

AUTOREFERAT

1. Dane personalne

Imię i Nazwisko: **Rafał Zdunek**
Data i miejsce urodzenia: 26 czerwca 1972r., Brzesko

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- Stopień naukowy: **Doktor Nauk Technicznych**
Dyscyplina: Telekomunikacja
Specjalność: Metody numeryczne
Jednostka: Instytut Telekomunikacji i Akustyki
Politechnika Wroclawska
Temat pracy: *Optymalizacja metod rekonstrukcji obrazu rozkładu współczynnika tłumienia fal elektromagnetycznych w ziemi*
Data obrony: 6 lutego 2002 r. (*praca obroniona z wyróżnieniem*)
Promotor: *Dr hab. inż. Andrzej Prałat*
Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wroclawska
Recenzenci: *Prof. dr hab. inż. Jan Sikora*
Instytut Elektrotechniki, Politechnika Warszawska
Dr hab. Krystyna Ziętak
Instytut Matematyki i Informatyki, Politechnika Wroclawska
- Tytuł: **Magister inżynier**
Kierunek: Elektronika i Telekomunikacja
Specjalność: Telekomunikacja rozsiewcza
Jednostka: Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska
Temat pracy: *Podatność systemu ochrony przeciwpożarowej wroclawskiego Ratusza na wyladowania piorunowe*
Data obrony: 29 września 1997
Promotor: *Dr inż. Andrzej Sowa*
Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wroclawska
- Tytuł: **Technik elektronik**
Specjalność: Elektronika ogólna
Szkoła: Technikum Elektroniczne
Zespół Szkół Mechaniczno-Elektrycznych w Tarnowie
Data obrony: Czerwiec 1992

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

3.1. Przebieg pracy zawodowej:

- Miejsce pracy: Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki (K-4), Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska
Stanowisko: **Adiunkt**
Okres zatrudnienia: od 1 czerwca 2013 do obecnie
- Miejsce pracy: Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki, Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska
Stanowisko: **Adiunkt**
Okres zatrudnienia: od 1 października 2002 do 31 maja 2013
- Miejsce pracy: Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska
Stanowisko: **Asystent**
Okres zatrudnienia: od 1 października 2001 do 30 września 2002

3.2. Doświadczenie zawodowe zdobyte za granicą:

- Miejsce pracy: Laboratory for Advanced Brain Signal Processing
Brain Science Institute, RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako-shi, 351-0198 Saitama, Japonia
Stanowisko: **Visiting Researcher**
Okres zatrudnienia: 2.08.2010 – 23.09.2010
- Miejsce pracy: Laboratory for Advanced Brain Signal Processing
Brain Science Institute, RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako-shi, 351-0198 Saitama, Japonia
Stanowisko: **Visiting Researcher**
Okres zatrudnienia: 7.07.2008 – 10.08.2008
- Miejsce pracy: Laboratory for Advanced Brain Signal Processing
Brain Science Institute, RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako-shi, 351-0198 Saitama, Japonia
Stanowisko: **Research Scientist**
Okres zatrudnienia: 17.10.2005 – 30.09.2007
- Miejsce pracy: The Institute of Statistical Mathematics
4-6-7 Minami-Azabu, Minato-ku, Tokio 106-8569,
Japonia
Stanowisko: **Visiting Associate Professor**
Okres zatrudnienia: 1.01.2004 – 31.03.2004

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 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, poz. 595 ze zm.)

Moim osiągnięciem naukowym stanowiącym znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Elektronika jest jednotematyczny cykl publikacji pt.:

Nieujemna faktoryzacja macierzy i tensorów: zastosowanie do klasyfikacji i przetwarzania sygnałów

Cykl publikacji składa się z dwunastu prac naukowych, w tym dwie monografie, osiem artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, posiadających *Impact Factor*, jednego artykułu w czasopiśmie międzynarodowym (aktualnie na liście filadelfijskiej) oraz jednego artykułu w serii LNAI (Springer).

- [1] **Zdunek R.**, Nieujemna faktoryzacja macierzy i tensorów: zastosowanie do klasyfikacji i przetwarzania sygnałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław **2014**, 362 stron, ISBN: 978-83-7493-844-0

Udział własny: 100%

- [2] Cichocki A., **Zdunek R.**, Phan A. H., Amari S.-I., Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-way Data Analysis and Blind Source Separation, Wiley and Sons, Chichester, UK, **2009**,

Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **221**

Udział własny: 25%

- [3] **Zdunek R.**, Regularized Nonnegative Matrix Factorization: Geometrical Interpretation and Application to Spectral Unmixing, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 24, No. 2, pp. 233–247, **2014**,

Punkty MNiSW (2013): **25**, IF (2013): **1,008**

Udział własny: 100%

- [4] **Zdunek R.**, Improved Convolutional and Under-determined Blind Audio Source Separation with MRF Smoothing, *Cognitive Computation*, Vol. 5, No. 4, pp. 493–503, **2013**,

Punkty MNiSW (2013): **20**, IF (2013): **0,867**

Udział własny: 100%

- [5] **Zdunek R.**, Cichocki A., Nonnegative Matrix Factorization with Constrained Second-Order Optimization, *Signal Processing*, Vol. 87, pp. 1904–1916, **2007**,

Punkty MNiSW (2010): **27**, IF (2007): **0,737**, IF(2013): **1,851**

Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **26**

Udział własny: 70%

- [6] **Zdunek R.**, Cichocki A., Nonnegative Matrix Factorization with Quadratic Programming, *Neurocomputing*, Vol. 71, No. 10-12, pp. 2309–2320, **2008**,
Punkty MNiSW (2010): **20**, IF (2008): **1,234**
Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **7**
Udział własny: 70%
- [7] **Zdunek R.**, Cichocki A., Fast Nonnegative Matrix Factorization Algorithms Using Projected Gradient Approaches for Large-Scale Problems, *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2008, No. 939567, 13 pages, **2008**,
To czasopismo jest już na liście filadelfijskiej („*Master Journal List*”) oraz indeksowane w bazie JCR (<http://www.hindawi.com/journals/cin/>)
Punkty MNiSW (2010): **2**,
Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **16**
Udział własny: 70%
- [8] Cichocki A., **Zdunek R.**, Multilayer Nonnegative Matrix Factorization Using Projected Gradient Approaches, *International Journal of Neural Systems*, Vol. 17, No. 6, pp. 431–446, **2007**,
Punkty MNiSW (2010): **20**, IF (2007): **0,488**, IF(2013): **5,054**
Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **18**
Udział własny: 30%
- [9] Cichocki A., **Zdunek R.**, Multilayer Nonnegative Matrix Factorization, *Electronics Letters*, Vol. 42, No. 16, pp. 947–948, **2006**,
Punkty MNiSW (2010): **27**, IF (2006): **1,063**
Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **9**
Udział własny: 30%
- [10] Cichocki A., **Zdunek R.**, Amari S.-I., Nonnegative Matrix and Tensor Factorization, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 25, No. 1, pp. 142–145, **2008**,
Punkty MNiSW (2013): **32**, IF (2008): **3,758**
Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **44**
Udział własny: 30%
- [11] He Z., Xie S., **Zdunek R.**, Zhou G., Cichocki A., Symmetric nonnegative matrix factorization: algorithms and applications to probabilistic clustering, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 22, No. 12, pp. 2117–2131, **2011**,
Punkty MNiSW (2010): **32**, IF (2011): **2,952**
Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **9**
Udział własny: 15%
- [12] **Zdunek R.**, Initialization of nonnegative matrix factorization with vertices of convex polytope, In: 11th International Conference on Artificial Intelligence and Soft

Computing (ICAISC 2012), Zakopane, Poland, April 29 - May 3, 2012, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 7267, pp. 448–455, **2012**,

Punkty MNiSW (2010): **13**,

Liczba cytowań (według Web of Science – bez autocytowań): **2**

Udział własny: 100%

Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Niejemna faktoryzacja macierzy (NMF – ang.: *Nonnegative Matrix Factorization*) jest metodą redukcji wymiarowości danych nieujemnych oraz ekstrakcji cech rzadkich. Stosuje się ją w wielu obszarach sztucznej inteligencji, analizie danych oraz w przetwarzaniu sygnałów i obrazów. Stanowi istotne narzędzie w rozwoju multidyscyplinarnych badań naukowych, łączących wiele dyscyplin nauk technicznych, zwłaszcza informatykę z elektroniką czy telekomunikacją.

