

Raport stiintific

privind implementarea proiectului in perioada octombrie 2011 – octombrie 2016

Proiect PN-II-ID-PCE-2011-3-0400, “Reprezentari rare in prelucrarea semnalelor”

Rezultate obtinute si publicatii

Din activitatea de cercetare desfasurata pe intreaga perioada a acestui proiectul au rezultat 27 de publicatii. Dintre acestea 9 sunt articole in reviste cotate ISI [1-9], unele extrem de prestigioase ca IEEE Transactions on Signal Processing, Signal Processing, IEEE Signal Processing Letters, Linear Algebra and Its Applications, Optimization and Engineering (toate “rosii” sau “galbene” in aceasta perioada, 7 articole fiind de acest tip). Mentionez ca articolul [4] a fost realizat in buna masura (sa zicem 80%) in cadrul unui proiect Idei anterior. Un al zecelea articol a fost publicat intr-o revista indexata (Scopus).

Restul de 17 articole au fost publicate la diverse conferinte, dintre care unele de prima mana: ICASSP, conferinta numarul unu in prelucrarea semnalelor (3 articole) si EUSIPCO, principala conferinta europeana in prelucrarea semnalelor (7 articole). Dintre conferintele mai putin importante, inclusiv cele din Romania, au fost selectate cele care sunt indexate in bazele de date cele mai importante. Astfel 14 din cele 17 articole sunt (sau vor fi) indexate ISI proceedings si toate 17 indexate Scopus.

De asemenea, doua articole de revista sunt aproape gata, unul pentru trimitere, celalalt deja la prima revizie.

Ca rezultate colaterale, dar nu lipsite de importanță, trebuie mentionate tezele de doctorat ale lui Cristian Rusu si Paul Irofti, sustinute in 2012, respectiv 2015, amandoua bazate pe munca in cadrul acestui proiect.

Cateva lucrari au deja un numar rezonabil de citari. De exemplu, pe Scopus, cele mai citate sunt [1] 20 (exclusiv de alti autori), [2] 14, [3] 6, [5] 5, [6] 9.

Toate rezultatele obtinute sunt de natură algoritmică. Articolele se sprijină pe programe scrise în Matlab sau C. Unele din aceste programe sunt disponibile pe site-ul proiectului. Pe celelalte le distribuim la cerere prin email.

Directii de cercetare

In propunerea de proiect au fost specificate patru directii de cercetare:

- O1.** Proiectarea filtrelor rare
- O2.** Problema celor mai mici patrate totala rara (sparse total least squares)
- O3.** Filtrare rara distribuita
- O4.** Clasificare cu predictorii rari

Datorita succeselor obtinute in probleme conexe si trecerii timpului, directiile O4 si O3 au fost transformate in

O5. Proiectarea dicționarelor pentru reprezentări rare și clasificare

O6. Proiectarea filtrelor rare adaptive

De asemenea, datorita sansei si a unor colaborari neasteptate initial, au fost deschise directii noi

O7. Filtre și polinoame rare. Utilizare în aproximări de funcții pozitive

O8. Modele grafice si independenta conditionala.

Directiile in care am avut cele mai bune rezultate sunt O1, O2, O5 si O6. Directiile O3 si O4 n-au produs nimic semnificativ decat dupa transformarea lor in O5 si O6, de aceea nu vor mai fi pomenite in continuare.

Descriere tehnica a rezultatelor

Voi detalia in continuare avansurile si rezultatele efective obtinute. Membrii echipei (Bogdan Dumitrescu, Bogdan Sicleru, Cristian Rusu, Paul Irofti) vor fi numiti prin initialele lor.

O1. La aceasta tema au lucrat BD, CR si BS. Pornind de la ideea generala de filtru rar, am dezvoltat mai multe rezultate.

