

**UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Milan Marić

**PRIMJENA KOMPRESIVNOG ODABIRANJA I  
DIGITALNOG WATERMARKINGA U SISTEMIMA ZA  
MONITORING ŠTETOČINA**

**-Magistarski rad-**

Podgorica, 2023. godine

## PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU

**Ime i prezime:** Milan Marić

**Datum i mjesto rođenja:** 23.04.1959. godine, Kolašin, Crna Gora

**Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:**

Elektrotehnički fakultet, odsjek Elektronika, 1982.

## INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

**Naziv postdiplomskog studija:** Akademske magistarske studije, smjer Računari

**Naslov rada:** Primjena kompresivnog odabiranja i digitalnog watermarkinga u sistemima za monitoring štetočina

**Fakultet na kojem je rad odbranjen:** Elektrotehnički fakultet, Podgorica

## UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

**Datum prijave magistarskog rada:** 04.11.2022.

**Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:** 23.03.2023.

**Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta:**

Prof. dr Srđan Stanković

Prof. dr Irena Orović

Doc. dr Anđela Draganić

**Mentor:** Prof. dr Irena Orović

**Komisija za ocjenu magistarskog rada:**

Prof. dr Srđan Stanković

Prof. dr Irena Orović

Doc. dr Anđela Draganić

**Komisija za odbranu magistarskog rada:**

Prof. dr Srđan Stanković

Prof. dr Irena Orović

Doc. dr Miloš Brajović

Datum odbrane: 19.07.2023.

Datum promocije: \_\_\_\_\_

# ETIČKA IZJAVA

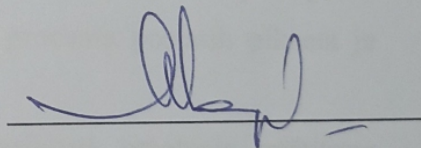
U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

**Primjena kompresivnog odabiranja i digitalnog watermarkinga u sistemima za monitoring štetočina**

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Milan Marić, Spec. Sci



## Sažetak

Pristup komprimovanog odabiranja (Compressive Sensing - CS) mijenja način akvizicije signala, omogućavajući njegovu uspješnu rekonstrukciju iz značajno manje prikupljenih odbiraka u poređenju sa tradicionalnim načinom akvizicije. Naime, može se reći da CS pristup komprimuje signal tokom procesa očitavanja. Signal treba da ima prorijeđenu ili konciznu (eng. *sparse*) predstavu u izvornom ili odgovarajućem transformacionom domenu. Takođe, procedura akvizicije treba da zadovoljava uslov nekoherentnosti kako bi omogućila rekonstrukciju signala iz relativno malog broja mjerenja, uz pomoć kompleksnih optimizacionih algoritama.

U ovom radu istraživanje je usmjereno ka testiranju mogućnosti primjene kompresivnog odabiranja u sistemu za snimanje 2D monohromatskih slika koje služi za identifikaciju i prebrojavanje štetnih insekata po jedinici površine. Primjena CS-a se razmatra zbog specifičnosti rada samog sistema koji ima *off line* mrežnu akviziciju medijskog zapisa slika sa kamere, mali prostor za lokalno skladištenje snimljenih podataka i GSM komunikacijske uređaje sa redukovanim propusnim opsegom. Cilj je sačuvati i slati što je moguće manje piksela snimljene slike, a na prijemnoj strani rekonstruisati sliku sa zadovoljavajućom tačnošću kako bi se uspješno primijenili algoritmi za prebrojavanje. Rekonstrukcija slike iz malog procenta poslatih piksela je vršena primjenom gradijentnog algoritma.

Poseban dio rada posvećen je istraživanju mogućnosti umetanja zaštitnog digitalnog watermark-a na slike insekata. Watermark je kreiran u vidu logo slike, korišćenjem serijskog broja digitalnog sertifikata kao jedinstvenog identifikatora izvora medijskog zapisa. Analizirana je robustnost watermark-a na CS atak, poređenjem originalnog logo-a i logo-a ekstrahovanog na prijemu nakon CS-a.

Ovaj rad ima za cilj provjeru praktičnosti upotrebe CS-a, pa su sistematski obrađene različite realne slike pribavljene iz TrapView sistema i prikazani su eksperimentalni rezultati pri korišćenju različitog procenta dostupnih uzoraka, počev od

3% pa do 40% dostupnih. Takođe, rad naglašava neke izazove do kojih smo došli prilikom analize rekonstruisanog materijala dobijenog od različitih izvora, gdje smo uključivanjem PKI tehnologije digitalnog sertifikata dobili jednozanačan i neporeciv način identifikacije izvora, samo na osnovu rekonstruisanog materijala.

**Ključne riječi:** digitalni vodeni žig (watermarking), digitalni potpis, javni ključ, kompresivno odabiranje, TrapView

## Abstract

The Compressive Sensing (CS) approach changes the way the signal is acquired, allowing it to be successfully reconstructed from significantly less acquired samples compared to the traditional way of acquisition. Namely, it can be said that the CS approach compresses the signal during the acquisition. The signal should have a sparse representation in the original or in a certain transformation domain. Also, the acquisition procedure should satisfy the incoherence condition in order to enable signal reconstruction from a relatively small number of measurements, using complex optimization algorithms.

In this work the possibility to apply the CS for a 2D monochrome image recording, that serves to identify and count harmful insects specimens per unit area. The application of CS is considered due to the specifics of the system itself, which has off-line network acquisition of media recording of images from the camera, a small space for local storage of recorded data, and GSM communication devices with reduced bandwidth.

The goal is to save and transfer as few pixels of the captured image as possible, and to reconstruct the image on the receiving side with satisfactory accuracy in order to successfully apply algorithms for specimen counting. Reconstruction of the image from a small percentage of transferred pixels is performed using a gradient algorithm.

A special part of the paper is dedicated to the investigating the possibility of inserting a protective digital watermark on insect images. Watermark was as a logo image, using the serial number of the digital certificate as a unique identifier of the source of the media record. The watermark robustness on the CS attack was analyzed, by comparing the original logo and the logo extracted on the receiving side after the CS application.

This paper aims to test the practicality of the use of CS, so various realistic images obtained from the TrapView System are systematically processed and

experimental results are presented using from 3% to 40% of the available samples in the reconstruction. This paper also highlights some of the challenges we encountered in analyzing reconstructed material obtained from different sources, where by incorporating PKI digital certificate technology we obtained an unambiguous and undeniable way of identifying the source, based solely on the reconstructed material.

**Keywords:** digital watermarking, digital signature, public key, compressive sensing, TrapView

# Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| Lista slika .....  | 7  |
| UVOD .....   | 8  |
| 1. Kompresivno odabiranje i primjena u rekonstrukciji dvodimenzionih signala .....       | 10 |
| 1.1 Osnovni koncepti kompresivnog odabiranja .....                                       | 10 |
| 1.2 Matematički aparat u kompresivnom odabiranju .....                                   | 11 |
| 2. Algoritmi za rekonstrukciju signala.....  | 15 |
| 2.1 Algoritmi za rekonstrukciju 2D signala.....  | 15 |
| 2.1.1 Basis Pursuit - Primal-dual interior point metod .....                             | 16 |
| 2.1.2. Gradijentni algoritam za rekonstrukciju 1D signala .....                          | 16 |
| 2.1.3 Iterative hard and soft thresholding .....   | 18 |
| 2.1.4 Automatizovani algoritam zasnovan na pragovanju.....                               | 19 |
| 2.2 Algoritmi za rekonstrukciju 2D signala.....  | 21 |
| 2.2.1 TV minimizacija .....  | 22 |
| 2.2.2 Adaptivni gradijentni algoritam za rekonstrukciju slike.....                       | 23 |
| 2.2.3 Automatizovani algoritam zasnovan na pragovanju za rekonstrukciju 2D signala ..... | 24 |
| 3. Digitalni watermarking i primjena u zaštiti slike.....                                | 27 |
| 3.1 Osobine koje watermark treba da zadovoljava .....                                    | 28 |
| 3.2 Zaštita digitalne slike – tehnike digitalnog watermarkinga .....                     | 30 |
| 3.3 Procedura umetanja watermarka u obliku logo slike .....                              | 33 |
| 4. TrapView sistem i CS optimizacija slika insekata.....                                 | 35 |
| 4.1 Primjena CS-a u optimizaciji TrapView slika .....                                    | 37 |
| 4.1.1 TV minimizacija u rekonstrukciji TrapView slika .....                              | 38 |
| 4.1.2. Primjena gradijentnog algoritma u rekonstrukciji TrapView slika.....              | 42 |
| 5. Digitalni watermarking i njegova primjena u sistemima za monitoring štetočina .....   | 45 |
| 5.1 Procedura zaštite digitalnih slika snimljenih TrapView kamerama.....                 | 46 |
| 5.2 TrapView image watermarking .....  | 49 |
| 5.3.1 Kompresivno odabiranje kao atak na watermarkiranu sliku.....                       | 53 |
| 5.3 Eksperimentalni rezultati .....  | 54 |
| 6. Zaključak.....  | 58 |
| Literatura.....  | 60 |



## Lista slika

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. 1: Primjer signala koji ima gustu predstavu u vremenskom domenu (a) i rijetku predstavu u Fourier-ovom domenu (b) .....                                      | 12 |
| Slika 3.1: Izbor koeficijenata za umetanje vodenog žiga .....   | 31 |
| Slika 3.2: Blok šema procedure za umetanje logo-a u bit ravni .....   | 34 |
| Slika 3.3: Matrica u binarnom obliku i njena izdvojena bit ravan.....   | 34 |
| Slika 4. 1: TrapView sistem.....  | 36 |
| Slika 4. 2: Šema CS watermarking procedure .....  | 38 |
| Slika 4. 3: Originalna slika iz rane faze monitoringa štetočina .....   | 38 |
| Slika 4. 4: Rekonstruisane slike iz rane faze monitoringa, korišćenjem različitog procenta koeficijenata slike: a) 2.7%, b) 10.68%, c) 15%, d) 21%, e) 30.14%,.....   | 39 |
| Slika 4. 5: Originalna slika koja pripada zreloj fazi monitoringa .....   | 40 |
| Slika 4. 6: Slike iz zrele faze monitoringa, rekonstruisane korišćenjem: a) 2.7%,.....  | 41 |
| Slika 4. 7: Slike iz početne faze monitoringa, rekonstruisane korišćenjem gradijentnog algoritma sa: a) 2.7%, b) 10.5%, c) 15%, d) 21%, e) 30%, f) 38% mjerenja ..... | 42 |
| Slika 4. 8: Slike iz zrele faze monitoringa, rekonstruisane korišćenjem gradijentnog algoritma sa: a) 2.7%, b) 10.5%, c) 15%, d) 21%, e) 30%, f) 38% mjerenja .....   | 44 |
| Slika 5. 1: TrapView sistem sa umetnutim watermarkom u vidu serijskog broja .....   | 47 |
| Slika 5. 2: a) Kreiranje logoa za kombinaciju “4CF9DFCA”; b) pojednostavljena ilustracija bit-matrične konverzije .....   | 50 |
| Slika 5. 3: Ilustracija podjele logoa u nekoliko bit ravni i umetanje u sliku.....  | 51 |
| Slika 5. 4: Izgled digitalnog sertifikata sa detaljima vezanim za serijski broj.....  | 54 |
| Slika 5. 5: Originalna i watermarkirana slika .....   | 55 |
| Slika 5. 6: a) Slika rekonstruisana korišćenjem 21% od ukupnog broja koeficijenata slike; b) logo ekstrahovan iz slike prikazane na slici 5.6 a) .....                | 56 |

## UVOD

Zaštita digitalnih podataka je jedna od intenzivno istraživanih i razvijanih oblasti obrade signala. Zaštita digitalnih podataka može da se vrši umetanjem digitalnog vodenog žiga (watermark-a) u multimedijalni sadržaj. Vodeni žig može biti vidljiv korisniku, ali i ne mora, a to zavisi od toga koja se procedura umetanja koristi – vidljiva ili nevidljiva. Međutim, bilo da se koristi vidljiva ili nevidljiva procedura, vlasnik digitalnog sadržaja bi trebalo da može da dokaže vlasništvo nad sadržajem, tj. trebalo bi da posjeduje odgovarajući ključ i da zna proceduru detekcije vodenog žiga.

Postoje različite vrste vodenog žiga koje mogu biti umetnute u digitalni signal, kao i različiti načini umetanja. Među njima se izdvajaju tzv. lomljivi vodeni žig i vodeni žig koji je robustan na različite vrste ataka. Kod procedure umetanja vodenog žiga važno je odabrati i domen u koji se umeće digitalni watermark. Domen može biti npr. vremenski, frekvencijski, vremensko-frekvencijski. Koji će se domen koristiti zavisi od zahtjeva sistema i konkretne aplikacije, tj. signala u koji se umeće vodeni žig.

Pod atacima na digitalni sadržaj se podrazumijeva svaki pokušaj promjene sadržaja ili njegovo neovlašćeno umnožavanje i dijeljenje. Ataci mogu biti različite vrste kompresije kao i umetanje šuma ili pokušaji različitih geometrijskih djelovanja na digitalni sadržaj.

U ovom radu ćemo napraviti poseban osvrt na kompresivno odabiranje (Compressive Sensing – CS) kao jedan vid ataka na digitalnu sliku. Kompresivno odabiranje je poslednju deceniju veoma aktuelan pristup među istraživačima a koji se koristi za brže i efikasnije odabiranje signala, i prevazilazi nedostatke klasičnog načina odabiranja pogotovu ako se radi sa visoko frekventnim signalima. Pod određenim uslovima, kompresivno odabiranje omogućava rekonstrukciju signala iz sasvim malog broja dostupnih odbiraka (mjerjenja) za razliku od odabiranja u skladu sa Teoremom o odabiranju. Teorema o odabiranju zahtijeva da je frekvencija odabiranja minimum dva puta veća od maksimalne frekvencije u signalu. Ovakav način odabiranja može, u slučajevima signala visokih frekvencija, rezultirati velikim brojem odbiraka. Kompresivno odabiranje zaobilazi ovu prepreku, i omogućava uspješnu analizu signala sa

malim brojem odbiraka. Međutim, da bi rekonstrukcija i analiza bili uspješni, treba uključiti složene matematičke algoritme kako bi se uspješno rekonstruisao signal iz malog broja odbiraka.

U našem radu smo testirali način na koji se može iskoristiti kompresivno odabiranje i osobina da se iz malog broja odbiraka rekonstruiše digitalna slika. Posmatrali smo slike iz realne aplikacije. Riječ je o TrapView aplikaciji, tj. aparaturi koja prikuplja slike insekata (štetočina) u zamkama koje se instalirane u poljima. Takozvana zamka je pametna zamka koja u sebi sadrži kameru koja snima i šalje snimke na cloud aplikaciju. Snimci se povremeno pregledavaju kako bi se utvrdilo kojoj zamki treba promjena ljepljive trake. Ljepljive trake koje se nalaze unutar zamke služe da skupljaju insekte. Slike ljepljivih traka se analiziraju iz cloud-a, kako bi se izbjeglo da se fizički provjerava svaka zamka pojedinačno. Promjena ljepljive trake se vrši ukoliko je broj insekata koji su uhvaćeni veći od predviđenog. Brojanje insekata sa ljepljive trake se ne vrši ručno, već je procedura automatizovana i u tu svrhu se koriste posebni algoritmi za prepoznavanje i brojanje.