Podstawowa wersja metody NMF zakłada przybliżoną i liniową dekompozycję macierzy nieujemnej (np. macierzy nieujemnych danych pomiarowych) na macierze (faktory) o nieujemnych elementach i zwykle mniejszym rzędzie. Niejemne i częstokroć rzadkie faktory mają pewne właściwości charakterystyczne, znaczeniowe i na ogół dość łatwą interpretację: każdy wektor kolumnowy nieujemnej macierzy danych można przedstawić jako liniową i addytywną kombinację pewnych wektorów nieujemnych cech rzadkich. Przykładowo, metoda NMF dekomponuje obrazy twarzy na obrazy części składowych (cech), takich jak: oczy, usta, włosy, uszy, itp. Lokalność, rzadkość, a przede wszystkim niejemność wektorów reprezentacji i możliwość ich statystycznej zależności są właściwościami, które odróżniają NMF od znanych metod dekompozycji danych, takich jak, np. analiza składowych głównych lub analiza składowych niezależnych. Dodatkowo, duża elastyczność modelu NMF w dostosowaniu do charakteru estymowanych czynników (rzadkość, gładkość, ortogonalność, unimodalność, itp.), rozkładu i mocy spektralnej zakłóceń danych pomiarowych, wymiaru dekomponowanej macierzy, stopnia dokładności aproksymacji modelu, a także struktury modelu, znajduje odzwierciedlenie w rosnącej popularności tej metody w różnych dziedzinach nauki.

Opublikowany w czasopiśmie „Nature” w 1999 roku artykuł autorstwa Lee i Seunga, który tak znacząco spopularyzował metodę NMF, ma już ponad 5000 cytowań według Google Scholar. Tematyka mojego osiągnięcia naukowego jest zatem aktualna i istotna dla rozwoju badań naukowych.

Niejemna faktoryzacja tensora (NTF – ang.: *Nonnegative Tensor Factorization*) jest metodą, którą można interpretować jako rozszerzenie nieujemnej faktoryzacji macierzy do reprezentowania danych zebranych w postaci tensora (wielowymiarowej tablicy liczb). Jest szczególnie przydatna do ekstrakcji dwuwymiarowych rzadkich i nieujemnych cech ze zbioru obrazów. W podstawowej wersji może być opisana znanym modelem CP z narzuconą niejemnością na estymowane faktory. Do estymacji czynników w metodzie NTF można stosować te same lub podobne narzędzia jak w metodzie NMF, a zatem w podejściu algorytmicznym obie metody faktoryzacji są blisko ze sobą związane.

Cel pracy:

Nadrzędnym celem moich badań jest poszukiwanie takich narzędzi do redukcji wymiarowości danych nieujemnych lub ekstrakcji nieujemnych cech, które byłyby efektywniejsze od obecnie istniejących, w danym obszarze zastosowań. Pojęcie efektywności należy rozumieć w szerokim sensie – najczęściej jednak jako stosunek jakości estymacji do

czasu obliczeń. Ze względu na założenie nieujemności danych obserwowanych lub estymowanych cech, zakres moich badań ograniczyłem do metod nieujemnej faktoryzacji macierzy lub tensorów. Zajmuję się aktualnym i bardzo dynamicznie rozwijającym się obszarem badań naukowych, a zatem moje lokalne (krótkoczasowe) kierunki działań zmieniają się w zależności od stanu wiedzy i wyników badań publikowanych przez konkurencyjne zespoły badawcze. Podczas mojej pracy podejmowałem próby poszukiwania odpowiedzi na następujące pytania:

- Jaki algorytm numeryczny zastosować do estymacji czynników w danym modelu NMF/NTF, zwłaszcza w kontekście zastosowania do ślepej separacji sygnałów nieujemnych, grupowania lub klasyfikacji danych?
- Kiedy model NMF ma jednoznaczne czynniki?
- Jak modelować obserwowane dane w różnych zastosowaniach?
- Jak minimalizować ryzyko zatrzymywania się procesu naprzemiennej aktualizacji czynników w lokalnych minimach funkcji celu?
- Jaką metodę wybrać do inicjalizacji czynników?
- Jak wykorzystać wiedzę aprioryczną o charakterze estymowanych czynników w procesie ich estymacji i jak dobierać parametry kar lub regularyzacji?
- Jaką funkcję celu przyjąć do estymacji czynników w modelu NMF lub NTF w kontekście danego zastosowania?
- Jak estymować liczbę komponentów ukrytych?

Odpowiedzi na powyższe pytania poszukiwałem na różnych etapach realizacji mojej pracy i można je odnaleźć w przedstawionym cyklu publikacji [1]-[12]. Są to jednak w znacznej mierze pytania nadal otwarte i będą stanowiły wyzwania badawcze jeszcze przez wiele lat.

Omówienie osiągniętych wyników:

Prace [2, 5–10] zawierają wyniki badań, które prowadziłem w *Laboratory for Advanced Brain Signal Processing* w *RIKEN Brain Science Institute* w Japonii. Celem tych badań było opracowanie skutecznych narzędzi do ślepej separacji obrazów i sygnałów nieujemnych. Moje zainteresowania koncentrowały się zatem na różnych aspektach metod NMF/NTF. Dużo uwagi poświęcałem tematyce algorytmów estymacji nieujemnych czynników. Początkowo zajmowałem się algorytmami multiplikatywnymi. Były one dość często stosowane w początkowym okresie rozwoju metody NMF, głównie ze względu na ich prostotę w implementacji, niską złożoność obliczeniową i monotoniczną zbieżność. Niestety ich wady, takie jak bardzo powolna zbieżność i to w dodatku do niekoniecznie optymalnego rozwiązania w sensie warunków optymalności *KKT* (*Karush-Kuhn-Tucker*), niestabilność numeryczna w estymacji bardzo rzadkich rozwiązań oraz dość duża podatność na zatrzymywanie się w lokalnych minimach funkcji celu, znacznie ograniczają ich użyteczność w wielu zastosowaniach modelu NMF. Istniała więc potrzeba opracowania skuteczniejszych narzędzi do realizacji postawionego celu.

Praca [5] ukazuje potencjał obliczeniowy projekcyjnych algorytmów quasi-Newtona w zadaniach estymacji czynników w modelu NMF. Algorytmy te charakteryzują się znacznie większą szybkością zbieżności niż wspomniane algorytmy multiplikatywne. Do najważniejszych moich osiągnięć naukowych przedstawionych w tej pracy należy zaliczyć:

- Koncepcję i opracowanie różnych wersji algorytmów quasi-Newtona do naprzemiennej minimalizacji zregularyzowanej funkcji odległości euklidesowej oraz dywergencji alfa. Są to algorytmy przeznaczone do głębokiej eksploracji funkcji celu. Pozwalają uzyskać bardzo dobrą jakość estymacji czynników, jeśli model jest

dokładny. Znalazły różnorodne zastosowania w wielu dziedzinach nauki, o czym świadczą liczne cytowania tej pracy (26 cytowań według bazy WoS).

