc sygnału echa, moc szumów, tak jakby brakowało innych symboli.
- „zysk anteny nadawczej”: - powinno być: zysk energetyczny anteny nadawczej

- „standardowa temperatura” – temperatura standardowa
  - $Sa(.)$  - można dodać do wykazu
- e) Rozdział 1
- „projektowania sygnałów” – nie brzmi to dobrze
  - „eksperymenty wykonano na przestrzeni ostatnich 6 lat...” – j.w.
- f) Rozdział 2
- Brakuje odniesień [...] do literatury przy wzorach, opisach Rozdz. 2
  - Str. 16 „sygnał losowy uzyskuje się najczęściej za pomocą elementu półprzewodnikowego...” - jest to jakiś skrót myślowy
  - „ ... modulowany do częstotliwości nośnej ...” , powinno być: moduluje (amplitudowo /kątowo,..) falę o częstotliwości nośnej, albo moduluje amplitudę/fazę/częstotliwości fali nośnej
  - Str. 17 „ Często używa się sygnałów unimodularnych...” – jakie to sygnały?
  - „... o jednostkowej amplitudzie zespolonej i równomiernym rozkładzie fazy...” – jeśli amplituda to chyba już rzeczywista, przy reprezentacji wielkości zespolonej w postaci  $A e^{j\varphi}$
  - „... sygnały o rozkładzie Rayleigha amplitudy, które dobrze modelują analogowy szum termiczny” - ?
  - „Sygnał nadawany wokół pewnej pulsacji środkowej  $\omega_c$  jest zdudniany z ...” – chyba jest mieszany z
  - „...dyskryminator liniowy...” - ?
  - „ ... różnica chwilowej częstotliwości nadawczej i odbiorczej jest proporcjonalna do odległości od obiektu” – powinno być .... prędkości obiektu
  - Str. 18 „ zapisane na pamięci ROM” – powinno być ... w pamięci..
  - „ ... zmierzono profile odległościowe samochodów ...” - ?
  - Str. 19 „ ... generatora sygnałów arbitralnych ...” – chyba ... losowych ...
  - Str. 20 „...przeprowadzone...” powinno być: ... przeprowadzona ...
  - „Najpopularniejszą architekturą radaru ...” – czy radar ma architekturę?
  - Str. 21 – w celu łatwiejszego zrozumienia dalszych wywodów, proponuję umieścić Rys.1. Struktura radaru szumowego, z artykułu K. Kulpa „**Trudno wykrywalne radary szumowe**”, Biuletyn WAT, v. LV, no. 2, 2006, str. 111-119
  - „... poprzez przemodulowanie sygnału  $x_T(t)$ , określonego w paśmie podstawowym, na częstotliwość nośną  $f_c$ ” – powinno być: jest zmodulowaną sygnałem  $x_T(t)$  falą nośną o częstotliwości  $f_c$
  - Równanie (2.1) nie przedstawia „Sygnału w paśmie podstawowym” – mnożone  $e^{-j2\pi fct}$
  - „ Składową transwersalną...” - ? - W astronomii prędkość transwersalna nazywana bywa prędkością tangencjalną (styczną).
  - Str. 22 „...  $f_{di}$  uwidocznione w członie eksponencjalnym wzoru (2.1) - ?
  - „... tzn. jej ściśnięcie albo rozszerzenie względem sygnału ...” - ?
  - „ ... prędkość obiektu jest prawie stała ...” - ?
  - We wzorze (2.5) w wykładniku funkcji  $e^{j(\cdot)}$  brakuje „-”, powinno być:  $e^{-j2\pi fdt}$
  - Str. 23 „... tak jak zostało to pokazane na Rys. 2.3....” – ale nie zostało pokazane!