1. Filtrele FIR cu s coeficienti diferiti de zero pot avea caracteristici de frecventa mai bune decat filtre cu lungime s (cu ordin minim), iar complexitatea implementarii lor este similara. Ele au intarzierea de grup mai mare, dar in multe aplicatii acest dezavantaj este neglijabil. CR si BD au studiat algoritmi pentru proiectarea de filtre rare folosind metoda L1 reponderata iterativ, urmata de eliminarea unul cate unul a coeficientilor celor mai mici. Pentru filtre FIR cu o singura variabila, rezultatele obtinute au fost doar usor superioare celor din [BWO10]. In schimb, pentru filtre 2D am obtinut rezultate mult mai bune decat in [LuHi11]. Articolul a fost publicat de revista Signal Processing [1].
2. O problema conexa, concretizata in [11] (BS+BD), a fost proiectarea bancurilor de filtre rare 2-D prin metoda transformarii de variabile [TK93], care permite un compromis intre complexitatea implementarii si calitatea raspunsului in frecventa al filtrului obtinut. Fiecare filtru al bancului este implementat ca o combinatie intre un filtru simplu 1D si un filtru 2D, numit de transformare, cu o anume structura. Noi am urmarit obtinerea unui filtru rar de transformare. Metoda cea mai eficienta a fost cea lacoma (greedy), prin care cel mai mic coeficient al filtrului de transformare este fixat la zero, apoi optimizarea continua pentru ceilalti coeficienti. Se pot astfel obtine filtre rare care au energia in banda de oprire mai mica decat a filtrelor pline.
3. Tot BS si BD au investigat problemei factorizarii spectrale rare, in care se da o secventa de autocorelatie rara si se doreste gasirea unui factor spectral rar. In general, doar un factor spectral este rar (si eventual transformari simple ale lui). Metoda propusa se bazeaza pe o parametrizare a polinoamelor nenegative rare prin matrice pozitive semidefinite cu dimensiune redusa. In multe cazuri, problema de programare semidefinita corespunzatoare factorizarii spectrale, care are ca scop minimizarea rangului matricei asociate secventei de autocorelatie, produce matrice cu rangul 1 din care se poate obtine polinomul. Rezultatele, superioare celor din [LV11,JOH12], au fost prezentate intr-o lucrare de conferinta [14].

O2. Problema celor mai mici patrute totale (CMMPT) rara este un subiect foarte actual, mai multe lucrari recente tratand diverse forme ale ei [HS10,ZLG11], fara a mentiona neaparat explicit apartenenta la acest

tip de problema. BD a obtinut o conditie teoretica ce caracterizeaza situatia in care solutiile problemelor CMMP si CMMPT rare au acelasi suport de dimensiune s . Conditia este exprimata in functie de constantele de izometrie restransa ale matricei sistemului si de unghiul minim intre subspatii de dimensiune s formate de coloanele matricei. Nu exista un rezultat similar in literatura de specialitate. De asemenea, au fost propusi cativa algoritmi lacomi, care in multe cazuri gasesc o solutie mai apropiata de cea reala decat algoritmul din [ZLG11]. Rezultatele au fost publicate in [3].

O5. Proiectarea dictionarelor pentru reprezentari rare a fost directia cu cele mai multe rezultate, la ea lucrind BD, CR si PI. In ordine cronologica, rezultatele obtinute sunt urmatoarele.

