

Prof. dr hab. inż. Ewaryst Rafajłowicz,  
Członek korespondent PAN,  
Politechnika Wrocławska,  
Wydział Informatyki i Telekomunikacji

**Recenzja dorobku naukowego**  
**Pana dr Tomasz Piotrowski**  
**Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej**  
**Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu**  
**w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora**  
**habilitowanego**

**Informacje ogólne**

Niniejszą recenzję sporządziłem w związku z toczącym się postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego Panu dr Tomasz Piotrowskiemu które prowadzone jest przez Radę Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Kandydat otrzymał stopień doktora w roku 2008, który został mu nadany przez Tokyo Institute of Technology, Dept. of Communications and Integrated Systems (nostryfikowany przez Politechnikę Warszawską, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych w 2011 roku) za rozprawę pod tytułem:

*„A study of minimum-variance pseudo-unbiased reduced-rank estimator for robust linear parameter estimation”*

**Tematyka cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe**

Habilitant zatytułował swoje osiągnięcie naukowe następująco:

*„Nowe metody filtracji w komputerowym przetwarzaniu sygnału EEG”*

Na osiągnięcie to składa się cykl powiązanych tematycznie sześciu artykułów naukowych, w tym pięciu opublikowanych w czasopismach o uznanej randze (Journal of the Franklin Institute, IEEE Transactions on Signal Processing i Neuroinformatics) oraz jednej pracy w materiałach bardzo dobrej konferencji IEEE International Conference on

Acoustics, Speech and Signal Processing. Publikacje te są bardzo aktualne – cztery ukazały się w latach 2019-2021.

Wszystkie wymienione wyżej artykuły mają jednego, dwóch lub trzech współautorów, ale załączone oświadczenia jednoznacznie wskazują na decydujący udział merytoryczny Habilitanta w ich powstawaniu.

Tematyka cyklu publikacji koncentruje się wokół zagadnień przetwarzania sygnałów z akcentem na zastosowania do sygnałów EEG. Podobne problemy są od pewnego czasu badane, jednakże w tym przypadku określenie „nowe metody” jest w pełni uzasadnione, co postaram się wypunktować w dalszej części recenzji.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że opracowane przez dr T. Piotrowskiego metody i algorytmy mogą przyczynić się do głębszego rozumienia funkcjonowania naszego mózgu. Są zatem ważne poznawczo, gdyż rejestracja sygnałów EEG jest bezinwazyjna, relatywnie tania i dostarcza informacji komplementarnych w stosunku do tych, które można odczytywać z funkcjonalnego rezonansu magnetycznego.

Z drugiej strony, wyniki Habilitanta bazują na ogólnym, liniowym stochastycznym modelu, który opisuje wpływ źródeł sygnału na odpowiedzi rejestrowane przez czujniki, z uwzględnieniem losowych zakłóceń. Zatem, wyniki te mogą być użyteczne także w innych zastosowaniach, co znajduje odzwierciedlenie w innych publikacjach dr T. Piotrowskiego. Zaznaczyć jednak należy, że sygnały EEG mają cechy specyficzne, które zostały wykorzystane w omawianym tu cyklu publikacji.

***Stwierdzam, że problematyka cyklu publikacji, jest aktualna i ważna dla dyscypliny Informatyka i Telekomunikacja oraz dyscyplin pokrewnych, a rozważane problemy, metody i algorytmy mają istotne cechy nowości.***

## **Omówienie i ocena cyklu publikacji stanowiących podstawowe osiągnięcie naukowe**

Punktem wyjścia większości rezultatów dr T. Piotrowskiego zawartych w ocenianym cyklu publikacji jest model liniowy:

$$y = H x + n, \quad (1)$$

gdzie  $y \in R^n$  jest wektorem obserwacji,  $x \in R^m$  wektorem nieznanych parametrów modelu, a wektor losowy  $n \in R^n$  modeluje addytywne zakłócenia pomiarowe.

W większości prac Habilitanta zakłada się, że macierz  $H \in R^{n \times m}$  rzędu  $m$  jest znana i w odniesieniu do sygnałów EEG jej elementy interpretowane są jako współczynniki wpływu  $i$ -tego źródła o intensywności  $x(i)$  na wartość zmierzoną przez  $j$ -ty czujnik. Zakłada się, że oddziaływania te są liniowe. W zastosowaniach, w których następuje fizyczny przepływ sygnału między źródłami a czujnikami, macierz  $H$  interpretować można jako zdyskretyzowaną wersję funkcji Greena badanego systemu. W analizie sygnałów EEG macierz  $H$  zależy od współrzędnych przestrzennych dipoli modelujących źródła sygnałów w mózgu.