Rad je organizovan na sljedeći način. U prvom poglavlju je opisano kompresivno očitavanje i algoritmi koji su korišćeni za rekonstrukciju signala iz malog broja dostupnih odbiraka (piksela). Drugi dio rada se odnosi na procedure zaštite digitalnih podataka. Naime, analizirana je mogućnost zaštite slika snimljenih TrapView sistemom. Zaštita je umetnuta u frekvencijski domen slike a cilj je bio sačuvati digitalni žig ako se slika podvrgne nekoj vrsti ataka. Kako je taj atak kompresivno očitavanje, tj. smanjenje broja piksela potrebnih za uspješnu rekonstrukciju slike, to je procedura umetanja dizajnirana na način da bude robustna prvenstveno na ovu vrstu ataka. Kompresivno odabiranje je ovdje posmatrano više kao pomoćni metod koji bi smanjio potrebnu memoriju za čuvanje slika na cloud-u i koji bi omogućio bržu i efikasniju provjeru tzv. TrapView zamki.

TrapView sistem je opisan u trećem poglavlju, dok je procedura umetanja watermark-a i ataka na watermarkiranu sliku opisana u četvrtom poglavlju. Zaključak je dat u petom dijelu.

# 1. Kompresivno odabiranje i primjena u rekonstrukciji dvodimenzionalnih signala

## 1.1 Osnovni koncepti kompresivnog odabiranja

Prema Teoremi o odabiranju, akvizicija signala se vrši tako što se odbirci uzimaju u ekvidistantnim vremenskim intervalima. Frekvencija signala uslovljava minimalnu frekvenciju odabiranja koja bi omogućila vjerno predstavljanje i rekonstrukciju signala. Naime, odabiranje signala treba da se vrši frekvencijom koja je minimalno dva puta veća od maksimalne frekvencije signala. Odabiranje signala u skladu sa Teoremom o odabiranju je zahtjevno kako u pogledu broja odbiraka koji treba da se čuvaju i dalje obrađuju tako i u pogledu vremena koje je potrebno za procesiranje ove količine podataka. Ovo može biti limitirajući faktor prilikom obrade visoko-frekvencijskih signala i slika velike rezolucije. Stoga se u posljednje vrijeme sve više koristi alternativni način odabiranja, u skladu sa pristupom kompresivnog odabiranja – compressive sensing (CS) [1]-[26]. Ukoliko signali zadovoljavaju neke unaprijed definisane uslove, primjena CS-a može osigurati uspješnu rekonstrukciju signala ako je veoma mali broj koeficijenata signala dostupan, i to mnogo manji u poređenju sa brojem koeficijenata kod tradicionalnog načina odabiranja. Naime, signal treba da ima konciznu (eng. *spars*) predstavu u nekom domenu, a procedura akvizicije odbiraka treba da obezbijedi linearno nezavisna mjerenja. Koncizni, *spars* signali imaju, u originalnom ili u transformacionom domenu, mali broj nenultih koeficijenata. To znači da je energija signala koncentrisana u malom broju odbiraka u tzv. *spars* domenu [1]-[3], [6].

Kompresivno odabiranje koristi moćan matematički aparat kako bi obezbijedio rekonstrukciju signala iz malog broja dostupnih mjerenja. Postoji veliki broj optimizacionih tehnika [1], [3], [4], [27]-[73]. Većina tehnika je zasnovana na optimizaciji različitih normi. Najčešće je korišćena  $\ell_1$ -optimizacija za rekonstrukciju jednodimenzionalnih signala [3], [18], [22], [34], dok se za rekonstrukciju dovodimenzionalnih signala često koristi minimizacija totalne varijacije – TV minimizacija [3], [55]-[59]. U

ovom radu kompresivno odabiranje primjenjeno u aplikaciji monitoringa štetočina u poljima. Naime, analizirana je mogućnost optimizacije fotografija korišćenih u ovim aplikacijama, pa su korišćeni algoritmi za 2D CS rekonstrukciju.

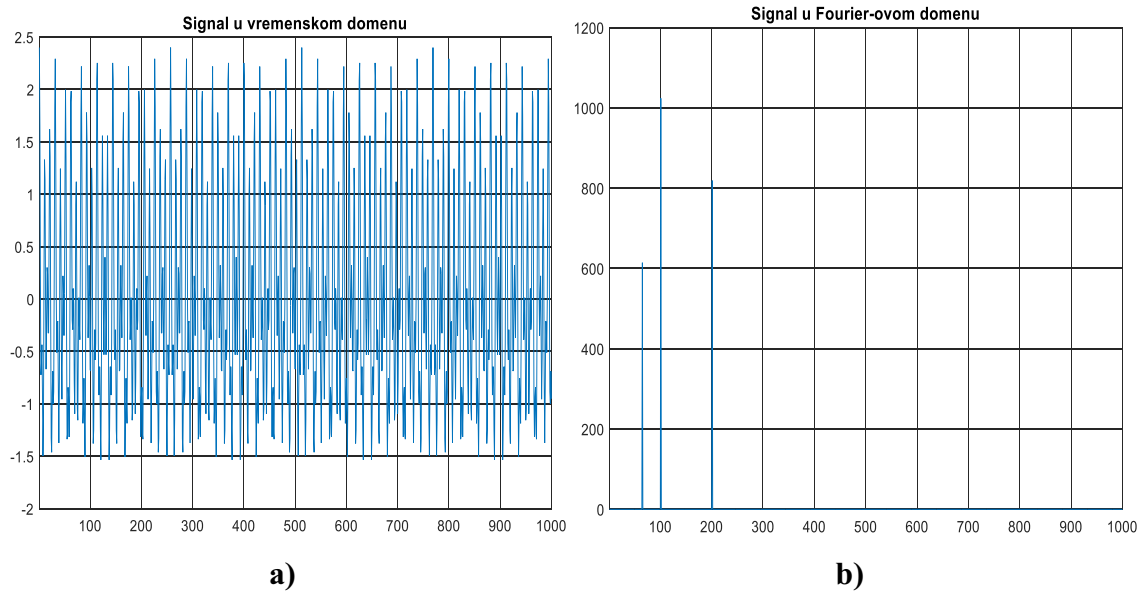
## ***1.2 Matematički aparat u kompresivnom odabiranju***

Mogućnost primjene kompresivnog odabiranja zavisi od nekoliko uslova, a na prvom mjestu od prirode signala. Naime, potrebno je da signal u originalnom ili nekom transformacionom domenu ima konciznu (razrijeđenu, *spars*) predstavu [1]-[4], [47]. Kažemo da signal ima razrijeđenu predstavu ukoliko je većina komponenti signala u tom domenu jednaka nuli. Za većinu realnih signala se može naći domen takav da signal u tom domenu zadovoljava uslov razrijeđenosti. Upravo na ovoj osobini realnih signala se zasnivaju tehnike kompresije. Npr. JPEG kompresija koristi rijetkost signala u domenu diskretne kosinusne transformacije. Međutim, slike ne zadovoljavaju osobinu striktno rijetkosti u nekom domenu, pa se koriste algoritmi za optimizaciju prilagođeni radu sa takvim signalima. Kod JPEG algoritma se, u zavisnosti od stepena kompresije koji želimo da postignemo, uzima određeni procenat najvećih koeficijenata iz domena diskretne kosinusne transformacije ili wavelet domena a vrijednosti preostalih koeficijenata se jednostavno postavljaju na nulu [3].

Matematički se to može opisati na sljedeći način: za signal dužine  $N$  odbiraka,  $K$  koeficijenata ( $K < N$ ) u transformacionom domenu je nenulto. Za većinu signala koji se javljaju u realnim aplikacijama moguće je naći domen u kom imaju *spars* predstavu. Na slici 1.1 je prikazan primjer signala u vremenskom i u frekvencijskom domenu. Sa slike 1.1a) se može vidjeti da signal u vremenskom domenu ima skoro sve nenulte koeficijente, pa kažemo da signal u vremenskom domenu ima gustu predstavu. Na slici 1.1b) prikazana je Fourier-ova transformacija. U ovom domenu signal ima samo tri nenulte komponente (od ukupno 1000, kolika je dužina signala), dok su preostali koeficijenti jednaki nuli. Kako je broj nenultih koeficijenata signala u transformacionom domenu

mnogo manji u poređenju sa dužinom signala, smatramo da signal ima rijetku (*spars*) predstavu u ovom domenu.

Drugi uslov primjene pristupa kompresivnog odabiranja je nekoherentnost i odnosi se na proceduru akvizicije odbiraka signala [1]-[4]. Naime, uslov je nekoherentnost između matrice mjerenja  $\Phi$  i transformacione matrice  $\Psi$ . Koherencija matrica se definiše kao najveća korelacija između bilo koja dva elementa ovih matrica.



**Slika 1. 1: Primjer signala koji ima gustu predstavu u vremenskom domenu (a) i rijetku predstavu u Fourier-ovom domenu (b)**

Mjera korelacije definiše se na sljedeći način [1]-[4]:

$$\mu(\phi, \psi) = \sqrt{N} \max_{k \geq 1, j \leq N} |\langle \phi_k, \psi_j \rangle|, \quad (1.1)$$

$$1 \leq \mu(\phi, \psi) \leq \sqrt{N},$$

gdje je  $N$  dužina signala, a  $\phi_k$  i  $\psi_j$  su vektor vrsta i vektor kolona matrica  $\Phi$  i  $\Psi$ , respektivno. Mjera koherencije treba da je što je moguće manja, kako bi se signal uspješno rekonstruisao iz malog broja dostupnih mjerenja.

Diskretni signal  $\mathbf{x}_{N \times 1}$  se može predstaviti na sljedeći način [1]-[4]:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N X_i \Psi_i = \Psi \mathbf{X}, \quad (1.2)$$

gdje je  $X_i$  težinski koeficijent,  $\Psi_i$  predstavlja bazni vektor, a  $\Psi$  je  $N \times N$  transformaciona matrica. Signal se odabira iz domena u kom ima gušću predstavu. Odbirke signala nazivamo mjerenjima. Ako se sa  $\mathbf{y}$  označi vektor mjerenja dužine  $M$ , pri čemu je  $M < N$ , onda važi sljedeća relacija [1]-[4], [19], [34]:

$$\mathbf{y}_{M \times 1} = \Phi_{M \times N} \mathbf{x}_{N \times 1} = \Phi_{M \times N} \Psi_{N \times N} \mathbf{X}_{N \times 1}, \quad (1.3)$$

Sistem jednačina definisan relacijom (1.3) je neodređen. Naime, ovaj sistem ima  $M$  jednačina sa  $N$  nepoznatih, pa se za njegovo rješavanje koriste optimizacioni algoritmi. U literaturi postoji veoma veliki broj optimizacionih pristupa, prilagođenih različitim tipovima signala. Cilj je pronaći ono rješenje koje je najviše *spars*, tj. rješenje koje ima najmanje koeficijenata velikih vrijednosti amplitude. Broj nenultih koeficijenata u nekom vektoru  $\mathbf{x}$  se može opisati se  $\ell_0$ -normom, koja je definisana sljedećom relacijom [3]:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}\|_{\ell_0} &= \lim_{p \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N |x_i|^p, \\ \|\mathbf{x}\|_{\ell_0} &= \text{card}\{\text{supp}(\mathbf{x})\} \leq K. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Stoga se rješenje sistema jednačina (1.3) može svesti na minimizaciju minimizaciju  $\ell_0$ -norme [3]:

$$\min \|\mathbf{X}\|_{\ell_0} \quad \text{uz uslov } \mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{X}. \quad (1.5)$$

Međutim, ovakav način traženja rješenja sistema jednačina (1.3) nije efikasan zbog računске kompleksnosti računanja  $\ell_0$ -norme. Optimalni rezultati u praksi se dobijaju primjenom  $\ell_1$ -norme. Problem minimizacije  $\ell_1$ -norme se može opisati kao [1]-[3], [4], [22]:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \min \|\mathbf{X}\|_{\ell_1} \quad \text{uz uslov } \mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (1.6)$$

gdje je  $\tilde{\mathbf{X}}$  rješenje minimizacionog problema  $\|\mathbf{X}\|_{\ell_1} = \sum_{i=1}^N |X_i|$ . Ukoliko je u signalu prisutan šum, relacija (1.6) postaje [1]:

$$\min \|\mathbf{X}\|_{\ell_1} \text{ uz uslov } \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{X}\|_{\ell_2} \leq \varepsilon, \quad (1.7)$$

gdje je  $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{e}$ , parametar  $\mathbf{e}$  predstavlja grešku i važi da je  $\|\mathbf{e}\|_{\ell_2} = \varepsilon$ .



## 2. Algoritmi za rekonstrukciju signala

### 2.1 Algoritmi za rekonstrukciju 2D signala

U literaturi postoji veliki broj algoritama za rekonstrukciju signala koji imaju konciznu predstavu u nekom domenu. Cilj svih algoritama je pronalaženje rješenja sistema jednačina sa najmanjim brojem nenultih koeficijenata. Drugim riječima, teži se traženju signala koji ima najkoncizniju predstavu u domenu rijetkosti.

U praksi se koriste različiti tipovi algoritama, u zavisnosti od prirode signala i aplikacije u kojoj se primjenjuje. Neki od često korišćenih algoritama su opisani u nastavku teksta.

U prethodnom poglavlju uvedeni su pojmovi  $\ell_0$  i  $\ell_1$  norme, pri čemu  $\ell_0$  norma daje broj nenultih koeficijenata vektora  $\mathbf{x}$  u nekom domenu. Teorijski, minimizacija ove norme bi dala rješenje neodređenog sistema jednačina (1.3) ali se u praksi ova metoda pokazala računski zahtjevnom. Stoga se pribjegava minimizaciji  $\ell_1$  norme.

Postoje različiti pristupi za rješavanje problema minimizacije  $\ell_1$  norme, definisanog relacijom (1.6). Jedan od načina je primjena konveksnih optimizacija, a u grupu ovih algoritama spadaju npr: Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), gradijentni algoritam, Basis Pursuit (BP), Basis Pursuit De-Noising (BPDN), i mnogi drugi. Neki od algoritama opisani su u [1]-[3], [4], [29], [30], [34]. Algoritmi zasnovani na konveksnim optimizacijama omogućavaju uspješnu rekonstrukciju signala čak i u slučajevima signala koji nijesu striktno koncizni u izvornom ili određenom transformacionom domenu.

