



**NATIONAL UNIVERSITY OF  
SCIENCE AND TECHNOLOGY  
POLITEHNICA BUCHAREST**



**Doctoral School of Electronics, Telecommunications  
and Information Technology**

**Decision No. ... from ...**

**REZUMAT TEZA  
DE DOCTORAT**

**Cristina-Elena POPA (BEJAN)**

---

**CONTRIBUȚII LA MARCAREA IMAGINILOR OBȚINUTE PRIN  
EȘANTIONARE COMPRESIVĂ**

**CONTRIBUTIONS TO THE WATERMARKING OF IMAGES  
SENSED BY COMPRESSIVE SAMPLING**

---

**Prof. Dr. Ing. Daniela COLȚUC**  
National University of Science and Tech-  
nology Politehnica Bucharest

PhD Supervisor

**BUCHAREST 2025**

---

# Capitolul 1

## Introducere

Evoluțiile tehnologice recente oferă utilizatorilor o mare varietate de dispozitive care permit unui număr în continuă creștere de oameni să achiziționeze, să proceseze, să distribuie și să stocheze cu costuri accesibile elemente media digitale.

Un exemplu relevant este evoluția telefonului mobil. A fost lansat pentru prima dată pe piața de consum în anii 1980 iar în prezent miliarde sunt deținute în întreaga lume. Funcționalitățile telefoanelor mobile s-au extins foarte mult iar acum joacă mai multe roluri, cum ar fi de cameră digitală, reportofon, planificator zilnic sau busolă.

Acest context aduce cu sine îngrijorări cu privire la subiecte precum confidențialitatea digitală, autenticitatea media sau securitatea comunicării. Pentru ca drepturile fiecărei persoane să fie protejate împotriva exploatării, în ultimii ani s-a creat și un cadru legal.

Conceptul de watermarking al imaginilor digitale constă în încorporarea invizibilă și robustă a informațiilor într-o imagine suport. Unul dintre scopurile sale principale este protecția și autentificarea conținutului, jucând astfel un rol important în asigurarea confidențialității digitale.

Teoria eșantionării compresate (CS) este una recentă, fiind publicată pentru prima oară în 2006 [5] [4] și propune o metodă eficientă de a achiziționa imagini direct într-o formă comprimată. CS are rezultate promițătoare în domeniul securității digitale [26], fiind integrată în algoritmi care îndeplinesc diverse funcții (protecția informațiilor private, autentificare, detectarea falsificării și altele).

În continuarea acestei lucrări vom prezenta o nouă perspectivă asupra combinării marcării de imagini cu teoria CS, cu scopul final de a oferi securitate în diverse scenarii.

### Prezentarea domeniului de cercetare

Teoria eșantionării compresate (CS) oferă o alternativă pentru procesul tradițional de eșantionare așa cum este definit de teorema eșantionării Nyquist Shannon.

CS a prezentat interes pentru multiple domenii de cercetare, precum imagistica medicală [8], monitorizarea bazelor de date în cloud [12], codarea imaginilor [13], imagistica radar [7], designul de sisteme 5G [25] și așa mai departe.

Scopul CS nu este acela de a înlocui tehnicile clasice de procesare de imagini, ci de a le extinde. De exemplu, abordarea CS poate fi folosită pentru a proiecta sisteme care beneficiază de utilizarea unui sistem de complexitate scăzută pe partea achiziției de date.

Marcarea digitală (en. digital watermarking) reprezintă ascunderea unor informații într-un conținut digital (semnal purtător). Fiecare sistem de marcarea digitală este proiectat pentru a se potrivi în contextul aplicației unde este aplicat, ducând la dezvoltarea unor tehnici de marcarea care servesc mai multor scopuri: protejarea proprietății intelectuale, controlul drepturilor de autor, detectarea falsificării, autentificarea, urmărirea tranzacțiilor și așa mai departe. [24].

În funcție de tipul de semnal digital în care se face inserția de watermark putem aminti mai multe direcții de cercetare: imagistică medicală [21], watermarking audio [9], utilizarea pentru imagini prin satelit [1] și watermarking video [2].

În ceea ce privește teoria CS, marcarea digitală poate oferi mai multe direcții de cercetare promițătoare pe baza cerințelor fiecărei aplicații și domeniu în parte.

### **Scopul tezei de doctorat**

Principalul scop al acestei teze este acela de a dezvolta un algoritm de marcarea digitală special pentru cerințele unui sistem bazat pe teoria CS. Pentru aceasta, vom studia teoria CS și a marcării digitale de imagini și vom rula simulări pentru a putea trage concluzii legate de influența parametrilor CS într-un scenariu de marcarea de imagini.

Importanța watermarking-ului în procesarea semnalelor digitale este de netăgăduit, deoarece posibilele sale aplicații în securitate, confidențialitate și integritatea datelor sunt considerate subiecte de interes în diferite domenii.

Având în vedere tehnicile existente care au fost examinate ca parte a bibliografiei, intersecția dintre marcarea digitală și CS este o direcție promițătoare pentru aplicații multiple în diferite domenii de cercetare. Fiecare dintre aceste metode se confruntă cu provocări unice și trebuie făcute compromisuri în funcție de scopul și cerințele finale ale aplicației.

Teza de doctorat își propune să evalueze impactul marcării digitale asupra calității semnalelor reconstruite din măsurători CS, precum și să evalueze capacitatea, imperceptibilitatea și robustețea tehnicilor de watermarking propuse. De asemenea, va necesita implementarea unor instrumente de simulare pentru testarea tehnicilor de marcarea digitală.

### **Conținutul tezei de doctorat**

Teza este structurată în șase capitole care prezintă sistematic cercetările pe tema marcării digitale a eșantioanelor compresate. Capitolul introductiv conține o scurtă prezentare a domeniului de cercetare, a obiectivelor cercetării și a structurii tezei.

Al doilea capitol prezintă o privire de ansamblu asupra aspectelor teoretice ale marcării digitale și ale eșantionării compresată și o revizuire extinsă a literaturii de specialitate a marcării digitale în contextul scenariilor CS.

Al treilea capitol descrie apoi un scenariu în care eșantioanele CS sunt marcate și conține o analiză detaliată a modului în care parametrii CS afectează algoritmul de marcarea în raport cu capacitatea, robustețea și imperceibilitatea acestuia [17].

Capitolul patru propune o arhitectură care să asigure confidențialitatea pentru un scenariu CS în care un watermark reversibil este încorporat din mers în eșantioanele achiziționate de o cameră cu un singur pixel [15].

Al cincilea capitol se concentrează pe extinderea algoritmului de marcarea prezentat în Capitolul 4 cu contribuții originale cum ar fi inserarea pe mai mulți biți și distribuția de imagini către utilizatorii neautorizați [16].

Al șaselea capitol prezintă un algoritm de marcarea digitală și criptare parțială conceput special pentru eșantioane CS.

Al șaptelea și ultimul capitol conține concluziile și se încheie cu o listă de contribuții originale în domeniu și o listă de publicații.

# Capitolul 2

## Context teoretic

Având în vedere că scopul acestei teze este de a dezvolta o nouă tehnică de marcarea digitală adecvată scenariilor CS, acest capitol conține descrierile acestor două teorii precum și o analiză aprofundată a cercetării de ultimă generație în domeniu.