Zakłada się także, że wektor  $x$  został wylosowany zgodnie z pewnym rozkładem prawdopodobieństwa oraz, że wektory  $x$  oraz  $n$  są stochastycznie niezależne.

W części omawianych publikacji od założeń tych robi się odstępstwa, mianowicie:

- wektor  $x$  jest traktowany jak wektor nieznanymi stałymi parametrami,
- dopuszcza się „odstrojenia” od macierzy  $H$ , które reprezentują niedokładną jej znajomość.

Badania tych odstępstw są ważne z punktu widzenia praktycznego i niełatwe do teoretycznej analizy.

Jako punkt odniesienia do oceny swoich wyników Habilitant przyjął filtr minimalizujący wariancję przy liniowych ograniczeniach, znany jako *linearly constrained minimum-variance* (LCMV). Jest to trafny wybór, gdyż filtr ten jest powszechnie używany, ale – jak to często się w takich sytuacjach zdarza – nie jest łatwo „przebić się” z nowymi rozwiązaniami, mimo udokumentowania ich wyższej jakości. W omawianych przypadkach, wyższa jakość przejawia się w lepszej rozdzielczości przestrzennej oraz w mniejszym błędzie średniokwadratowym.

Omawiane wyniki w znacznej mierze bazują na konstrukcji filtra zwanego MV-PURE, którego dr T. Piotrowski jest współautorem. Podstawowa różnica między filtrem LCMV a rodziną filtrów MV-PURE polega na zastosowaniu redukcji rzędu macierzy filtra.

W dalszej części recenzji będę stosował te same skróty nazw artykułów cyklu, które stosował Habilitant w swoim autoreferacie oraz podobną kolejność omawiania wyników, gdyż autoreferat wskazuje logiczną i konsekwentną drogę ich otrzymywania.

Prace JF1 i JF2 skupiają się na badaniu własności rodziny filtrów MV-PURE. W pierwszej z nich rozważany jest dobór redukcji rzędu macierzy filtra w zależności od poziomu zakłóceń. Najważniejszym przesłaniem tego artykułu jest wykazanie, że jeśli mamy informację o poziomie zakłóceń, to możliwy jest taki dobór redukcji rzędu, by filtr MV-PURE zapewniał niższą wartość błędu średniokwadratowego niż filtr LCMV.

Na szczególną uwagę zasługuje artykuł JFI2, w którym badane jest zachowanie się filtrów zaprojektowanych dla macierzy  $H$  w modelu (1) w sytuacji, gdy faktycznie występująca macierz ma postać  $H+\Delta H$ , gdzie macierz  $\Delta H$  symuluje niedokładności w znajomości elementów macierzy  $H$  (odstrojenia, perturbacje). W artykule tym przedstawiono oryginalne podejście do takich badań, które pozwala uzyskać analityczne oszacowania dla błędów średniokwadratowym szerokiej klasy filtrów liniowych, w tym filtrów MV-PURE i innych filtrów o zredukowanym rzędzie. Podejście to opiera się na wprowadzonym w pracy JFI2 pojęciu pary źle uwarunkowanych stochastycznych modeli liniowych  $H$  i  $H+\Delta H$  z wysokim stosunkiem sygnału do szumu. Definicja tego pojęcia może mieć znacznie szersze zastosowania w badaniach niepewności w innych modelach. W artykule JFI2 zastosowano tę koncepcję do wykazania, między innymi, że

w pewnych sytuacjach filtry o zredukowanym rzędzie zastosowane do danych z modelem  $H+\Delta H$  mogą osiągać mniejszy błąd średniokwadratowy niż filtry optymalne, minimalizujące błąd przy znajomości macierzy  $H$ . Oczywiście, wyniki te osiągnięto w JFI2 przy pewnych założeniach upraszczających, bez których nie byłyby one czytelne. Elementem nowatorskim pracy JFI2 jest także przeprowadzenie badań dla losowych macierzy perturbacji, podczas gdy najczęściej stosuje się odstrojenia o ograniczonej normie i niesprecyzowanym charakterze.