### 2.1.1 Basis Pursuit - Primal-dual interior point metod

U nastavku je opisan BP pristup, koji se koristi za rješavanje problema opisanog relacijom (1.6). Pristup koristi *primal-dual interior point* metod. U slučaju realnih parametara  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{X}$ , problem (1.6) se svodi na:

$$\min_t \sum t, \text{ uz uslov } -t \leq \mathbf{X} \leq t, \mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (2.1)$$

a koraci *primal-dual interior point* su opisani u Algoritmu 1.

---

#### Algoritam 1: Primal-dual interior point metod

---

- Za poznati vektor mjerenja  $\mathbf{y}$ , postaviti system:  $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 = \mathbf{A}^T \mathbf{y}$
- Postaviti  $t_0 = \gamma |\mathbf{X}_0| + \lambda \max \{|\mathbf{X}_0|\}$ , parametri  $\gamma$  i  $\lambda$  su korisnički definisani.
- Formiranje Lagrangian funkcije:

$$\Lambda \left( \mathbf{X}, t, g, -\frac{1}{\mathbf{X}_0 - t_0}, \frac{1}{\mathbf{X}_0 + t_0} \right) = f(t) + g(\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{y}) - \frac{\mathbf{X} - t}{\mathbf{X}_0 - t_0} - \frac{\mathbf{X} + t}{\mathbf{X}_0 + t_0},$$

$$\text{gdje je } g = -\mathbf{A} \left( \frac{-1}{\mathbf{X}_0 - t_0} + \frac{1}{-\mathbf{X}_0 - t_0} \right)$$

- Ažuriranje svakog argumenta Lagrangian funkcije korakom  $\Delta$  i parametrom  $u$ .
- 

Korak  $\Delta$  se dobija traženjem prvog izvoda funkcije  $\Lambda$  po njenim argumentima, a parameter  $u$  se računa korišćenjem posebnog metoda *backtracking line search* pa se ažurirane vrijednosti za  $\mathbf{X}$  dobijaju kao  $\mathbf{X} = \mathbf{X} + u(\Delta \mathbf{X})$ .

Basis Pursuit De-Noising (BPDN) pristup se koristi u slučaju kada je u signalu prisutan šum.

### 2.1.2. Gradijentni algoritam za rekonstrukciju 1D signala

Gradijentni algoritam, predložen u [37], spada u grupu konveksnih optimizacija. Algoritam iterativno mijenja vrijednosti nedostajućih odbiraka u domenu u kom signal

ima gustu predstavu. Vrijednosti dostupnih odbiraka signala se mijenjaju za vrijednosti  $+\Delta$  i  $-\Delta$ , iterativnim putem. Variranjem vrijednosti nedostajućih odbiraka i mjerenjem koncentracije signala u svakoj iteraciji, algoritam nalazi rješenje koje daje minimalnu koncentraciju u transformacionom, spars domenu.

Vrijednosti nedostajućih odbiraka se ažuriraju vrijednostima gradijentnog vektora. Te vrijednosti se dobijaju kao razlika između  $\ell_1$ -normi vektora koji su promijenjeni za  $+\Delta$  i  $-\Delta$ . Koraci algoritma opisani su tabelom u okviru Algoritma 2.

---

**Algoritam 2:** Gradijentni algoritam
 

---

**Ulazi:** Skup pozicija nedostajućih odbiraka  $\mathbb{N}_x$ ;

Vektor mjerenja  $\mathbf{y}$ ;

$$x^{(0)}(n) \leftarrow \begin{cases} y(n), & n \notin \mathbb{N}_x \\ 0, & n \in \mathbb{N}_x \end{cases}$$

$$\Delta \leftarrow \max |x^{(0)}(n)|$$

$iter \leftarrow 0$

**repeat**

$$x^{(iter+1)}(n) \leftarrow x^{(iter)}(n), \text{ za svako } n$$

**for**  $n_i \in \mathbb{N}_x$  **do**

$$X^+(k) \leftarrow \mathfrak{F}\{x^{(iter)}(n) + \Delta\delta(n - n_i)\},$$

$$X^-(k) \leftarrow \mathfrak{F}\{x^{(iter)}(n) - \Delta\delta(n - n_i)\}, \quad (\mathfrak{F} - \text{transformacija})$$

$$\text{Računanje vektora gradijenta: } g(n_i) \leftarrow \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left( \|X^+(k)\|_{\ell_1} - \|X^-(k)\|_{\ell_1} \right),$$

$$x^{(iter+1)}(n_i) \leftarrow x^{(iter)}(n_i) - g(n_i)$$

**end for**

$iter \leftarrow iter + 1$

**Dok ne bude zadovoljen kriterijum zaustavljanja**  $\Delta \leftarrow \Delta / 3$  ili

**Dok se ne postigne zadovoljavajuća tačnost**

**Izlaz:** rekonstruisani signal  $x^{(iter)}(n)$

---

### 2.1.3 Iterative hard and soft thresholding

Posebna grupa algoritama je zasnovana na tzv. *greedy* metodama [27]-[36]. Ove metode zasnovane su na iterativnom traženju optimalnog rješenja, težeći ka globalnom optimumu problema koji se posmatra. U ovu grupu spadaju Orthogonal Matching Pursuit - OMP, Stagewise OMP, CoSaMP, algoritmi zasnovani na pragovanju, itd [27]-[36]. U poređenju sa algoritmima zasnovanim na minimizaciji  $\ell_1$ -norme, *greedy* algoritmi su računski manje zahtjevni zbog čega su i brži, ali ujedno i manje precizni.

Algoritmi zasnovani na pragovanju su iterativni algoritmi koji koriste adaptivni prag i mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$x_i = T_{\varepsilon}(f(X_{i-1})) \quad (2.2)$$

Funkcija pragovanja je označena sa  $T_{\varepsilon}$ , dok  $f$  označava funkciju koja modifikuje izlaz prethodne iteracije. Vektor  $\mathbf{X}$  označava signal u transformacionom domenu koji ima osobinu rijetkosti.

Postoje dvije verzije algoritama pragovanja – tzv. meko i tvrdo pragovanje (eng. *soft thresholding* i *hard thresholding*), pa su i dvije verzije algoritama: *iterative hard thresholding* (IHT) i *iterative soft thresholding* (IST), opisani u nastavku.

IHT algoritam postavlja sve osim  $K$  najvećih komponenti signala  $\mathbf{X}$  na nulu. Funkcija tvrdog pragovanja function  $H_K$  se definiše na sljedeći način:

$$H_K(\mathbf{X}) = \begin{cases} X_i, & |X_i| > \varepsilon \\ 0, & \text{drugdje} \end{cases} \quad (2.3)$$

Algoritam 3 sumira korake IHT-a.

Funkcija mekog pragovanja je definisana relacijom (2.4). Relacija se primjenjuje na svaki element vektora  $\mathbf{X}$ :

$$S_{\lambda}(X_i) = \begin{cases} X_i - \lambda, & \mathbf{X} > \lambda \\ 0, & |X_i| < \lambda \\ X_i + \lambda, & \mathbf{X} < -\lambda \end{cases} \quad (2.4)$$

**Algoritam 3: Iterative hard thresholding**


---

**Ulazi:** broj komponenti signala  $K$ , transformaciona matrica  $\Psi$ , vektor mjerenja  $y$ , matrica mjerenja  $\Phi$ , CS matrica  $A = \Psi\Phi$

**Izlaz:** aproksimacija signala  $X$

$X_0 \leftarrow 0$

**for**  $i=1, \dots$ , dok se zadovolji stop kriterijum **do**

$$X_i \leftarrow H_K \left( X_{i-1} + A^T (y - AX_{i-1}) \right)$$

**end for**

**return**  $X \leftarrow X_i$

---

**2.1.4 Automatizovani algoritam zasnovan na pragovanju**

Dalje, metoda najmanjih kvadrata upotrijebljena je u algoritmima zasnovanim na računanju praga, koji se koristi za detekciju komponenti signala. Naime, upotrebom praga moguće je detektovati pozicije komponenti signala a metoda najmanjih kvadrata se zatim koristi za računanje amplituda tih komponenti. Vrijednosti pragova se određuju posmatranjem koeficijenata u transformacionom domenu. Naime, ukoliko je nedovoljan broj odbiraka (mjerenja) signala  $M$  na raspolaganju, to će šum u transformacionim domenu biti veći. Šum je posljedica nedovoljnog broja odbiraka, a njegovom karakterizacijom je moguće odrediti vrijednost praga koji će biti iznad šuma. Komponente koje preostanu iznad praga predstavljaju korisne komponente signala.

Kao posljedica nedostajućih odbiraka, u signalu se javlja šum. Ovaj šum se može modelovati i na osnovu njega računati prag koji razdvaja komponente signala od šuma. Detekcija komponenti čije su vrijednosti iznad vrijednosti šuma se vrši u transformacionom domenu. Algoritam je definisan za domen diskretne Fourier-ove transformacije (DFT domen) kao domen u kom signal ima konciznu predstavu i ima iterativnu i neiterativnu verziju. Iterativna verzija algoritma se koristi u slučajevima kada je broj dostupnih odbiraka signala  $M$  veoma mali. Neiterativna i iterativna verzija

algoritma za rekonstrukciju jednodimenzionih signala predložene su u [48]. U nastavku su opisane obje verzije algoritma, za rekonstrukciju jednodimenzionih i dvodimenzionih signala.

Ako se broj dostupnih mjerenja signala označi sa  $M$ , vektor mjerenja sa  $\mathbf{y}$ , prag sa  $T$ , dužina signala sa  $N$ , sa  $P$  vjerovatnoća da su sve komponente diskretne Fourier-ove transformacije, koje se nalaze na pozicijama zahvaćenim šumom, ispod nivoa komponenti signala, dalje, vektor pozicija dostupnih odbiraka signala označi sa  $\mathbf{V}_a = \{n_1, \dots, n_M\}$ , varijansa Gausovog šuma  $\sigma_N$  a matrice transformacije, mjerenja i CS matrica sa  $\mathbf{\Psi}$ ,  $\mathbf{\Phi}$  i  $\mathbf{A} = \mathbf{\Phi}\mathbf{\Psi}$ , respektivno, onda se iterativna verzija algoritma može opisati koracima Algoritma 4 [3], [48].

#### Algoritam 4: Automatizovani iterativni algoritam zasnovan na pragovanju

**Ulaz algoritma:**  $M, N, \mathbf{y}, \mathbf{V}_a = \{n_1, \dots, n_M\}, \mathbf{\Psi}, \mathbf{\Phi}, \mathbf{A} = \mathbf{\Phi}\mathbf{\Psi}, \sigma_N$ .

○ Definiše se skup  $\mathbf{p} = \emptyset$ ;

**Naredni koraci algoritma se ponavljaju dok se ne detektuju sve komponente signala ( $i = 1 : i = i + 1$ ):**

○ Računanje varijanse:

$$\sigma^2 = M \frac{N - M}{N - 1} \sum_{i=1}^M \frac{y(i)^2}{M};$$

○ Računanje praga  $T$ , za datu vrijednost vjerovatnoće  $P$ :

$$T = \sqrt{-\sigma^2 \log(1 - P(T)^{1/N})};$$

○ Računanje vektora početne Fourier-ove transformacije,  $\mathbf{X}_i$ :

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{y}(\mathbf{\Phi}\mathbf{\Psi}^{-1});$$

○ Ažuriranje skupa  $\mathbf{p}$ :

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} \cup \arg \left\{ |\mathbf{X}_i| > \frac{T}{N} \right\};$$

○ Računanje:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{y};$$

○ Ažuriranje vektora  $\mathbf{y}$ :

$$\forall p \in \mathbf{p}: \mathbf{y} = \mathbf{x}(\Omega_a) - X(p) e^{j \frac{2\pi p V_a}{N}};$$

- 
- Ažuriranje vektora Fourier-ove transformacije  $\mathbf{X}$ ;
  - Ažuriranje  $A^2 = \sum \frac{|y|^2}{M}$  i  $\sigma^2 = A^2 M \frac{N-M}{N-1}$  ;
  - **Algoritam zaustaviti kad se ispuni uslov  $A^2 < \sigma_N^2$ .**
- 

Kada govorimo o dvodimenzionim signalima, kad njih je teško naći domen u kojima imaju konciznu predstavu. Stoga algoritmi za rekonstrukciju dvodimenzionih signala koriste  $\ell_1$  minimizaciju gradijenta, odnosno razlike među koeficijentima [55]-[73]. Imajući u vidu da digitalna slika često ne zadovoljava uslov rijetkosti, a da njen gradijent zadovoljava ovaj uslov, to je minimizacija gradijenta veoma često korišćen pristup u rekonstrukciji slike. Kako su u radu posmatrani dvodimenzioni signali, u sljedećem poglavlju je posebna pažnja posvećena upravo algoritmima za rekonstrukciju slike.

## ***2.2 Algoritmi za rekonstrukciju 2D signala***

Za rekonstrukciju slike korišćenjem malog broja dostupnih koeficijenata koristi se minimizacija norme gradijenta, a najčešće korišćena norma je minimizacija totalne varijacije (*total-variation minimization* - TV) [57]-[61]. TV norma predstavlja  $\ell_1$  normu gradijenta a uvedena je od strane Rudin, Osher i Fatemi-ja [56]. TV minimizacija pokazala je uspješne rezultate u regularizaciji slike. Osim TV minimizacije, postoje i druge metode prilagođene radu sa 2D signalima, zasnovane na gradijentu, wavelet transformaciji, kao i iterativnim metodama pragovanja [63]-[73].

### 2.2.1 TV minimizacija

U tzv. inverznim problemima, kakav je estimacija slike  $\mathbf{X}$  iz mjerenja  $\mathbf{y}$ , pristup za rješavanje problema se zasniva na definisanju objektivne funkcije  $O$  i na njenoj minimizaciji. Objektivna funkcija se može definisati na sljedeći način:

$$O(\mathbf{X}) = \frac{\eta}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{X}\|^2 + \varepsilon R(\mathbf{X}), \quad (2.5)$$

gdje  $\mathbf{y}$  predstavlja mjerenja signala,  $\mathbf{A}$  je matrica mjerenja, dok parametar  $\varepsilon \in (0, \infty)$  predstavlja težinski parametar. Regularizaciona funkcija  $R(\mathbf{X})$  može biti  $\ell_1$  norma, TV norma, i slično. U slučaju da je  $R(\mathbf{X})$  TV norma, važe sljedeće relacije:

$$R(\mathbf{X}) = \|d\mathbf{X}\|_{\ell_1},$$

$$d_{i,j}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(i+1, j) - \mathbf{X}(i, j) \\ \mathbf{X}(i, j+1) - \mathbf{X}(i, j) \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

gdje  $d$  predstavlja gradijentni operator, a  $(i, j)$  označava poziciju piksela. Diskretni oblik TV norme se može zapisati na sljedeći način:

$$\text{TV}(\mathbf{X}) = \sum_{i,j} \sqrt{(\mathbf{X}_{i+1,j} - \mathbf{X}_{i,j})^2 + (\mathbf{X}_{i,j+1} - \mathbf{X}_{i,j})^2}. \quad (2.7)$$

Funkcija  $R(\mathbf{X})$  može se zapisati u integralnom obliku na sljedeći način:

$$R(\mathbf{X}) = \int_{\Omega} |d\mathbf{X}| dx dy = \int_{\Omega} \sqrt{\mathbf{X}_x^2 + \mathbf{X}_y^2} dx dy. \quad (2.8)$$

Nedostatak IST algoritma je u sporij konvergenciji kada je matrica  $\mathbf{A}$  pogrešno postavljena (“*ill-posed*” ili “*ill-conditioned*”), pa se za poboljšanje konvergencije koristi modifikovani algoritam - TwIST algoritam (Two-step Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm).