### 2.1 Eșantionarea compresată

Operația de eșantionare ne permite să convertim lumea înconjurătoare într-o colecție de semnale digitale discrete. Acest lucru este extrem de important deoarece putem apoi procesa aceste semnale folosind computere sau procesoare de semnal digital specializate.

Pentru funcțiile care variază în timp, eșantionarea înseamnă înregistrarea valorii funcției la fiecare  $T$  secunde,  $T$  fiind intervalul de eșantionare sau perioada de eșantionare. Frecvența de eșantionare ( $f_s$ ) reprezintă numărul de mostre pe secundă,  $f_s = 1/T$

Teorema eșantionării specifică frecvența minimă de eșantionare care asigură reconstruirea din eșantioane periodice a unui semnal continuu și cu bandă limitată în frecvență, cu frecvența maximă  $f_m$ .

**Theorem 1 (Teorema eșantionării Nyquist–Shannon)** *Un semnal de bandă limitată  $x(t)$  poate fi recuperat din eșantioanele sale dacă acestea sunt luate cu o frecvență mai mare sau egală cu dublul celei mai mari frecvențe din spectrul semnalului inițial  $f_s \geq 2f_m$ .*

Teoria eșantionării compresate (CS) [6] oferă o modalitate de a utiliza un număr total de eșantioane mai mic decât valoarea specificată de teorema de eșantionare Nyquist–Shannon. Acestea sunt deja comprimate și pe baza lor semnalul discret original ar putea fi reconstruit cu ajutorul unui algoritm de reconstrucție.

Pentru a aplica cu succes teoria CS, trebuie îndeplinite două cerințe: semnalul original să fie rar și funcțiile bazei de detectare și a bazei semnalului original.

Pornim de la presupunerea că pentru un număr mare de semnale există o bază în care pot fi approximate printr-un număr mic de elemente diferite de zero comparate cu

dimensiunea semnalului, astfel încât putem spune despre acest semnal că este rar (eng. sparse) în acea bază.

Pentru ca reconstrucția să fie posibilă, este necesar să existe incoerență între baza utilizată pentru reprezentarea semnalului ( $\psi$ ) și cea folosită pentru eșantionare ( $\phi$ ).

#### Teoria CS

În teoria CS eșantioanele, numite și măsurători, sunt obținute prin proiectarea semnalului original  $x(N)$  pe un număr de vectori de măsurare ( $\phi_1, \dots, \phi_M$ ). Aceștia reprezintă liniile matricei de măsurare  $\phi$  (Fig. ??). Dimensiunea matricii  $\phi \in \mathbb{R}^{M \times N}$  este dictată de dimensiunea lui  $x(N)$  și de numărul de vectori de măsurare ( $M$ ), cu  $K < M \ll N$ .

Ecuția eșantionării CS este:

$$y = \phi x \quad (2.1)$$

În cazul imaginilor 2D, semnalul discret  $x \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  pe care ne dorim să îl reconstruim este imaginea serializată. Dacă  $s \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  este reprezentarea rară a semnalului obținută folosind matricea ortonormală de transformare  $\psi \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $x$  poate fi exprimat ca fiind:

$$x = \psi s \quad (2.2)$$

Combinând această ecuație cu 2.2, relația dintre măsurătorile  $y$  și reprezentarea rară a semnalului  $s$  este:

$$y = \phi \psi s = \theta s \quad (2.3)$$

Pentru a putea reconstrui cu succes semnalul original pe baza  $y$ , trebuie să existe incoerență între matricele  $\psi$  și  $\phi$ .

## 2.2 Marcarea digitală

Marcajele sunt modele adăugate pe hârtie ca o modalitate de a-i dovedi autenticitatea. Acestea sunt folosite pentru a evita sau cel puțin a descuraja falsificarea documentelor oficiale precum cărți de identitate, pașapoarte, valută, ștampile.

Într-o manieră similară, marcarea digitală constă în încorporarea de informații în medii digitale (exemple comune fiind imaginile, fișierele audio sau video). Datele încorporate reprezintă marcajul (en. watermark) și au multiple scopuri, cele mai comune fiind protecția dreptului de autor, urmărirea sursei, detectarea falsificării și transmiterea datelor auxiliare. [11]

## 2.3 Cercetări recente în domeniu

În ultimii ani, s-au făcut mai multe studii pe tema combinării tehnicilor de marcarea digitală cu teoria CS. Pe baza modului în care cele două se întrepătrund, pot fi observate patru direcții de cercetare:

1. Eșantionare compresată cu rol de atac asupra marcajelor digitale

În acest caz, se efectuează eșantionare compresată pe un semnal marcat. Efectele CS asupra marcajului sunt măsurate pentru a descrie robustețea metodei.

2. CS folosită pentru proiectarea marcajului digital

Marcajul digital este proiectat pe baza eșantioanelor CS.

3. Criptarea de date (watermark cryptography)

Având în vedere natura aleatorie a matricei de măsurare, aplicarea teoriei CS poate fi considerată un model de criptare ușoară.

4. CS folosită ca suport pentru eșantionare

Teoria CS este utilizată direct în scenariul de watermark, de exemplu în etapa de marcarea.

Dintre aceste posibile utilizări, ultima este subiectul tezei de doctorat.

## Capitolul 3

# Studiu asupra marcării eşantioanelor compresate

După ce am stabilit bazele teoretice pentru teză, unul dintre cei mai importanți pași este înțelegerea modului în care parametrii utilizați în teoria CS influențează măsurătorile CS rezultate și, prin urmare, compresia datelor și calitatea reconstrucției. În plus, parametrii influențează direct marcarea digitală a măsurătorilor în raport cu capacitatea, transparența și robustețea acestora.

Acest capitol studiază parametrii care influențează performanța unui scenariu de watermark în contextul CS, cum ar fi alegerea matricei de detectare, transformarea aplicată pentru a evidenția natura sparse a semnalului și algoritmul de reconstrucție.

Luăm în considerare trei matrice de detectare diferite - Gaussiană, Bernoulli și circulantă -, două transformări ortogonale - Transformarea Wavelet discretă (DWT) și Transformarea cosinus discretă (DCT) - și doi algoritmi CS lacomi (en. greedy), adică Orthogonal Matching Pursuit (OMP) și Compressive Sampling Matching Pursuit (CoSaMP).

Algoritmul propus de Huang et. al [10] a fost selectat pentru marcarea eşantioanelor CS și va fi evaluat prin robustețe, transparență și capacitate.

Arătăm că rata de recuperare și capacitatea algoritmului de marcă sunt afectate de baza de reprezentare a semnalului și de matricea de măsurători utilizată pentru eşantionare. Imperceptibilitatea marcajului este evaluată pe baza raportului semnal/zgomot de vârf (PSNR) și testată în raport cu cei doi algoritmi de recuperare.

Contribuțiile originale legate de efectul parametrilor CS asupra marcării digitale:

- S-a extins versiunea originală a scenariului de marcă pentru mai multe tipuri de parametri CS, utilizând și DWT pentru transformarea imaginii, doi algoritmi noi de recuperare (OMP și CoSaMP) și trei matrice de măsurare: Gaussiană, Bernoulli și circulantă binară.
- S-au formulat concluzii privind alegerea unei configurații optime de parametri



Experimentele efectuate au analizat modul în care marcarea și detectarea de watermark sunt afectate de metoda de eșantionare, precum și modul în care marcarea măsurătorilor CS afectează reconstrucția semnalului.