1. Un algoritm pentru antrenarea de dictionare cu dimensiune mica, descris in [2], este unul din cele mai semnificative rezultate obtinute in acest proiect. Algoritmul construiește dictionarul prin adaugarea de atomi alesi dintre cei mai prost reprezentati vectori de antrenare, urmata de cativa pasi in stil K-SVD de antrenare a dictionarului. Adaugarea si reantrenarea se repeta pana cand dictionarul satisface o eroare de reprezentare impusa. Deoarece se lucreaza cu dictionare mici, cel puțin in fazele de inceput, algoritmul este relativ rapid, cu timp total comparabil cu cel al K-SVD. Mai important, dimensiunea dictionarului este cu 30-50% mai mica decat cea a dictionarului antrenat direct cu K-SVD. In acest fel, viteza aplicatiilor care folosesc dictionarele creste semnificativ, deoarece timpul de calcul al unei reprezentari este (cel puțin) proportional cu dimensiunea dictionarului.
2. Un rezultat interesant a fost obtinut intr-un domeniu conexe proiectarii de dictionare pentru reprezentari rare, anume obtinerea de matrice cat mai incoerente, aceasta insemnand ca produsul scalar intre orice doua coloane ale matricei este cat mai mic. Aceste matrice, sau cadre grassmaniene, sunt utile si in alte zone, de exemplu comunicatii [TaKim02]. Ideea de baza este de a porni de la o matricea aleatoare cu elemente normal distribuite, care are proprietati bune de incoerenta in medie, si de a aplica apoi o procedura iterativa de crestere a incoerentei. In fiecare iteratie se minimizeaza produse scalare intre coloanele matricei cautate si cele ale matricei de la pasul anterior, rezultand astfel o problema de programare liniara. Desi procedura este relativ lenta pentru dimensiuni mari, ea produce rezultate mai bune decat cele obtinute in [TKK12] (cele mai bune in momentul respectiv), apropiindu-se de limita Welch pentru valoarea maxima a incoerentei. Rezultatele au fost publicate in [5].
3. O directie de cercetare cu potential mare este antrenarea dictionarelor structurate. Am studiat cazul in care dictionarul este format din matrice circulante. Un astfel de dictionar rezolva din start problema variantei la deplasari ale datelor, fiind insensibil la acestea deoarece cuprinde explicit toate versiunile deplasate ale unui semnal. Dificultatea majora a fost obtinerea unui algoritm eficient de proiectare, atat in timp cat si ca precizie a implementarii. Folosind proprietati ale matricelor circulante, ale caror produs cu un vector poate fi exprimat cu FFT, si o procedura iterativa de antrenare, in care fiecare matrice circulanta este imbunatatita separat, am obtinut rezultate excelente, mai bune decat in [SHA06,Bart12]. Articolul rezultat este [6].
4. Simplificarea setului de antrenare pentru optimizarea dictionarelor pentru reprezentari rare cu ajutorul algoritmului K-SVD [AEB06] este utila pentru a reduce durata mare de antrenare necesitata de algoritmul K-SVD atunci cand numarul vectorilor de antrenare depaseste cateva zeci de mii. Algoritmul propus in [12] se bazeaza pe gruparea vectorilor de antrenare in cluster si utilizarea algoritmului K-SVD folosind un singur reprezentant al fiecarui cluster. Gruparea in cluster se face

utilizand doar produse scalare si un proces iterativ de grupare. Algoritmul rezultat este mult mai rapid decat K-SVD iar eroarea de reprezentare cu dictionarul astfel obtinut este comparabila cu cea a dictionarului dat de K-SVD.

5. Antrenarea dictionarelor formate din matrice ortogonale, in care reprezentarea unui vector de antrenare se face intr-o singura astfel de matrice, este o idee noua. Chiar daca dictionarele obtinute au dimensiune mare, reprezentarea este extrem de rapida, batand chiar algoritmi rapizi ca OMP, in conditiile unor erori de reprezentare egale. Am demonstrat practic ca se pot obtine reprezentari mai rapide decat in dictionare nestructurate. Rezultatele au fost publicate in [15]. PI a continuat aceasta directie de cercetare prin paralelizarea dictionarelor formate din matrice ortogonale, care aduce un salt suplimentar de viteza, obtinandu-se timpi de executie mult mai mici decat ai unor algoritmi standard ca Orthogonal Matching Pursuit. De asemenea, timpul de antrenare este net inferior celui al K-SVD (inclusiv in varianta paralela). Am investigat de asemenea situatiile in care eroarea de reprezentare este comparabila cu cea a K-SVD. A rezultat articolul [9].
6. Daca in [2] am propus o procedura completa in pentru proiectarea de dictionare cu numar mic de atomi, o noua incercare este dezvoltarea unui algoritm rapid care sa produca o buna initializare pentru algoritmi consacratii precum K-SVD. Procedura porneste de la un dictionar incoerent obtinut cu [5] (el poate fi inlocuit, in cazul cel mai simplu, cu o matrice ortogonala generata aleator) si elimina o parte din atomii lui. In acest fel se obtine o multime de atomi cu proprietati bune de coerenta (adica foarte bine separati). Peste care se adauga atomi pornind de la vectorii de antrenare cel mai prost reprezentati. Complexitatea mica este obtinuta din faptul ca in pasul de eliminare, antrenarea se face doar prin rotatii (inmultiri cu matrice ortogonale), deci atomii initiali nu sunt antrenati individual, iar in pasul de adaugare nu se reantreneaza intreg dictionarul, ci doar atomii nou adaugati. Rezultatele, publicate in [17], sunt cele scontate, adica initializarea propusa scurteaza timpul total de antrenare pentru erori similare de reprezentare cu K-SVD, sau, la timpi de executie egali (reglati din numarul de iteratii K-SVD), produce eroare mai mica.
7. Deoarece optimizarea dictionarelor pentru dictionare rare are complexitate mare, o idee naturala este de a incerca obtinerea unor algoritmi paraleli. PI s-a ocupat de implementarea pe GPU, in OpenCL, a unor versiuni paralele ale algoritmilor consacratii. Dupa depasirea unor dificultati tehnice legate de implementarea OpenCL si BLAS pe tipul de placa AMD de care dispunem (OpenCL e un standard relativ nou si implementarile unor functii de baza nu sunt 100% stabile, dupa cum PI a constatat direct), primele rezultate au fost obtinute prin modificarea algoritmului K-SVD. In afara paralelizarii unor blocuri ale algoritmului, am testat si varianta in care mai multi atomi sunt actualizati simultan, spre deosebire de functionarea pur secventiala presupusa optima pentru K-SVD. Surprinzator, aceasta asigura nu doar un timp de executie mai scurt, ci si o eroare de reprezentare finala mai mica, cu pretul minor al unei convergente neuniforme. Noul algoritm si prezentarea rezultatelor obtinute pe placa GPU de care dispunem au produs lucrarea [18], extinsa in [10]. Au fost obtinute accelerari de aproximativ 10 ori, ceea ce e un rezultat meritoriu pentru placa GPU utilizata. Un studiu mai amanuntit al performantelor algoritmilor paraleli in privinta erorii de reprezentare a fost publicat in [25].
8. Impactul algoritmului de reprezentare asupra rezultatului antrenării dictionarelor pentru reprezentări rare a fost studiat in [20]. Pornind de la observația că mai mulți algoritmi de antrenare de dictionare folosind Orthogonal Matching Pursuit (OMP) dau rezultate similare pentru anumite probleme, am investigat și alți algoritmi de reprezentare, mai lenți decât OMP, dar cu rezultate