### 2.2.2 Adaptivni gradijentni algoritam za rekonstrukciju slike

U nastavku je opisan još jedan često korišćeni algoritam za rekonstrukciju dvodimenzionih signala – adaptivni gradijentni algoritam. Ovaj algoritam za rekonstrukciju konciznih signala pripada grupi konveksnih optimizacija. Algoritam je predložen u radu [61]. Zasnovan je na promjeni početnih vrijednosti dostupnih odbiraka signala (promjeni za vrijednosti parametra  $+\Delta$  i  $-\Delta$ ), i na mjerenju koncentracije u onom domenu u kom signal ima konciznu predstavu. Naime, vrijednosti nedostajućih odbiraka signala se ažuriraju vrijednostima gradijentnog vektora. Gradijentni vektor je razlika  $\ell_1$ -normi vektora koji su promijenjeni za  $+\Delta$  i  $-\Delta$ . Drugim riječima, vrijednosti nedostajućih odbiraka signala se postepeno mijenjaju dok ne dosegnu tačnu vrijednost, tj. minimum koncentracije u transformacionom domenu. Važno je napomenuti da algoritam osim računanja  $\ell_1$  norme, kao mjeru koncentracije dozvoljava bilo koju normu.

Dostupni pikseli ostaju nepromijenjeni tokom izvršavanja algoritma. Optimalno rješenje se dobija kada promjene vrijednosti nedostajućih odbiraka ne prestanu da utiču na koncentraciju signala ili dok se ne dostigne unaprijed definisani broj iteracija [3], [61]. U nastavku su detaljno opisani koraci algoritma.

---

#### Algoritam 5: Gradijenti algoritam za rekonstrukciju slike

---

##### Ulazi:

- Pozicije mjerenja  $\mathbf{N}_M$ , tj. dostupnih piksela  $(n, m) \in \{(n_1, m_1), \dots, (n_M, m_M)\}$
- Dostupni odbirci  $x(n, m)$ ,  $(n, m) \in \mathbf{N}_M$
- Broj iteracija:  $B$
- Mjerenja:  $y^{(0)}(n, m) = \begin{cases} x(n, m), & \text{za } (n, m) \in \mathbf{N}_M \\ 0, & \text{za } (n, m) \notin \mathbf{N}_M \end{cases}$
- Za prvu iteraciju:  $y_1(n, m) = y(n, m)$

##### Izlazi:

10: **Ponavljati**  $q=1:B$

11: **Postaviti**  $i \in \{n_1, n_2, \dots, n_M\}$  i  $j \in \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$

12: 
$$y^+(n, m) = y^{(q)}(n, m) + \Delta \delta(n - i, m - j)$$

$$y^-(n, m) = y^{(q)}(n, m) - \Delta \delta(n - i, m - j)$$

- 
- 13:  $Y(n, m)^+ \leftarrow \text{DCT} \{y^+(n, m)\}$   
 $Y(n, m)^- \leftarrow \text{DCT2} \{y^-(n, m)\}$
- 14: Računanje gradijenta:  $G^{(q)}(n, m) \leftarrow \frac{1}{NM} (\|Y^+\|_{\ell_1} - \|Y^-\|_{\ell_1})$
- 15:  $y_{q+1}(n, m) = y_q(n, m) - G_q(n, m)$
- 16:  $\beta_q = \arccos \frac{\langle \mathbf{G}^{(q-1)} \mathbf{G}^{(q)} \rangle}{\|\mathbf{G}^{(q-1)}\|_{\ell_2} \|\mathbf{G}^{(q)}\|_{\ell_2}}$
- 17: **ako je**  $\beta_q > 170^\circ$
- 18:  $\Delta \leftarrow \Delta / \sqrt{10}$
- 19: **kraj**
- 20: **kraj**
- 

### 2.2.3 Automatizovani algoritam zasnovan na pragovanju za rekonstrukciju 2D signala

Iterativna verzija algoritma zasnovanog na pragovanju i adaptiranog za rekonstrukciju dvodimenzionih signala sumirana je kroz Algoritam 6. Ovaj algoritam predložen je u [60] pod nazivom Simple and Fast Algorithm for Reconstruction of 2D signals - SFAR 2D.

Prije nego bude opisan pseudokod algoritma, biće uvedeni parametri korišćeni u 2D verziji algoritma zasnovanog na pragovanju. Neka su  $\mathbf{U}$  i  $\mathbf{P}$  ukupni i parcijalni skup odbiraka signala, za koje važe sljedeće relacije:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U} &= \{U(x, y) : x \in \{1, \dots, I\}, y \in \{1, \dots, J\}\}, \\
 \mathbf{P} &= \{P(x, y) : x \in \{1, \dots, M_x\}, y \in \{1, \dots, M_y\}\}, \\
 \mathbf{P} &\subset \mathbf{U},
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

gdje je  $I \times J$  ukupan broj odbiraka signala,  $M_x$  i  $M_y$  predstavljaju broj odbiraka duž  $x$  i  $y$  pravaca respektivno, ( $M_x < I$ ,  $M_y < J$ ). Varijansa šuma nastalog kao posljedica nedostajućih odbiraka signala se računa u skladu sa sljedećom relacijom za 2D slučaj [3], [60]:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^K A_i^2 M_x M_y \frac{IJ - M_x M_y}{IJ - 1}. \quad (2.10)$$

Amplituda  $i$ -te komponente signala je označena sa  $A_i$ , a  $K$  je ukupan broj komponenti signala. Prag koji odvaja komponente signala od komponenti šuma se računa kao [3], [60]:

$$T = \sigma \sqrt{-\log(1 - P^{\frac{1}{IJ}})}. \quad (2.11)$$

Skup pozicija dostupnih odbiraka signala označen je sa  $\mathbf{V}_a$ ,  $\mathbf{V}_a = \{(x_1, y_1), \dots, (x_{M_x}, y_{M_y})\}$ , vektor dostupnih odbiraka označen je sa  $\mathbf{y}$ ,  $\Psi^{-1}$  je inverzna 2D DFT matrica,  $\mathbf{p}$  vektor je pozicija komponenti signala koje su iznad praga, a vektor početne DFT se računa kao:  $\mathbf{X}_p = \Psi_{\mathbf{V}_a} \mathbf{y}$ , dok  $\Psi_{\mathbf{V}_a}$  matricu čine kolone originalne 2D DFT matrice definisane skupom  $\Omega_a$ .

**Algoritam 6: Iterativna verzija automatizovanog algoritma zasnovanog na pragovanju za rekonstrukciju 2D signala (SFAR-2D algoritam)**

**Ulazi algoritma:** vektor pozicija dostupnih odbiraka signala  $\mathbf{V}_a$  i vektor mjerenja  $\mathbf{y}$ , transformacione matrice - 2D DFT matrica i inverzna 2D DFT matrica  $\Psi$  i  $\Psi^{-1}$ , respektivno; skup  $\mathbf{p} = \emptyset$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^K A_i^2 M_x M_y \frac{IJ - M_x M_y}{IJ - 1},$$

- Računanje varijanse:

$$A^2 = \sum_{i=1}^K A_i^2$$

- Za datu vrijednost vjerovatnoće  $P=0.99$  računa se prag  $T$ ;
- Računanje vektora početne DFT,  $\mathbf{X}_P$ :

$$\mathbf{X}_P = \Psi_{\mathbf{V}_a} \mathbf{y};$$

- Naredni koraci algoritma ponavljaju se dok sve komponente ne budu detektovane:

**for**  $i=1 : i=i+1$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} \cup \arg\{|\mathbf{X}_P| > T\},$$

$$\mathbf{F} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{y}, \quad ;$$

$$\mathbf{A} = \Psi^{-1}(\mathbf{V}_a, \mathbf{p}),$$

- Ažuriranje  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{X}_P$ ,  $A^2$  i  $\sigma^2$ :

$$\mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{A} \mathbf{X}_P(\mathbf{p}),$$

$$\mathbf{X}_P = \Psi_{\mathbf{V}_a} \mathbf{y},$$

$$A^2 = \sum \frac{|\mathbf{y}|^2}{M_x M_y},$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^K A_i^2 M_x M_y \frac{IJ - M_x M_y}{IJ - 1}$$

**Izlaz iz algoritma:** Vektor rekonstruisane Fourier-ove transformacije  $\mathbf{F}$

### **3. Digitalni watermarking i primjena u zaštiti slike**

Umetanje tajnog signala u digitalni sadržaj poznato je pod nazivom watermarkiranje. Ovaj proces služi za zaštitu od zloupotreba i može se primijeniti na različite vrste digitalnih podataka. Naime, zloupotrebe digitalnog sadržaja su veoma česte, i podrazumjevaju njegovo nedozvoljeno kopiranje ili modifikaciju. Kvalitet kopiranog podatka može biti identičan kvalitetu originalnog digitalnog sadržaja. Stoga se digitalni watermarking koristi za otkrivanje određenih manipulacija digitalnog sadržaja. Tajni signal, koji se umeće u digitalni sadržaj i koji služi za identifikovanje vlasnika tog sadržaja, se naziva watermark i obično predstavlja slučajnu sekvencu. Umetanje watermarka može da se obavlja na različite načine a watermarkiranje može da se primijeni na različite domene u signalu – npr. vremenski, prostorni ili transformacioni domen, pa i vremensko-frekvencijski domen [74]-[106]. U većini slučajeva se teži da watermark bude perceptualno neprimjetan, kako ne bi degradirao kvalitet multimedijalnog sadržaja u koji se umeće. Watermark treba da bude detektibilan u okviru signala, kako bi se moglo dokazati vlasništvo nad multimedijalnim sadržajem. Detektibilnost watermarka zavisi od niza faktora, između ostalog od načina umetanja kao i od njegove jačine. Ukoliko je jačina watermarka veća, lakše ga je detektovati ali se u takvim slučajevima rizikuje degradacija kvaliteta sadržaja u koji je watermark umetnut. U realnim situacijama uvijek postoji kompromis između zahtjeva neperceptibilnosti i detektibilnosti watermarka.

### 3.1 Osobine koje watermark treba da zadovoljava

U nastavku su date osnovne osobine koje watermark treba da zadovoljava [3].

*Nevidljivost:* U većini slučajeva, od interesa je da watermark bude nevidljiv. Ukoliko je watermark primjetan, dolazi do degradacije originalnog sadržaja. Takođe, vidljivi watermark se lako uklanja iz originalnog sadržaja, pa je u današnje vrijeme popularnija procedura umetanja nevidljivog watermarka. Tehnike nevidljivog watermarkiranja se dijele na robustne, polu-lomljive i lomljive tehnike. Kod lomljivih tehnika, koje se koriste za dokazivanje autentičnosti podataka, watermark će biti u određenoj mjeri degradiran ukoliko dođe do pokušaja promjene originalnog digitalnog sadržaja. Polu-lomljive tehnike su otporne samo na određene obrade digitalnog sadržaja. Kod robustnih tehnika, watermark je otporan na određene obrade signala kao što je filtriranje ili kompresija, a otporan je i na neke od namjernih napada na digitalni sadržaj sa ciljem uklanjanja watermarka.

*Detektibilnost:* Vjerovatnoća detekcije watermarka utiče na efikasnost watermarking procedure. Nije uvijek moguće detektovati watermark sa 100% sigurnošću, a da umetnuti watermark ne naruši kvalitet signala. Najčešći vid detekcije watermarka je tzv. slijepa detekcija watermarka. Ovakav vid detekcije ne zahtijeva postojanje originalnog sadržaja koji se watermarkira, i omogućava veliki stepen sigurnosti.

Za sliku  $S_x$ , forma slijepe detekcije watermarka se može definisati kao korelacija između funkcije  $\rho$  i watermarka  $w$  u vidu lokalno optimalnog detektora na sljedeći način [3], [74], [86], [88]:

$$D = \sum \rho(S_x) \cdot w, \quad (3.1)$$

gdje  $\rho$  funkcija koja zavisi od raspodjele watermarkiranih koeficijenata slike  $S_x$ :

$$\rho(S_x) = -\frac{p'(S_x)}{p(S_x)}, \quad (3.2)$$

Funkcija  $p(S_x)$  je funkcija gustine vjerovatnoće a  $p'(S_x)$  je prvi izvod ove funkcije.

Ukoliko koeficijenti koji su odabrani za watermarkiranje, imaju Gauss-ovu raspodjelu, onda se relacija (3.1) svodi na standardni korelator [3], [77], [86], [88]:

$$D = \sum_{i=1}^M S_x(i)w(i). \quad (3.3)$$

*Robustnost:* Watermarking procedura se definiše tako da bude robustna na najčešće metode obrade vezane za aplikaciju u kojoj se procedura primjenjuje. U ovakvim situacijama watermark može biti manje ili više oštećen pa se ove metode nazivaju atacima na watermarkirani sadržaj. Drugim riječima, detekcija watermarka treba da bude uspješna i nakon primjene nekih metoda obrade nad signalom ili namjernih pokušaja uklanjanja watermarka. Među najčešćim atacima izdvajaju se šumovi, metode za filtriranje signala, metode kompresije, geometrijski ataci, itd. Osim robustnih watermarking procedura, postoje i procedure u kojima je watermark lomljiv (ili polulomljiv). Svrha ovakvih procedura je otkrivanje manipulacija nad watermarkiranim sadržajem i obično se koriste za dokazivanje autentičnosti podataka.