Cele mai bune rezultate din punct de vedere al capacității au fost obținute la utilizarea matricei circulante binare și DWT. Cu toate acestea, această combinație nu reușește să ofere o rată bună de recuperare a marcajului după transmiterea datelor pe un canal zgomotos.

Numărul de biți de watermark care sunt încorporați în măsurătorile CS afectează direct calitatea reconstrucției, deoarece valorile măsurătorilor nu sunt redundante. Se poate obține o marcăre cu capacitate mare, dar cu costul unei calități mai scăzute a imaginii reconstruite.

Raportul semnal zgomot (SNR) al canalului influențează atât recuperarea de watermark, cât și reconstrucția imaginii. Dacă SNR este mare, rata de recuperare este, de asemenea, mare, fără valori fals pozitive detectate și imaginea reconstruită este de bună calitate.

Algoritmul de reconstrucție CS nu influențează nici inserția de watermark, nici reconstrucția.

Cu toate acestea, rezultatele noastre arată că OMP returnează rezultate de reconstrucție mai bune și este mai puțin influențat de marcăre decât CoSaMP.

Testele arată că trebuie făcut un compromis pentru a obține cea mai bună capacitate de inserție, păstrând în același timp o bună calitate a reconstrucției CS. Având în vedere acest lucru, asocierea DCT cu o matrice de măsurare circulantă oferă cea mai bună variantă de capacitate și rate de recuperare, în timp ce calitatea reconstrucției CS a fost mai bună pentru OMP.

Compromiterea fie a capacității, fie a transparenței ar trebui să fie decisă la nivelul aplicației, pe baza specificațiilor sau cerințelor acesteia.

## Capitolul 4

# Algoritm de marcarea digitală bazat pe CS utilizat pentru a securiza aplicațiile de imagistică computațională

Când vine vorba de lungimile de undă vizibile pentru ochiul uman, utilizarea tehnologiilor CCD și CMOS pentru a dezvolta noi senzori a ajutat camerele digitale să devină mai mici, mai puțin costisitoare și să ofere imagini de calitate superioară. Cu toate acestea, aceste tehnologii nu pot fi utilizate de aplicații care folosesc lungimi de undă diferite și, deși există alte opțiuni, costurile sunt considerabil mai mari atunci când funcționează în afara regiunii vizibile a spectrului electromagnetic.

Această limitare a declanșat necesitatea cercetării diferitelor abordări, una dintre ele fiind utilizarea teoriei și a algoritmilor CS pentru a propune noi arhitecturi de sisteme de imagistică.

Acest capitol prezintă câteva concepte de bază legate de imagistica cu un singur pixel și propune o metodă de adăugare a unui watermark în măsurătorile rezultate din eșantionarea CS folosind o cameră cu un singur pixel (SPC). Stratul de securitate adăugat permite doar utilizatorilor autorizați să acceseze imaginea originală. În cazul utilizatorilor neautorizați, se poate vizualiza în continuare o imagine de calitate mult mai scăzută decât cea originală.

### Camera cu un singur pixel

Camera cu un singur pixel este un sistem de achiziție de date dezvoltat pe baza teoriei CS. Se folosește de un sistem optic de proiectare, un modulator spațial de lumină și un detector pentru a obține măsurarea unei imagini. Pe baza acestor măsurători se pot reconstrui eșantioanele imaginii.

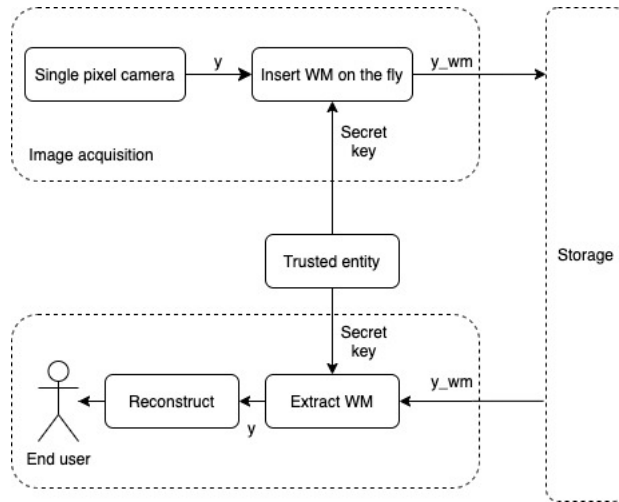


Fig. 4.1 Arhitectura propusă pentru scenariul de inserție în măsurătorile SPC

### Scenariu de marcarea digitală a măsurătorilor SPC

Să luăm în considerare un scenariu CS în care măsurătorile CS sunt marcate. Metoda pe care o propunem este să extragem un număr de valori din măsurătorile CS și să le inserăm ca watermark în secvența trunchiată rezultată.

Este important să folosim un algoritm de marcarea cu o transparență moderată: acest lucru permite reconstrucția unei versiuni deteriorate, dar totuși recognoscibilă a imaginii originale, pe baza măsurătorilor marcare. De asemenea, marcarea trebuie să fie reversibilă, astfel încât după extracție imaginea să poată fi reconstruită la calitatea originală. Analizăm capacitatea algoritmului de marcarea ca o posibilă sursă de distorsiune.

Algoritmul selectat este cel propus de Sachnev et. al [20] care la rândul lui extinde lucrarea realizată de Thodi et. al in [23]. Acesta expandează eroarea de predicție pentru a putea realiza inserția de watermark, folosindu-se de două praguri ( $T_n$  și  $T_p$ ).

Elementul de noutate al scenariului propus este faptul că inserția de watermark se realizează în timpul eșantionării (en. on the fly). Măsurătorile selectate pentru marcarea sunt convertite în bază 2, criptate cu o cheie secretă și apoi inserate bit cu bit în următoarele măsurători achiziționate (Fig. 4.1).

Rulăm simulări pe două imagini de 256x256 pixeli, Lena și Peppers (Fig. ??). Reconstrucția CS se face pe baza unui număr de măsurători reprezentând 50% din dimensiunea imaginii serializate (rata de compresie de 1.6), folosind algoritmul descris de [3].

Capacitatea de inserție este prezentată în Fig. 4.2 pe  $T_n = 0$  and  $T_p$  în intervalul 50 - 1024. Un alt aspect analizat este calitatea de reconstrucție pentru un utilizator neautorizat ce folosește măsurătorile marcate (Fig. 4.3).

Simulările au confirmat faptul că secvența de watermark poate fi extrasă fără pierderi. De asemenea, calitatea finală a reconstrucției este afectată chiar și atunci când este inserată o secvență scurtă de marcaj.