potențial superioare. Orthogonal Least Squares (OLS), Projection-Based Orthogonal Matching Pursuit (POMP) și versiunea nou introdusă Projection-Based OLS (POLs), Look-Ahead Orthogonal Least Squares (LAOLS) [CVS12] au fost combinate cu algoritmi de actualizare de atomi din [AEB06], [SBJ13], [SaMa13]. Rezultatele numerice arată că într-adevăr, algoritmi superiori de reprezentare duc la rezultate de antrenare mai bune, deși nu este neapărat clar care combinație este mai bună. Mai interesant, se poate face antrenarea (când viteza de execuție nu e critică) cu un algoritm mai bun, dar utilizarea (când viteza este importantă) cu OMP; noul algoritm POLs aduce beneficiile cele mai mari în această situație.

9. Lucrarea [21] este dedicată studiului dicționarelor co-rare. Reprezentările co-rare utilizează atomii din dicționar pentru a descrie un subspațiu ortogonal pe spațiul semnalelor (spre deosebire de reprezentările rare, unde spațiul semnalelor este modelat direct). Lucrarea [21] prezintă un algoritm pentru antrenarea unui dicționar pentru reprezentări co-rare și modalitatea de utilizare a acestuia în cazul dicționarelor compuse din blocuri ortogonale.
10. Dicționarele compuse sunt formate din două grupuri de atomi: unul antrenat standard cu semnale de test, înaintea utilizării propriu-zise, și altul antrenat chiar cu semnalele care trebuie prelucrate (de exemplu pentru eliminarea zgomotului). Desigur, pentru al doilea grup este necesar un algoritm rapid, conform restricțiilor de prelucrare. Pi a propus în [21] utilizarea unui bloc ortogonal pentru acest al doilea grup, datorită existenței unor algoritmi rapizi de antrenare. Rezultatele obținute sunt mai bune decât cele cu dicționare clasice cu dimensiuni comparabile.
11. Deși aparent nu are nicio legătură cu subiectul nostru de cercetare, lucrarea [23], dedicată unei metode robuste de estimare a direcțiilor de sosire (DOA – Direction of Arrival), are ca punct de inspirație pentru rezolvarea unei probleme de robustețe o analiză a direcțiilor atomilor în cazul reprezentărilor rare. Deși problema de plecare este total diferită, rezolvarea ei aproximativă și rapidă se bazează pe similaritatea cu reprezentarea rară pe bază de dicționar.
12. Regularizarea problemei de optimizare pe care se bazează învățarea dicționarelor aduce beneficii pentru reprezentare, după cum a fost demonstrat în [DXW12]. Metoda de optimizare din această lucrare se bazează pe tehnici de gradient, care sunt destule de lente în comparație cu algoritmi de tipul K-SVD. Am arătat în [24] că algoritmi K-SVD pot fi adaptați la criteriul de optimizare regularizat (în pofida afirmației contrare din [DXW12]) și că sunt mult mai rapizi. De asemenea, am studiat regularizarea cu un criteriu referitor la incoerența dicționarului. O altă lucrare este aproape gata.
13. În [27] am propus o abordare algoritmică nouă prin tratarea simultană problemelor de învățare a dicționarelor și căutare a subspațiilor. În prima se dorește găsirea unei dimensiuni optime a dicționarului, în timp ce în a doua tinta este dimensiunea exactă (și necunoscută) a subspațiului. De aceea, în ambele probleme se poate pleca de la dicționare inițiale de dimensiuni mai mari, care sunt reduse prin utilizarea unor tehnici specifice atât în etapa de reprezentare, cât și în cea de actualizare a dicționarului. Algoritmul rezultat a fost adaptat și la cazul în care datele de antrenare sunt incomplete.