- Zastosowanie uogólnionej miary różnorodności, inspirowanej funkcją celu w algorytmie FOCUSS (ang. *FOCal Underdetermined System Solver*), do wymuszania rzadkości w estymowanym faktorze. W pracy pokazano, że taką funkcję łatwo zaimplementować i prowadzi ona do znacznej poprawy jakości estymowanych faktorów, jeśli charakteryzują się one dużą rzadkością.
- Zaproponowanie reguły zmniejszającej parametr regularyzacji stopniowo z postępującymi iteracjami naprzemiennymi, poczynając od dużej wartości początkowej. Reguła ta pozwala łatwiej kontrolować ilość wprowadzanej informacji apriorycznej i jest obecnie stosowana w wielu metodach NMF.

W pracy [6] przedstawiono nową koncepcję estymacji faktorów w modelu NMF. Zaproponowałem aby zadania naprzemiennej optymalizacji nieliniowej funkcji Lagrange'a (z logarytmicznym członem kary) sprowadzić do zadań programowania kwadratowego, aproksymując tę funkcję za pomocą szeregu Taylora do stopnia drugiego. Zadania te są następnie rozwiązywane za pomocą zmodyfikowanego algorytmu IPTR (ang. *Interior-Point Trust-Region*). Takie podejście okazało się szczególnie efektywne w przypadku występowania niejednoznaczności rotacyjnej. Zaproponowany algorytm QP-NMF najlepiej bowiem radził sobie z problemem zatrzymywania się procesu naprzemiennej optymalizacji funkcji celu w jej lokalnych minimach. Niestety pomimo niewątpliwych zalet tego algorytmu, jego koszt obliczeniowy w zadaniach o dużych rozmiarach jest znaczący.

Problem dużej złożoności obliczeniowej udało się częściowo rozwiązać w pracy [7], stosując algorytmy gradientów rzutowanych. Charakteryzują się one znacznie lepszymi właściwościami numerycznymi niż znane algorytmy multiplikatywne oraz mogą być zastosowane do rozwiązywania zadań o dużych rozmiarach (są skalowalne). Ten wniosek potwierdzono eksperymentalnie, a zaproponowane narzędzia już znalazły liczne zastosowania (praca cytowana 16 razy).

Metodę NMF bazującą na algorytmach gradientów rzutowanych można dodatkowo usprawnić, jeśli zaimplementuje się ją w tzw. wielowarstwowej strukturze modelu NMF. Takie podejście zaproponowano w pracy [8] i jest ono szczególnie użyteczne, gdy nadmiarowość obserwacji nie jest zbyt duża. Ponadto, taka struktura modelu NMF jest też przydatna w estymacji komponentów ukrytych w modelu źle uwarunkowanym. W pracy [9] pokazano, że możliwa jest ślepa separacja nieujemnych i nieskalowanych sygnałów źródłowych na podstawie ich liniowych mieszanin, uzyskanych za pomocą mieszającej macierzy Hilbera o wskaźniku uwarunkowania ok. 9000. W testach przeprowadzonych w tej pracy, zaproponowana metoda zwiększa znacząco jakość estymowanych sygnałów.

Artykuł [10] syntezyzuje otrzymane wcześniej wyniki badań w zakresie zastosowania metod NMF do ślepej separacji sygnałów nieujemnych oraz pokazuje, że opracowane narzędzia mogą być wykorzystane do estymacji faktorów w modelu NTF.

Rozdziały 5, 6 i 8 monografii [2] są mojego autorstwa. Zawarto w nich podsumowujące wyniki badań w zakresie wykorzystania projekcyjnych algorytmów gradientów rzutowanych oraz quasi-Newtona. Porównano opracowane narzędzia pod względem ich efektywności dla różnych zbiorów danych. Zamieszczono również m-pliki funkcyjne Matlaba, zawierające implementacje zoptymalizowanych algorytmów. Przegląd wybranych zastosowań metody NMF przedstawiono w Rozdziale 8. Najwięcej uwagi poświęcono grupowaniu danych, klasyfikacji obrazów, spektroskopii oraz analizie mikromacierzy DNA. Praca [2] liczy obecnie ponad 220 cytowań w bazie WoS.

Metoda NMF znalazła także liczne zastosowania w ślepej separacji sygnałów spektralnych, zwłaszcza w obrazowaniu hiperspektralnym. W pracy [3] zaproponowano zmodyfikowaną wersję algorytmu FC-NNLS (ang. *Fast Combinatorial Nonnegative Least*

Square) oraz stosując podejście geometryczne wyjaśniono dlaczego parametr regularyzacji powinien zmniejszać się stopniowo z iteracjami naprzemiennymi. Z badań przeprowadzonych na różnych sygnałach spektralnych wynika, że zaproponowany algorytm jest efektywniejszy niż znane z literatury algorytmy VCA (ang. *Vertex Component Analysis*), MVSA (ang. *Minimum Volume Simplex Analysis*) i SISAL (ang. *Simplex Identification via Split Augmented Lagrangian*).

Praca [4] dotyczy spłotowego i podokreślonego modelu ślepej separacji sygnałów akustycznych z nagrań rejestrowanych stereofonicznie. Model NMF zastosowano do opisu komponentów ukrytych w spektrogramach źródeł. Założono, że estymowane sygnały źródłowe charakteryzują się lokalnie gładkim profilem zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Modelując lokalną gładkość losowym polem Markowa oraz stosując podejście bayesowskie, uzyskano znaczącą poprawę jakości estymowanych sygnałów akustycznych (mowy i dźwięków instrumentów nieperkusyjnych) w stosunku do innych badanych metod.

Szczególnym przypadkiem modelu NMF jest jego symetryczna struktura, która znalazła zastosowanie w zadaniu grupowania probabilistycznego, niekoniecznie nieujemnych danych. Do realizacji takiego zadania można zastosować narzędzia zaproponowane w pracy [11]. Są to usprawnione algorytmy multiplikatywne, które gwarantują monotoniczną zbieżność do punktu granicznego, określonego warunkami optymalności *KKT* i można je implementować w konfiguracji równoległej. W pracy tej zastosowano je do grupowania obrazów twarzy, dokumentów tekstowych oraz ekspresji genów.

Jeśli w standardowym modelu NMF, jeden z estymowanych czynników jest wystarczająco rzadki a drugi całkowicie gęsty, wówczas nieujemna faktoryzacja takich danych jest niejednoznaczna. Jeśli jednak, obserwowane dane są dokładne, możliwa jest jednoznaczna estymacja czynników (z pominięciem niejednoznaczności skali i permutacji) stosując algorytm przedstawiony w pracy [12]. Bazuje on na podejściu geometrycznym. Wyszukuje rekurencyjnie promienie ekstremalne stożka wielościanowego, generowanego wektorami danych. Dla danych dokładnych, promienie te są poszukiwanymi wektorami cech. Uwzględniając jednak słabe zaburzenia modelu, algorytm ten może być stosowny do inicjalizacji czynników w modelu NMF.