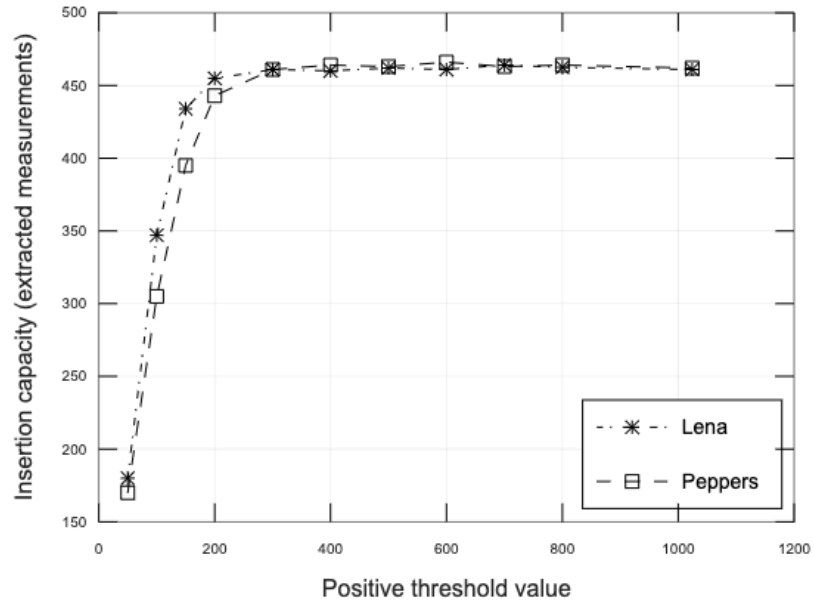


Fig. 4.2 Capacitatea algoritmului de marcare

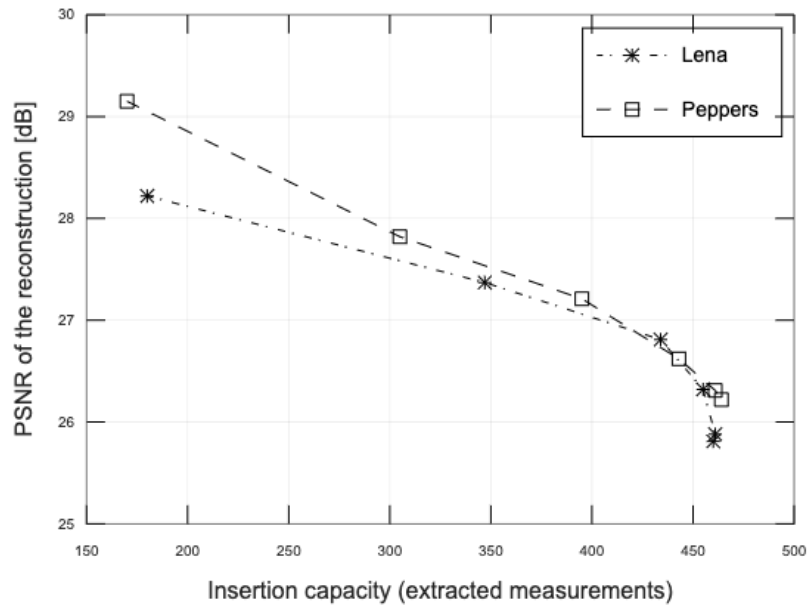


Fig. 4.3 Valorile PSNR [dB] pentru diferite capacități de inserție

## Capitolul 5

# Insertie de watermark pe mai mulți biți pentru măsurătorile SPC

În acest capitol analizăm un scenariu în care un watermark reversibil multi-bit este inserat în timpul achiziției măsurătorilor unei camere cu un singur pixel. Utilizatorii autorizați pot să reconstruiască imaginea la calitatea sa originală iar ceilalți utilizatori (neautorizați) pot obține o versiune de calitate scăzută a imaginii. Informațiile introduse în pasul de marcarea constau dintr-un set de valori de măsurare criptate. Rezultatele arată că atât capacitatea algoritmului de marcarea cât și calitatea reconstrucțiilor sunt afectate de numărul de biți utilizați pentru a reprezenta watermark-ul și de tipul de matrice utilizată pentru eșantionare.

Algoritmul de marcarea prezentat în capitolul anterior a fost modificat pentru a permite inserția de mai mulți biți.

Vom considera valorile originale ale măsurătorilor  $y_i$ , valoarea maximă a marcajului pe  $x$  biți  $b_{max} = 2^x - 1$ , marcajul reprezentat în baza 10  $b_x$ , pragul  $T$  care delimitează în ce măsurători se face inserția și  $d_i$  valoarea erorii de predicție.

Valorile marcate ale măsurătorilor pot fi exprimate ca fiind:

$$y_{wm_i} = \begin{cases} y_i + b_{max} \cdot d_i + b_x & \text{if } d_i \in [-T, T] \\ y_i + b_{max}T + b_{max} & \text{if } d_i > T \text{ and } T \geq 0 \\ y_i - b_{max}T & d_i < -T \text{ and } -T < 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Pentru extracția de watermark, se calculează valoarea erorii de predicție modificate:

$$D_i = y_{wm_i} - \bar{y} \quad (5.2)$$

Eroarea originală de predicție  $d_i$  este calculată ca fiind:

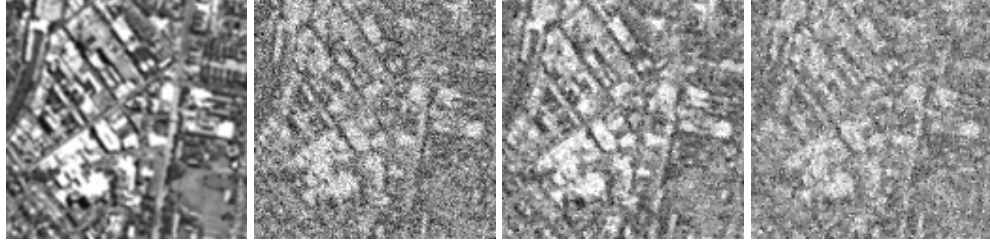


Fig. 5.1 De la stânga la dreapta: Sidney imaginea originală și reconstrucții din măsurători marcate pe 8 biți cu matricea S (PSNR 17.12 dB), Hadamard (PSNR 19.00 dB) și BPDB (16.50 dB)

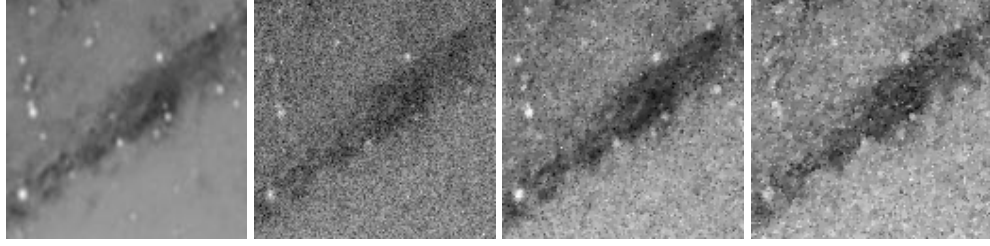


Fig. 5.2 De la stânga la dreapta pentru Andromeda, imaginea originală și reconstrucții din măsurători marcate pe 8 biți cu matricea S (PSNR 20.91 dB), Hadamard (PSNR 23.83 dB) și BPDB (PSNR 22.41 dB)

$$d_i = \begin{cases} \lfloor D_i/2^x \rfloor & \text{if } D_i \in [-2^x T, 2^x T + b_{\max}] \\ D_i - b_{\max}(T - 1) & \text{if } D_i > 2^x T + b_{\max} \text{ and } T \geq 0 \\ D_i + b_{\max}T & \text{if } D_i < -2^x T \text{ and } -T < 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Valoarea marcajului poate fi obținută prin:

$$b_x = D_i \mod 2^x, D_i \in [-2^x T, 2^x T + b_{\max}] \quad (5.4)$$

Valoarea originală a măsurătorii  $y_i$  poate fi calculată ca fiind:

$$y_i = d_i + \bar{y} \quad (5.5)$$

Am efectuat simulări pe două imagini cu dimensiunea de 128x128 pixeli: Andromeda, o decupare de natură rară (en. sparse) dintr-o imagine mai mare a galaxiei Andromeda și Sidney, o decupare dintr-o imagine din satelit a orașului Sidney. Reconstrucția CS se face dintr-un număr de eșantioane egal cu 50% din pixelii imaginii în cazul Andromeda și 70% din pixelii imaginii pentru Sidney.