O6. La această temă a lucrat BD împreună cu un colaborator extern, Alexandru Onose, la Universitatea Tehnică din Tampere. Rezultatele sunt [7] și [19]. Ambele lucrări investighează metode adaptive aleatoare de descreștere pe coordonate pentru găsirea soluțiilor rare ale unor sisteme de ecuații liniare. În [7] este tratată problema CMMP standard, iar în [19] problema CMMP totală (vezi și O2). Contribuția centrală este o metodă de modificare adaptivă a probabilităților cu care se aleg coordonatele, astfel încât viteza de

convergență să crească. În esență, probabilitățile au două componente: una care asigură echitatea trecerii peste toate coordonatele și alta care dă mai multă importanță coordonatelor corespunzătoare coeficienților nenuli. Au fost demonstrate rezultate referitoare la convergență pentru algoritmul CMMP și sunt în studiu cele referitoare la CMMPT. Au fost obținute rezultate numerice mai bune decât cele cu algoritmi anteriori (e.g. [ABG10], [OD13], [ZN13]).

07. La această temă au lucrat BS și BD. Subiectul principal a fost aproximarea sumelor de exponențiale (SdE) reale pozitive cu polinoame. SdE apar în mod natural în modelarea densităților de probabilitate, cu aplicații în statistică [Duf07], finanțe, asigurări, dar și în răspunsurile unor clase de sisteme. Am utilizat două tehnici pentru rezolvarea problemelor de optimizare cu SdE printre variabile. În ambele cazuri, o aproximare inițială a exponenților se obține adăugând funcției obiectiv un termen care forțează raritatea SdE. Apoi se caută valori mai bune ale exponenților cu simpli pași de gradient. De asemenea, se profita de faptul că pentru exponenți fiși, problema de optimizare este convexă, deci coeficienții SdE pot fi optimizați exact. Am aplicat metodele obținute pentru modelarea densităților de probabilitate empirice, dar și pentru proiectarea filtrelor IIR cu răspuns pozitiv.

1. Dacă exponențialele au exponenți cu valori parte dintr-o progresie aritmetică, atunci SdE poate fi văzută ca un polinom rar, pentru care restricția de pozitivitate poate fi exprimată printr-o inegalitate liniară matriceală (LMI). Pașii de gradient produc în general exponenți care nu aparțin unei progresii aritmetice; totuși, aproximând exponenții cu o progresie aritmetică cu pas suficient de mare astfel încât gradul polinomului asociat să nu fie prea mare, și astfel complexitatea problemei de optimizare să rămână acceptabilă, am obținut o procedură de optimizare care da rezultate foarte bune pentru SdE cu un număr rezonabil de termeni (<10). Rezultatele au fost publicate în [16].
2. Pentru cazul general, când exponenții au valori arbitrare, am utilizat două aproximări polinomiale unilaterale ale exponențialei, una superioară, alta inferioară. Aproximările se fac pe intervale a căror lungime poate fi calculată automat, pentru o precizie dorită de aproximare; am constatat că este suficient un număr mic de intervale pentru a obține precizii practice bune. În acest fel, probleme de optimizare cu SdE pot fi approximate, cu precizie arbitrară, prin probleme cu polinoame, a căror rezolvare este posibilă cu rutine standard de genul celor din biblioteca POS3POLY [4]. Rezultatele au fost publicate în [8].

