

RAPORT

ETAPA III: Dezvoltare compandare reversibilă, compresie și investigare aplicații

În această etapă, eforturile echipei de cercetare s-au concentrat în principal asupra utilizării inserției reversibile la compresia fără pierderi a imaginilor, idee originală care devine posibilă datorită rezultatelor obținute la algoritmi de mare capacitate. Pe lângă compresia fără pierderi a imaginilor, au fost obținute rezultate remarcabile la dezvoltarea algoritmilor de mare fidelitate, algoritmi destinați aplicațiilor de inserție cu distorsiuni foarte mici gen aplicații de imagistică medicală, aplicații tip steganografie etc. Menționăm, tot la capitolul aplicații, dezvoltarea de algoritmi de inserție în domeniul criptat pentru aplicații tip *cloud*. Obiectivele proiectului au fost îndeplinite.

Referitor la publicații, menționăm apariția articolului în revista ISI Q2 *Signal Processing: Image Communication* (acceptat în etapa anterioară) și a unui articol prezentat la conferința *far* în domeniul prelucrării semnalelor *IEEE ICASSP 2019* de la Brighton. Mai menționăm două articole aflate în evaluare la reviste ISI Q1 și alte două articole aflate în faze avansate de redactare ce urmează a fi trimise la reviste ISI Q1.

Activitatea 3.1. Management și diseminare.

Directorul de proiect a asigurat coordonarea cercetărilor și a supervizat activitatea de diseminare a rezultatelor. Referitor la diseminare, până în acest moment există 6 publicații aparute în 2019, două articole aflate în evaluare și alte 2 articole în fază avansată de redactare:

1. I.Caciula, H.G Coanda, D. Coltuc, “Multiple Moduli Prediction Error Expansion Reversible Data Hiding”, *Signal Processing: Image Communication*, vol. 71, pag. 120-127, 2019, FI 2.814, ISI Q2., (articol acceptat în faza anterioară a lucrărilor)

2. I.C. Dragoi, D. Coltuc, "Prediction-error-ordering for High-fidelity Reversible Data Hiding," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* 2019.
3. I.C. Dragoi, D. Coltuc, "Gradient Based Prediction for High Fidelity Reversible Data Hiding with Pairwise Embedding," *IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, 2019.
4. R. Pogula, T. Kishore Kumar, F. Albu, "Modified Least-Mean Mixed-Norm Algorithms for Impulsive Noise Environment in Adaptive Sparse System Identification," in *Proc. of IEEE TSP*, Budapesta, pp.557-561, 2019
5. A. Bobeica, I.C. Dragoi, I Caciula, D. Coltuc, "Sample Value Ordering for Audio Reversible Data Hiding Galati", *The 6th Intl. Symposium on Electrical and Electronics Engineering ISEEE*, 18 - 20 oct., Galați, 2019
6. W. Shi, Y. Li and F. Albu, "A Norm Penalized Noise-free Maximum Correntropy Criterion Algorithm," in *Proc. of APSIPA ASC* 2019, Lanzhou, China, pp. 1717-1720.
7. I.C. Dragoi, D. Coltuc, „On the Security of Reversible Data Hiding in Encrypted Images by MSB Prediction”, în evaluare la *IEEE Transaction on Information Forensics and Security*, FI 6.211, ISI Q1, răspuns așteptat în decembrie 2019.
8. I.C. Dragoi, H. G. Coanda, D. Coltuc, „Prediction Based Sorting for Reversible Data Hiding with Pixel-Value-Ordering”, în evaluare la revista *IEEE Signal Processing Letters* (ISI Q1).

Mai menționăm și două articole în diferite faze de redactare:

9. I.C. Dragoi, D. Coltuc, „High Embedding Bit-Rate Reversible Data Hiding”, în fază avansată de redactare (80-90%) și umeaza a fi trimis spre evaluare la revista *IEEE Transactions on Image Processing* (ISI Q1).
10. D. Coltuc, I. C. Dragoi, „Lossless Image Compressing by Reversible Data Hiding”, în curs de redactare pentru reviste ISI Q1 (*IEEE T-IP*, etc.).