Kao mjeru kvaliteta detekcije moguće je koristiti indeks detektibilnosti  $R$ . Indeks detektibilnosti se računa na sljedeći način: prvo se računaju odzivi detektora za watermark sekvence (koji su u stvari pravi ključevi), a zatim se računaju odzivi detektora na veliki broj pogrešnih ključeva. Nakon toga se računaju srednje vrijednosti odziva detektora za pogrešne i prave ključeve i to:  $\bar{D}(w)$  za razne watermark sekvence i  $\bar{D}(p)$  za pogrešne ključeve (pokušaje). Standardne devijacije odziva detektora za razne watermark sekvence i za pogrešne pokušaje označićemo sa  $\sigma_w^2$  i  $\sigma_p^2$ , respektivno. Sada se mjera kvaliteta detekcije može opisati sljedećom relacijom:

$$R = \frac{\bar{D}(w) - \bar{D}(p)}{\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_p^2}}. \quad (3.4)$$

Mjera kvaliteta detekcije  $R$  služi za računanje vjerovatnoće greške detekcije, koja se računa na sljedeći način:

$$P_{err}(R) = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{2}\right) - \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(-\frac{R}{2}\right) + \frac{1}{2}. \quad (3.5)$$

### 3.2 Zaštita digitalne slike – tehnike digitalnog watermarkinga

Zaštita digitalne slike umetanjem vodenog žiga (watermarka) može da se vrši na različite načine. Watermark može biti primjetan ili neprimjetan. Primjetan watermark se češće koristi za zaštitu digitalnog videa ili slike i mijenja originalni sadržaj. Samim tim što je vidljiv, ovaj vid zaštite može biti uklonjen iz digitalnog sadržaja, pa nije naročito popularan. U praksi se češće koriste tehnike neprimjetnog umetanja vodenog žiga [3], [74], [76].

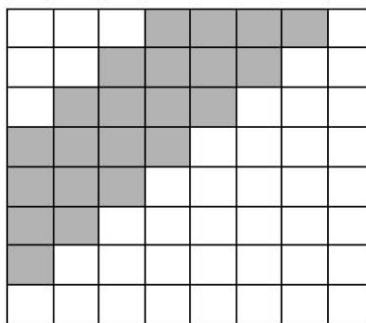
U pogledu domena u kom se vrši umetanje, tehnike umetanja se mogu podijeliti u dvije kategorije – tehnike umetanja u prostornom domenu i tehnike umetanja u frekvencijskom domenu. U pogledu implementacije, tehnike umetanja u prostornom domenu su jednostavnije ali se mora voditi računa da se promjenom vrijednosti piksela ne naruši kvalitet slike. Istovremeno, tehnika umetanja treba da obezbijedi da watermark bude robustan na nenamjerne atake na digitalni sadržaj ili na namjerne pokušaje uklanjanja watermarka iz slike, npr. kompresijom, geometrijskim atacima ili filtriranjem.

Tehnike umetanja u frekvencijskom tj. transformacionom domenu pružaju veću fleksibilnost pri odabiru načina umetanja, transformacionog domena koji će se koristiti i regiona u koje će watermark biti umetnut, a da se zadrži robustnost i neprimjetnost watermarka. Koji će se transformacioni domen koristiti zavisi od osobina signala i zahtjeva konkretne aplikacije. Najčešće korišćeni domeni kod watermarkiranja digitalne slike su Diskretna Fourier-ova transformacija (DFT), Diskretna kosinusna transformacija (DCT), Diskretna wavelet transformacija i slično. Ove tehnike umetanja koriste osobine ljudskog vizuelnog sistema imajući u vidu da je ljudsko oko različito osjetljivo na promjene koeficijenata koji pripadaju različitim frekvencijskim regionima. Naime, ljudska čula su najosjetljivija na promjene koje se dešavaju na niskim frekvencijama. Stoga se ovi frekvencijski regioni izbjegavaju pri watermarkiranju kako ne bi došlo do degradacije signala. Promjene komponenti signala koje pripadaju visokim frekvencijama



su najmanje primjetne, ali umetanje vodenog žiga u ove koeficijente nije pogodno zbog nedostatka robustnosti a samim tim i bezbjednosti. Stoga se koeficijenti koji pripadaju srednjim frekvencijama najčešće koriste kao kompromisno rješenje koje može pružiti adekvatan stepen zaštite digitalnog sadržaja uz obezbjeđivanje neprimjetnosti umetnutog watermarka.

Jednostavna procedura za watermarking slike zasnovana je na aditivnom umetanju watermarka u DCT domen slike, na blokove  $8 \times 8$ , i opisana je u [3]. Watermark se umeće u dio 2D DCT koeficijenata koji se nalaze na srednjim frekvencijama, kao što je prikazano na slici 3.1. Srednje frekvencije odabrane su kako bi se sačuvala robustnost watermarka a istovremeno, kako bi watermark bio neprimjetan.



**Slika 3.1: Izbor koeficijenata za umetanje vodenog žiga**

Umetanje watermarka je zasnovano na standardnoj aditivnoj proceduri za umetanje:  $S_w = S + \alpha w$  gdje su  $S$  originalni srednje-frekvencijski DCT koeficijenti,  $\alpha$  je jačina watermarka a  $S_w$  su watermarkirani koeficijenti. Procedura se ponavlja za svaki  $8 \times 8$  blok. Detekcija watermarka se vrši standardnim korelatorom pod pretpostavkom da raspodjela koeficijenata koji su odabrani za watermarkiranje zadovoljava Gauss-ovu raspodjelu.

Procedura watermarkiranja slike u boji, predložena u [3] koristi 2D DCT transformaciju čitave slike. Koraci procedure opisani su u nastavku:

a) Selekcija koeficijenata za watermarkiranje:

1. Kanali boja – R, G, B

2. Računanje 2D DCT transformacije za svaki kanal boja
3. Pretvaranje dobijenih 2D DCT matrica u vektor i sortiranje tog vektora
4. Izbjegavanje najvećih  $K$  koeficijenata iz sortiranog vektora i umetanje watermarka u sljedećih  $M$  koeficijenata

b) Umetanje watermarka:

Umetanje watermarka može se opisati sljedećom relacijom, gdje su sa  $I$  označeni 2D DCT koeficijenti,  $w$  je watermark koji se može kreirati kao pseudoslučajna sekvenca a  $\alpha$  je jačina watermarka:

$$I_w(i) = I(i) + \alpha \times |I(i)| \times w(i), \quad i = L+1, \dots, M+L$$

c) Sljedeći korak je preraspodjela watermarkirane sekvence u matricu;

d) Računanje inverzne 2D DCT transformacije.

### ***3.3 Procedura umetanja watermarka u obliku logo slike***

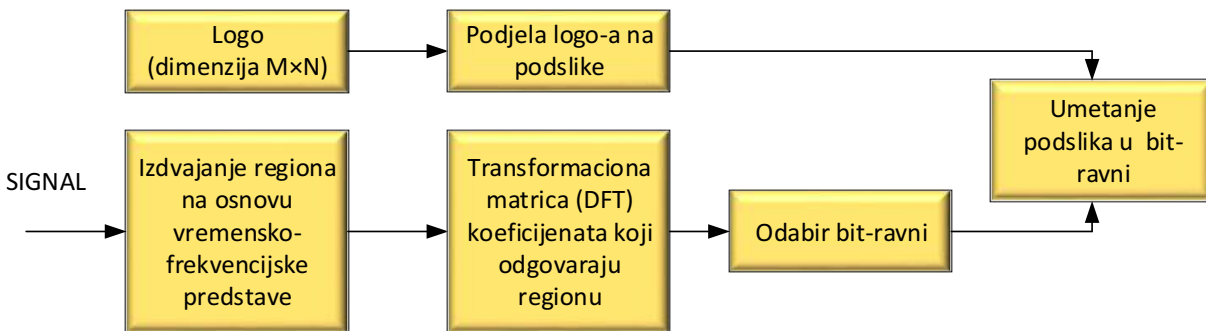
U nastavku je opisana procedura za umetanje logo slike kao watermarka u neki multimedijalni sadržaj. Logo može biti neka prirodna slika, a može se definisati i kao binarna slika, tj. slika čije su vrijednosti osvjetljala ili 0 ili 1. U [98] predložena je procedura za umetanje logo slike u koeficijente diskretne Fourier-ove transformacije posmatranog digitalnog sadržaja. Opisana procedura koristi koncept podjele na bit ravni i umetanja dijela logo slike u svaku od bit ravni. Koncept podjele logo slike u više bit ravni i umetanje podijeljenog logo-a biće korišten i u proceduri watermarkiranja u ovom radu.

Ako se koeficijenti slike (u prostornom ili transformacionom domenu) koji su određeni za watermarkiranje prikazu u binarnom obliku sa jednakim brojem bita, onda se ti koeficijenti mogu posmatrati kao trodimenziona matrica. Ova matrica, kao i izdvojena bit ravan, su prikazani na slici 3.1. Ukoliko su koeficijenti slike, u prostornom ili transformacionom domenu, prikazani sa  $B$  bita,  $B$  označava i broj dostupnih bit ravni.

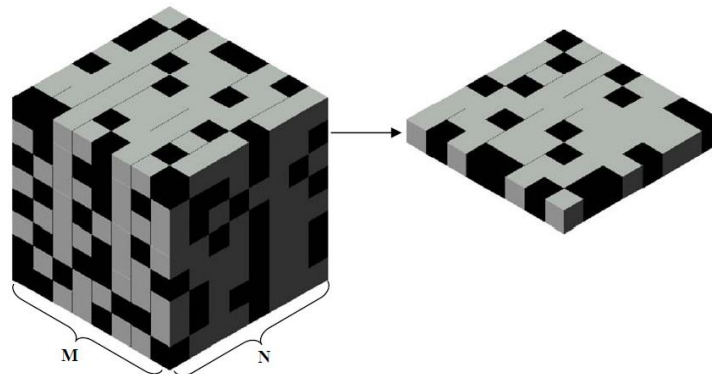
U radu [98] logo je umetnut u različite bit-ravni matrice DFT koeficijenata. Posmatran je govorni signal. Ova procedura koristi i vremensko-frekvencijsku analizu za odabir DFT koeficijenata pogodnih za watermarking. Izdvajanje podslika logo-a iz koeficijenata govornog signala omogućeno je inverzijom procedure, a sjedinjavanjem podslika dobija se originalni logo. U ovoj proceduri, umetanje logo-a vrši se mijenjanjem binarnih vrijednosti nekih od bit-ravni DFT matrice u skladu sa pikselima logo-a. Logo se umeće u samo nekoliko bit ravni jer bi mijenjanje svih bit-ravni dovelo do degradacije kvaliteta slike. Odabir bit ravni se vrši u skladu sa unaprijed postavljenim uslovima. Ukoliko se logo umeće u najniže bit ravni, može se desiti da ne bude dovoljno robustan na namjerne pokušaje uklanjanja watermarka. Umetanje logo-a u najviše bit-ravni dovodi do rizika da logo bude perceptualno vidljiv, pa se umetanje u srednje bit ravni pokazalo kao optimalno rješenje.

Blok šema procedure prikazana je na slici 3.2 a procedura ima nekoliko koraka [98]:

- Korišćenjem vremensko-frekvencijske predstave izdvaja se određeni region signala (u ovom slučaju govornog signala)
- Sljedeći korak je kreiranje matrice DFT koeficijenata. Matrica se kreira tako da sadrži najznačajnije koeficijente iz selektovanog regiona
- Odabir bit-ravni u koje će biti umetnuti djelovi logo slike
- Kreira se logo i dijeli se na podslike koje se umeću u bit-ravni DFT matrice.



**Slika 3.2: Blok šema procedure za umetanje logo-a u bit ravni**



**Slika 3.3: Matrica u binarnom obliku i njena izdvojena bit ravan**

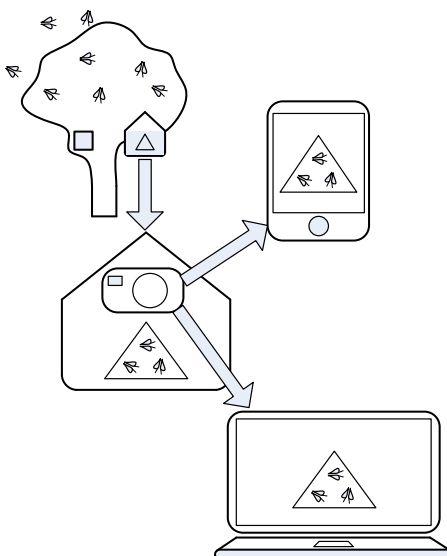
## 4. TrapView sistem i CS optimizacija slika insekata

TrapView [107]-[109] je automatizovani sistem za monitoring štetočina u poljima i vinogradima. Koristi specijalizovane zamke za insekte, koje pokrivaju površinu od 1 do 5 hektara. Zamke su u potpunosti automatizovane, a postoji mogućnost dodavanja senzora koji prate vremenske prilike. Sistem je prilagođen da radi na bilo kom području koje ima GPRS ili 3G mrežnu pokrivenost. U zamci se nalazi ljepljiva traka sa feromonima koji privlače insekte. Takođe, svaka zamka je opremljena kamerom koja periodično snima stanje na ljepljivoj traci i slike šalje na cloud TrapView platformu. Na platformi se vrši dalja obrada slika, koja podrazumijeva analizu snimljenih slika i brojanje fotografisanih insekata. Brojanje se vrši primjenom posebnih algoritama koji, pored razlikovanja insekata od prašine koja se obično nalazi na slici, razlikuju i opasne od bezazlenih insekata. Drugim riječima, TrapView je platforma koja omogućava rano otkrivanje štetočina u poljima. Sistem takođe omogućava automatsko prepoznavanje štetočina, vrši statističke analize a omogućava i manualno posmatranje fotografija iz svake zamke. Ovakav, automatizovan pristup nadzoru insekata smanjuje troškove nadgledanja, posebno u slučajevima kada postoji potreba za nadgledanjem velikih površina, koje se sastoje od nekoliko stotina kvadratnih kilometara. Slike se svakodnevno šalju krajnjem korisniku. Međutim, pošto su slike visoke rezolucije, bilo bi od velike važnosti smanjiti veličinu kako bi se ubrzao postupak za učitavanje i preuzimanje od strane krajnjeg korisnika.

Izgled TrapView zamke, kao i šematski prikaz sistema, dati su na slici 4.1. Platformi se može pristupiti sa bilo kog uređaja koji ima internet konekciju – personalnog računara, laptopa, tableta ili mobilnog telefona.

Slika fotografisana TrapView kamerom veličine je oko 2MB. Imajući u vidu da je broj zamki, a samim tim i kamera, veoma veliki (zavisi od veličine polja, ali može dostići i do 1000 stanica), godišnje se troši i do 1 TB memorije za skladištenje slika. Zbog toga

se javila ideja za optimizacijom snimljenih fotografija prije nego se one pošalju mobilnom mrežom na TrapView platformu, sa ciljem smanjenja troškova skladištenja kao i povećanja brzine rada aplikacije.



**Slika 4. 1: TrapView sistem**

U cilju optimizacije snimljenih slika, korišćen je pristup kompresivnog odabiranja [109]. Ideja je da se smanji količina podataka koja se šalje na TrapView platformu što je moguće više, a da se zadrži kvalitet slike koja dolazi do krajnjeg korisnika. Zadržavanje kvaliteta slike je od interesa zbog uspješne post-obrade snimljenih slika. Post-obrada podrazumijeva brojanje jedinki insekata koji bivaju zarobljeni na ljepljivoj traci, a bazira se na specijalizovanim algoritmima brojanja. Kompresivno odabiranje je u iskorišćeno u cilju kompresije i rekonstrukcije snimljenih slika [109].

