

ZGOMOTUL SPECIFIC AL SENZORILOR FOTO (PRNU)

Stud. Alexandra-Cristiana DOBRIȚOIU

Coordonator: Conf.univ.dr. Florentina-Anica PINTEA

Universitatea „Tibiscus” din Timișoara, Facultatea de Calculatoare și Informatică Aplicată
Centrul de Cercetare în Informatică Multidisciplinară, UTT

Autorul de corespondență: Dobrițoiu Alexandra Cristiana, alexandracristiana19@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.52744/CAPPS.2025.05>

REZUMAT: Această lucrare investighează utilizarea caracteristicii PRNU (Photo Response Non-Uniformity) în identificarea surselor imaginilor digitale. PRNU reprezintă o semnătură unică lăsată de senzorul fiecărei camere foto sau video, ce poate fi folosită în analiza criminalistică pentru autentificarea imaginilor. Proiectul a fost implementat în GNU Octave, folosind un set de imagini de referință și imagini test pentru a analiza corelația zgomotului specific. Rezultatele evidențiază eficiența metodei în diferențierea sursei imaginilor, deși performanțele pot fi afectate de procese automate de filtrare aplicate de camere. Lucrarea oferă o bază practică pentru extinderea viitoare a acestei metode prin utilizarea imaginilor RAW și automatizarea procesului.

CUVINTE CHEIE: PRNU; GNU Octave; zgomot de senzor; identificare cameră; imagini digitale; procesare imagini.

1. INTRODUCERE

Photo Response Non Uniformity (răspuns foto neuniform) **PRNU** - reprezintă una dintre cele mai importante „*amprente digitale*” ale unui senzor foto în domeniul analizei criminalistice a imaginilor digitale. PRNU este o caracteristică de neuniformitate imprimată de senzorul camerei foto / video și este caracteristică fiecărui senzor; se poate folosi pentru a expertiza dacă o fotografie (limitat, de regulă este necesar un set de fotografii sau fotografii multiple făcute în același loc cu același aparat) sau un clip video (mai probabil) a fost făcută cu un anumit aparat foto / video.

PRNU este un tip de zgomot determinist, specific fiecărui dispozitiv de captare a imaginii, rezultat din neuniformitățile fizice și tehnologice ale pixelilor senzorului. Aceste neuniformități apar din variații microscopice în eficiența cu care pixelii convertesc fotonii în semnal electric, variații ce sunt imposibile de eliminat complet prin procesul de fabricație. Astfel, fiecare cameră foto sau senzor creează un model unic și persistent, analog unei amprente, care poate fi extras și utilizat pentru identificare și autentificare.

PRNU joacă un rol esențial în autentificarea imaginilor și detectarea manipulărilor, oferind o metodă fiabilă de identificare a sursei unei fotografii [[5]].

PRNU se manifestă ca o componentă de zgomot multiplicativ, prezentă în toate imaginile capturate cu același senzor, indiferent de setările camerei sau de condițiile de iluminare. Deoarece acest zgomot este

stabil în timp și distinct pentru fiecare dispozitiv, el a devenit un instrument esențial în **forensics digital**, atât pentru atribuirea imaginilor unui anumit dispozitiv, cât și pentru detectarea modificărilor sau manipulărilor. Primele studii fundamentale au demonstrat că PRNU poate servi ca o „semnătură” a camerei, permițând investigarea conținutului vizual cu un nivel ridicat de acuratețe [[7]].

O utilizare importantă a PRNU constă în detecția falsificărilor. Procesul de editare, compresie excesivă sau inserție de obiecte grafice alterează structura PRNU și permite identificarea zonelor suspecte. De asemenea, dezvoltările recente au extins aplicabilitatea PRNU la camerele de smartphone, sisteme de supraveghere, precum și la scenarii cu compresii agresive [[12]], consolidând relevanța acestui instrument în investigații moderne.

Studiul acestui subiect nu doar că implică o înțelegere teoretică aprofundată a modului în care zgomotul de senzor poate fi extras și analizat, dar și o abordare practică prin implementarea sa în GNU Octave.