08. La această temă au lucrat BD împreună cu C.D. Giurcaneanu de la Universitatea din Auckland, Noua Zeelandă și un doctorand al lui (Said Maanan). Modelele grafice asociate unor serii de timp corespunzătoare unor fenomene studiate împreună reprezintă fiecare fenomen printr-un nod al grafului, dependentă (condiționată de ansamblul fenomenelor) dintre două fenomene fiind reprezentată printr-un arc al grafului. O metodă de studiere a independenței fenomenelor se bazează pe construcția matricii inverse de densitate spectrală (MIDS), a cărei elemente (ideale) nule marchează perechi independente de fenomene. Am studiat utilizarea modelelor AR în acest context, caz în care MIDS este o matrice polinomială (aproximativ) rară. Determinarea ordinului modelului și a structurii de zerouri se fac cu metode de optimizare convexă, combinate cu utilizarea unor criterii de teoria informației. În particular, am propus o variantă multivariabilă a criteriului RNML (renormalized maximum likelihood). Combinația de metode conduce la rezultate foarte bune, mai rapide decât cele din abordări recente. Au rezultat articolul [26], un articol de revistă fiind în acest moment în revizie la Signal Processing.

Greutati intampinate si alte informatii

Reducerile bugetului, extinderea duratei la 5 ani si incertitudinile financiare au condus la dificultati in mentinerea consistentei echipei. Din aceste motive, Cristian Rusu a plecat la un postdoc in Italia in 2013, apoi a revenit pentru un timp, dupa care a plecat din nou. In locul sau a fost angajat Paul Irofti. Din pacate, Bogdan Sicleru s-a imbolnavit grav si, dupa o perioada in care a lucrat mai putin, in 2014 a renuntat complet la activitatea de cercetare (ca si la cea didactica). Insecuritatea finantarii a facut sa nu mai angajez pe nimeni. Dupa trei ani de buget redus, revenirea la (aproape) normal in 2016 a fost tardiva pentru a determina schimbari semnificative. Din punctul meu de vedere, acest tip de proiect este util in primul rand pentru plata unor tineri care sa faca cercetare in cadrul doctoratului sau imediat dupa. Nu este nevoie de salarii foarte mari, pentru ca ele pot fi completate de bursa de doctorat si eventuale activitati didactice, dar constanta este extrem de importanta. Sunt tineri care efectiv nu au suficiente resurse daca veniturile li se injumatatesc pentru o perioada mai lunga.

Pagina web dedicata proiectului este <http://www.schur.pub.ro/Idei2011.htm>.

Articole publicate in reviste ISI

- [1] C.Rusu, B.Dumitrescu – Iterative Reweighted l1 Design of Sparse FIR Filters, *Signal Processing*, vol.92, no.4, pp.905-911, Apr. 2012.
- [2] C.Rusu, B.Dumitrescu – Stagewise K-SVD to Design Efficient Dictionaries for Sparse Representations, *IEEE Signal Processing Letters*, vol.19, no.10, pp.631-634, Oct. 2012.
- [3] B.Dumitrescu – Sparse Total Least Squares: Analysis and Greedy Algorithms, *Linear Algebra and its Applications*, vol.438, no.6, pp.2661-2674, Mar. 2013.
- [4] B.C.Sicleru, B.Dumitrescu - POS3POLY - a MATLAB Preprocessor for Optimization with Positive Polynomials, *Optimization and Engineering*, vol.14, no.2, pp.251-273, 2013.
- [5] C. Rusu - Design of incoherent frames via convex optimization, *IEEE Signal Processing Letters*, vol.20, no.7, pp. 673-676, July 2013.
- [6] C. Rusu, B. Dumitrescu, S. Tsiftaris - Explicit shift-invariant dictionary learning, *IEEE Signal Processing Letters*, vol.21, no.1, pp.6-9, Jan. 2014.
- [7] A.Onose, B.Dumitrescu - Adaptive Randomized Coordinate Descent for Sparse Systems: Lasso and Greedy Algorithms, *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol.63, no.15, pp.4091-4101, Aug. 2015.
- [8] B.Dumitrescu, B.C.Sicleru, F.Avram - Modeling probability densities with sums of exponentials via polynomial approximation, *J. Computational and Applied Mathematics*, vol.292, pp.513-525, 2016.
- [9] P. Irofti - Efficient Parallel Implementation for Single Block Orthogonal Dictionary Learning, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 101–108, 2016.