Pe lângă articolele menționate mai sus, există deja idei și rezultate originale pentru elaborarea unor alte articole referitoare la utilizarea inserției pentru compresia fara pierderi a imaginilor, prelucrări reversibile de imagini, inserție în imagini color etc.

Activitate 3.2. Evaluarea performanțelor compresiei fără pierderi cu predictorii dezvoltati pentru marcare reversibilă

Ne propusesem în cadrul activității 3.2 să dezvoltăm scheme de compresie fără pierderi care, în etapa de decorelare, să utilizeze predictorii eficienți de la inserția reversibilă. Mai exact, în locul unor predictorii ca MED, GAP – utilizați în JPEG-LS, CALIC, să introducem predictorii necauzali (de tipul rombului lui Sachnev [1]) și/sau predicția locală. Chiar dacă predictorii în sine sunt mai performanți, aspect ușor de verificat calculând entropia erorii de predicție), integrarea în schemele complexe de compresie nu apare ca o soluție viabilă. Predictorii necauzali ar impune o operare în două etaje stil „cross/dot” [1], cu câștig evident la predicția primului etaj, câștig care se pierde în etajul doi. Utilizarea predicției locale [2] pentru predictorii cauzali rămâne o soluție viabilă pentru înlocuirea MED în JPEG-LS sau GAP în CALIC. Nu am continuat în această direcție din două motive:

- crește drastic complexitatea;

- în ciuda câștigului la predicție, compresia rămâne inferioară celei asigurate de JPEG2000 la o complexitate redusă.

În acest context, ne-am concentrat eforturile la îmbunătățirea capacității de inserție pentru a utiliza direct inserția reversibilă la compresia fără pierderi a imaginilor. Direcția de cercetare este dictată de performanțele algoritmului nostru cu module multiple de inserție pentru expandarea erorii de predicție, MM-PE, publicat în SPIC 2019 [3], care depășește semnificativ algoritmi existenți [4-6]. În materie de spațiu disponibil, algoritmul MM-PE începe să concureze cu algoritmi de compresie fără pierderi pentru imagini. Mai exact, prin compresie se obține un spațiu disponibil care, raportat la numărul de pixeli, reprezintă o măsură a spațiului liber pe pixel. Spațiul asigurat de compresie începe să fie comparabil cu spațiul de inserție oferit de MM-PE. În aceste condiții, putem concepe scheme mixte (compresia unei părți a imaginii urmată de inserția codului compresat în partea rămasă), scheme care, în unele cazuri, să asigure o compresie mai bună. Continuând pe această pistă, ne-am concentrat pe creșterea capacității de inserție la algoritmi tip MM-PE. Rezultatele cercetărilor sunt foarte promițătoare. Astfel, a fost dezvoltat un algoritm îmbunătățit, IMM-PE, care elimină harta modulelor printr-o procedură originală, de complexitate scăzută, de estimare a modulelor de expandare. Această procedură elimină și etapa de compresie a hărții cu impact asupra complexității matematice a algoritmului. Un alt aspect remarcabil este că

noul algoritm permite controlul capacitate/distorsiune – un avantaj considerabil față de [3] care a fost gandit pentru a asigura doar capacitatea maximă de inserție. Din punctul de vedere al capacității de inserție, noul algoritm este net superior algoritmului [3]. După cum am menționat la 3.1, un articol asupra noului algoritm este deja în fază avansată de redactare și urmează a fi trimis la *IEEE T-IP*.