Monografia [1] stanowi syntezę wyników moich badań przeprowadzonych od 2005 r. do 2013 r. Zawiera zarówno gruntowne porównanie opracowanych algorytmów i modeli, jak i nowe, niepublikowane wcześniej wyniki badań. Przedstawiłem różne zagadnienia związane z nieujemną faktoryzacją macierzy, takie jak: funkcje celu, algorytmy optymalizacji z ograniczeniami nieujemności, niejednoznaczność faktoryzacji oraz strategie wymuszania określonych cech czynników, struktury modeli, modele nieujemnej faktoryzacji tensora oraz przykładowe zastosowania omawianych modeli. Omawiane metody znajdują liczne zastosowania w wielu dziedzinach nauki i technikach inżynierskich. W pracy dokonano oceny efektywności wybranych metod i modeli dla zadań ślepej separacji sygnałów, grupowania oraz klasyfikacji danych. Prognozowane kierunki rozwoju metod NMF i NTF przedstawiłem w rozdziale podsumowującym monografię.

Najważniejsze osiągnięcia naukowe:

- Prowadzone przeze mnie badania zaowocowały powstaniem wielu nowych i efektywnych algorytmów dla modeli NMF/NTF. Monografie [1], [2] i artykuł [10] syntezują otrzymane wyniki badań i zawierają porównanie efektywności opracowanych algorytmów dla danych o różnych właściwościach.
- Liczne wyniki badań pokazują, że algorytm Fast HALS (rozdział 4.6.1 w [1]) jest jednym z najefektywniejszych algorytmów do estymacji nieujemnych czynników w wielu zastosowaniach modeli NMF/NTF, zwłaszcza jeśli obserwowane dane są

faktoryzowalne. Badania te były prowadzone przez niezależnych badaczy z zagranicznych ośrodków naukowych i publikowane w renomowanych czasopismach zagranicznych. Wyniki badań przedstawione w tej monografii również potwierdzają ten wniosek. Algorytm ten powstał na bazie algorytmu HALS (ang. *Hierarchical Alternating Least Squares*), którego jestem współautorem.

- Liczne cytowania moich prac z lat 2006 – 2007 oraz komentarze w literaturze pokazują, że mój pomysł zastosowania projekcyjnych algorytmów quasi-Newtona ([5, 6] oraz rozdział 6 w [2]) do metody NMF stał się bardzo trafny i zainspirował wielu badaczy do rozwijania tej tematyki. Obecnie algorytmy quasi-Newtona są dość popularne w rozwiązywaniu zadań nieujemnej faktoryzacji macierzy.
- Opracowałem nowe i bardzo skuteczne algorytmy quasi-Newtona dla symetrycznej struktury modelu NMF (rozdział 5.1.2 w [1]). Algorytmy te dla danych dokładnych lub słabo zaburzonych są znacznie skuteczniejsze niż istniejące w literaturze algorytmy multiplikatywne.
- Współpracując z wieloma światowymi ekspertami w dziedzinie metod NMF, brałem udział w opracowaniu efektywnych algorytmów multiplikatywnych do grupowania probabilistycznego [11].
- Zaproponowałem wymuszanie rzadkości w estymowanym faktorze przez uogólnioną miarę różnorodności [5], inspirowaną funkcją celu w algorytmie FOCUSS. Takie podejście znacząco poprawia jakość estymacji czynników o dużej rzadkości.
- Zauważyłem, że parametr kary lub regularyzacji w członie wymuszającego gładkość estymowanego czynnika powinien zmniejszać się stopniowo z iteracjami naprzemiennymi, począwszy od dużej wartości początkowej. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne, gdy zadanie faktoryzacji jest niejednoznaczne (z pominięciem niejednoznaczności skali i permutacji), bowiem zmniejsza ryzyko zatrzymania się procesu zbieżności w niekorzystnym punkcie lokalnego minimum funkcji celu. Analiza geometryczna i badania empiryczne potwierdzają tę tezę ([3] i rozdział 4 w [1]).
- Do wymuszania lokalnej gładkości estymowanych czynników zastosowałem wygładzanie oparte na rozkładzie Gibbsa z losowym polem Markowa. Takie rozwiązanie okazało się bardzo efektywne, zwłaszcza w podokreślonym modelu ślepej separacji sygnałów akustycznych [4].
- Zaproponowałem różne metody inicjalizacji czynników ([12] i rozdział 4.1 w [1]). Na szczególne wyróżnienie zasługuje metoda SimplexMax [12], która wyszukuje promienie ekstremalne w stożku wielościanowym tworzonym przez zbiór wektorów obserwacji. Umożliwia ona znalezienie rozwiązania dokładnego, jeśli obserwowane dane są niesprzeczne i co najmniej jeden z estymowanych czynników jest wystarczająco rzadki. W przypadku danych zaburzonych, algorytm ten znajduje rozwiązanie przybliżone, które jest zwykle lepszym inicjalizatorem iteracyjnych metod aktualizacji czynników niż inicjalizacja całkowicie losowa.
- Opracowałem nową strukturę modelu NMF (rozdział 5.4.2 w [1]), która zakłada, że jeden z estymowanych czynników można wyrazić za pomocą liniowej kombinacji jednomodalnych funkcji bazowych, nieujemnych i lokalnie gładkich. Takie podejście jest szczególnie użyteczne w estymacji sygnałów spektralnych.
- Udowodniłem monotoniczną zbieżność algorytmów MUE i beta-NMF, stosując bardziej rygorystyczne podejście niż w pracach Lee i Seunga (rozdział 4.4 w [1]).
- Zaproponowałem usprawnioną wersję algorytmu spektralnego rzutowania gradientu (rozdział 4.10.5 w [1]), służącą do minimalizacji funkcji odległości euklidesowej, regularyzowanej członem wymuszającym założone profile cech lub profile

wektorów wierszowych w macierzy kodującej. Jest to wersja przeznaczona do nadzorowanej klasyfikacji lub estymacji sygnałów o lokalnej gładkości.

- Usprawniłem algorytm punktów wewnętrznych (rozdział 4.8 w [1]). W wyniku zastosowania faktoryzacji Choleskiego do rozwiązywania zadania odwrotnego, uzyskano pokaźne zmniejszenie kosztu obliczeniowego.
- Do minimalizacji uogólnionych funkcji celu zastosowałem algorytm obszaru zaufania (rozdział 4.10.2 i 4.10.4 w [1]). Dla dywergencji alfa i beta pokazano, że punkt Cauchy'ego może być relatywnie łatwo obliczany i przy niskim koszcie obliczeniowym. Finalna postać algorytmu może być wyrażona w wersji zwektoryzowanej.
- Bazując na modelu Tweedie, przedstawiłem związek funkcji celu z rozkładami gęstości prawdopodobieństwa zmiennych obserwowanych (rozdział 2 w [1]).
- Opracowałem półortogonalny model dekompozycji Tuckera, który jest szczególnie przydatny w klasyfikacji obrazów (rozdział 6.3.3 w [1]).
- Zaproponowałem półbinarną metodę NMF do twardego grupowania danych (rozdział 7.2.1 w [1]).

Najistotniejsze wnioski:

- Z przeprowadzonych badań wynika konkluzja, że nie istnieje taki algorytm, który byłby bezkonkurencyjny we wszystkich zastosowaniach modelu NMF. W wielu przypadkach algorytmem pierwszego wyboru może być HALS lub RNNLS (ang. *Regularized Nonnegative Least Squares*). Jednakże precyzyjny wybór algorytmu powinien być zależny od wielu czynników, zwłaszcza własności obserwowanych danych i charakteru poszukiwanych czynników. Jeśli dane są dokładne, opisane modelem faktoryzowalnym, a funkcja celu należy do klasy $C^{1,1}$, z pewnością najlepszym wyborem będą algorytmy quasi-Newtona. Jeśli jednak model faktoryzacji jest tylko przybliżony lub silnie zaburzony, szybkość zbieżności danego algorytmu nie jest aż tak istotna. W takim przypadku, należy bardziej brać pod uwagę inne czynniki, takie jak charakter zbieżności, stabilność numeryczną algorytmu oraz łatwość przystosowania go do włączenia informacji apriorycznej.
- W trzecim rozdziale monografii [1] przedstawiono warunki jednoznaczności czynników w modelu NMF. Dotyczą one modelu dokładnego i są przydatne głównie w rozważaniach teoretycznych, bowiem zastosowanie ich do oceny czynników w przestrzeniach wielowymiarowych sprowadza się do zadania klasy NP. Co więcej, metody te umożliwiają ocenę jednoznaczności już istniejących czynników, a nie dają odpowiedzi na pytanie czy dana macierz obserwacji posiada jednoznacznie nieujemną faktoryzację. Można przypuszczać, że ten aspekt modelu NMF będzie jeszcze silnie rozwijany w przyszłości.

