



## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Tytuł rozprawy: Non-stationary noise estimation in accelerated parallel MRI data**

**Estymacja niestacjonarnego szumu w przyspieszonym równoległym obrazowaniu metodą rezonansu magnetycznego**

**Autor rozprawy: mgr inż. Tomasz Pięciak**

**Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Piotr Augustyniak**

**Promotor pomocniczy: Dr Santiago Aja-Fernandez**

Badania rezonansem magnetycznym (MR) są rutynową procedurą kliniczną w wielu typach schorzeń. Szeroko stosowane są techniki przyśpieszające obrazowanie w rezonansie magnetycznym. Skrócenie czasu akwizycji obrazów skłania do podjęcia prac nad technikami równoległymi. Istotnym czynnikiem pogarszającym jakość obrazu jest obecność szumów. Lokalna ocena jakości obrazu może mieć istotny wpływ na ocenę wiarygodności diagnostyki. Prace nad analizą przestrzennego rozkładu szumu prowadzone są od szeregu lat w różnych ośrodkach badawczych. Szczególnie istotne jest to w zaawansowanych technikach diagnostycznych, m.in. obrazowaniu tensora dyfuzji.

Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje metodę wyznaczania map szumu niestacjonarnego w obrazach rezonansu magnetycznego zarejestrowanych w sekwencjach SENSE i GRAPPA. Proponowana estymacja szumu realizowana jest wyłącznie na podstawie analizy pojedynczego przekroju. Podjętą w rozprawie tematykę uważam za w pełni uzasadnioną, interesującą i aktualną dla współczesnych prac w obszarze technik obrazowania medycznego.

Autor sformułował następującą tezę pracy:

„Maps of non-stationary noise generated by parallel MRI reconstruction can be accurately estimated from a single acquisition without any additional information needed.”

Praca obejmuje 160 stron podzielonych na 7 rozdziałów, poprzedzonych wykazem najważniejszych skrótów i oznaczeń oraz zakończonych załącznikiem oraz spisem literatury,

rysunków i tabel. Wykaz literatury jest obszerny, liczący 13 stron. Pozycje bibliograficzne nie zostały ponumerowane. Praca jest napisana w języku angielskim.

Rozdział pierwszy, będący wstępem, wprowadza w problematykę modelowania szumów niestacjonarnych w obrazach rezonansu magnetycznego oraz dokonuje przeglądu literatury. Po sformułowaniu tezy pracy oraz wyszczególnieniu własnych publikacji, ostatni podrozdział zawiera krótkie streszczenie kolejnych rozdziałów.

Rozdział drugi przedstawia fizyczne podstawy działania rezonansu magnetycznego, kolejne etapy rekonstrukcji danych z wykorzystaniem technik single-coil, multiple-coil. Szczególną uwagę Autor zwraca na techniki SENSE i GRAPPA, pozwalające na akwizycję równoległą.

Rozdział trzeci omawia modele statystyczne szumu w przestrzeni  $k$  oraz  $x$ , ze szczególnym uwzględnieniem niestacjonarnego szumu Riciana oraz szumu o rozkładzie  $nc-\chi$ . Doktorant rozpoczął opis od prostego modelu dla single-coil uogólniając go dla technik wykorzystujących akwizycję równoległą.

Rozdział czwarty stanowi przegląd literatury związanej z estymacją szumów niestacjonarnych w rezonansie magnetycznym. Porównano techniki estymacji szumu dla danych o rozkładzie Riciana,  $nc-\chi$  oraz Gaussa, uzasadniając to ich przydatnością w estymacji zakłóceń przestrzennych w technikach SENSE i GRAPPA rezonansu magnetycznego.

Rozdziały piąty i szósty należą do głównych rozdziałów opisujących metodę estymacji szumu niestacjonarnego w przyspieszonym równoległym obrazowaniu z wykorzystaniem rezonansu magnetycznego. W rozdziale piątym opisano metodę automatycznego wydzielenia przestrzennie-zależnego wzorca szumu. Przedstawiono kolejno metodę VST, wyznaczenie nowej transformacji dla stacjonarnego rozkładu Riciana, wykorzystanie VST dla niestacjonarnego rozkładu Riciana oraz estymację szumu z wykorzystaniem VST. Opisano środowisko testowe, w którym wykorzystano syntetyczne oraz rzeczywiste obrazy rezonansu magnetycznego. Wyniki porównano z innymi metodami.

Rozdział szósty, analizuje niestacjonarny szum o rozkładzie  $nc-\chi$ , występujący w obrazach wykorzystujących równoległą technikę akwizycji GRAPPA. Wyprowadzono asymptotyczną transformatę VST dla rozkładu  $nc-\chi$ . Jest ona podstawą metody estymacji, zależnego od sygnału, niestacjonarnego szumu o rozkładzie  $nc-\chi$ . Opisano środowisko testowe, w którym wykorzystano obrazy syntetyczne oraz rzeczywiste dane GRAPPA MRI. Przedstawiono wykonane eksperymenty statystyczne. Wyniki porównano z innymi metodami, wykorzystując obrazy syntetyczne T1-, T2-, i PD-zależne. Rozdział kończy podsumowanie i wnioski.

Rozdział siódmy podsumowuje wyniki pracy, wskazując na istotne osiągnięcia naukowe. Wskazuje na główne założenie, jakie towarzyszyło realizacji rozprawy, a którym było opracowanie mapy szumu przestrzennego, uzyskanego z pojedynczego obrazu MR.