Tabel 1. Spațiu liber obținut prin compresie fără pierderi și prin inserție reversibilă pentru setul Kodak

Imagine	Spatiu dupa compresie [bpp]				Insertie reversibilă [bpp]	
	TIF	JPEG-LS	PNG	JPEG-2000	MM-PE	IMM-PE
1	1,34	1,99	2,50	2,56	2,13	2,20
2	2,63	3,34	3,69	3,83	3,37	3,47
3	2,58	3,92	4,00	4,45	4,01	4,24
4	1,69	3,08	3,50	3,82	3,29	3,40
5	0,94	1,97	2,39	2,70	2,19	2,36
6	2,04	2,82	3,15	3,33	2,36	2,80
7	2,19	3,61	3,85	4,25	3,85	3,90
8	0,61	1,60	2,49	2,48	1,87	2,08
9	2,37	3,34	3,78	4,00	3,55	3,75
10	1,99	3,29	3,71	3,91	3,52	3,71
11	2,17	2,91	3,28	3,45	2,76	2,91
12	2,34	3,68	3,85	4,09	3,18	3,68
13	0,91	1,53	1,89	1,89	1,38	1,56
14	1,11	2,55	2,79	2,96	2,41	2,58
15	1,87	3,20	3,62	4,06	2,59	3,45
16	2,53	3,42	3,69	3,83	3,25	3,38
17	1,85	3,16	3,53	3,80	2,94	3,33
18	1,23	2,17	2,63	2,84	2,17	2,41
19	1,72	2,59	3,32	3,47	2,95	3,12
20	3,62	3,88	4,48	4,71	1,16	3,79
21	2,13	2,86	3,25	3,38	2,88	2,99
22	1,57	2,64	3,18	3,38	2,92	3,01
23	1,77	3,70	4,06	4,48	3,90	4,18
24	1,60	2,40	2,98	3,21	2,54	2,73
Media	1,86	2,90	3,31	3,53	2,79	3,12

În tabelul 1 prezentăm pentru setul Kodak (24 de imagini de dimensiune 512x768) o comparație a spațiului disponibil obținut la compresia fără pierderi cu algoritmi standard (TIF,

JPEG-LS, PNG, JPEG2000) cu cei doi algoritmi de mare capacitate. După cum se poate observa, dintre compresoarele fără pierderi, TIF are rezultatele cele mai proaste. Ordinea din punctul de vedere al ratei de compresie și echivalent, al spațiului liber disponibil, este TIF, JPEG-LS, PNG și JPEG2000. Varianta inițială de capacitate mare, [3], are performanțe comparabile cu JPEG-LS. Astfel, oferă spațiu mai mare pentru 12 imagini, egal pentru 2 imagini și mai mic pentru 10 imagini. Varianta îmbunătățită de capacitate mare IMM-PE depășește JPEG-LS pe 18 imagini, are performanțe egale pentru 4 imagini și performanțe mai slabe pentru doar 2 imagini. PNG-ul este superior variantei îmbunătățite pentru 18 imagini, are rezultate egale pentru 3 și mai slabe pentru alte 3 imagini. JPEG-2000 are performanțe mai bune decât varianta îmbunătățită pe întreg setul.

Concluzia noastră este că, în momentul de față, algoritmi de inserție reversibilă, ar putea înlocui cu performanțe similare sau mai bune (rată de compresie) compresoare fără pierderi standard ca JPEG-LS. Îmbunătățirea capacității de inserție ne-ar putea permite să obținem performanțe comparabile cu PNG. Estimăm posibilă o îmbunătățire a capacității de inserție a IMM-PE cu 01-03 bpp, ceea ce ar conduce la performanțe egale cu ale PNG. După cum se arată în secțiunea următoare, un avantaj evident al utilizării algoritmilor de inserție reversibilă la compresia fără pierderi a imaginilor este accesul direct la conținutul imaginilor compresate.

Activitate 3.3. Dezvoltare scheme compandare reversibilă

Ne-am propus să introducem un concept nou, compandorul reversibil, care să asigure funcția de compresie fără pierderi, păstrând vizibil conținutul imaginii. Astfel, dacă la algoritmi de compresie (cu sau fără pierderi) clasici, după compresie fișierului este codat, iar conținutul este neinteligibil. Pentru vizualizare este necesară decodarea fișierului printr-o operație inversă compresiei. Compandorul propus de noi asigură compresie printr-o operație de subeșantionare, iar informația pierdută este injectată în imaginea subeșantionată prin inserție reversibilă. Astfel se realizează compresie fără a pierde conținutul imaginii.

