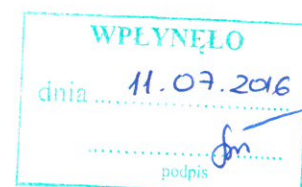


Łódź, 05 lipca 2016

dr hab. inż. Michał Strzelecki, prof. nadzw.
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
90-924 Łódź, Wólczańska 211/213



Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Pięciaka
"Non-stationary noise estimation in accelerated parallel MRI data"
przygotowanej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, promotor prof. dr hab. Piotr
Augustyniak, kopromotor dr Aja-Fernández, Universidad de Valladolid, Hiszpania

1. Wstęp

Przedmiotem niniejszej rozprawy jest zagadnienie modelowania oraz estymacji map szumu w obrazach tomografii rezonansu magnetycznego (RM) uzyskiwanych za pomocą wybranych równoległych protokołów akwizycji. Temat pracy uważam za ważny i dobrze uzasadniony ze względu na stale rosnące znaczenie badania RM w diagnostyce obrazowej. Zaawansowane technologicznie, współczesne skanery rezonansu magnetycznego zapewniają nie tylko wysoką rozdzielczość obrazów, ale również oferują dużą liczbę sekwencji obrazowania umożliwiających szczegółową ocenę wizualizowanych narządów wewnętrznych pod względem anatomicznym oraz fizjologicznym. Opracowanie metod estymacji szumu jest bardzo istotnym elementem przetwarzania pozyskanych obrazów RM, ponieważ prowadzi to w efekcie do wiarygodniejszej i rzetelniejszej diagnozy. Przedstawiony problem badawczy jest również trudny i bardzo ambitny; mimo wielu prowadzonych badań jego zadowalające rozwiązanie nie zostało do tej pory znalezione. Z tym większą satysfakcją mogę stwierdzić, że Doktorant był w stanie zaproponować własny, znaczący wkład do tej dziedziny.

Cele pracy są zdefiniowane w sposób jasny i przekonujący. Podobna uwaga dotyczy postawionej przez Autora tezy rozprawy. Jedynie tytuł pracy, moim zdaniem, nie jest sformułowany w pełni precyzyjnie: same dane jako takie nie są ani przyspieszone, ani równoległe. To sekwencje obrazowania (protokoły akwizycji) wykorzystywane przez Autora zapewniają szybką i równoległą akwizycją danych. Sądzę, że tytuł powinien być sformułowany np. tak: "Non-stationary noise estimation in MRI data acquired by accelerated parallel image sequences".

2. Zawartość rozprawy

Formalna struktura rozprawy jest poprawna, tekst jest napisany w sposób przejrzysty i poprawny stylistycznie. Jest ona podzielona na dwie części. Pierwsza z nich (rozdziały 2, 3 i 4) stanowi wprowadzenie do obrazowania z użyciem tomografii RM, głównie skupiając się na powszechnie obecnie stosowanych sekwencjach obrazowania SENSE i GRAPPA, które dzięki wykorzystaniu cewek wielokanałowych w skanerach RM umożliwiają równoległą akwizycję danych. Następnie przedstawiono modele statystyczne szumu typowe dla obrazowania MR wraz z bardzo szerokim i dogłębnym przeglądem literatury dotyczącym istniejących metod estymacji niestacjonarnego szumu o rozkładach Gaussa, Rice'a oraz niecentralnym chi ($nc-\chi$).

Druga część rozprawy opisuje badania przeprowadzone przez Autora. Rozdział 5 jest poświęcony estymacji niestacjonarnego szumu, który zakłóca zrekonstruowany przy użyciu sekwencji SENSE obraz RM. Do celu zaproponowano nową metodę, wykorzystującą przekształcenie stabilizujące wariancję (ang. *variance-stabilizing transformation*, VST). Metoda ta przekształca zależny od sygnału niestacjonarny szum Rice'a w niezależny od sygnału szum Gaussa o jednostkowej wariancji. Zastosowana metoda VST opiera się na już istniejącym podejściu opracowanym w pracy [Foi 2011]¹, przy czym opracowano nową funkcję transformacji, wykorzystującą dwa dodatkowe parametry. Zadaniem tych parametrów (oznaczonych jako wektor Θ) zależnych od wartości stosunku sygnału do szumu (SNR), jest zapewnienie gaussowskiego charakteru VST w całym zakresie zmian SNR występującym w obrazie. Proponowane kryterium optymalizacji w celu uzyskania optymalnych wartości Θ składa się z trzech ważonych składników, opisanych równaniem 5.12. Ponieważ wartości wag są ustalane doświadczalnie, zatem chciałbym zapytać, jak dobór wag wpływa na optymalizację Θ ; czy uzyskane wartości parametrów będą optymalne w ogólnym przypadku, tzn. dla wszystkich obrazów uzyskanych dzięki sekwencji SENSE? Inne pytanie dotyczy przyjętych wartości wag λ : dwie z nich są bardzo małe (1000 razy) w stosunku do pozostałej. Czy w związku z tym dwa składniki (określające wynikowy kształt rozkładu zmiennej po zastosowaniu VST) wzoru 5.12 z przypisanymi niewielkimi wagami są w jakikolwiek sposób istotne, czy też mogłyby pozostać zaniedbane?