Niejednoznaczność czynników w pewnych zastosowaniach modelu NMF nie jest jednak istotnym problemem. Przykładowo, w nadzorowanej klasyfikacji metodę NMF najczęściej stosuje się do ekstrakcji cech o określonym charakterze. Nie jest więc szczególnie istotne czy cechy te są jednoznaczne czy nie, a jedynie to czy prowadzą do właściwej reguły dyskryminacyjnej. Inaczej jest jednak w grupowaniu danych czy ślepej separacji źródeł. W tych zastosowaniach, niejednoznaczności inne niż skalowanie lub permutacja czynników mogą poważnie zaburzyć interpretację estymowanych czynników. Problem niejednoznaczności czynników można też łagodzić przez odpowiedni dobór informacji apriorycznej. Zadanie to nie jest łatwe, ale pokazuje ogromną elastyczność modelu NMF w dostosowaniu do danych obserwowanych. Przykładowo, jeśli NMF stosowany jest do grupowania

twardego, wówczas wymuszanie binarności w jednym z estymowanych czynników jest celowe i prowadzi do większej stabilizacji i powtarzalności wyników grupowania.

- Badania eksperymentalne potwierdzają, że jeśli zadanie nieujemnej faktoryzacji macierzy jest jednoznaczne (z wyłączeniem niejednoznaczności skali i permutacji), dobrze uwarunkowane i bez zaburzeń modelu, możliwa jest ekstrakcja nawet bardzo dużej liczby komponentów ukrytych (cech). W przeciwnym razie, nawet przy silnej nadmiarowości obserwacji mogą wystąpić problemy z estymacją kilku komponentów. W takim przypadku, informacje aprioryczne o charakterze poszukiwanych czynników mają istotne znaczenie.
- Jeśli oczekuje się, że co najmniej jeden z czynników modelu NMF nie będzie wystarczająco rzadki, jego estymacja powinna być wspomagana regularyzacją w normie l_2 , a współczynnik regularyzacji powinien zmniejszać się stopniowo z liczbą iteracji naprzemiennych, poczynając od dużej wartości.
- Do estymacji czynników w modelu NMF można stosować różne funkcje celu. Funkcja odległości euklidesowej jest prawdopodobnie najczęściej stosowana, ponieważ zwykle zakłada się, że błąd residualny ma rozkład gaussowski. Nie we wszystkich zastosowaniach funkcja ta jest najlepszym wyborem. Przykładowo, w klasyfikacji obrazów twarzy lepsze rezultaty uzyskano stosując uogólnioną dywergencję Kullbacka–Leiblera. Podobnie jest w grupowaniu dokumentów tekstowych. Stosując model NMF do ślepej separacji sygnałów akustycznych efektywniej jest modelować podobieństwo między zbiorem komponentów ukrytych a modelem NMF przez dywergencję Itakura–Saito. Liczne przykłady z literatury również potwierdzają, że w wielu zastosowaniach modelu NMF lepsze wyniki uzyskuje się innymi miarami podobieństwa niż odległość euklidesowa.
- Nieujemna faktoryzacja tensora może być realizowana za pomocą algorytmów NMF, ale nie są to jednak metody równoważne z punktu widzenia właściwości estymowanych cech. Przykładowo, cechy estymowane metodą NMF z macierzy zwektoryzowanych obrazów twarzy mogą charakteryzować się odmienną lokalnością niż cechy estymowane podstawową metodą NTF z tensora obrazów uporządkowanych wzdłuż jednego z modów. Komponenty ukryte otrzymane metodą NTF wzdłuż modu uporządkowania obrazów mogą posiadać lepsze właściwości dyskryminacyjne niż wektory macierzy kodującej w modelu NMF. Badania przedstawione w pracy [1] pokazują, że algorytm UO-NTD pozwala uzyskać trochę większą dokładność klasyfikacji obrazów twarzy z bazy ORL niż metody NMF. Można więc przypuszczać, że metoda NTF jest bardziej odpowiednia do klasyfikacji obrazów wielowymiarowych. Można nią ekstrahować cechy multiliniowe z danych wielomodalnych. Przykładowo, stosując NTF do wielomodalnego tensora zbioru spektrogramów, każda estymowana cecha reprezentowana jest wielomodalnym tensorem rzędu pierwszego, gdzie każdy mod odpowiada jednej dziedzinie obserwacji. Przy odpowiedniej informacji apriorycznej o własnościach cech względem dowolnego modu, łatwiej realizować ich selekcję oraz interpretację.

Aspekt praktyczny i zastosowanie:

Prowadzone badania zaowocowały powstaniem wielu algorytmów numerycznych oraz narzędzi programistycznych, które mogą znaleźć zastosowania w obszarach sztucznej inteligencji, uczeniu maszyn oraz przetwarzaniu sygnałów i obrazów. Poniżej przedstawiono listę najważniejszych zastosowań:

- *Ślepa separacja sygnałów spektralnych*. W wielu metodach analizy spektralnej, zwłaszcza w obrazowaniu hiperspektralnym oraz różnego rodzaju spektroskopii, np. Ramana lub masowej, przyjmuje się liniowy i addytywny model mieszania sygnałów czystych spektralnie. Są to sygnały nieujemne i częstokroć rzadkie, a proces mieszania wyrażony przez superpozycję. Do estymacji takich sygnałów oraz macierzy mieszającej opracowano różne narzędzia bazujące na modelach NMF lub NTF (rozdział 7.1 w [1]).
- *Ślepa separacja sygnałów akustycznych* (mowy lub muzyki) z nagrań rejestrowanych stereofonicznie. Opracowane narzędzia bazują na podkreślonym modelu jednoczesnego lub splotowego mieszania niestacjonarnych sygnałów źródłowych z możliwymi stacjonarnymi zaburzeniami obserwacji [4]. Umożliwiają więc separację większej liczby sygnałów źródłowych niż liczba sygnałów obserwowanych.
- *Analiza skupień* różnego rodzaju danych. Na szczególne wyróżnienie zasługują narzędzia do grupowania dokumentów tekstowych, a także do twardego grupowania danych nieujemnych, grupowania probabilistycznego oraz miękkiego grupowania dwustronnego (rozdział 7.2 w [1]).
- *Klasyfikacja obrazów* (rozdział 7.3 w [1]), w szczególności obrazów twarzy, tekstury, cyfr ręcznie pisanych, oraz spektrogramów różnych sygnałów. Opracowane narzędzia mogą być zastosowane w różnych dziedzinach nauki, np. w inżynierii biomedycznej (analiza ekspresji genów, analiza sygnałów EEG), medycynie (ekstrakcja cech z obrazów rezonansu magnetycznego), a także w przemyśle (w zautomatyzowanej ocenie jakości produkcji przemysłowej różnego rodzaju materiałów na podstawie obrazów ich tekstury).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych)

5.1. Działalność naukowa prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora

Pierwsze badania naukowe rozpocząłem podczas realizacji pracy magisterskiej. Moim celem było wyjaśnienie przyczyny uszkodzenia się systemu ochrony przeciwpożarowej wieży wrocławskiego Ratusza podczas wyładowań atmosferycznych występujących w bezpośredniej jego bliskości. Zadanie badawcze zakończyło się sukcesem – opracowano równoważny model obwodowy opisujący zjawisko indukowania się sygnałów zakłócających w obwodach elektrycznych instalacji przeciwpożarowej, których źródłem jest prąd impulsowy w kanale burzowym. Model ten został zweryfikowany przez porównanie zmierzonych i obliczonych wyników. Następnie, na podstawie modelu opracowano skuteczne sposoby zwiększenia odporności tego systemu na wyładowania atmosferyczne. Wyniki badań opublikowano w materiałach konferencji *EMC98* (Zał. 4: [H.12]).