Algoritmul îmbunătățit de capacitate mare descris în 3.2. este esențial pentru compandoarele reversibile întrucât asigură capacitate mare de inserție și, foarte important, permite controlul distorsiune-capacitate. În această etapă, am considerat compandoare cu rata de subeșantionare prefixată, respectiv prin eliminarea unei linii și a unei coloane dintr-un grup de n

(cu n 4-6 sau combinații). Pentru liniile/coloanele eliminate, determinăm eroarea de predicție și o inserăm în imaginea rămasă.

Eliminarea unei linii și a unei colane din grupuri de 4 reduce dimensiunea imaginii la 56%. În general, eliminarea unei linii și ulterior, a unei colane, din grupul de n reduce dimensiunea la $(n-1)^2/n^2$ din dimensiunea originală. Pentru 5 avem 64%, iar pentru 6 avem 69%. O valoare mică a lui n înseamnă compresie mare și, implicit, cere capacitate mare de inserție la algoritmul reversibil cu efectul distorsiunilor mari introduse. Creșterea lui n reduce constrângerile asupra algoritmului reversibil și crește calitatea imaginii compresate.



Fig. 1. Imagini compandate la 56% ($n=4$).

Prezentăm în continuare câteva rezultate pentru imaginile setului Kodak. Astfel, eliminarea unei linii și coloane din fiecare grup de 4, reduce dimensiunea imaginii necompresate de la 393.216 kB la 221.184 kB, respectiv la 56%. Cu varianta actuală a IMM-PE, pentru jumătate din cele 24 de imagini, se poate insera integral informația necesară reconstituirii exacte a liniilor și coloanelor eliminate, respectiv putem recupera imaginea originală fără pierderi. Pentru 8 din cele 12 imagini

(02, 04, 09, 10, 12, 15, 16, 17) pierderea de compresie față de compresia cu JPEG-2000 este în intervalul 7%-15%. Pentru 5 din cele 8, pierderea este doar în intervalul 7%-10%. Pentru imaginile la care nu se poate insera toată informația adițională, o soluție simplă este de a adauga la imaginea compandată linii/coloane suplimentare în care să stocăm, byte cu byte, restul de informație. Liniile/coloanele suplimentare (maximum 10-15) au aspect de zgomot. O alta solutie este creșterea lui n . În figura 1 prezentăm 4 imagini compandate (12, 15, 20, 23) și cu informație inserată pentru $n=4$.

Dimensiunea imaginii compandate crește cu n (251.658 kB pentru 5 și 273.067kB pentru 6). Pentru imaginile compandate cu $n=4$ se observă că, în ciuda zgomotului introdus la inserție, imaginile rezultate sunt recunoscute vizual fără nicio problemă. Calitatea crește semnificativ mărind n , însă compresia scade. Pentru $n=5$, respectiv reducere la 64%, putem insera complet informația necesară reconstruirii exacte la 18 din cele 24 de imagini.

În Fig. 2, prezentăm imaginea 15 compandată la 64% împreună cu imaginea originală.



Fig. 2. Imaginea 15 compandată (64%, $n=5$) și imaginea originală.

Activitate 3.4. Dezvoltare aplicații algoritmi marcare reversibilă.