Na podstawie opracowanej VST zaproponowano ogólny schemat estymacji niestacjonarnego szumu Rice'a, wykorzystując dodatkowo filtrację homomorficzną. Poprawność działania opracowanego schematu została zweryfikowana na podstawie szeregu starannie zaplanowanych eksperymentów, obejmujących analizę obrazów fantomów, syntetycznych niezakłóconych obrazów RM mózgu (sekwencje T1, T2, PD) oraz obrazów RM mózgu uzyskanych dla sekwencji SENSE (zakłóconych szumem symulowanym oraz rzeczywistym). Uzyskane wyniki zostały przeanalizowane pod względem jakościowym oraz ilościowym, ponadto porównano je aż z 14 (!) istniejącymi metodami estymacji szumu, uznanymi za najbardziej reprezentatywne. Wykazano, że przedstawiona autorska metoda estymacji szumu przewyższa wszystkie pozostałe (zarówno jakościowo jak i ilościowo), ponadto cechuje się znacznie niższymi nakładami obliczeniowymi.

¹ A. Foi, Noise estimation and removal in MR imaging: the variance stabilization approach. Proc. of the IEEE Int. Symposium on Biomedical Imaging, 2011, pp. 1809-1814

Rozdział 7 opisuje problem estymacji szumu o rozkładzie $nc-\chi$ występującego w równoległym obrazowaniu z użyciem sekwencji GRAPPA. Ponownie zaproponowano tu nową postać VST w celu usunięcia zależności szumu od wartości zarejestrowanego sygnału. W tym przypadku opracowano dwie wersje VST, a mianowicie tzw. postać asymptotyczną (równanie 6.21) oraz jej zmodyfikowaną wersję uwzględniającą dodatkowe parametry (określoną jako „robust numerical model” opisany równaniem 6.28). Celem tej modyfikacji jest zapewnienie poprawnego działania VST dla całego zakresu wartości SNR. W przypadku zmodyfikowanej VST pojawiają się takie same pytania dotyczące zaproponowanego kryterium optymalizacji jak w dla rozwiązania przedstawionego w rozdziale 5. Wykazano, z wykorzystaniem testów statystycznych, że zaproponowane VST rzeczywiście generują zmienne o rozkładzie Gaussa $N(0,1)$. Następnie przedstawiono metodę estymacji w niestacjonarnego szumu $nc-\chi$ z wykorzystaniem opracowanej VST oraz gaussowskiej filtracji homomorficznej. Poprawność metody została zweryfikowana na podstawie wyników eksperymentów wykorzystujących podobne dane jak w rozdziale 5 (przy czym tym razem obrazy uzyskano z użyciem sekwencji GRAPPA). Wykazano przewagę podejścia zaproponowanego przez Doktoranta w porównaniu do innych znanych metod, dotyczy to całego zakresu zmienności odchylenia standardowego szumu oraz współczynnika korelacji pomiędzy cewkami odbiorczymi tomografu.

3. Wkład Autora rozprawy do dyscypliny informatyka

Główne osiągnięcia Doktoranta można podsumować w następujących punktach:

- Opracowanie znacząco zmodyfikowanej VST dla transformacji zależnej od sygnału zmiennej o rozkładzie Rice’a do zmiennej niezależnej od sygnału o rozkładzie Gaussa. Wykazano, że proponowane podejście przewyższa obecnie uznawaną za bardzo skuteczną metodę przedstawioną w pracy [Foi 2011], zapewniając poprawne zachowanie się VST w całym zakresie wartości SNR;
- Propozycja dwóch nowych postaci VST dla zakłóceń o $nc-\chi$. Asymptotyczna postać VST jest przekształceniem odwracalnym i charakteryzuje się bardzo niską złożonością obliczeniową (w porównaniu z innymi metodami). Parametryczna wersja VST zapewnia poprawną transformację zmiennej o rozkładzie $nc-\chi$ dla całego zakresu SNR występującego w analizowanych obrazach RM;
- Opracowanie schematu estymacji niestacjonarnego szumu o rozkładzie Rice’a z wykorzystaniem zaproponowanej VST oraz filtracji homomorficznej. Schemat ten ma zastosowanie do przetwarzania obrazów RM uzyskanych dzięki sekwencji SENSE;
- Opracowanie schematu estymacji niestacjonarnego szumu o rozkładzie $nc-\chi$. Podobnie jak dla przypadku szumu Rice’a, zastosowano tu autorską wersję parametryczną VST oraz Gaussowski filtr homomorficzny. Opracowana metoda jest przeznaczona do estymacji szumu w obrazach RM uzyskanych dzięki sekwencji GRAPPA.