Cele trei tipuri de matrice de măsurare CS sunt Hadamard (construcția Sylvester), matricea S cu prima linie și coloana setate la zero [22] și BPBD.

Rezultatele simulărilor au inclus evaluarea capacității algoritmului de marcare pentru fiecare combinație de imagine și matrice de măsurători, pentru o variație de la 1 la 10 a

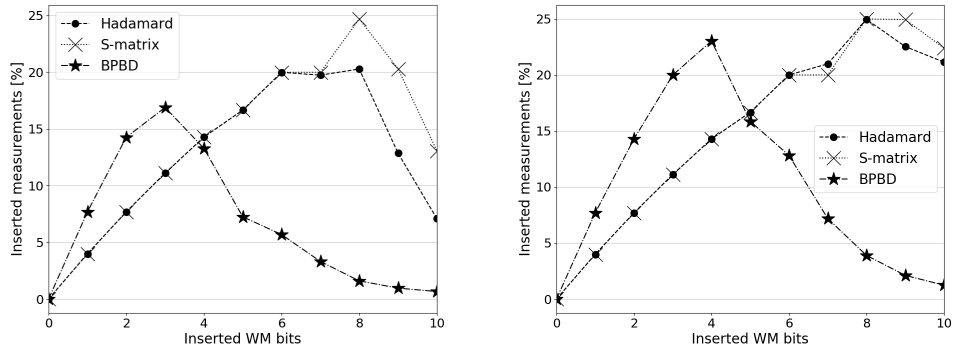


Fig. 5.3 Capacitatea algoritmului de marcare pentru Sidney (stânga) și Andromeda (dreapta) pentru mai multe valori  $x$  de biți utilizați pentru reprezentarea marcajului

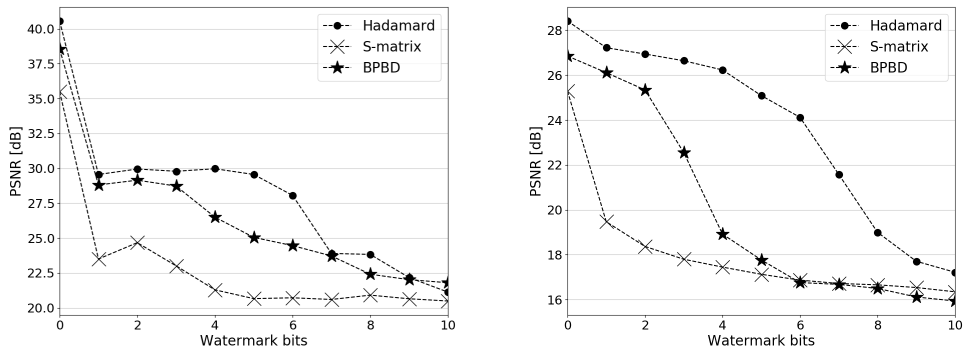


Fig. 5.4 Variation of the reconstruction quality for Andromeda (left) and Sidney (right) for various number of bits  $x$  used to represent the watermark

numărului de biți pe care se face reprezentarea marcajului. Creșterea numărului de biți duce la o capacitate mărită până la atingerea unui prag (Fig. 5.3)

Calitatea imaginii reconstruite este influențată de doi factori: inserția de watermark (care alterează valorile măsurătorilor) și micșorarea numărului total de măsurători folosite pentru reconstrucție (Fig. 5.4).

În urma simulărilor se observă că valorile capacității pentru matricile Hadamard și S sunt foarte similare, fiind mai mari decât în cazul BPBD.

Utilizarea matricei de măsurare S oferă cea mai mare capacitate de inserare cu cea mai mare degradare a imaginilor reconstruite în comparație cu celelalte două.

Pentru imagini rare, o reconstrucție CS de bună calitate poate fi obținută dintr-un număr mai mic de măsurători.

## Capitolul 6

# Marcare și criptare parțială a imaginilor obținute prin eșantionare compresivă

Acest capitol propune o metodă pentru a realiza simultan marcarea și criptarea parțială a măsurătorilor CS. Constă în criptarea unei părți din măsurători și inserarea codului rezultat în restul măsurătorilor.

Criptarea se face prin efectuarea operației XOR cu o cheie secretă.

Pentru inserție folosim o versiune modificată a algoritmului de extindere a erorii de predicție, adaptată pentru a se potrivi cu statisticile măsurătorilor CS. O particularitate a metodei este inserarea în timpul achiziției (en. *on the fly*), care o face potrivită pentru eșantionarea secvențială realizată de către o cameră cu un singur pixel. Fără cheia secretă, un utilizator neautorizat poate reconstrui o imagine de calitate scăzută dar cu conținut ușor de recunoscut.

Spre deosebire de practica obișnuită de utilizare a marcajelor imperceptibile, inserția se realizează pe un număr mare de biți, astfel încât să provoace o distorsiune vizuală puternică dacă un utilizator neautorizat încearcă să reconstruiască imaginea din măsurătorile marcate.

Noutatea metodei constă în criptarea completă a unei părți a măsurătorilor CS și utilizarea ca purtător al restului și, de asemenea, inserarea secvențială (*on the fly*) a măsurătorilor criptate. Un alt aspect original este utilizarea unei versiuni modificate a algoritmului de extindere a erorilor de predicție.

Metoda este evaluată sub următoarele aspecte: capacitatea algoritmului de marcarea, distorsiunea introdusă de criptarea parțială și impactul asupra volumului de date. Este derivată o ecuație pentru capacitatea de inserție și este trasată curba experimentală de distorsiune a metodei.



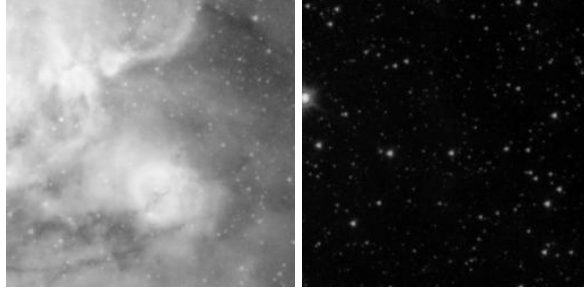


Fig. 6.1 Două exemple de imagini folosite pentru simulări, una cu multe detalii (stânga) și una cu puține detalii (dreapta).