Moje pierwsze osiągnięcia naukowo-badawcze oraz leżąca u podstaw pasja poznawania świata motywowały mnie do dalszych działań w kierunku rozwoju nauki. W 1997 roku rozpocząłem studia doktoranckie w Zakładzie Układów Elektronicznych Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej pod opieką dra hab. inż. A. Prałata. Zaangażowałem się w badania geofizyczne struktury skał osadowych metodami elektromagnetycznymi. Badania te miały na celu poszukiwanie niejednorodności takiej struktury w rejonie występowania szkód górniczych. Moje zainteresowania naukowe koncentrowały się na zadaniu tzw. inwersji modelu, tzn. jak z danych zmierzonych zrekonstruować obraz rozkładu poszukiwanej cechy, niosącej istotną informację o badanych uszkodzeniach górniczych. W moich rozważaniach tą cechą jest współczynnik tłumienia fali elektromagnetycznej, propagowanej w ziemi między odwiertami, a metodą badań tzw. geotomografia

elektromagnetyczna. Celem mojej pracy doktorskiej było znalezienie optymalnej metody rekonstrukcji obrazu w geotomografii elektromagnetycznej. Po przyjęciu pewnych uproszczeń modelu opisującego propagację fali elektromagnetycznej w ziemi oraz przy założeniu dyskretnej reprezentacji transformaty Radona, zadanie rekonstrukcji obrazu w analizowanej geotomografii sprowadza się do zregulowanego liniowego zadania najmniejszych kwadratów z macierzą systemową niepełnego rzędu. W pracy badałem różne metody rozwiązywania takich zadań, zarówno w podejściu algebraicznym jak i statystycznym.

Do największych moich osiągnięć naukowo-badawczych uzyskanych podczas realizacji pracy doktorskiej należy zaliczyć:

- przetestowanie ok. 100 (iteracyjnych) metod stosowanych do rozwiązywania liniowego zadania najmniejszych kwadratów i zadań rekonstrukcji obrazów w innych zastosowaniach tomografii oraz ocenę ich przydatności do rekonstrukcji obrazu w geotomografii elektromagnetycznej
- usprawnienie wieloparametrowej metody gradientów sprzężonych przez włączenie regularyzacji Tichonowa – modyfikacja ta okazała się innowacyjna i kluczowa do osiągnięcia wysokiej jakości rekonstruowanego obrazu,
- zastosowanie wygładzania obrazu rekonstruowanego filtracją Wienera lub regularyzacją losowymi polami Markowa.

Osiągnięcia te pokazały jak ważna jest regularyzacja zadań rekonstrukcji obrazów w tego rodzaju tomografii oraz jakie funkcje kary należy zastosować. W wyniku realizacji tej pracy powstały efektywne narzędzia do interpretacji danych pomiarowych w geotomografii elektromagnetycznej. Mogą one być przydatne w badaniach geofizycznych zarówno naukowych jak i inżynierskich. W okresie realizacji doktoratu wyniki badań opublikowano w dwóch czasopismach o zasięgu międzynarodowym oraz dziewięciu raportach konferencyjnych (Zał. 4: [H.1 – H.11]).

5.2. Działalność naukowa prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora

Moja działalność naukowa prowadzona po doktoracie dotyczy następujących obszarów badań:

- **Rekonstrukcja obrazu w geotomografii elektromagnetycznej**

Po obronie doktoratu kontynuowałem badania w zakresie metod rekonstrukcji obrazu w geotomografii elektromagnetycznej. Motywowany konstruktywnymi uwagami recenzentów mojej pracy doktorskiej, znacznie usprawniłem opracowane narzędzia i metody. W latach 2002 – 2004 moje badania prowadzone były w kierunku statystycznych metod rekonstrukcji obrazu, a zwłaszcza metod estymacji parametrów regularyzacji i innych hiperparametrów, występujących w bayesowskim podejściu do rekonstrukcji obrazu. Bazałem zarówno na metodach walidacji krzyżowej, jak i na metodach maksymalizacji wielowymiarowych rozkładów granicznych. Zaproponowałem narzędzia statystyczne do estymacji wspomnianych parametrów, a zwłaszcza hiperparametrów w rozkładzie Gibbsa. W kontekście wspomnianych zastosowań zajmowałem się też wielosiatkową metodą rekonstrukcji obrazu. Wyniki badań zostały opublikowane w różnych pracach: artykuł z listy filadelfijskiej (Zał. 4: [B.4]), inne artykuły (Zał. 4: [C.3, C.8]) i raporty konferencyjne (Zał. 4: [E.16 – E.20, E.22, E.23]).

W 2002 roku nawiązałem współpracę z Prof. C. Popa z Wydziału Matematyki i Informatyki, *OVIDIUS* University of Constanta w Rumunii w zakresie rozwoju i zastoso-

wania algorytmu Kaczmarza do rekonstrukcji obrazu w geotomografii elektromagnetycznej. Wspólne analizy pokazały, że podstawowa wersja tego algorytmu, stosowanego w różnych metodach obrazowania tomograficznego, jest wrażliwa na zaburzenia szumowe, należące do ortogonalnego uzupełnienia obrazu przekształcenia przestrzeni rozwiązań w przestrzeń obserwacji. Zaproponowano więc wersję usprawnioną i eksperymentalnie pokazano, że takie podejście pozwala uzyskać lepsze rekonstrukcje. Wyniki badań opublikowano w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (Zał. 4: [B.5]). Mój udział w tych badaniach oceniam na 50 %. Kolejne wspólne badania zaowocowały dalszym rozwojem algorytmu Kaczmarza. Wprowadzono regularyzację losowym polem Markowa oraz ograniczenia nieujemności. Takie podejścia pozwalają znacząco zredukować pionowe smużenia w obrazie, powodowane ograniczonym zakresem kątowym promieni sondujących badany obszar. Rezultaty badań przedstawiane były na wielu konferencjach międzynarodowych (Zał. 4: [E.6, E.11, E.12, E.14, E.15]).