Articole publicate în alte reviste

- [10] P. Irofti, Efficient Dictionary Learning Implementation on the GPU Using OpenCL, *UPB Scientific Bulletin, series C*, vol. 78, no. 3, pp. 39–50, 2016.

Articole publicate la conferinte

- [11] B.C.Sicleru, B.Dumitrescu – Least-Squares Design of 2-D Sparse Nonseparable Filter Banks Using Transformation of Variables: a Greedy Approach, *EUSIPCO*, Bucharest, Romania, pp. 76-80, Aug. 2012.
- [12] C.Rusu – Clustering Before Training Large Datasets - Case Study: K-SVD, *EUSIPCO*, Bucharest, Romania, pp. 2188-2192, Aug. 2012.
- [13] C.Rusu – Fast Design of Efficient Dictionaries for Sparse Representation, *Int. Workshop Machine Learning for Signal Processing*, Santander, Spain, art. no. 6349795, Sep. 2012.
- [14] B.C.Sicleru, B.Dumitrescu - Greedy Sparse Spectral Factorization Using Reduced-Size Gram Matrix Parameterization, *EUSIPCO*, Marrakech, Morocco, Sep. 2013.
- [15] C.Rusu, B.Dumitrescu - Block Orthonormal Overcomplete Dictionary Learning, *EUSIPCO*, Marrakech, Morocco, Sep. 2013.
- [16] B.Dumitrescu, B.C.Sicleru - Optimization with sums of exponentials and applications, *Int. Conf. Acoustics Speech Signal Proc. (ICASSP)*, Florence, Italy, pp.370-374, May 2014.
- [17] C.Rusu, B.Dumitrescu - An initialization strategy for the dictionary learning problem, *Int. Conf. Acoustics Speech Signal Proc. (ICASSP)*, Florence, Italy, pp.6781-6785, May 2014.
- [18] P.Irofti, B.Dumitrescu - GPU Parallel Implementation of the Approximate K-SVD Algorithm Using OpenCL, *European Signal Proc. Conf. (EUSIPCO)*, Lisbon, Portugal, pp.271-275, Sep. 2014.
- [19] A.Onose, B.Dumitrescu - Adaptive Cyclic and Randomized Coordinate Descent for the Sparse Total Least Squares Problem, *European Signal Processing Conf. (EUSIPCO)*, Nice, France, pp.1726-1730, Sep. 2015.
- [20] P.Irofti, B.Dumitrescu - Overcomplete Dictionary Design: the Impact of the Sparse Representation Algorithm, *Proc. 20th. Int. Conf. on Control Systems and Computer Science*, Bucharest, Romania, pp.901-908, May 2015.
- [21] P.Irofti, B.Dumitrescu - Cospase Dictionary Learning for the Orthogonal Case, *19th. Int. Conf. System Theory, Control and Computers*, Cheile Gradistei, Romania, pp.343-347, Oct. 2015.
- [22] P. Irofti - Sparse Denoising with Learned Composite Structured Dictionaries, *19th. Int. Conf. System Theory, Control and Computers*, Cheile Gradistei, Romania, pp.331-336, Oct. 2015.
- [23] B.Dumitrescu, C.Rusu, I.Tabus, J.Astola - Low-complexity robust DOA estimation, *Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP)*, Brisbane, Australia, pp.2794-2798, Apr. 2015.
- [24] P.Irofti, B.Dumitrescu - Regularized Algorithms for Dictionary Learning, *Int. Conf. Communications*, Bucharest, Romania, pp.439-442, June 2016.
- [25] P.Irofti, B.Dumitrescu - Overcomplete Dictionary Learning with Jacobi Atom Updates, *Int. Conf. Telecommunications and Signal Processing*, Vienna, Austria, June 2016.
- [26] S.Maanan, B.Dumitrescu, C.D.Giurcaneanu - Renormalized Maximum Likelihood for Multivariate Autoregressive Models, *EUSIPCO*, Budapest, Hungary, pp. 150-154, Sep. 2016.

[27] B.Dumitrescu, P.Irofti - Low Dimensional Subspace Finding via Size-Reducing Dictionary Learning, *IEEE Int. Workshop Machine Learning for Signal Processing*, Salerno, Italy, Sep. 2016.

Bibliografie

[AEB06] M. Aharon, M. Elad, A. Bruckstein, „K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation,” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol.54, no.11, pp. 4311–4322, Nov. 2006.