Capacitatea exprimată ca numărul de biți inserați este  $C = x * n$  iar capacitatea relativă  $C_r$  poate fi exprimată în funcție de numărul total de măsurători  $L$ :

$$C_r = \frac{C}{L} \quad (6.1)$$

Pentru praguri suficient de mari,  $C_r$  poate fi aproximată ca:

$$C_r \approx \frac{n}{1 + n/16} \quad (6.2)$$

### Rezultate experimentale

Simulările au fost rulate atât pe date simulate reprezentând o imagine a cerului (nebuloasa W51) împărțită în 359 de bucăți de dimensiune 256x256, cât și pe date reale obținut în cadrul experimentelor din [14]. Ideea din spatele alegerii acestor date simulate a fost potențialul SPC în explorarea cerului. Fig. 6.1 conține două exemple de imagini folosite pentru simulări, având valori diferite ale dispersiei.

Testăm experimental metoda noastră pentru următoarele aspecte: capacitatea de inserție, distorsiunea și impactul asupra volumului de date. Rezultatele sunt date pentru un prag de inserție larg, ceea ce înseamnă că inserarea este efectuată în toate măsurătorile disponibile.

Am luat în considerare un număr total de măsurători reprezentând 40% din dimensiunea imaginii și un prag  $T = 500$ , care asigură că toate măsurătorile sunt eligibile pentru inserare.

În Fig. 6.2, capacitatea relativă  $C_r$  este reprezentată în raport cu numărul de niveluri de inserție  $n$ . Curba are o tendință ascendentă, cu valori de capacitate variind de la 0,9 biți/măsurătoare pentru 1 nivel până la 7,5 biți/măsurătoare pentru 14 niveluri.

Ne folosim de valorile PSNR pentru a evalua distorsiunea comparată cu reconstrucția imaginii din măsurătorile originale (Fig. 6.3). O scădere a calității reconstrucției poate fi observată după 6 niveluri de inserție. Până la 7 niveluri de inserție, distorsiunea nu este vizibilă. Distorsiunea și capacitatea sunt strâns legate. Figura 6.4 arată corelația

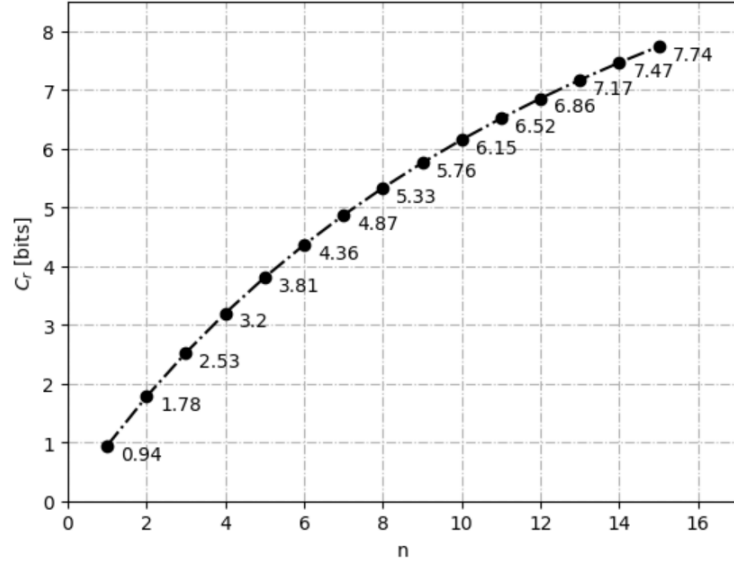


Fig. 6.2 Capacitatea relativă  $C_r$  vs. numărul de niveluri de inserție  $n$  pentru  $T = 500$ .

dintre capacitatea relativă  $C_r$  și PSNR. După cum era de așteptat, atât capacitatea cât și distorsiunea cresc odată cu numărul de niveluri de inserție.

În cazul datelor reale, achiziția se realizează cu o matrice CS de tip S cu coloanele permutate aleator. Rezultatele experimentelor denotă faptul că, în cazul datelor reale, rezultatele sunt similare cu cele obținute pentru date simulate. La 10 nivele de inserție valoarea PSNR este de 10.48 dB pentru datele reale și aproximativ 14 dB pentru imaginile reconstruite folosind date simulate.

Datorită faptului că se bazează pe expandarea erorii de predicție, algoritmul prezentat modifică volumul de date în momentul inserării.

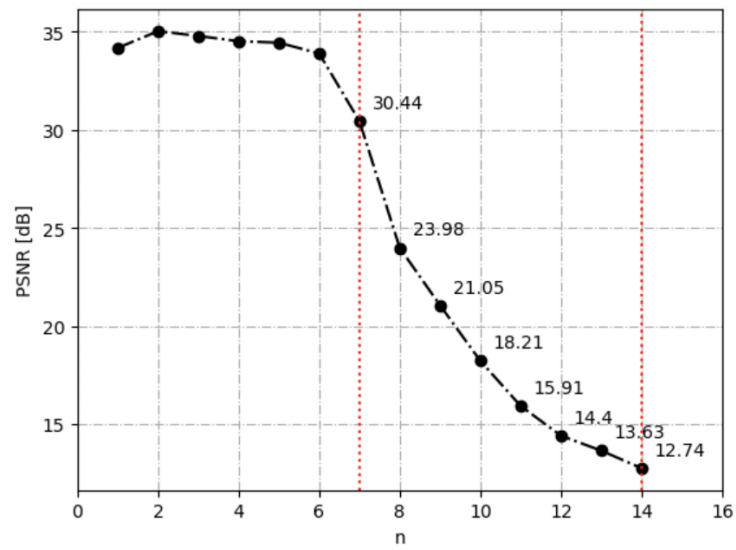


Fig. 6.3 Valori experimentale pentru PSNR

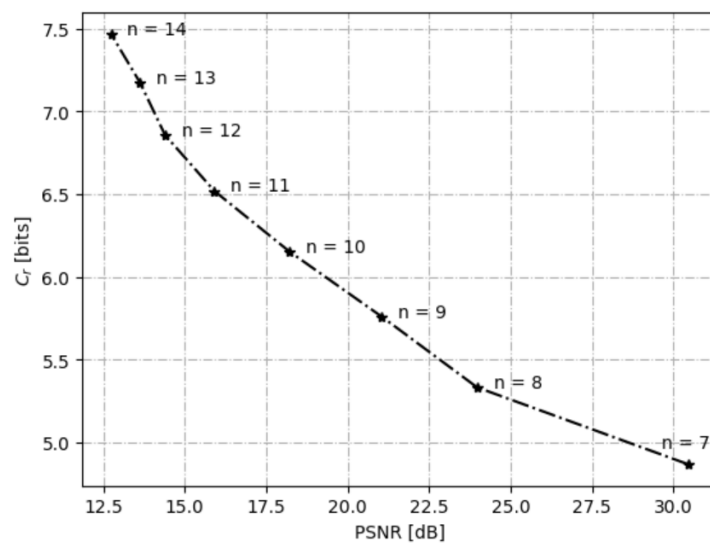


Fig. 6.4 Capacitatea relativă  $C_r$  exprimată în funcție de valoarea mediană a PSNRs

## Capitolul 7

# Enciptie Parțială cu Data Hiding a Măsurătorilor CS

Acest capitol propune o metodă de efectuare a Reversible Data Hiding (RDH) cu criptare parțială în măsurătorile CS prin criptarea unei părți a acestora folosind o cheie secretă și apoi inserarea valorilor rezultate din mers în următoarele măsurători eligibile. Inserarea are ca rezultat o distorsiune vizibilă, în timp ce imaginile reconstruite pe baza măsurătorilor marcate încă au un conținut discernabil. Modificările propuse pentru algoritmul de extindere a erorii de predicție îl adaptează pentru utilizare într-un scenariu SPC, limitând în același timp extinderea gamei de valori a datelor. Această adaptare este inovatoare în comparație cu algoritmul propus în Capitolul 6 și permite utilizatorului să controleze dacă măsurătorile modificate necesită memorie suplimentară în comparație cu cele originale.