## 4.1 Primjena CS-a u optimizaciji TrapView slika

Kompresivno odabiranje se može iskoristiti za optimizaciju TrapView slika, što je i pokazano u ovom poglavlju. Umjesto slanja čitave slike od TrapView zamke do *cloud* platforme, moguće je odabrati samo određeni procenat koeficijenata slike koji se šalju na platformu. Slika se prvo pretvara u 2D DCT domen, iz kog se uzimaju koeficijenti [55], [109]. Imajući u vidu da su nam dostupni svi mogući koeficijenti, odabir koeficijenata koji će se slati je izvršen na sljedeći način: uzet je određeni broj ( $K_1$ ) niskofrekvencijskih koeficijenata, a  $K_2$  koeficijenata je uzeto slučajnim putem iz ostatka DCT ravni [55], [109]. Koeficijenti  $K_2$  pripadaju srednjim i visokim frekvencijama. Vektor mjerenja se može opisati sljedećom relacijom:

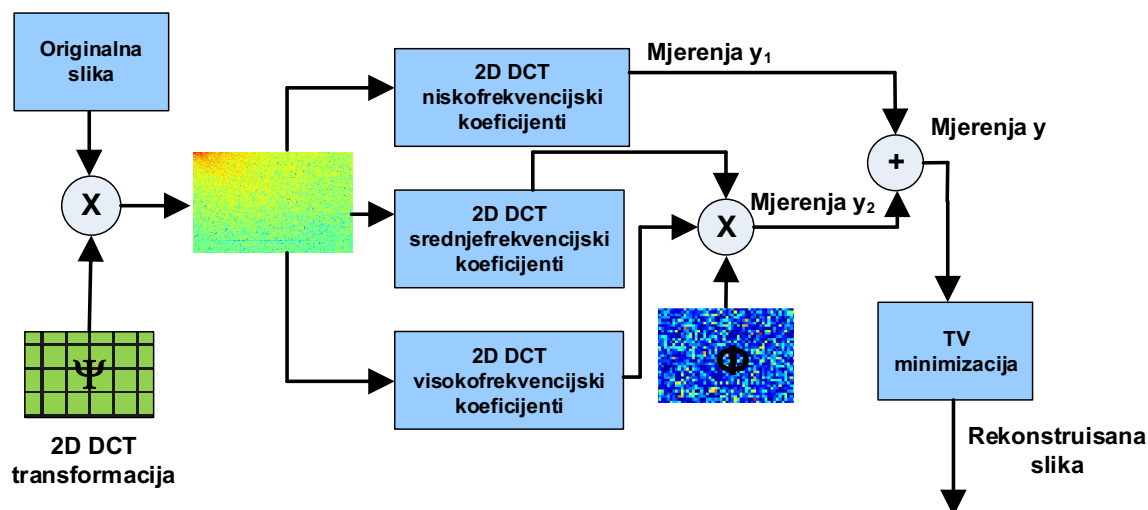
$$\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2], \quad (4.1)$$

gdje su  $\mathbf{y}_1$  niskofrekvencijski DCT koeficijenti a  $\mathbf{y}_2$  su koeficijenti prikupljeni iz ostatka DCT ravni. Ovakvim načinom odabiranja, tj. uzimanjem određenog procenta niskofrekvencijskih koeficijenata, osigurali smo očuvanje dobrog kvaliteta slike koja se dobija na prijemu. Rekonstrukcioni problem se rješava primjenom TV minimizacije i definisan je sljedećom relacijom [109]:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{X}} \text{TV}(\mathbf{X}) \text{ uz uslov } \mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \\ & \text{gdje je} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\text{TV}(\mathbf{X}) = \sum_{i,j} \sqrt{(\mathbf{X}_{i+1,j} - \mathbf{X}_{i,j})^2 + (\mathbf{X}_{i,j+1} - \mathbf{X}_{i,j})^2}$$

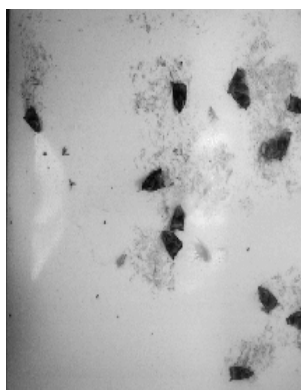
Šematski prikaz procedure za akviziciju i rekonstrukciju TrapView slika je dat na slici 4.2.



Slika 4. 2: Šema CS watermarking procedure

#### 4.1.1 TV minimizacija u rekonstrukciji TrapView slika

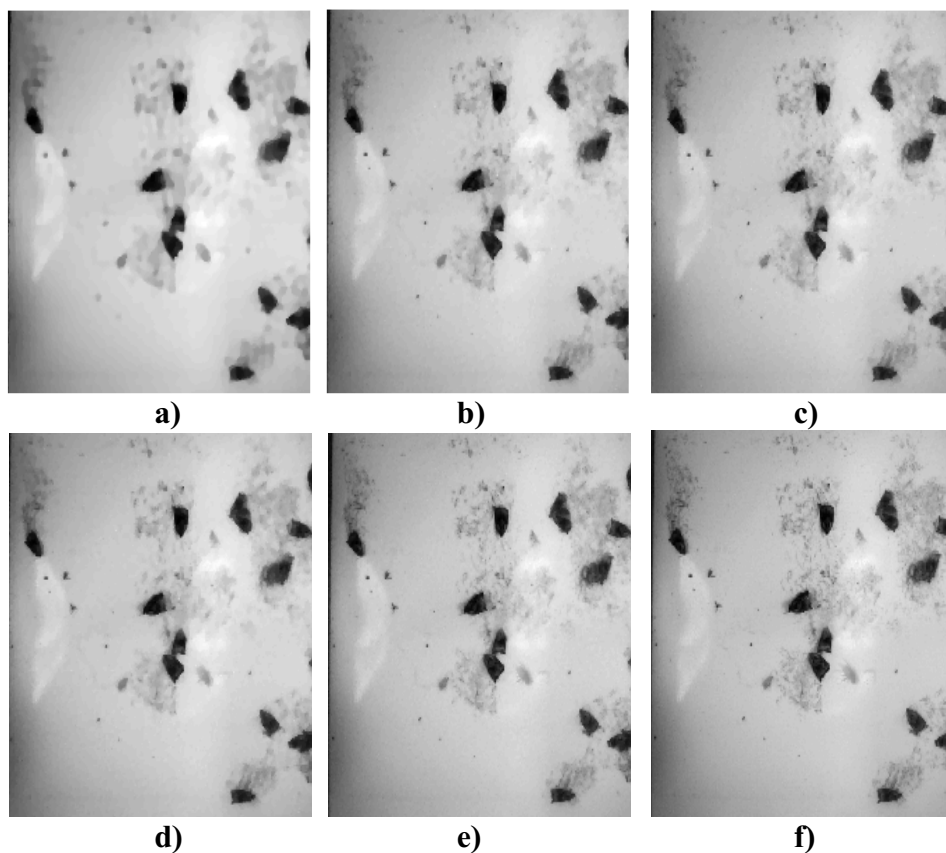
Posmatrane su slike snimljene u različitim fazama [109]. Prvo je posmatrana slika iz početne faze. Originalna fotografija je prikazana na slici 4.3. Fotografija pripada ranoj fazi monitoringa. Sa slike se može vidjeti da je ljepljiva traka u ovoj fazi relativno čista kao i da je mali broj insekata prikupljen na traci. Nad ovom slikom testirana je rekonstrukcija, sa smanjenjem brojem dostupnih koeficijenata slike. Testirana je tačnost rekonstrukcije ako je dostupno od oko 3% pa do 40% ukupnog broja koeficijenata slike.



Slika 4. 3: Originalna slika iz rane faze monitoringa štetočina



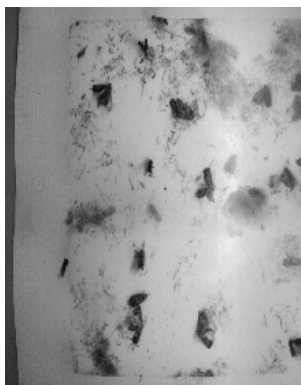
Određeni procenat niskofrekvencijskih koeficijenata iz fotografije se uzima u svim posmatranim slučajevima, imajući u vidu da je značajna informacija o slici sadržana upravo u ovim koeficijentima. Ostatak koeficijenata se uzima po slučajnom rasporedu iz ostatka slike. Rekonstruisane slike prikazane su na slici 4.4 [109].



**Slika 4. 4: Rekonstruisane slike iz rane faze monitoringa, korišćenjem različitog procenta koeficijenata slike: a) 2.7%, b) 10.68%, c) 15%, d) 21%, e) 30.14%, f) 39.67% od ukupnog broja odbiraka**

Sa slike 4.4 se može vidjeti da, i u slučaju kada je veoma mali broj koeficijenata dostupan (oko 3%), slika može biti rekonstruisana sa zadovoljavajućim kvalitetom. Ista procedura je ponovljena sa slikama iz zrele faze monitoringa, tj. iz faze kada je ljepljiva traka gusto pokrivena uhvaćenim insektima.

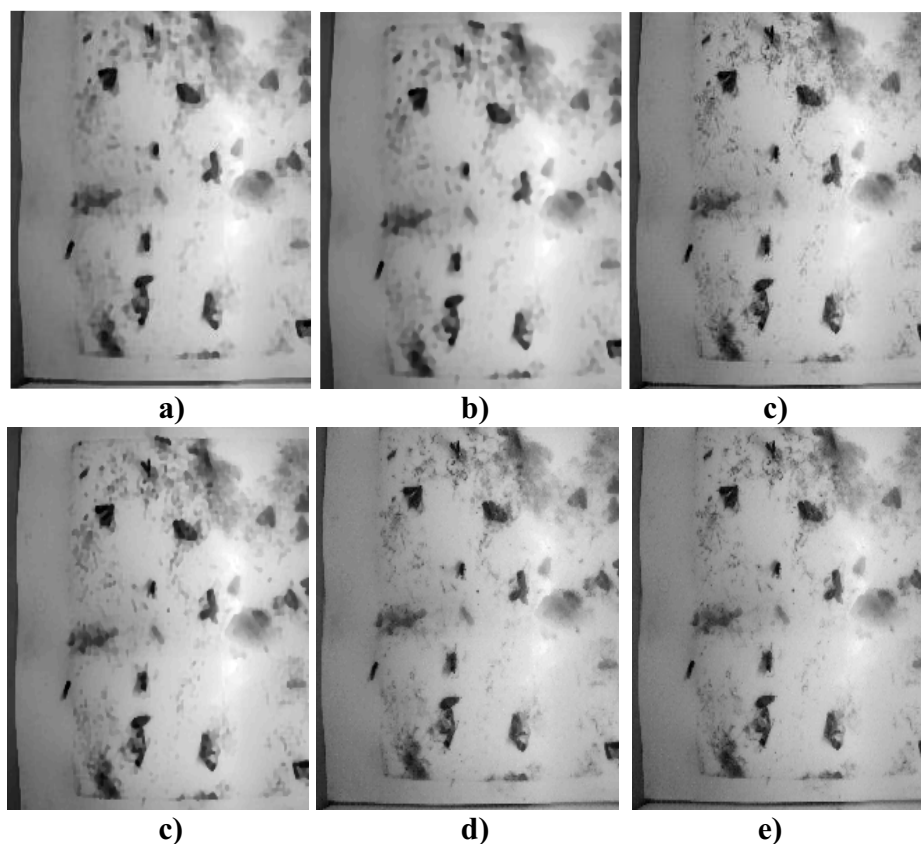
Originalna slika iz zrele faze monitoringa prikazana je na slici 4.5, dok slika 4.6 prikazuje rekonstruisane slike. Procenat uzetih mjerenja je isti kao i u prethodnom slučaju – posmatran je kvalitet rekonstrukcije sa oko 3% pa do oko 40% uzetih mjerenja. Broj niskofrekvencijskih koeficijenata je fiksiran na 4000, a varira se broj srednjefrekvencijskih i visokofrekvencijskih koeficijenata [109]. Kvalitet rekonstruisanih slika testiran je vizuelno – posmatranjem originalne i rekonstruisanih slika, a takođe je posmatrana i mjera kvaliteta *peak signal to noise ratio* (PSNR). Vrijednosti PSNR-a za različiti broj mjerenja i slike iz različitih faza monitoringa, prikazane su u tabeli 4.1 [109]. Iz tabele se može vidjeti da je PSNR slika koje pripadaju početnoj fazi monitoringa malo veći u poređenju sa PSNR-om slika iz druge faze monitoringa. Slike koje pripadaju prvoj fazi monitoringa imaju manje uhvaćenih insekata, i manje detalja u samoj slici.



**Slika 4. 5: Originalna slika koja pripada zreloj fazi monitoringa**

Drugim riječima, slike iz ove faze su više *spars* u prostornom domenu i imaju manje detalja, pa algoritmi daju bolje rezultate za isti broj uzetih mjerenja. Vrijednost PSNR-a od oko 33 dB je dobijena za sliku rekonstruisanu korišćenjem samo 3% od ukupnog broja odbiraka slike (za slike u početnoj fazi monitoringa) kao i za oko 11% mjerenja za slike iz kasnije faze monitoringa štetočina. Imajući u vidu dobijene vrijednosti PSNR-a, vizuelno upoređujući originalne i rekonstruisane slike, kao i primjenom algoritama brojanja insekata na rekonstruisane slike, može se zaključiti da CS pristup ne utiče na dalju obradu slike i tačnost brojanja. Važno je napomenuti da, osim algoritma koji koristi TV minimizaciju i DCT koeficijente slike, za rekonstrukciju slike se mogu primijeniti i drugi algoritmi koji vrše rekonstrukciju podobabranih 2D signala.

Mjerenja se, osim iz transformacionog domena, mogu uzimati i iz prostornog domena slike.