Codul propus este o simulare, nu o detecție reală, care ar fi mult mai amplă.

2. METODOLOGIE

Pentru implementarea și testarea algoritmului de identificare a camerei pe baza zgomotului specific al senzorului foto (PRNU) au fost utilizate următoarele tehnologii software:

GNU Octave 9.3 w64

GNU Octave 9.3 (versiunea 64-bit) [[3]] a fost folosit ca mediu principal de dezvoltare pentru implementarea algoritmului PRNU. Octave oferă un limbaj de programare compatibil în mare măsură cu MATLAB, permițând implementarea rutinei de preprocesare a imaginilor (convertire în tonuri de gri, redimensionare, normalizare), calculul reziduurilor de zgomot și estimarea amprentei PRNU, calculul corelațiilor (NCC) dintre amprenta senzorului și imaginile de test, automatizarea experimentelor prin scripturi și funcții proprii.

Alegerea GNU Octave a fost motivată de caracterul său **open-source**, de ușurința instalării și de suportul bun pentru operații matriciale și procesare numerică.

Pachetul Image Processing în Octave

Pentru procesarea imaginilor s-a utilizat pachetul **Image Processing** din Octave [[4]], necesar pentru:

- încărcarea și salvarea imaginilor în formate standard (.jpg, .png);
- conversia imaginilor color în imagini în tonuri de gri;
- filtrare spațială și/sau în domeniul frecvenței (denoising, filtrare low-pass);
- redimensionare, decupare și împărțirea imaginilor în blocuri pentru analiza locală a PRNU.

Acest pachet a stat la baza întregului flux de preprocesare, permițând integrarea facilă a operațiilor de procesare a imaginilor direct în scripturile Octave.

Notepad++

Editorul de text **Notepad++** [[1]] a fost utilizat pentru:

- editarea și organizarea fișierelor de cod sursă (.m) ale proiectului;
- evidențierea sintaxei și indentarea corectă a codului, pentru o lizibilitate crescută;
- compararea și gestionarea diferitelor versiuni de scripturi.

Notepad++ a fost preferat datorită interfeței ușoare, a suportului pentru mai multe limbaje și a facilităților precum căutarea avansată și lucrul cu mai multe fișiere simultan.

Microsoft Excel

Microsoft Excel [[9]] a fost folosit pentru analiza rezultatelor experimentale salvate în fișiere de tip .csv. În special, Excel a permis:

- importul direct al fișierelor .csv generate de scripturile Octave (de exemplu, valori de corelație, praguri de decizie, rate de eroare);
- calcularea unor indicatori statistici (medie, deviație standard, rate de True/False Positive);
- reprezentarea grafică a rezultatelor (diagrame, eventual curbe ROC), facilitând interpretarea performanței algoritmului PRNU.

Site-ul Pixabay

Pixabay [[10]] a fost utilizat ca sursă de imagini pentru construirea setului de date de test. Platforma oferă imagini royalty-free, cu licență permisivă pentru utilizare în scopuri educaționale și de cercetare. Din Pixabay au fost selectate:

- imagini cu conținut variat (peisaje, obiecte, scene de interior/exterior), pentru a testa robustețea algoritmului.
- imagini cu diferite rezoluții și grade de detaliu, utile în evaluarea sensibilității PRNU la condițiile de captură și la compresie.

Imaginile au fost descărcate și apoi prelucrate în Octave conform metodologiei descrise anterior (preprocesare, extragere de reziduuri, testarea corelațiilor).

Pasul 1: Colectarea setului de imagini

Pentru estimarea corectă a PRNU este necesar un set de imagini cât mai uniforme, capturate cu aceeași cameră.