Experimentele se realizează pe un set de data experimentale (similar cu cel utilizat în Capitolul 6) precum și pe un set de date reale.

Principala diferență față de variantele anterioare ale algoritmului este faptul că, în pasul de inserție de date, măsurătorile care nu sunt eligibile pentru inserție nu sunt modificate:

$$D_i = \begin{cases} 2^n \cdot d_i + bn_i & \text{if } d_i \in [-T, T] \\ d_i & \text{if } d_i \notin [-T, T] \end{cases} \quad (7.1)$$

Pentru că nu se mai realizează expandarea acestor măsurători, se poate păstra reprezentarea originală pe 16 biți a măsurătorilor marcate. Pentru a păstra caracteristica de reversibilitate a algoritmului se folosește o hartă de poziții ce conține informația necesară extragerii datelor inserate.

Rezultatele experimentale arată că această variație a algoritmului de inserție de date poate fi folosită cu succes atât pe date reale cât și pe date simulate. Distorsiunea imaginilor reconstruite pe baza măsurătorilor marcate este vizibilă începând cu 1 nivel de inserție 7.1.

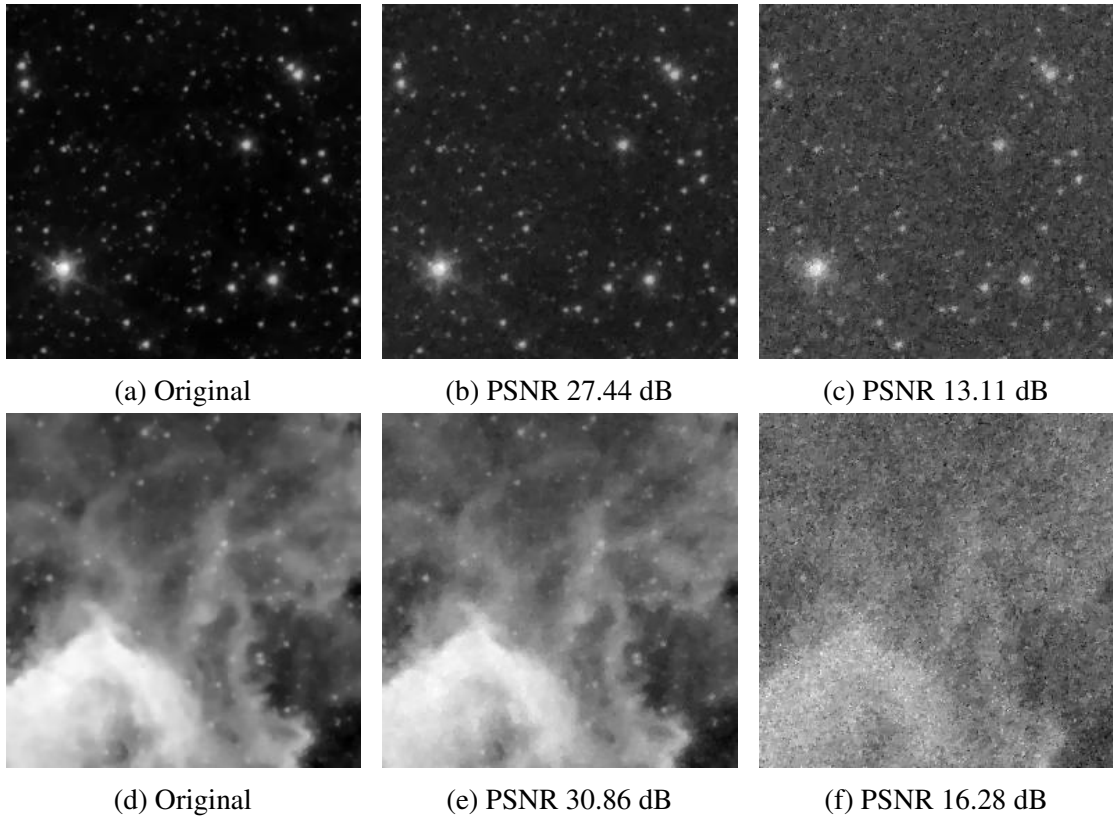


Fig. 7.1 Exemple de reconstrucție pe baza măsurătorilor originale  $y$  ((a) și (d)), după inserție pe 1 nivel ((b) și (e)) și 3 nivele ((c) și (f)). Datele sunt simulate

Inserția expandează volumul de date cu 2-3% pentru  $T = 20$  7.2.

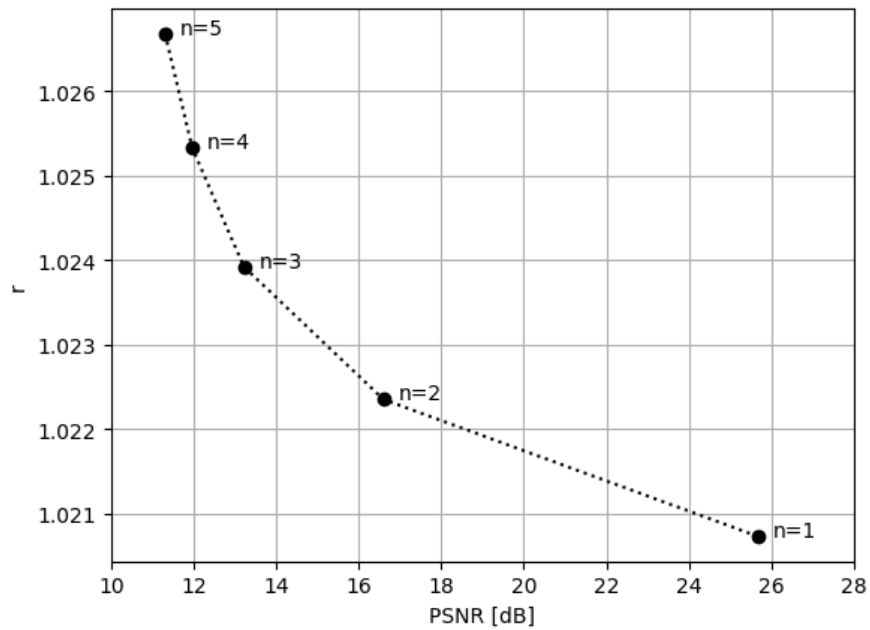


Fig. 7.2 Curba ratei de distorsiune pentru  $T = 20$ .

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost acceptate pentru publicare în articolul de conferință "Partial Encryption With Data Hiding Performed On-the-fly On Compressed Sensed Measurements".

# Capitolul 8

## Concluzii

Teza aduce contribuții în domeniul marcării digitale în contextul eșantionării compresive. Este axată pe dezvoltarea și evaluarea unui nou algoritm de marcăre conceput pentru inserția în măsurători CS în timpul achiziției, în special în cazul camerelor cu un singur pixel.