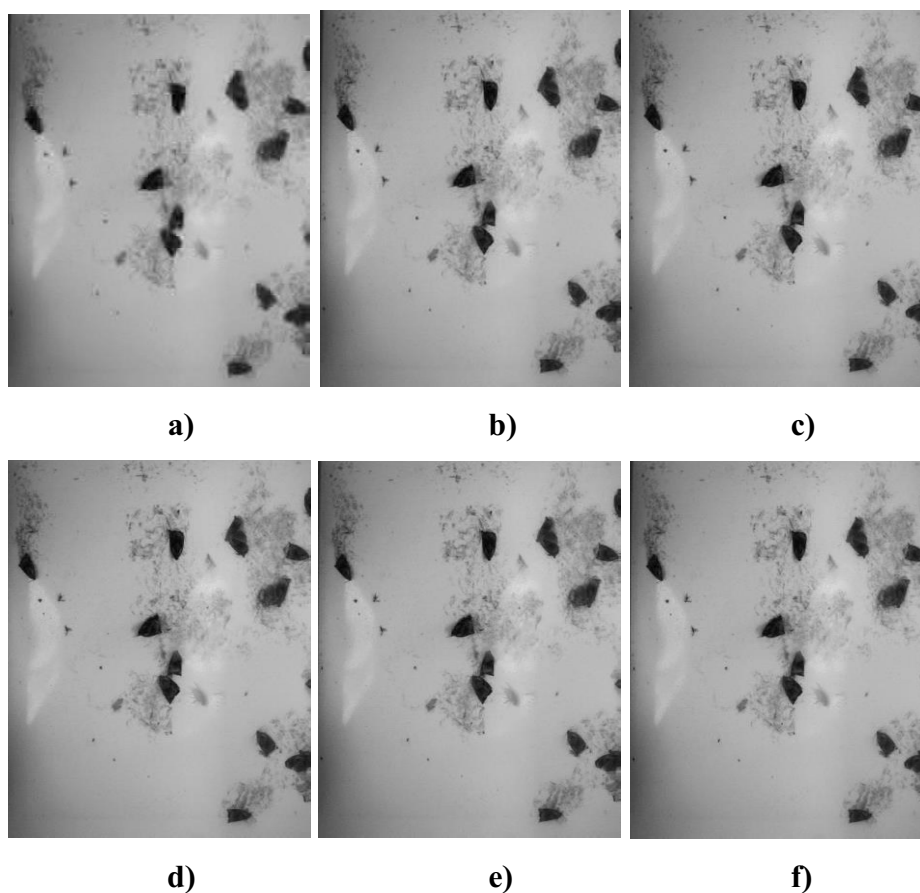
Slika 4. 6: Slike iz zrele faze monitoringa, rekonstruisane korišćenjem: a) 2.7%, b) 10.68%, c) 15%, d) 21%, e) 30.14%, f) 39.67% mjerenja od ukupnog broja koeficijenata slike

Tabela 4.1: Procenat mjerenja slike i mjera kvaliteta rekonstruisane slike (PSNR) za slike iz obje posmatrane faze

| <i>Procenat mjerenja</i> | <i>Broj niskofrekvencijskih koeficijenata</i> | <i>Broj srednjefrekvencijskih i visokofrekvencijskih koeficijenata</i> | <i>PSNR (dB) – slika iz početne faze monitoringa</i> | <i>PSNR (dB) – slika iz kasne faze monitoringa</i> |
|--------------------------|---|--|--|--|
|                          | $K_1$   | $K_2$  |  |  |
| 2.7                      | 4000  | 3000   | 33.08  | 31.14  |
| 10.68                    | 4000  | 24000  | 36.02  | 33.91  |
| 15                       | 4000  | 35000  | 36.94  | 34.88  |
| 21                       | 4000  | 52000  | 38.08  | 35.98  |
| 30.14                    | 4000  | 75000  | 39.30  | 37.19  |
| 39.67                    | 4000  | 100000   | 40.56  | 38.47  |

#### 4.1.2. Primjena gradijentnog algoritma u rekonstrukciji TrapView slika

Rekonstrukcija slika testirana je korišćenjem još jednog algoritma baziranog na gradijentu. Iste slike su posmatrane kao u poglavlju 4.1.1., za početnu i za zrelu fazu monitoringa. Procenat mjerenja je sličan kao u prethodnom poglavlju – testirana je rekonstrukcija počev od oko 3% do oko 40% mjerenja. Mjerenja se uzimaju iz prostornog domena, za razliku od prethodnog slučaja gdje su mjerenja prikupljana iz transformacionog domena (u našem primjeru, iz 2D DCT domena). Takođe, mjerenja su birana na potpuno slučajan način iz čitavog prostornog domena slike. Rezultati rekonstrukcije za početnu i kasnu fazu monitoringa su prikazani na slikama 4.7 i 4.8, respektivno.

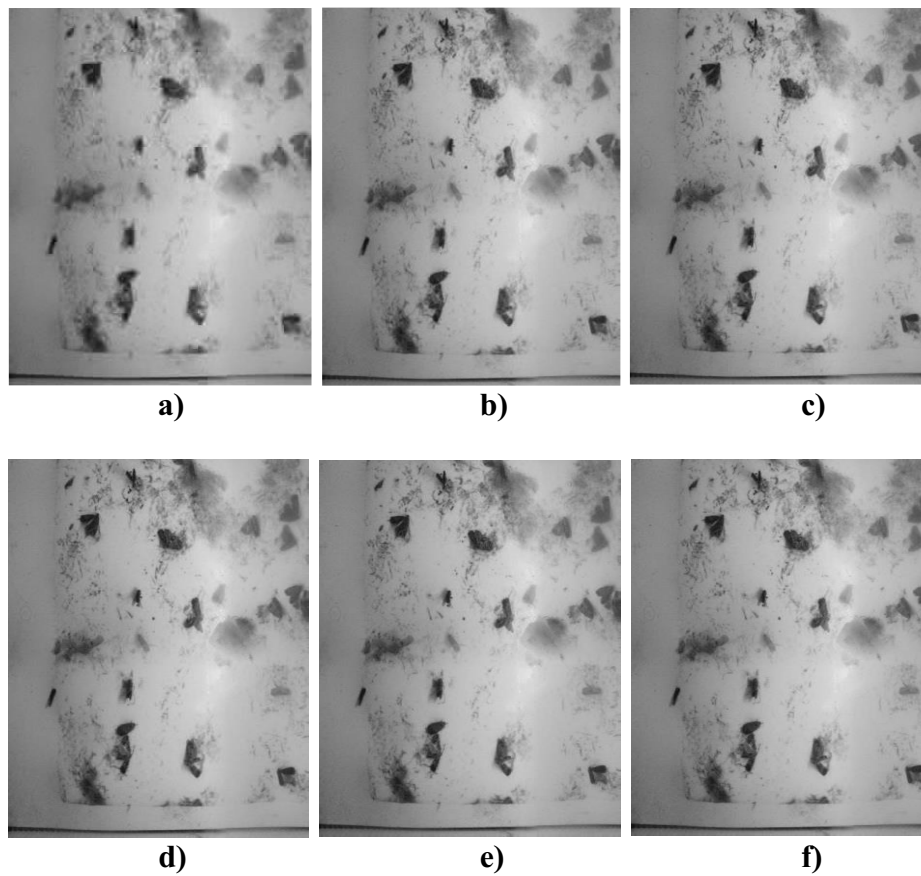


**Slika 4. 7: Slike iz početne faze monitoringa, rekonstruisane korišćenjem gradijentnog algoritma sa: a) 2.7%, b) 10.5%, c) 15%, d) 21%, e) 30%, f) 38% mjerenja**

Kvalitet rekonstruisanih slika testiran je kako vizuelno tako i mjerenjem PSNR-a. Vrijednosti PSNR-a za različiti broj dostupnih uzoraka slike su prikazani u tabeli 4.2. Kao i pri rekonstrukciji metodom totalne varijacije, dobili smo da je PSNR u početnoj fazi monitoringa veći u poređenju sa PSNR-om rekonstruisanih slika koje pripadaju drugoj fazi monitoringa. Poređenjem vrijednosti PSNR-a slika rekonstruisanih primjenom TV minimizacije i primjenom gradijentnog algoritma, može se vidjeti da je vrijednost PSNR-a veća kod slika rekonstruisanih primjenom gradijentnog algoritma, za približno isti broj mjerenja. Za slike iz početne faze monitoringa ta vrijednost je neznatno veća. Međutim, može se zaključiti da se oba algoritma mogu primijeniti u ovoj aplikaciji, imajući u vidu da se brojanje insekata može uspješno izvršiti nad slikama rekonstruisanim primjenom oba algoritma. Koji će se algoritam upotrijebiti, zavisi od implementacije, obzirom da prvi algoritam uzima mjerenja iz transformacionog, a drugi algoritam mjerenja uzima iz prostornog domena.

**Tabela 4.2: Procenat mjerenja slike i mjera kvaliteta rekonstruisane slike (PSNR) za slike iz obje posmatrane faze**

| <i>Procenat mjerenja</i> | <i>PSNR (dB) – slika iz početne faze monitoringa</i> | <i>PSNR (dB) – slika iz zrele faze monitoringa</i> |
|--------------------------|--|--|
| 2.7                      | 32.64  | 32.14  |
| 10.5                     | 37.18  | 36.87  |
| 15                       | 38.56  | 38.26  |
| 21                       | 40.06  | 39.76  |
| 30                       | 40.85  | 40.43  |
| 38                       | 39.88  | 39.62  |



**Slika 4. 8: Slike iz zrele faze monitoringa, rekonstruisane korišćenjem gradijentnog algoritma sa: a) 2.7%, b) 10.5%, c) 15%, d) 21%, e) 30%, f) 38% mjerenja**

## 5. Digitalni watermarking i njegova primjena u sistemima za monitoring štetočina

Zaštita autorskih prava i prevencija neautorizovanog korišćenja digitalnih podataka je oblast kojoj se posvećuje posebna pažnja u digitalnoj obradi signala. Razvoj novih ICT tehnologija olakšao je pristup digitalnim informacijama. Međutim, javlja se sve veći problem identifikacije vlasnika digitalnih podataka, kao i njihove autentičnosti. Naime, korišćenjem različitih metoda, kopije digitalnih podataka mogu biti distribuirane sa promijenjenim informacijama koji se odnose na sami sadržaj, informacije o autoru ili informacije o izvoru digitalnih podataka.

Digitalni sertifikat, *Public Key Cryptography Signature* (PKCS), koji se umeće u digitalni medij, može obezbjediti autentifikaciju izvora digitalnih podataka i provjeru njihove autentičnosti. PKCS tehnologija je pouzdana i snažna u smislu zaštite od hakerskih napada, ali pokazuje nedostatke u okruženjima gdje su digitalni podaci podložni modifikaciji ili su izloženi šumu tokom prenosa do prijemnika. U ovom dijelu rada predložen je postupak umetanja vodenog žiga koji ima za cilj očuvanje ugrađenog PKCS-a, čak i u slučajevima ako je digitalna slika izložena različitim vrstama ataka na digitalni sadržaj.

Vodeni žig (watermark) je upotrijebljen za identifikaciju uređaja koji je snimio određeni digitalni podatak. Konkretno, posmatrane su digitalne slike snimljene kamerama u TrapView sistemima. Kao što je napomenuto u poglavlju 4, broj TrapView zamki i njima pridruženih kamera, može biti veoma veliki, u zavisnosti od veličine polja koje se nadgleda. Zbog toga je veoma važno da imamo tačnu informaciju o lokaciji kamere koja je snimila određenu sliku kako bismo imali predstavu o stanju ljepljive trake u svakoj postavljenoj zamci i eventualno je zamijenili ukoliko je potrebno. Takođe, umetanjem digitalnog watermarka i njegovom uspješnom detekcijom osiguravamo nemodifikovan prenos slike do krajnjeg korisnika. Digitalni watermark je kreiran korišćenjem digitalnog

sertifikata, tzv. *Public Key Cryptography Signature* (PKCS). Watermark je kreiran na osnovu 32-bitnog serijskog broja koji se umeće u snimljenu sliku. Detekcija watermarka na prijemnoj strani bazira se na ekstrakciji serijskog broja. Na osnovu dobijenog serijskog broja detektuje se kamera koja je snimila sliku. Procedura umetanja vodenog žiga je definisana tako da bude robustna na optimizaciju slika primjenom kompresivnog odabiranja. Robustnost na CS atak je od interesa zbog mogućnosti istovremene primjene optimizacije snimljenih slika i njihove zaštite digitalnim watermarkom. Watermaking procedura je testirana na različitim atacima koji se mogu javiti u digitalnoj slici, kao što su različiti tipovi šumova, posvjetljivanje/potamnjenje slike, filtriranje, JPEG kompresija i slično.

### ***5.1 Procedura zaštite digitalnih slika snimljenih TrapView kamerama***

Predložena watermarking procedurav je zasnovana na umetanju dijela PKCS-a, tj. serijskog broja (SB), u digitalni sadržaj. Šematski prikaz modifikovanog TrapView sistema dat je na slici 5.1. Svaka TrapView kamera ima svoj PKCS, a serijski broj predstavlja samo jedan dio PKCS-a. Serijski broj se nalazi dostupan u heksadecimalnom obliku. Procedura je sljedeća: Serijski broj se prvo pretvara iz heksadecimalnog u binarni oblik, tj. u 32-bitnu sekvencu. Na osnovu binarnog formata zapisa serijskog broja, kreira se logo. Logo se zatim ugrađuje u digitalnu sliku i predstavlja watermark. Slika sa vodenim žigom (logoom) se zatim prenosi preko mreže do TrapView platforme i može biti izložena napadima.

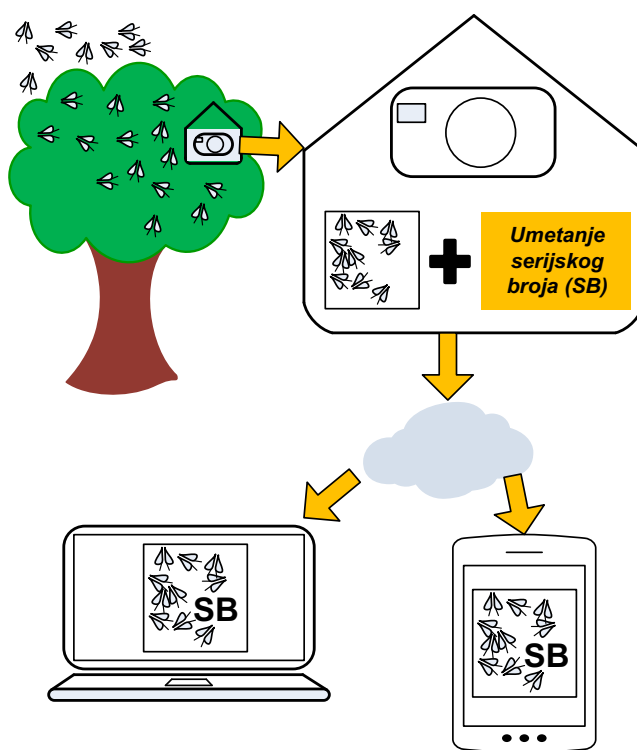
Na strani prijemnika, omogućena je detekcija watermarka, odnosno ekstrakcija 32-bitne sekvence. Ova sekvenca se zatim upoređuje sa prvobitnom sekvencom, tj. sa serijskim brojem koji odgovara serijskom broju uređaja (kamere) koji je snimio posmatranu sliku. Ovaj izvorni serijski broj je dostupan preko sistema za sertifikaciju (*Certification Authority system*). Watermarking procedura zasnovana na serijskom broju i



primijenjena u TrapView sistemu treba da omogući identifikaciju zamke kojoj treba promijeniti ljepljivu traku kad broj uhvaćenih insekata dostigne kritični broj.