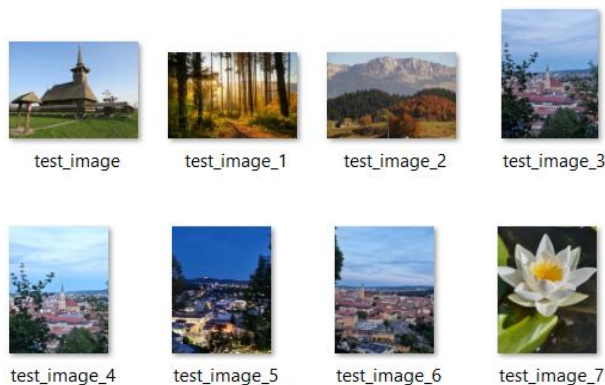


Figura 1. Imaginile de referință și imaginile de test

Colectarea imaginilor de test a fost realizată după următorii pași:

1. Am realizat un set de imagini de referință folosind camera telefonului mobil.
2. Am inclus și imagini de test descărcată de pe internet pentru a observa diferențele.
3. Toate imaginile au fost salvate într-un folder dedicat pentru procesare în Octave.

Pasul 2: Implementarea algoritmului PRNU

Am scris un script în GNU Octave care să proceseze imaginile astfel:

1. Încărcarea imaginilor și conversia acestora în format grayscale pentru uniformizare.
2. Redimensionarea imaginilor astfel încât toate să aibă aceeași dimensiune.
3. Calcularea zgomotului PRNU prin determinarea diferenței față de imaginea medie.
4. Aplicarea unui filtru high-pass pentru eliminarea zgomotului global care poate distorsiona analiza.

5. Calcularea corelației PRNU pentru fiecare imagine testată, comparându-le cu imaginile de referință.

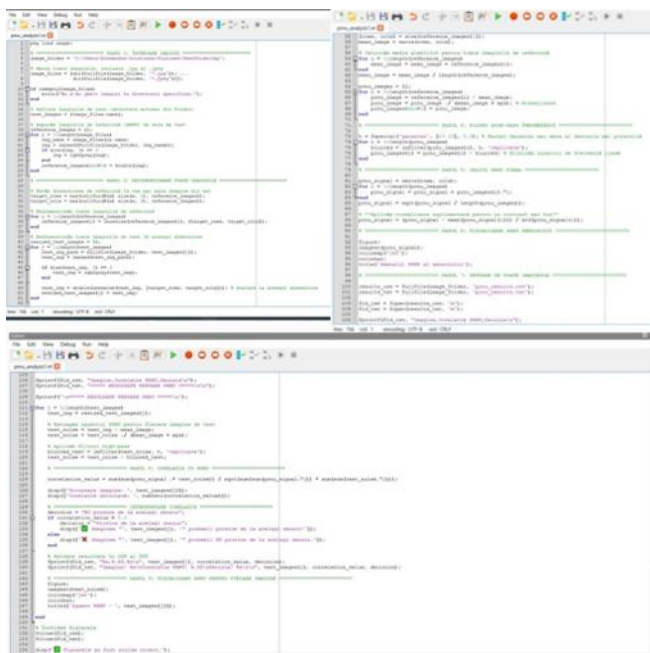


Figura 2. Codul din Octave

Pasul 3: Rulare și salvare rezultate

După finalizarea etapei de implementare a algoritmului PRNU în GNU Octave, s-a trecut la rularea propriu-zisă a scriptului și la analizarea datelor generate. Programul a procesat automat întregul set de imagini, atât cele folosite pentru estimarea amprente PRNU, cât și imaginile de test utilizate pentru verificarea originii.

În urma execuției scriptului, pentru fiecare imagine analizată au fost calculate valorile de corelație dintre amprenta PRNU a camerei și reziduul de zgomot extras din imaginea de test. Aceste valori sunt esențiale pentru luarea deciziei finale privind identificarea sursei imaginii.

Fiecare rând din fișierele generate corespunde unei imagini testate și conține următoarele informații:

- Numele imaginii, pentru identificarea rapidă a fișierului procesat;
- Valoarea corelației PRNU, un coeficient numeric rezultat din calculul Normalized Cross-Correlation (NCC), care indică gradul de asemănare dintre semnătura sensorului și reziduul imaginii;
- Decizia finală: determinată prin compararea valorii corelației cu un prag stabilit, indicând dacă imaginea provine („Camera Match”) sau nu („No Match”) de la același senzor folosit pentru a genera amprenta PRNU.