- Str. 24 „Na rys. 2.4 przedstawiono przykładową funkcję niejednoznaczności ...” – warto by to poprzedzić postacią analityczną (wzorem)
- Str. 25 „Widoczny ...” – raczej: widoczne
- „... widoczne są deterministyczne listki boczne o kształcie funkcji  $S_a(\cdot)$  ...” nie widać tego na Rys. 2.4 (może pokazać przekrój?), warto w tym miejscu wyjaśnić sens ujemnych wartości odległości i prędkości względem radaru. Obiekt jest dalej bądź bliżej, porusza się szybciej lub wolniej. Może się oddalać lub zbliżać.
- Wykresy na rys. 2.4, 2.5, 2.6 nie mają jednostek przy słupkach kolorów
- „...liniowej modulacji fazy (LFM)...” – powinno być: ... modulacji częstotliwości ...
- „... o ile jest mniejsza niż  $v_{max}=\pm 93,75$  m/s – skąd znak „-„ ? - ze wzoru (2.11) to nie wynika
- Str. 28 „... pomiarów rzeczywistych ...” - ?
- Str. 29 we wzorze powinno być  $\lambda_c$  długość fali nośnej i pod nim legenda.
- Str. 31 „... podłogi szumowej ...” – zbyt dosłowne tłumaczenie „noise floor”, powinno być raczej „poziomu szumów”.
- Str. 32 na rys. 2.8 do 2.11 „F. autokorelacji ...” – powinno być: funkcja autokorelacji. Czy przedstawione funkcje reprezentują postacie różnych sygnałów pseudolosowych zastosowanych w radarze szumowym, analizowanym i zbudowanym przez Autora z Zespołem?
- Str. 33 „...wtedy wtedy ...” – o jedno za dużo.
- Str. 34 „... sygnał przecieku międzyantenowego ...” - raczej: sprzężenia elektromagnetycznego, sprzężenia wzajemnego anten
- „... emitują sygnał wzajemnie ortogonalny ...” – powinno być: sygnały wzajemnie ortogonalne
- „Konfiguracja MIMO” – w telekomunikacji używa się tego terminu dla systemów wykorzystujących emisję wielu sygnałów i ich odbioru wieloma antenami (rodzaj odbioru zbiorczego przestrzennego), w których, po wyznaczeniu funkcji transmitancji każdej z par anten N-O (macierz transmitancji) i późniejszym przetwarzaniu sygnałów odbiera się sygnał o podwyższonych parametrach S/N [dB], przepływności C [bit/s] i.in. W zastosowaniu dla radarów, dla odróżnienia od rozwiązań w telekomunikacji, nazywałbym takie rozwiązanie raczej „systemami z wieloma antenami nadawczymi i z wieloma odbiorczymi”.
- Str. 37 „... metodą usuwa efektu ...” – powinno być: ... usuwania ...

#### g) Rozdział 3

- W całym rozdziale brak powołań [.] się na literaturę przy wprowadzaniu wzorów, co pozwoliłoby ustalić które są własne, wyprowadzone i/lub zmodyfikowane przez Autora?!

- Str. 39 - „Projektowanie optymalnych sygnałów ...” – czy nie lepiej by brzmiało „Synteza optymalnych sygnałów ...”, bo jest tak w rzeczywistości, że Autor poszukuje sygnał, które zapewnią uzyskanie oczekiwanej postaci funkcji autokorelacji, tzn. eliminacji niepożądanych ech.
- Str. 43 - we wzorze (3.6) pojawia się funkcja  $\chi(\cdot)$  bez opisu
- We wzorze (3.8)  $k$  i  $l$  mają ten sam zakres  $k, l=1$  do  $k, l=K$  - czy tak?
- Str. 49 źródło pochodzenia wykresów na Rys. 3.4 i 3.5. Jak należy rozumieć  $<-250$  dB poziom lisków bocznych funkcji autokorelacji, w znaczeniu praktycznym?
- „ ... czy to .... czy ...” – po co „czy”?
- Str. 51 – „ ...  $n$  i  $-n$  ....  $n$  i  $-n$ .” – te ostatnie niepotrzebne.
- Str. 52 – „Składa się on z następujących kroków ...” – niejasne te kroki, a po za tym - „wyplaszczenie „ ?
- „ ... transformaty Fouriera i mnożenia. „ - co jest mnożone?

#### h) Rozdział 4

- Str. 54 „...sygnałem wejściowym był sygnał o zadanym rozkładzie amplitudy i białym widmie gęstości mocy.” – czy to jest możliwe? Widmo równomierne („białe”) ma jedynie sygnał o postaci dystrybucji delta-Dirac’a w dziedzinie czasu.
- Str. 58 we wzorze (4.8) „  $R_x(m-i)$ ” – powinno być:  $R_x(m_0+i)$
- Str. 60 – czy dla pierwszej iteracji nie ma listka głównego (Rys. 4.2)?
- „Nasycenie poprawy w okolicy  $-350$  dB wynika z dokładności numerycznej...” oraz Rys. 4.2, 4.3 i 4.4 -Jaki ma sens pokazywanie zakresu do  $-350$  dB  $R_y$  i  $MWISL$  , z praktycznego punktu widzenia? Czy można to osiągnąć eksperymentalnie, w modelach fizycznych?
- Str. 66 – Rys. 4.6 i 4.7 – granice między prostokątnymi obszarami są „ostre”, przejście z niebieskiego w zielony, ale w obu obszarach pojawiają się „punkty” o różnych odcieniach kolorów – jak to należy rozumieć? To samo dotyczy Rys. 4.11 a,b,c,d. 4.15, 4.16, 4.17
- Str. 74 – Rys. 4.12 – podobnie jak wcześniej, jaki ma sens pokazywanie  $MWISL$  w zakresie do  $-400$  dB?
- Rys. 4.13 – co oznaczają poziome równoległe linie (czarne, niebieskie)? „Zbliżenie” na Rys. 4.13b ma inne poziomy (PAR $>1.001$ ) tych linii niż na Rys. 4.13a (PAR $>1,2$ ).
- Str. 76 – pojawia się pojęcie „okna Hanna” i wykres na Rys. 4.14 – bez określenia, opisu, źródła [...] literaturowego?! Jak je uzyskano w symulacjach i w eksperymencie pomiarowym?
- Str. 78 – na Rys. 4.18 pojawiają się skoki funkcji  $R_y(\cdot)$  dla  $m<500$  i  $m>1000$  – dlaczego?