O prima serie de cercetări au fost dedicate dezvoltării algoritmilor de inserție de mare fidelitate, algoritmi la care se impune condiția ca distorsiunea introdusă să nu depășească un nivel de gri. Acești algoritmi sunt de interes atât în steganografie (unde constrângerea principală este de a avea o inserție de informație nedetectabilă) sau în alte aplicații (imagistică medicală) unde, imperceptibilitatea asigurată grație nivelului scăzut al distorsiunilor elimină necesitatea de a restaura imaginea originală până la distorsiune zero. În această direcție am dezvoltat noi algoritmi tip PVO (*pixel value ordering*), mai exact algoritmi PVO îmbunătățiți pentru perechi de pixeli. Doi astfel de algoritmi au fost deja publicați (*IEEE ICASSP 2019*, Brighton și *IEEE ISSCS 2019*, Iași). Menționăm în mod deosebit algoritmul prezentat la *ICASSP*, conferința din domeniul prelucrării imaginilor și semnalelor. Acest algoritm se distinge prin faptul că propune utilizarea eroarii de predicție atât pentru ordonare cât și pentru inserție. Algoritmul depășește performanțele algoritmilor IPVO propuși până în prezent [7-13]. Un algoritm și mai interesant a fost trimis spre evaluare la *IEEE Signal Processing Letters*, și anume un algoritm care crează blocurile în funcție de valoarea prezisă. Ideea de la care pornește acest algoritm este că pixelii pentru care avem aceeași valoare prezisă au, cu probabilitate mare, același nivel de gri și vor conduce la rezultate mai bune în scheme tip PVO. Ipoteza se dovedește corectă, iar rezultatele sunt foarte bune, depășind algoritmul nostru propus la *ICASSP 2019*.

O a doua serie de cercetări este dedicată inserției în domeniul criptat cu aplicații la tehnologiile tip *cloud*. Rezultatul principal este o variantă îmbunătățită a algoritmului cu inserție în bitul cel mai semnificativ (MSB) publicat în *IEEE T-IFS 2018* de Puteaux & Puesch, [15]. Algoritmul lor asigură capacitate mare de inserție și este deosebit de simplu și implicit, de complexitate redusă, ceea ce convine pentru utilizarea în *cloud*. Analiza noastră a arătat că algoritmul are serioase probleme de securitate. Astfel, se poate obține la etapa de inserție în imaginea criptată informație despre conținutul imaginii fără a avea cheia de criptare. De asemenea, se poate detecta existența informației înscrise prin simpla analiză statistică a distribuției pixelilor din planul MSB. După analiză, am conceput un algoritm care păstrează avantajele algoritmului original [15] și a variantelor pe care le-a inspirat [16,17], dar elimină problemele de securitate. Articolul care prezintă noul algoritm a fost trimis spre evaluare pentru publicare în *IEEE TIFS*.

Menționăm și continuarea cercetărilor privind aplicațiile pentru audio cu dezvoltarea unui algoritm pentru inserție de mare fidelitate bazat pe ordonare. Algoritmul a fost prezentat la *IEEE ISEE*, Galați.

Activitate 3.5. Implementare, testare, validare algoritmi

Au fost implementați (MatLab) și testați pe seturi extinse de imagini algoritmi originali dezvoltați în activitățile 3.2, 3.3 și 3.4. Se observă varietatea algoritmilor, respectiv 3 tipuri distincte de algoritmi: algoritmi de capacitate mare în domeniul spațial, algoritmi PVO în perechi de pixeli și, în final, algoritmi cu inserție în domeniul criptat. Implementările pentru compresoarele fără pierderi din 3.2, 3.3 sunt cele furnizate de MatLab (JPEG2000, JPEG-LS, PNG).

Activitate 3.6. Dezvoltare algoritmi rapizi

Complexitatea algoritmilor este o problemă recurentă în prelucrarea imaginilor. Dintre algoritmi dezvoltați în cadrul acestei etape, problema complexității apare cu precădere în două cazuri. Astfel, avem predicția locală, [2], unde pentru fiecare pixel se calculează predictorul care minimizează eroarea într-un bloc de dimensiune 12x12. În acest caz, soluția adoptată a fost cea publicată în [18] și anume, un predictor pentru 2-4 pixeli.

Al doilea caz privește algoritmul de mare capacitate MM-PE, unde, pe lângă predicția locală mai apare și problema compresării eficiente a hărții de module, realizată cu compresoare din familia *paq*, respectiv *paq8* [19]. Soluția noastră a fost radicală și anume, eliminarea hărții și estimarea ei printr-o inversare a ecuației de marcare multibit astfel încât să se evite depășirile. Problema revine la a prezice, atât la inserție, cât și la detecție, modulul curent de expansiune. Efortul de a reduce complexitatea ne-a condus la un algoritm nou, foarte eficient. Un articol asupra acestui algoritm este în fază avansată de redactare și urmează să fie trimis la *IEEE Trans. on Image Processing*. De asemenea, menționăm și algoritmi eficienți prezentați la *IEEE TSP*, Budapesta și la *APSIPA ASC 2019*, Lanzhou, China.