Publikacje TSP i BSPC dotyczą zagadnień trudniejszych niż te omówione powyżej, a mianowicie filtrów przestrzennych, których zadaniem jest lokalizacja źródeł i ocena ich mocy. Gdyby dostępne były pary wektorów obserwacji, zadania takie byłyby klasycznymi zadaniami odwrotnymi wyznaczania parametrów w macierzy  $H$ . W omawianych pracach pojawia się dodatkowa trudność oceny  $x$ -ów. W tym miejscu przydatne są wyniki i algorytmy zawarte w omówionych już publikacjach Habilitanta.

W pracy TSP postawiono zadanie z dodatkowym jeszcze wymaganiem dążenia do redukcji wpływu zakłóceń interferencyjnych. W artykule tym zaproponowano i zbadano cztery nowe algorytmy do rozwiązywania tej klasy zagadnień.

W publikacji BSPC lokalizacja źródeł realizowana jest za pomocą tak zwanych indeksów aktywności neuronalnej. Zaproponowano dwie nowe rodziny takich indeksów i na nich oparto nowe algorytmy, korzystające także z redukcji rzędu macierzy filtrów. Wykazano zwiększenie rozdzielczości przestrzennej lokalizowanych źródeł i to w utrudnionych warunkach bliskości przestrzennej i istnienia korelacji. Opracowano algorytmy i zbadano je na danych rzeczywistych EMG. Podjęto też próbę objaśnienia powodów uzyskiwania lepszych rezultatów niż przy zastosowaniu indeksów klasycznych, gdyż znane objaśnienie w postaci redukcji błędu średniokwadratowego przez balansowanie obciążenia i wariancji w tym przypadku nie daje pełnego obrazu. Rozważania te świadczą o dużej dojrzałości naukowej Habilitanta.

Znaczący postęp dokonany został w publikacji ICASSP. Polega on na zaproponowaniu wersji on-line filtrów do oceny aktywności źródeł. Osiągnięcie to nie tylko przyspiesza algorytmy, ale także poszerza znacznie możliwości badawcze z użyciem pewnego sprzężenia zwrotnego w badaniach reakcji mózgu.

Swego rodzaju podsumowaniem jest system oprogramowania przedstawiony w publikacji NEURO. W systemie tym doprowadzono oprogramowanie bazujące na rezultatach prac omawianego cyklu do postaci użytkowej – w postaci pakietu w środowisku MATLAB. Habilitant nadzorował prace programistyczne.

Uzyskanie ocenianych rezultatów wymagało od Habilitanta bardzo dużej wiedzy z teorii sygnałów i umiejętności łączenia jej z aspektami programistycznymi.

**Podsumowując, bardzo pozytywnie oceniam wkład Habilitanta, zawarty w całym cyklu publikacji i uważam, że spełnia on wymagania odnośnej Ustawy w obszarze osiągnięć naukowych.**

## **Ocena pozostałego dorobku naukowego Habilitanta**

W dokumentacji przewodu, Habilitant wymienił także 9 prac które nie weszły w skład wyżej ocenionego cyklu. Są to artykuły opublikowane w materiałach międzynarodowych konferencji o uznanej randze. Tematyka ich zbliżona jest do tych w cyklu publikacji. Część z nich zawiera nowe wątki algorytmiczne.

Habilitant jest aktywny w realizacji grantów NCN. Jest także liderem wniosku o grant japońsko-europejski w Toruniu na temat bezpiecznego działania rozproszonych algorytmów głębokiego uczenia maszynowego. Temat uważam za ważny i aktualny.

**Jego publikacje są aktualne i istotne dla teorii i zastosowań oraz wskazują na rozwój Habilitanta w okresie po uzyskaniu doktoratu.**

Dr T. Piotrowski angażuje się także w prace organizacyjne, między innymi, jest koordynatorem polskiego węzła International Neuroinformatics Coordinating Facility. Ma również udział w rozwoju młodej kadry na poziomie magisterskim i wspomaganie prac nad doktoratami.

**Podsumowanie.** Przedstawiona wyżej, pozytywna ocena dorobku naukowego i badawczego dr Tomasza Piotrowskiego pozwala mi na sformułowanie stwierdzenia, że dorobek ten spełnia wymagania odnośnej Ustawy, które są potrzebne do nadania stopnia doktora habilitowanego. W związku z tym, wnioskuję do Komisji i Rady Naukowej IBS PAN o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Wrocław 6 listopada 2021 r.



Ewaryst Rafajłowicz