Wprowadzanie informacji apriorycznej o cechach rekonstruowanego obrazu jest bardzo istotne w tomografii o ograniczonym zakresie pomiarowym. Celem stosowania geotomografii do badań obszarów ze szkodami górniczymi było poszukiwanie tzw. pustek w górotworze. Obiekty te charakteryzują się znacznie odmienną wartością współczynnika tłumienia fali elektromagnetycznej niż obszar tła – stąd wniosek, że taki obraz tomograficzny można modelować obrazem binarnym. Rekonstrukcja obrazu w tomografii binarnej jest numerycznie trudniejsza niż obrazu o cechach ciągłych, ponieważ zadanie optymalizacji binarnej jest zwykle niewypukłe. Mimo to, tomografia binarna umożliwia zrekonstruowanie obrazu dokładnego nawet z danych niekompletnych oraz jest znacznie bardziej odporna na zakłócenia szumowe. Takie podejście do geotomografii przedstawiłem na warsztatach naukowych pt. „Workshop on Discrete Tomography and Its Applications”, które odbyły się w Nowym Jorku w 2005 r. Mój referat spotkał się z akceptacją światowych ekspertów w dziedzinie tomografii dyskretnej. Zostałem zaproszony przez Prof. G. Hermana i Prof. A. Kuba do współpracy. W efekcie dalszych badań w zakresie tej tematyki, powstały nowe algorytmy do geotomografii binarnej. Zaproponowałem zregularizowany algorytm rekonstrukcji obrazu oparty na maksymalizacji statystyki Gibbsa-Boltzmannia oraz algorytm rzutowania gradientu z binarnym wymuszaniem. Efektywność zaproponowanych rozwiązań została potwierdzona zarówno w testach z danymi syntetycznymi jak i rzeczywistymi. Wyniki badań opublikowano w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (Zał. 4: [B.3]) oraz w Zał. 4: [C.5, F.3].

- **Nieparametryczna estymacja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa**

Podczas pobytu w Institute of Statistical Mathematics w Tokio włączyłem się aktywnie w realizację jednego z projektów badawczych tego instytutu. Podjąłem współpracę z Prof. K. Tanabe. Zajmowałem się bayesowską metodą nieparametrycznej estymacji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wielowymiarowych zmiennych losowych. W tej metodzie estymator jest formułowany podobnie jak w modelu jądrowej regresji logistycznej. Funkcja jądrowa może być wyrażona w bazie wielomianów, zwłaszcza wielomianów ortogonalnych. Do wyznaczenia współczynników liniowej kombinacji funkcji bazowych zastosowałem metodę Newtona. W moim podejściu wszystkie hiperparametry estymowane były na podstawie maksymalizacji rozkładów granicznych, wyznaczanych za pomocą próbkowania ważonego, stosując metodę MCMC lub przez aproksymację funkcji podcałkowej szeregiem Taylora do stopnia drugiego. Moja praca z tej tematyki zakończyła się opracowaniem skutecznych narzędzi w Matlabie do wyznaczania poszukiwanego estymatora. Dla wielu zbiorów testowych, estymator ten okazał się efektywniejszy niż np. znane estymatory jądrowe. Wyniki badań przedstawiono podczas warsztatów naukowych

„Workshop on Nonparametric Density Estimation Methods”, które odbyły się w Kioto w 2004 r. Wiedzę i doświadczenie jakie zdobyłem podczas realizacji tego projektu nadal wykorzystuję do rozwijania metod nieujemnej faktoryzacji macierzy, którymi zajmuję się obecnie.

- **Optymalizacja sieci telefonii komórkowej UMTS**

W 2004 roku podjąłem współpracę z ówczesnym Zakładem Radiokomunikacji w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Uczestniczyłem w trzech projektach badawczych związanych z planowaniem i optymalizacją sieci telefonii komórkowej trzeciej generacji UMTS. Zajmowałem się algorytmami numerycznymi w zastosowaniu do zadania poszukiwania optymalnych położzeń stacji bazowych oraz optymalnych wartości kątów pochylenia wiązki głównej promieniowania w antenach stacji bazowych, czyli tzw. tiltów. Są to zadania klasy *NP*-trudnej i zwykle rozwiązywane za pomocą algorytmów heurystycznych. Stosując dane syntetyczne oraz model propagacyjny Okumura-Hata, badałem różne strategie ewolucyjne, algorytmy genetyczne oraz algorytm inwazyjnych chwastów w kontekście wspomnianych zastosowań. Pod moją opieką powstały również dwie prace magisterskie o tej tematyce. Wyniki badań zostały opublikowane w Zał. 4: [B.7] (w roku publikacji czasopismo to znajdowało się na liście filadelfijskiej). Efektywność optymalizacji heurystycznej znacząco zależy od szybkości oceny dopasowania osobników w populacji. W rozważanym zastosowaniu, zadanie optymalizacji wiąże się z koniecznością estymacji mocy sygnałów wysyłanych przez anteny nadawcze (zarówno w terminalach jak i stacjach bazowych). Moce te można wyznaczyć z układu równań liniowych, otrzymanych z przekształcenia modelu sterowania mocą w systemie UMTS. W tym kontekście badałem różne metody iteracyjne, zwłaszcza bazujące na podprzestrzeni Kryłowa. Ponadto zajmowałem się również metodami redukcji wymiarowości analizowanego układu równań oraz warunkami jakie muszą być spełnione, aby rozwiązania były nieujemne (moce sygnałów nie mogą mieć ujemnych wartości). Wyniki badań opublikowano w następujących pracach w Zał. 4: [C.6, C.7, E.10, E.13, E.21, F.5].

- **Metoda FOCUSS dla podokreślonych układów równań**

Podokreślony układ równań to taki, w którym liczba niewiadomych jest większa niż liczba równań. Aby jego rozwiązanie było jednoznaczne, muszą być spełnione odpowiednie warunki jednoznaczności, dotyczące zarówno macierzy systemowej, jak i profilu rzadkości wektora rozwiązań. Najrzadsze rozwiązanie uzyskuje się, wyrażając zadanie optymalizacji w normie l_0 . Jednak w wielu zastosowaniach, wystarczająco dobre wyniki uzyskuje się już w normie l_1 . Do rozwiązania takiego zadania można zastosować różne algorytmy, jak np. poszukiwanie dopasowujące (ang. *matching pursuit*), ortogonalne poszukiwanie dopasowujące, algorytmy LASSO, itp. Moje zainteresowania w tym zakresie koncentrowały się wokół algorytmu FOCUSS. Jest to iteracyjny algorytm ważonych najmniejszych kwadratów, który jest podobny do reguły aktualizacji pierwszego kroku iteracyjnego w zregulowanej wieloparametrowej metodzie gradientów sprzężonych. Metodą tą zajmowałem się podczas doktoratu. Charakteryzuje się znacznie mniejszą złożonością obliczeniową niż wspomniane poszukiwania dopasowujące i już znalazł szerokie spektrum zastosowań, m.in. w rzadkiej rekonstrukcji sygnałów, próbkowaniu oszczędnym (ang. *compressed sensing*), rzadkim bayesowskim uczeniu, estymacji spektralnej oraz analizie sygnałów EEG/MEG. Obecnie istnieje wiele jego modyfikacji lub usprawnień. Moje badania dotyczyły głównie algorytmu M-FOCUSS, który jest szczególnie użyteczny do estymacji sygnałów złożonych z wielu próbek lub grupy sekwencyjnych wektorów.