[ABG10] D. Angelosante, J. A. Bazerque, and G. B. Giannakis, “Online adaptive estimation of sparse signals: where RLS meets the l1-norm,” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 58, no. 7, pp. 3436–3447, Jul. 2010.

[Bart12] Q. Barthelemy, A. Larue, A. Mayoue, D. Mercier and J. I. Mars, “Shift & 2D Rotation Invariant Sparse Coding for Multivariate Signals”, *IEEE Tran. Signal Proc.*, vol. 60, no. 4, pp. 1584–1611, 2012.

[BWO10] T. Baran, D. Wei and A. V. Oppenheim, Linear Programming Algorithms for Sparse Filter Design, *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 58, no. 3, pp. 1605–1617, 2010.

[CVS12] S. Chatterjee, M. Vehkaperä, and M. Skoglund, “Projection-Based and Look-Ahead Strategies for Atom Selection,” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 60, no. 2, pp. 634–647, Feb. 2012.

[DXW12] W. Dai, T. Xu, and W. Wang. “Simultaneous Codeword Optimization (SimCO) for Dictionary Update and Learning.” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 60, no.12, pp. 6340–6353, Dec. 2012.

[Duf07] D. Dufresne, Fitting Combinations of Exponentials to Probability Distributions, *Appl. Stochastic Models Bus.Ind.*, vol. 23, pp. 23–48, 2007.

[HS10] M. Herman, T. Strohmer, “General Deviants: An Analysis of Perturbations in Compressed Sensing”, *IEEE J. Sel. Topics Signal Proc.*, vol.4, no.2, pp.342–349, 2010.

[JOH12] K. Jaganathan, S. Oymak, and B. Hassibi, “Phase retrieval for sparse signals using rank minimization,” in *Proc. Int. Conf. Ac. Speech and Sign. Proc. (ICASSP)*, Kyoto, Japan, March 2012, pp. 3449–3452.

[LuHi11] W. S. Lu and T. Hinamoto, Two-dimensional digital filters with sparse coefficients, *Multidim. Syst. Signal Proc.*, vol. 22, no. 1-3, pp. 173–189, 2011.

[LV11] Y.M. Lu and M. Vetterli, “Sparse spectral factorization: unicity and reconstruction algorithms,” in *Proc. Int.Conf. Ac. Speech and Sign. Proc. (ICASSP)*, Prague, Czech Republic, May 2011, pp. 5976–5979.

[OD13] A. Onose and B. Dumitrescu, “Adaptive matching pursuit using coordinate descent and double residual minimization,” *Signal Proc.*, vol. 93, no. 11, pp. 3143–3150, 2013.

[SaMa13] S. K. Sahoo and A. Makur, “Dictionary training for sparse representation as generalization of K-Means clustering,” *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 20, no. 6, pp. 587–590, June 2013.

[SBJ13] M. Sadeghi, M. Babaie-Zadeh, and C. Jutten, “Dictionary Learning for Sparse Representation: a Novel Approach,” *IEEE Signal Proc. Letter*, vol. 20, no. 12, pp. 1195–1198, Dec. 2013.

[SHA06] K. Skretting, J. Husoy and S. Aase, “General design algorithm for sparse frame expansions”, *Signal Process.*, vol. 86, pp. 117–126, 2006.

[TaKim02] V. Tarokh and I.-M. Kim, "Existence and construction of noncoherent unitary space-time codes," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 48, pp.3112–3117, 2002.

[TK93] D.B.H. Tay and N.G. Kingsbury, "Flexible design of multidimensional perfect reconstruction FIR 2-band filters using transformations of variables," IEEE Trans. Image Proc., vol. 2, no. 4, pp. 466–480, Oct. 1993.

[TKK12] E. Tsiligianni, L. Kondi, and A. Katsaggelos, "Use of tight frames for optimized compressed sensing," in EUSIPCO, Bucharest, Romania, pp. 1439–1443, 2012.

[ZN13] Y. V. Zakharov and V. H. Nascimento, "DCD-RLS adaptive filters with penalties for sparse identification," IEEE Trans. Signal Proc., vol. 61, no. 12, pp. 3198–3213, Jun. 2013.

[ZLG11] H. Zhu, G. Leus, G. Giannakis, "Sparsity-Cognizant Total Least-Squares for Perturbed Compressive Sampling", IEEE Trans. Signal Proc., vol.59, no.5, pp. 2002–2016, May 2011.

Director proiect,

Prof. Bogdan Dumitrescu