Rozprawa zawiera elementy, które uznać można jako wkład Doktoranta w badania nad analizą szumów niestacjonarnych w rezonansie magnetycznym. Zaliczam do nich:

1. udoskonalenie metody stabilizacji wariancji VST (variance-stabilizing transformation) wykorzystanej dla stacjonarnego rozkładu Riciana, umożliwiającej poprawę (w stosunku do modelu Foi) stabilizacji stosunku sygnał/szum. Proponowana metoda pozwala na estymację szumu w oparciu o pojedynczy przekrój bez konieczności wyznaczenia regionów tła i obiektu. Metoda może zostać wykorzystana dla obrazów T1-, T2- i PD-zależnych a wykorzystana filtracja homomorficzna zwiększa jej odporność na granulację tekstury obrazu. Rzetelnie przeprowadzono weryfikację zaproponowanej modyfikacji. Wykorzystano do tego celu obrazy syntetyczne, obrazy fantomów oraz obrazy rzeczywiste. Porównano estymatory szumu dla danych syntetycznych oraz mapy przestrzennego rozkładu szumu dla 15 różnych metod. Autor przeprowadził także analizę złożoności obliczeniowej oraz czasu wykonywania poszczególnych algorytmów.
2. propozycję VST opracowaną dla szumu niestacjonarnego o rozkładzie  $nc-\chi$  oraz testy wykonane dla danych zarejestrowanych techniką GRAPPA. Podjęto istotną kwestię związaną z oszacowaniem liczby cewek odbiorczych będącej parametrem w przypadku zastosowania rozkładu  $nc-\chi$ . Opracowano model numeryczny poprawiający asymptotyczną stabilizację dla niskiego poziomu stosunku sygnał/szum. Podobnie jak w przypadku niestacjonarnego rozkładu Riciana, przeprowadzono szczegółową ocenę opracowanej metody. Rozpoczęto od eksperymentów statystycznych, weryfikujących gaussowski charakter analizowanego szumu. Następnie wykonano badania eksperymentalne z wykorzystaniem danych symulowanych T1-, T2- i PD-zależnych.

Rozprawa doktorska jest bardzo obszerna, zawierająca bogaty opis matematyczny, wskazujący na dobrą znajomość przez Autora teoretycznych podstaw generowania obrazów w różnych protokołach akwizycyjnych rezonansu magnetycznego. Na szczególną uwagę zwracają techniki przyspieszonej akwizycji równoległej oraz związane z nią problemy szumów niestacjonarnych. Autor zadbał także o szczegółową weryfikację opracowanych metod, wykorzystując do tego celu zarówno eksperymenty statystyczne jak i dane syntetyczne i obrazy rzeczywiste T1-, T2- i PD-zależne.

Lektura rozprawy nasuwa także pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym, które nie wpływają na pozytywną ocenę całości pracy badawczej przedstawionej w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

1. Motywując cel pracy Autor wskazuje na możliwość redukcji szumu w obrazie MR z wykorzystaniem opracowanej metody. W rozprawie nie znalazłam potwierdzenia tego sformułowania. Proszę o pokazanie (w czasie obrony) przykładu zastosowania

wyznaczonej mapy szumu do redukcji szumu na obrazie MR. Czy możliwe jest pokazanie obrazu zaszumionego oraz jego mapy szumu i obrazu ze zredukowanym szumem.

2. Proszę o wyjaśnienie możliwości wykorzystania wyników analizy szumu w procesie segmentacji obrazów (str. 12). Jakie byłyby ograniczenia w zastosowaniu opracowanej przez Doktoranta metody.
3. Czy w analizie porównawczej wykorzystano oprogramowanie autorów, czy własną wersję, opracowaną np. na podstawie literatury?
4. Autor wielokrotnie wykorzystuje liczbę mnogą w określeniach takich jak: „our prosal” , „we introduce”, „we confirm” (str. 66), „we adopt”, „we derive” (str. 102) i wielu innych miejscach rozprawy. Sugeruje to, że praca jest wieloautorska i nasuwa pytanie o wkład Doktoranta w opracowane i zweryfikowane metody.
5. Uwagi edytorskie. Praca jest interesująca dla dwóch grup specjalistów. Pierwszą reprezentują naukowcy, zajmujący się statystyką i zainteresowani matematycznymi podstawami teorii szumów niestacjonarnych. Druga grupa, to specjaliści z zakresu komputerowego wspomagania diagnostyki obrazowej, zainteresowani wynikami pracy oraz ich wpływem na diagnostykę kliniczną oraz komputerowe przetwarzanie i analizę obrazów. Oba wątki są w rozprawie przedstawione naprzemiennie. Bardziej przyjazna dla czytelnika byłaby struktura Autoreferatu, który omawiałaby dokonania Doktoranta bez wnikania w niuanse matematyczne i załączników, którymi byłyby publikacje prezentujące szczegóły metodologiczne.

## Podsumowanie

Mgr inż. Tomasz Pięciak posiada odpowiednią wiedzę z zakresu technik akwizycji obrazów rezonansu magnetycznego. Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz stanowi istotny wkład w dziedzinę modelowania szumu niestacjonarnego w technikach przyspieszonej akwizycji równoległej. Zawarta w pracy metodologia badań doprowadziła do udowodnienia tez pracy oraz realizacji postawionego celu, jakim było opracowanie metody estymacji map szumu niestacjonarnego w obrazach rezonansu magnetycznego, wykorzystującego akwizycję równoległą. Sformułowany problem badawczy i jego realizacja skłaniają do postawienia wniosku o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Pięciaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