Sygnaly źródłowe (w dziedzinie bezpośredniej lub transformowanej) w pewnych zastosowaniach, np. w EEG lub MEG, mogą być zarówno rzadkie jak i lokalnie gładkie. Celowe wydaje się zatem włączenie do procesu ich estymacji nie tylko funkcji wymuszających rzadkość ale też lokalną gładkość. Takie podejście badałem przy współpracy z Prof. A. Cichockim (*RIKEN Brain Science Institute*, Japonia). W wyniku tych badań powstał nowy algorytm SOB-M-FOCUSS do estymacji sygnałów o wspomnianych właściwościach. W algorytmie tym parametr regularyzacji estymowany jest automatycznie z danych pomiarowych, wykorzystując uogólnioną metodę walidacji krzyżowej. Wyniki badań opublikowano w czasopiśmie z listy filadelfijskiej (Zał. 4: [B.2]). Kolejne moje prace naukowe o tej tematyce dotyczą innego (rygorystycznego) sposobu wyprowadzenia formuł iteracyjnych algorytmu FOCUSS oraz usprawnień obliczeniowych w algorytmach FOCUSS i M-FOCUSS (Zał. 4: [B.1, D.17]). W pracach pokazano, że operacja odwrotności macierzy w podstawowej formule iteracyjnej algorytmu FOCUSS może być realizowana za pomocą algorytmu gradientów sprzężonych, co znacznie przyspiesza procedurę aktualizacji rozwiązania. Opublikowane prace są cytowane wielokrotnie w czasopismach z listy filadelfijskiej. Algorytm FOCUSS w połączeniu z filtracją Wienera znalazł również zastosowanie do rekonstrukcji obrazu w geotomografii elektromagnetycznej (Zał. 4: [E.5]).

- **Nieujemna faktoryzacja macierzy i tensorów**

W 2005 r. wyjechałem do *Laboratory for Advanced Brain Signal Processing* w *RIKEN Brain Science Institute*, podejmując współpracę z Prof. A. Cichockim w zakresie rozwoju metod nieujemnej faktoryzacji macierzy. Początkowo moja praca dotyczyła głównie implementacji algorytmów numerycznych w pakiecie narzędziowym ICALAB. Jednakże dzięki wiedzy nt. algorytmów rekonstrukcji obrazu i doświadczeniu w posługiwaniu się algorytmami numerycznymi mogłem szybko włączyć się w nurt zaawansowanych prac naukowo-badawczych wspomnianego laboratorium. Przy współpracy z innymi pracownikami tego laboratorium opracowałem nowy pakiet narzędziowy NMFLAB, w którym zaimplementowałem bardzo wiele badanych algorytmów i modeli NMF. Są to narzędzia służące do ślepej separacji obrazów lub sygnałów nieujemnych, udostępniane niekomercyjnie na stronie <http://www.bsp.brain.riken.jp>. Obecnie narzędzia te stosowane są w wielu dziedzinach nauki, a liczba pobrań tego pakietu już dawno przekroczyła tysiąc.

We wspomnianym laboratorium zajmowałem się różnymi aspektami nieujemnej faktoryzacji macierzy, ale w obszarze zastosowań do przetwarzania sygnałów. Początkowo pracowałem nad regularyzacją algorytmów multiplikatywnych (Zał. 4: [E.9]) oraz analizowałem właściwości statystycznych miar podobieństwa (Zał. 4: [D.22, D.23]). W kolejnym etapie moje badania koncentrowały się wokół zastosowań metod quasi-Newtona. Opracowałem bardzo efektywne algorytmy bazujące na metodzie Newtona do minimalizacji różnych funkcji celu, zwłaszcza dywergencji alfa i beta (Zał. 4: [D.21]). Miary te stosowałem również do oceny nieujemnych czynników w modelach dekompozycji tensorach (Zał. 4: [D.20, E.8]). Jestem autorem pomysłu zastosowania wygładzania estymowanych cech w modelu NMF za pomocą losowego pola Markowa (Zał. 4: [D.14, E.7]). Jest to koncepcja inspirowana bayesowskimi metodami rekonstrukcji obrazów tomograficznych. Uczestniczyłem w badaniach nad wielowarstwową strukturą modelu NMF. Rozwiązanie technologiczne oparte na takiej strukturze zostało opatentowane przez *US Patent and Trademark Office* (Zał. 4: [G.1]).

Po powrocie do jednostki macierzystej nadal rozwijałem metody NMF ale w szerszym spektrum ich zastosowań. Opracowałem bardziej specyficzne algorytmy NMF, przeznaczone do konkretnych zastosowań, np. takich jak twarde grupowanie danych, grupowanie dokumentów tekstowych, klasyfikacja obrazów twarzy oraz sygnałów akustycznych (Zał.

4: [C1, D.3–D.13, E.2–E.4, F.1, F.2, F.4]). Zaproponowałem nową strukturę modelu NMF, w której wektory cech wyrażone są przez liniową kombinację funkcji bazowych (Zał. 4: [D.4]). Jest to model szczególnie użyteczny do estymacji sygnałów lokalnie gładkich i o małej rzadkości. Model ten był rozwijany i usprawniany w kolejnych pracach (Zał. 4: [D.2, E.1]), które powstały już po zredagowaniu monografii habilitacyjnej. Jedną z ostatnich moich prac (Zał. 4: [D.1]) dotyczy również tzw. modelu „online NMF”, przeznaczonego przede wszystkim do dynamicznej estymacji wektorów cech. Takie modele potrzebne są do opisu splotowego mieszania niestacjonarnych sygnałów, propagowanych wielodrogowo.

6. Podsumowanie dorobku naukowego

Tabela 1: Zestawienie dorobku naukowego:

Kategoria	Liczba publikacji		
	Przed doktorem	Po doktoracie	Razem
Publikacje z tzw. „listy filadelfijskiej”, w tym:	0	15	15
• artykuły z bazy Journal Citation Reports (JCR):	0	13	13
○ autor	0	3	3
○ współautor	0	10	10
• pozostałe artykuły (źródło: <i>Web of Science</i>):	0	2	2
Artykuły w czasopismach spoza listy filadelfijskiej:	2	8	10
Książki:	0	2	2
• monografie w jęz. polskim	0	1	1
• podręczniki/monografie w jęz. angielskim	0	1	1
Rozdziały w książkach:	0	4	4
Referaty konferencyjne:	10	45	55
w tym:			
• publikowane w serii Springer LNCS/LNAI (do 2010 r. dokumentowane jako artykuł o zasięgu międzynarodowym, a obecnie jako referat konferencyjny)	0	23	23
• publikowane w IEEE Xplore	1	8	9
• pozostałe	9	14	23
Patenty:	0	1	1
Publikacje popularno-naukowe:	0	1	1
Prace przyjęte do druku:		3	3
Podsumowanie:	12	79	91

Tabela 2: Informacje o publikacjach z bazy JCR.

Czasopismo	Impact Factor (IF) (rok publ.)	Impact Factor (IF) z 2013 r.	Pkt. MNiSW z 2013 r.	Liczba publ.	Rok publ.
International Journal of Applied Mathematics and Computer Science	1,008	1,008	25	1	2014
Cognitive Computation	0,867	0,867	20	1	2013
IEEE Transactions on Neural Networks	2,952	3,766	45	1	2011

IEEE Transactions on Signal Processing	2,212 z 2009 r.	2,813	32	1	2009
	2,335 z 2008 r.	2,813	32	1	2008
IEEE Signal Processing Magazine	3,758	3,368	32	1	2008
Theoretical Computer Science	0,806	0,489	27	1	2008
Neurocomputing	1,234	1,634	20	1	2008
International Journal of Neural Systems	0,488	5,054	20	1	2007
Signal Processing	0,737	1,851	27	1	2007
Electronics Letters	1,063	1,038	27	1	2006
IEEE Sensors Journal	1,100	1,475	32	1	2005
Mathematics and Computers in Simulation	0,512	0,836	25	1	2004
Podsumowanie:	19,072	27,012	364	13	

Całkowita liczba punktów MNiSW za dorobek naukowy (po doktoracie) wynosi: 706

Tabela 3: Liczby cytowań moich prac oraz h-index

Bazy danych	h-index	Liczba cytowań
Web of Science (bez autocytowań z dn. 25.06.2014)	12	714
Scopus	15	1013
Google Scholar (z dn. 29.07.2014)	21	2215

31.07.2014r.

Rafał Zdunek