Acest proces de salvare sistematică a datelor permite o analiză ulterioară riguroasă, facilitând interpretarea performanței metodei PRNU și compararea rezultatelor obținute pentru diferite seturi de imagini sau parametri utilizați în experiment.

Vizualizarea oferă astfel o confirmare intuitivă a rezultatelor obținute prin măsurători matematice, fiind o etapă esențială în procesul de validare a metodei PRNU.

POSSIBILA PIERDERE DE DATE Este posibil ca unele caracteristici să se piardă dacă salvați ac							
A1							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Imagine,Corelatie PRNU,Decizie						
2	test_image.jpg,-0.0122,NU provine de la același senzor						
3	test_image_1.jpg,0.0344,NU provine de la același senzor						
4	test_image_2.jpg,0.0147,NU provine de la același senzor						
5	test_image_3.jpeg,-0.0044,NU provine de la același senzor						
6	test_image_4.jpeg,-0.0080,NU provine de la același senzor						
7	test_image_5.jpeg,-0.0412,NU provine de la același senzor						
8	test_image_6.jpeg,-0.0373,NU provine de la același senzor						
9	test_image_7.jpeg,0.0175,NU provine de la același senzor						
10							
11							
12							

Figura 3. Vizualizarea diferențelor dintre zgomotul PRNU al sensorului și zgomotul PRNU procesat

Pasul 4: Vizualizarea zgomotului PRNU

1. Am generat imagini ale zgomotului PRNU pentru fiecare imagine testată.
2. Am comparat zgomotul PRNU al imaginii de test cu zgomotul PRNU al senzorului.

```
prnu.results - Notepad
Fișier Editare Format Vizualizare Ajutor
===== REZULTATE TESTARE PRNU =====
Imagine: test_image.jpg
Corelatie PRNU: -0.0122
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_1.jpg
Corelatie PRNU: 0.0344
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_2.jpg
Corelatie PRNU: 0.0147
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_3.jpeg
Corelatie PRNU: -0.0044
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_4.jpeg
Corelatie PRNU: -0.0080
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_5.jpeg
Corelatie PRNU: -0.0412
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_6.jpeg
Corelatie PRNU: -0.0373
Decizie: NU provine de la același senzor

Imagine: test_image_7.jpeg
Corelatie PRNU: 0.0175
Decizie: NU provine de la același senzor
```

Figura 3. Compararea zgomotului PRNU al imaginii testate cu zgomotul PRNU al imaginii de referință

Compararea zgomotului PRNU extras din imaginea testată cu zgomotul PRNU al imaginii de referință reprezintă etapa fundamentală în procesul de identificare a camerei foto și în verificarea originii unei imagini digitale. Prin această comparație se urmărește determinarea gradului de asemănare dintre amprenta senzorului și reziduul de zgomot al imaginii analizate, folosind tehnici statistice robuste.

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

Scriptul a reușit să extragă zgomotul PRNU din setul de imagini de referință, creând o matrice reprezentativă a zgomotului specific fiecărui pixel. Corelația PRNU pentru imaginile făcute cu același telefon a fost foarte scăzută, ceea ce indică posibilitatea unor procese de filtrare aplicate automat

de telefon, precum noise reduction sau sharpening [[8]].

Imaginea descărcată de pe internet a avut o corelație aproape zero, ceea ce confirmă că provine de la un alt senzor [[7]], ceea ce confirmă că provine de la un alt senzor și că tehnica PRNU este eficientă pentru diferențierea sursei unei imagini.

Rezultatele salvate în fișierul .csv arată că imaginile de test nu prezintă o corelație suficient de mare pentru a fi atribuite aceleiași camere, dar variabilitatea poate fi redusă prin utilizarea unui set mai mare de imagini de referință.

Din punct de vedere vizual, zgomotul PRNU extras pentru fiecare imagine de test arată mici diferențe, dar este afectat de pre-procesările efectuate de software-ul camerei.