i) Rozdział 4

- Str. 81 – „Pomiary rzeczywiste” – a czy mogą być nierzeczywiste – proponuje „Weryfikacja eksperymentalna na poligonach pomiarowych”
- „sygnałów arbitralnych” – może raczej: sygnałów losowych (pseudo-)
- Str. 82 – Rys. 5.1 – co jest, czym w stosunku do schematu blokowego na Rys. 2.3?
- „Rys. 5.2. Widok na scenę pomiarową” jest za mały, nieczytelny, czy „scena” to właściwe określenie?
- Str. 83 – „w przypadku prostokątnego widma sygnału listki boczne przybierają kształt funkcji  $Sa(\cdot)$ ” – widmo jest prostokątne czy funkcja czasu sygnału sondującego?
- „... po filtracji kratowej ...” – a może by wspomnieć wcześniej o tym, na czym polega taka filtracja, jakie ma właściwości, sposób realizacji?
- Str. 84 – wyniki eksperymentu i symulacji to dwa niezależne procesy. Nie można ich porównać. Poziomy listków bocznych z -250 dB w symulacjach urealniła praktyka i w rzeczywistości osiągają poziomy -40, -70 dB.
- Ale inny aspekt przedsięwzięcia Autora jest ważniejszy - aby było możliwe porównanie, weryfikacja eksperymentalna, modele symulacyjne powinny reprezentować „rzeczywistość”, zaplanowany scenariusz pomiarów, sytuacje odzwierciedlające geometrię poligonu i lokalizacje obiektów pomiarowych, parametry ruchu. Dotyczy to obu eksperymentów: na terenie kampusu Uczelni oraz na Zalewie Zegrzyńskim. Autor tak nie postąpił.
- Str. 86 – Rys. 5.5 – jak się ma do schematu na rys. 2.3?
- Str. 88 – na Rys. 5.10 wykres szumu optymalizowanego (czerwony) ma „skok” przy odległości 2500 m (?)
- Wyniki dla konfiguracji MIMO (według Recenzenta „dla konfiguracji z wieloma antenami nadawczymi i odbiorczymi”) na rys. 5.13, 5.14, 5.15 są prawie identyczne (?) dla poszczególnych przypadków – czy tak? Jak jest przydatność takiego pomiaru?
- Str. 94 –m Autor stwierdza „Uzyskane wyniki są spójne z wynikami symulacyjnym w poprzednim rozdziale (por. rys. 4.13) - z porównania wynika, że nie są spójne (zbliżone)! Co Autor uznaje za „spójność” wyników?
- Str. 96 – na Rys. 5.21 opis wykresów jest zamieniony – powinno być: niebieska linia - Hann, czerwona – prostokątny
- Str. 98 – czy można porównać wyniki na Rys 5.24 (brak opisu osi poziomej) i Rys. 4.18?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Materiał opracowany przez Doktoranta stanowi istotną wskazówkę dla projektantów radarów szumowych, jak dobierać w nadajnikach radarów szumowych charakterystyki filtrów kształtujących sygnały szumowe sondujące przestrzeń dla zminimalizowania maskującego wpływu odbić od obiektów rozpraszających położonych w małej odległości od radaru.

Wydaje się to być problem o znaczeniu kluczowym dla zastosowania tego typu radarów. Należy kontynuować prace w celu doprowadzenia do stanu realizowalności radaru z przetwarzaniem sygnałów w czasie rzeczywistym.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:
- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
  - b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
  - c) spełniająca wymagania
  - d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem**
  - e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Wskazane w recenzji uwagi i niedociągnięcia redakcyjne, edycyjne i inne nie umniejszają wkładu Autora oraz inwencji w opracowaniu interesujących wskazówek, pozwalających właściwie określać parametry filtrów stosowanych w odbiornikach radarów szumowych dla minimalizacji efektów maskowania przez sygnały odbite od obiektów położonych w bliskiej odległości od radaru.

Rozprawa doktorska pt. **“METODY SYNTEZY OPTYMALNYCH SYGNAŁÓW W RADARACH SZUMOWYCH”**, autorstwa mgr. inż. **Janusza Kulpy** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim z wyraźnym nadmiarem i może być dopuszczona do publicznej obrony.



.....  
*podpis*