Wykazano, że obydwa schematy prowadzą do dokładniejszej estymacji szumu analizowanych obrazach RM dla pełnego zakresu SNR niż w przypadku innych opisanych w literaturze metod. Ponadto opracowane metody umożliwiają estymację zakłócenia na podstawie tylko jednego obrazu (wielokrotna akwizycja danych lub tzw. skanowanie wstępne nie jest konieczne). Zostało to pokazane dla niestacjonarnych szumów zarówno o rozkładzie

Rice'a jak i $nc-\chi$, które zakłócają obrazy otrzymane za pomocą sekwencji SENSE i GRAPPA odpowiednio. Zatem należy stwierdzić, że sformułowana przez Autora rozprawy teza została w pełni udowodniona oraz osiągnięto wszystkie cele pracy.

4. Zagadnienia do dyskusji

Wyniki przedstawione w pracy otwierają pole do dalszej dyskusji. Chciałbym prosić Doktoranta o odniesienie się do następujących kwestii:

1. Jednym z potencjalnych zastosowań opracowanych metod estymacji map szumu może być ich wykorzystanie do dokładniejszego oszacowania parametru dyfuzji w obrazowaniu tensora dyfuzji. Jednak zdecydowana większość badań RM dotyczy obrazowania struktur anatomicznych. Zatem, czy opracowane metody mogą być zastosowane do standardowych sekwencji obrazowania w celu poprawy jakości uzyskanych obrazów i w konsekwencji uzyskania bardziej wiarygodnej diagnozy medycznej? Czy ta kwestia była omawiana z lekarzami radiologami?
2. Proponowane metody zostały opracowane dla powszechnie obecnie stosowanych protokołów równoległej akwizycji danych (SENSE i GRAPPA). Jednakże, obrazowanie RM oferuje szereg innych sekwencji oraz technik obrazowania. Czy da się uogólnić opracowane metody estymacji szumu dla obrazów otrzymanych np. z czynnościowego rezonansu magnetycznego, spektroskopii RM lub sekwencji angiograficznych?
3. Podobne pytanie dotyczy skanerów generujących pole magnetyczne o większych wartościach indukcji (3T dla urządzeń klinicznych i 6-12T dla tomografów eksperymentalnych) lub metod obrazowania, które znacząco zwiększają SNR. Jedną z nich jest metoda bazująca na zjawisku dynamicznej polaryzacji jądrowej w połączeniu z spektroskopią rezonansu magnetycznego. W tym podejściu następuje znaczący wzrost sygnału generowanego przez protony jąder atomowych, co umożliwi bardzo dokładną obserwację zmian metabolicznych, zarówno *in vitro* jak i *in vivo*. Taka technika jest używana przy np. wspomaganie diagnostyki raka prostaty. Czy uzyskane w pracy wyniki mogłyby być uogólnione również dla wspomnianych wyżej skanerów oraz metody obrazowania?
4. Wreszcie, chciałbym uzyskać szerszy komentarz dotyczący możliwości implementacji opracowanych algorytmów w strukturze GPU. Autor zaznaczył ten wątek w rozprawie, ale oczekiwałbym bardziej szczegółowego omówienia tego zagadnienia.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że lokuje się ona w dyscyplinie informatyka oraz wzbogaca tę dyscyplinę. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny informatyki dotyczącą komputerowych metod przetwarzania i analizy obrazów a także umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych. Stwierdzam, że praca "Non-stationary noise estimation in accelerated parallel MRI data" z nadmiarem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz wnioskuje o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Tomasz Pięciaka do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę:

- bardzo wysoki poziom merytoryczny recenzowanej pracy doktorskiej, potwierdzony publikacjami uzyskanych wyników w dwóch wysokiej jakości czasopismach naukowych (Medical Image Analysis, IF=4.95 oraz IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IF=8.69),
- możliwe zastosowanie opracowanych algorytmów w praktyce klinicznej, w szczególności do wspomagania jakościowej i ilościowej diagnostyki z użyciem obrazowania rezonansem magnetycznym

wniosuję o wyróżnienie przedłożonej rozprawy.

Marta Stelli