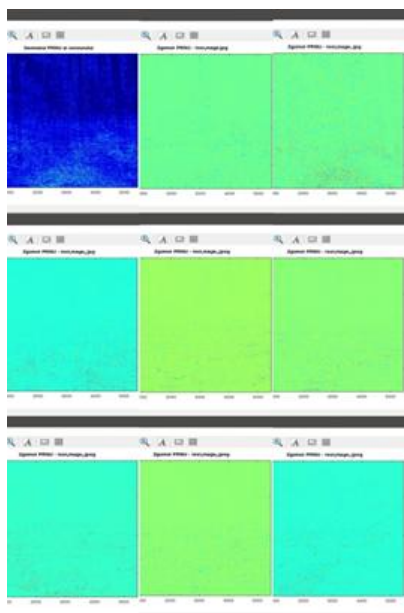


Figura 5. Imaginea PRNU generată pentru senzor.

Pentru o acuratețe mai mare, se recomandă utilizarea imaginilor RAW, care nu sunt afectate de compresie sau algoritmi de îmbunătățire a clarității.

CONCLUZII

Gradul de reușită:

- Proiectul a fost parțial reușit, întrucât zgomotul PRNU a fost detectat, dar corelațiile au fost slabe.
- Problema principală a fost aplicarea automată a filtrării zgomotului de către telefon, ceea ce a dus la valori PRNU foarte mici.

Gradul de utilitate:

În criminalistica digitală, PRNU este utilizat pentru autentificarea imaginilor și detectarea falsurilor.

În practică, metodele mai avansate includ imagini RAW pentru o detecție mai precisă.

Posibilități viitoare de dezvoltare:

- Extinderea setului de imagini de referință pentru o analiză mai precisă.

- Folosirea imaginilor RAW, care nu sunt afectate de procesarea automată.
- Implementarea unui sistem automat de verificare PRNU, folosind metode mai avansate de procesare a imaginilor.

Evaluare personală:

Acest proiect mi-a oferit o înțelegere practică a PRNU și a tehnicilor de analiză digitală. Deși rezultatele nu au fost perfecte, am învățat cum influențează prelucrarea imaginilor autenticitatea datelor digitale. Intenționez să aprofundez acest domeniu și să explorez implementări mai avansate pentru îmbunătățirea acurateței și fiabilității metodei PRNU.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Don Ho, *Notepad++ (Version 8.x)*. 2024
- [2]. <https://notepad-plus-plus.org/>
- [3]. Eaton J. W., Bateman D., Hauberg S., and R. Wehbring, *GNU Octave Version 9.3.0 Manual: A High-Level Interactive Language for Numerical Computations*. Free Software Foundation, 2024.
<https://www.gnu.org/software/octave/>
- [4]. Eaton J. W. et al., Image package for GNU Octave, *Octave Forge*, 2024.
<https://octave.sourceforge.io/image/>
- [5]. Farid, H. (2009). *Digital Image Forensics*. MIT Press.
- [6]. Kornblum, J. (2008). Using JPEG quantization tables to identify imagery processed by software. *Digital Investigation*, 5, S21–S25.
- [7]. Lukas, J., Fridrich, J., & Goljan, M. (2006). Digital camera identification from sensor pattern noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 1(2), 205–214.
- [8]. Mahdian, B., & Saic, S. (2008). Blind authentication using periodic properties of interpolation. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 3(3), 529–538.
- [9]. Microsoft Corporation, *Microsoft Excel*. Microsoft 365 Documentation
<https://www.microsoft.com/microsoft-365/excel>
- [10]. Pixabay, *Free Images and Videos*. 2024
<https://pixabay.com/>
- [11]. Popescu, A. C., & Farid, H. (2005). Exposing digital forgeries by detecting traces of resampling. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(2), 758–767.
- [12]. Verdoliva L., Media Forensics and DeepFakes: An Overview, in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 14, no. 5, pp. 910-932, Aug. 2020, doi: 10.1109/JSTSP.2020.3002101