Bibliografie

- [1] V. Sachnev, H. J. Kim, J. Nam, S. Suresh and Y. Q. Shi, "Reversible Watermarking Algorithm Using Sorting and Prediction", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, pp. 989–999, 2009.
- [2] I.-C. Dragoi and D. Coltuc, "Local-Prediction-Based Difference Expansion Reversible Watermarking", *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 23, no. 4, pp. 1779–1790, 2014.
- [3] I. Caciula, H.G. Coanda and D. Coltuc, "Multiple Moduli Prediction Error Expansion Reversible Data Hiding", *Signal Process.: Image Comm.*, vol.71, pp. 120-127, 2019.
- [4] X. Li, B. Yang and T. Zeng, "Efficient Reversible Watermarking Based on Adaptive Prediction-Error Expansion and Pixel Selection", *IEEE Trans. on Image Process.*, vol. 20, no. 12, pp. 3524–3533, 2011.
- [5] F. Peng, X. Li and B. Yang, "Adaptive Reversible Data Hiding Scheme Based on Integer transform", *Signal Process.*, vol. 92, no. 1, pp. 54-62, 2012.
- [6] X. Gui, X. Li and B. Yang, "A High Capacity Reversible Data Hiding Scheme Based on Generalized Prediction-Error Expansion and Adaptive Embedding", *Signal Process.*, vol. 98, pp. 370-380, 2014.
- [7] X. Li, J. Li, B. Li and B. Yang, "High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value-ordering and prediction-error expansion", *Signal Process.*, 93 (1), pp. 198–205, 2013.
- [8] F. Peng, X. Li and B. Yang, "Improved PVO-based reversible data hiding", *Digit. Signal Process.*, 25, pp. 255–265, 2014.
- [9] B. Ou, X. Li and J. Wang, "Improved PVO-based reversible data hiding: A new implementation based on multiple histograms modification", *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 38, pp. 328–339, 2016.
- [10] P. Rahmani and G. Dastghaibafard, "A Reversible Data Hiding Scheme Based on Prediction-Error Expansion Using Pixel-based Pixel Value Ordering Predictor", *Proc. of the 2017 Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP2017)*, pp. 219-223, 2017.
- [11] X. Li, B. Yang and T. Zeng, "Efficient Reversible Watermarking Based on Adaptive Prediction-Error Expansion and Pixel Selection", *IEEE Trans. on Image Process.*, vol. 20, no. 12, pp. 3524–3533, 2011.

- [12] F. Peng, X. Li and B. Yang, "Adaptive Reversible Data Hiding Scheme Based on Integer transform", *Signal Process.*, vol. 92, no. 1, pp. 54-62, 2012.
- [13] X. Gui, X. Li and B. Yang, "A High Capacity Reversible Data Hiding Scheme Based on Generalized Prediction-Error Expansion and Adaptive Embedding", *Signal Process.*, vol. 98, pp. 370-380, 2014.
- [15] P. Puteaux and W. Puech, "An efficient MSB prediction-based method for high-capacity reversible data hiding in encrypted images", *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, 7, pp. 1670-1681, 2018.
- [16] Y. Puyang, Z. Yin and Z. Qian, "Reversible Data Hiding in Encrypted Images with Two-MSB Prediction", *IEEE Intl. Workshop Inf. Forensics Security (WIFS)*, 2018.
- [17] K. Chen and C.-C. Chang, "High-capacity reversible data hiding in encrypted images based on extended Run-Length coding and block-based MSB plane rearrangement", *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 58, pp. 334-344, 2019.
- [18] I.-C Dragoi and D. Coltuc, "On Local-Prediction-Based Difference Expansion Reversible Watermarking", *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 24, no. 4, pp. 1244-1246, 2015.
- [19] <http://mattmahoney.net/dc/>