Contribuțiile originale prezentate în teză sunt:

- Un studiu privind influența parametrilor CS asupra marcajului măsurătorilor CS, bazat pe teorie și simulări experimentale [17].
- Un algoritm de inserare de watermark conceput special pentru a permite inserția în măsurătorile CS, în timp ce ele sunt achiziționate (en. on the fly) [15].
- O versiune actualizată a algoritmului de expandare a erorilor, modificat pentru a permite inserarea pe mai mulți biți și pentru a maximiza capacitatea de inserție pe baza proprietăților măsurătorilor CS [16, 18]
- Un design de marcaj de imagini conceput special pentru cerințele și limitările inserării secvențiale în măsurătorile unui sistem imagistic cu un singur pixel [16, 18]
- O arhitectură care permite utilizatorilor neautorizați să acceseze o versiune de joasă calitate a imaginii originale, prin reconstrucția pornind de la măsurătorile marcate [15, 16, 18]
- Un model matematic și studiile asociate pentru capacitatea relativă a algoritmului propus [19]
- O versiune modificată a algoritmului de expandare a erorilor ce permite inserarea de date fără a modifica gama de valori a măsurătorilor marcate [19]

## **8.1 Listă de publicații originale**

### **8.1.1 Articole de revistă**

1. C. Popa, C. Damian and D. Coltuc, "Joint Watermarking and Partial Encryption of Compressive Sensed Data", acceptat pentru publicare la revista *Information*, MDPI. Factor de Impact 2.4, Q2

### **8.1.2 Articole de conferință**

1. C. Popa, D. Coltuc and C. Damian, "On the Watermarking of Image Compressed Samples," 2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2019
2. C. Popa and D. Coltuc, "Compressive sensing based watermarking as a security layer for computational imaging applications," 2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania, 2020
3. C. Popa and D. Coltuc, "Multi-bit watermark insertion for single pixel camera measurements," 2021 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2021
4. C. Popa, C. Damian and D. Coltuc and C. Damian, "Partial Encryption with Data Hiding Performed On-the-fly on Compressed Sensed Measurements," acceptat pentru publicare la International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence ECAI 2025, Targoviste, Romania.

## **8.2 Perspective pentru cercetare ulterioară**

Au fost identificate mai multe direcții de cercetare pentru dezvoltări ulterioare:

- O evaluare amănunțită a rezistenței algoritmului la diferite tipuri de atacuri și îmbunătățirea pe baza rezultatelor a securității acestuia.
- Un pas următor ce vine natural este testarea metodei dezvoltate în teză pe un sistem SPC real, folosind datele achiziționate de acesta
- Extinderea scenariului pentru alte tipuri de date în diferite domenii în care achiziția acestora se realizează folosind teoria CS.



# Bibliografie

- [1] Al-Mansoori, S. and Kunhu, A. (2013). Multi-watermarking scheme for copyright protection and content authentication of dubaisat-1 satellite imagery. In *Satellite Data Compression, Communications, and Processing IX*, volume 8871, pages 72–88. SPIE.
- [2] Asikuzzaman, M. and Pickering, M. R. (2017). An overview of digital video watermarking. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 28(9):2131–2153.
- [3] Beck, A. and Teboulle, M. (2009). A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm with application to wavelet-based image deblurring. In *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 693–696.
- [4] Donoho, D. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4):1289–1306.
- [5] E. Candès, J. Romberg, T. T. (2006). Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(2):489–509.
- [6] E. J. Candès, M. B. W. (2008). An Introduction to Compressive Sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2).
- [7] Ender, J. (2013). A brief review of compressive sensing applied to radar. In *2013 14th International Radar Symposium (IRS)*, volume 1, pages 3–16. IEEE.
- [8] Graff, C. G. and Sidky, E. Y. (2015). Compressive sensing in medical imaging. *Applied Optics*, 54(8):C23–C44.
- [9] Hua, G., Huang, J., Shi, Y. Q., Goh, J., and Thing, V. L. (2016). Twenty years of digital audio watermarking—a comprehensive review. *Signal processing*, 128:222–242.
- [10] Huang, H.-C., Chang, F.-C., et al. (2014). Robust image watermarking based on compressed sensing techniques. *J. Inf. Hiding Multim. Signal Process.*, 5(2):275–285.
- [11] Kamaruddin, N. S., Kamsin, A., Por, L. Y., and Rahman, H. (2018). A review of text watermarking: theory, methods, and applications. *IEEE Access*, 6:8011–8028.
- [12] Kung, H., Lin, C.-K., and Vlah, D. (2011). {CloudSense}: Continuous {Fine-Grain} cloud monitoring with compressive sensing. In *3rd USENIX Workshop on Hot Topics in Cloud Computing (HotCloud 11)*.
- [13] Liu, X., Zhai, D., Zhou, J., Zhang, X., Zhao, D., and Gao, W. (2016). Compressive sampling-based image coding for resource-deficient visual communication. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(6):2844–2855.

- [14] Petrovici, M.-A., Damian, C., Udrea, C., Garoi, F., and Coltuc, D. (2016). Single pixel camera with compressive sensing by non-uniform sampling. In *2016 International Conference on Communications (COMM)*, pages 443–448. IEEE.
- [15] Popa, C. and Coltuc, D. (2020). Compressive sensing based watermarking as a security layer for computational imaging applications. In *2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, pages 1–4.
- [16] Popa, C. and Coltuc, D. (2021). Multi-bit watermark insertion for single pixel camera measurements. In *2021 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pages 1–4. IEEE.
- [17] Popa, C., Coltuc, D., and Damian, C. (2019). On the watermarking of image compressed samples. In *2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pages 1–4.
- [18] Popa, C., Damian, C., and Coltuc, D. (2025a). Joint data hiding and partial encryption of compressive sensed stream. in press.
- [19] Popa, C., Damian, C., and Coltuc, D. (2025b). Partial encryption with data hiding performed on-the-fly on compressed sensed measurements. accepted at the 17th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence ECAI 2025, Targoviste, Romania.
- [20] Sachnev, V., Kim, H. J., Nam, J., Suresh, S., and Shi, Y. Q. (2009). Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 19(7):989–999.
- [21] Singh, A. K., Kumar, B., Singh, G., and Mohan, A. (2017). *Medical image watermarking*. Springer.
- [22] Sloane, N. J. (1979). Multiplexing methods in spectroscopy. *Mathematics Magazine*, 52(2):71–80.
- [23] Thodi, D. M. and Rodríguez, J. J. (2004). Reversible watermarking by prediction-error expansion. In *6th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, 2004.*, pages 21–25. IEEE.
- [24] Verma, V. S. and Jha, R. K. (2015). An overview of robust digital image watermarking. *IETE Technical review*, 32(6):479–496.
- [25] Wunder, G., Boche, H., Strohmer, T., and Jung, P. (2015). Sparse signal processing concepts for efficient 5g system design. *IEEE Access*, 3:195–208.
- [26] Zhang, Y., Zhang, L. Y., Zhou, J., Liu, L., Chen, F., and He, X. (2016). A Review of Compressive Sensing in Information Security Field. *IEEE Access*.