Nakon watermarkiranja, slike se šalju na TrapView platformu. Prije slanja, treba izvršiti optimizaciju u cilju obezbjeđivanja bržeg rada aplikacije i štednje memorijskog prostora, kako je to napomenuto i u Poglavlju 4. Optimizacija se i ovdje radi primjenom tehnika kompresivnog odabiranja, na isti način kako je to prikazano u poglavlju 4, ali imajući u vidu da se sada radi na watermarkiranim slikama. Mjerenja se uzimaju iz transformacionog domena, a rekonstrukcija se vrši primjenom metoda totalne varijacije.

Serijski broj treba da bude očuvan i nakon selekcije dijela koeficijenata i rekonstrukcije slike iz relativno malog broja uzetih mjerenja. Drugim riječima, procedura watermarkiranja treba da bude robustna na CS atak.



**Slika 5. 1:** TrapView sistem sa umetnutim watermarkom u vidu serijskog broja (SB)

U nastavku je opisana procedura optimizacije, primjenom CS pristupa. I ovdje, odabir koeficijenata slike po slučajnom rasporedu omogućava uspješnu rekonstrukciju iz relativno malog broja uzetih koeficijenata. Koeficijenti se biraju iz transformacionog

domena, watermarkirane slike. Ako watermarkiranu sliku označimo sa  $\mathbf{x}_w$  a matricu transformacije sa  $\Psi$  onda važi:

$$\mathbf{x}_w = \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{wi} \psi_i = \Psi \mathbf{X}_w, \quad (5.1)$$

gdje su  $\mathbf{X}_{wi}$  transformacioni koeficijenti watermarkirane slike a  $\psi_i$  je bazni vektor. Vektor mjerenja  $\mathbf{y}_w$  watermarkirane slike je definisan sljedećom relacijom:

$$\mathbf{y}_w = \Phi \mathbf{x}_w = \Phi \Psi \mathbf{X}_w = \mathbf{A} \mathbf{X}_w. \quad (5.2)$$

Matrica  $\mathbf{A}$  je CS matrica a matrica  $\Phi$  modeluje selekciju koeficijenata po slučajnom rasporedu. Za rekonstrukciju slike iz prikupljenog seta mjerenja  $\mathbf{y}_w$  koristi se TV optimizacija:

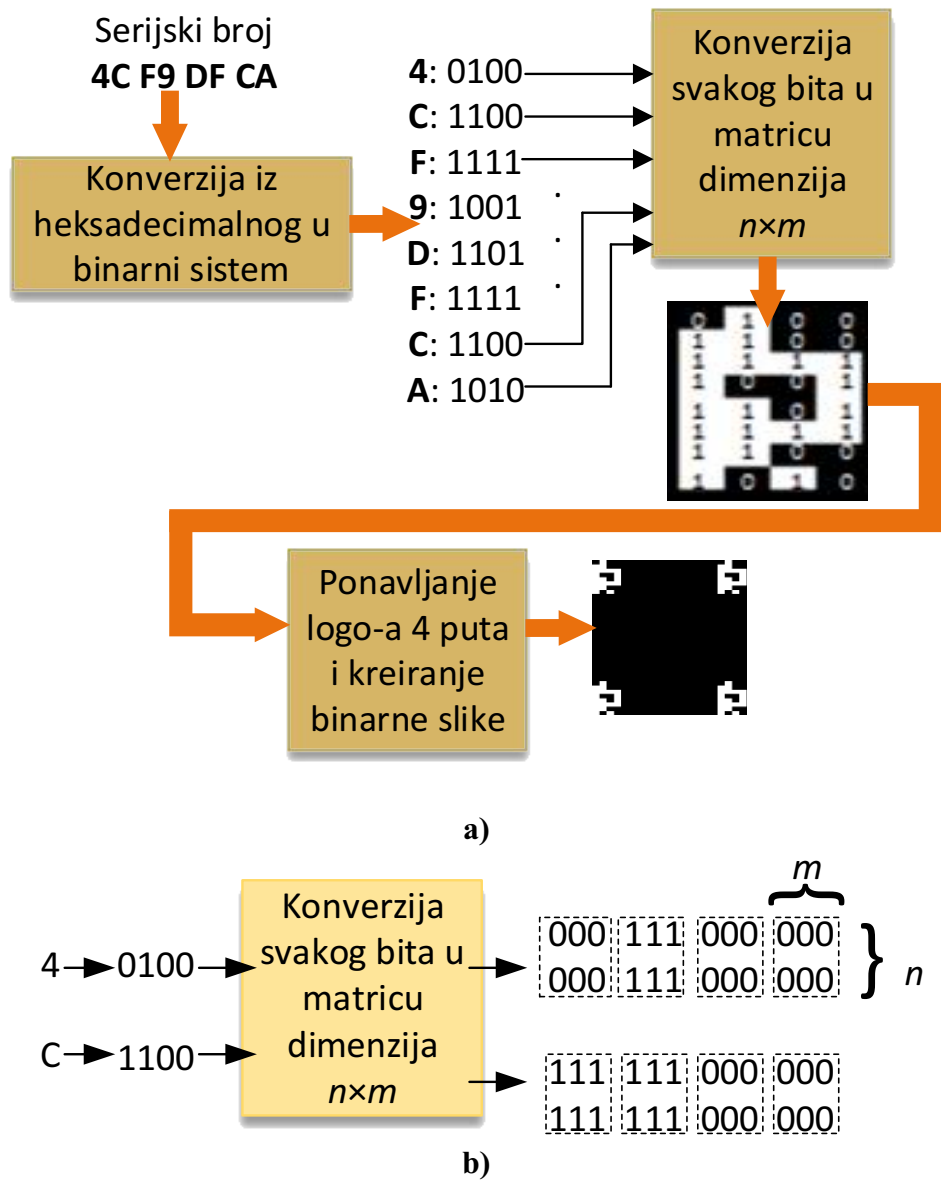
$$\min_{\mathbf{X}_w} \text{TV}(\mathbf{X}_w) \text{ uz uslov } \mathbf{y}_w = \mathbf{A} \mathbf{X}_w. \quad (5.3)$$

## 5.2 *TrapView image watermarking*

U nastavku će biti detaljno opisana procedura umetanja watermarka. Digitalni sertifikat, čije je jedan dio služi kao watermark, se dobija od strane sertifikacionog tijela. Svaki sertifikat ima jedinstveni serijski broj, period validnosti i objekat (u našem slučaju uređaj, kameru) kojem je dodijeljen. Serijski broj je dio digitalnog sertifikata koji nam služi kao watermark. Serijski broj se sastoji od 4 grupe sa po 8 heksadecimalnih brojeva. U predloženoj proceduri watermarkiranja, uzeta je jedan grupa od 8 heksadecimalnih brojeva, koja je zatim konvertovana u binarnu sekvencu. Primjer jedne heksadecimalne kombinacije (koja je kasnije korišćena i u eksperimentalnim rezultatima) i njene konverzije u binarni broj, prikazana je na slici 5.2.

Svaki simbol je predstavljen sa 4 bita. Ukupno je 8 simbola, pa se watermark sastoji od 32 bita. Nakon konverzije iz heksadecimalnog u binarni oblik, svaki bit iz 32-bitne sekvence se dalje predstavlja u matricnoj formi. Drugim riječima, formira se  $n \times m$  matrica nula ili jedinica, u zavisnosti od toga da li je posmatrani bit jednak nuli ili jedinici (slika 5.2a). Konačno, jedan heksadecimalni simbol formira matricu veličine  $n \times 4m$  (slika 5.2b). Nakon konverzije svih 8 heksadecimalnih simbola u binarne matrice, dobija se binarni logo.

U cilju poboljšanja robustnosti predložene watermarking procedure na različite atake, logo slika je u originalnu sliku umetnuta više puta. Odabrano je da se logo umeće 4 puta, i to u čoškove slike, kao što je prikazano na slici 5.2a. Sljedeći korak je umetanje logoa. Originalna logo slika je podijeljena u više djelova i umeće se u nekoliko bit ravni. Naime, u jednu bit ravan umeće se samo dio logo slike. Ako se pretpostavi da je osvjetljaj jednog piksela slike predstavljen sa  $B$  bita, onda imamo dostupno  $B$  bit ravni. U našoj proceduri je odabrano  $L=4$  bit ravni za umetanje logoa kao i četiri matrice dimenzija  $n \times 4m$  u čoškovima slike. Za umetanje logoa korišćene su srednje bit ravni [98], [108], u cilju obezbjeđivanja robustnosti a istovremeno, izbjegavanja uticaja watermarka na kvalitet slike. Logo je podijeljen u  $L$  djelova (slojeva).



**Slika 5. 2: a) Kreiranje logoa za kombinaciju “4CF9DFCA”; b) pojednostavljena ilustracija bit-matrične konverzije**

Podjela u slojeve urađena je korišćenjem jedinstvenog ključa formiranog u obliku matrice  $\mathfrak{R}$  [98]. Svaki sloj logo-a sadrži vrijednosti iz određenog intervala – postoji  $L$  nepreklapajućih intervala. Stoga, matrica  $\mathfrak{R}$  i granice intervala, kao i selekcija bit ravni formiraju ključ. Prilikom detekcije watermarka, kompletan logo se dobija tek nakon sumiranja djelova logoa iz svih  $L$  slojeva. Podjela na slojeve ilustrovana je na slici 5.3.

Neka  $W_k$  označava  $k$ -ti sloj logoa  $W$ ,  $B$  broj bit ravni,  $M$  i  $N$  dimenzije slike,  $\omega_k$  granice za pojedine slojeve, onda se procedura kreiranja logoa može sumirati sljedećom tabelom:

**Tabela 1: Procedura kreiranja logoa:**

---

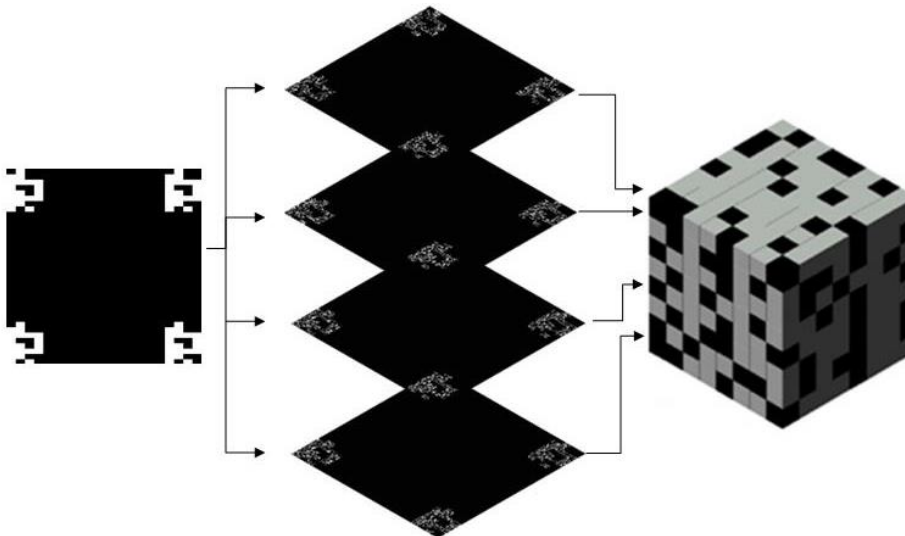
```

 $k \in 1, \dots, B$ 
. for  $i=1:M$ 
.   for  $j=1:N$ 
.     if  $\omega_{k-1} < \mathfrak{R}(i, j) < \omega_k$  then
.        $W_k(i, j) = W(i, j)$ 
.     else
.        $W_k(i, j) = 0$ 
.     end if
.   end for
. end for

```

---

Granične vrijednosti za pojedine slojeve su birane na unaprijed definisan način, što takođe predstavlja jedan vid zaštite. U našem slučaju elementi slučajne matrice  $\mathfrak{R}$  uzimaju vrijednosti iz intervala  $(0,1)$ , a odgovarajući slojevi imaju sljedeće granice:  $(0, 1/4)$ ,  $(1/4, 1/2)$ ,  $(1/2, 3/4)$  i  $(3/4, 1)$ .



**Slika 5. 3: Ilustracija podjele logoa u nekoliko bit ravni i umetanje u sliku**

Ako se posmatrana slika označi sa  $\mathbf{x}_w$ , umetanje logoa može se opisati sljedećom tabelom:

**Tabela 2: Procedura umetanja logoa**

---

```

 $k \in 1, \dots, B$ 
. for  $i=1:M$ 
.   for  $j=1:N$ 
.     if  $W_k(i,j)=1$  then
.        $x(i,j)=W_k(i,j)$ 
.     else
.        $x(i,j)=x(i,j)$ 
.     end if
.   end for
. end for

```

---

Ekstrakcija watermarka se vrši na prijemnoj strani. U zavisnosti od vrste ataka kojem je izložena slika prilikom prenosa, ekstahovani logo će biti u izvjesnoj mjeri degradiran. Iz primljenog logo-a treba izvući serijski broj, kako bi se detektovao uređaj koji je snimio primljenu sliku. Imajući u vidu da je logo sastavljen od 4 manja logoa koja su smještena u uglovima slike, 4 serijska broja će biti izdvojena na prijemnoj strani – po jedan serijski broj iz svakog ugla slike. Ukoliko se makar jedan izdvojeni serijski broj pokalapa sa umetnutim originalnim serijskim brojem, može se reći da je uspješno detektovan izvor koji je snimio posmatranu sliku.

Procedura ekstrakcije logoa opisana je u Tabeli 3.

**Tabela 3: Procedura za ekstrakciju logoa**

---

```

 $k \in 1, \dots, B$ 
. for  $i=1:M$ 
.   for  $j=1:N$ 
.     if  $W(i,j)=1$  and  $\omega_{k-1} < \Re(i,j) < \omega_k$ 
.       then
.          $W_k^{ext}(i,j) = W_k(i,j)$ 
.       else
.          $W_k^{ext}(i,j) = 0$ 
.       end if
.   end for
. end for

```

---

Ekstrakcija logoa se ne može izvršiti ukoliko je matrica  $\mathfrak{R}$  nepoznata. Za uspješnu ekstrakciju treba da budu poznate i granične vrijednosti pojedinih slojeva (granice intervala) kao i redni brojevi bit ravni koje su odabrane za umetanje djelova logoa. Svi ovi stepeni zaštite omogućavaju robustnost watermarking procedure na CS atak, što će biti eksperimentalno pokazano u poglavlju 5.3.

### ***5.3.1 Kompresivno odabiranje kao atak na watermarkiranu sliku***

Posebna pažnja u radu je posvećena kompresivnom odabiranju kao ataku na posmatranu watermarkiranu sliku. Imajući u vidu da je u Glavi 4 testirana mogućnost optimizacije procedure, tj. rekonstrukcije slike iz malog broja mjerenja, od interesa je da predložena watermarking procedura bude robustna na CS atak.

Nakon umetanja serijskog broja, za prenos se bira samo određeni dio koeficijenata watermarkirane slike. Selekcija se vrši slučajnim putem a na prijemu se primjenjuje rekonstrukcioni algoritam. Cilj je dobiti sliku što je moguće boljeg kvaliteta. Naime, slika nakon rekonstrukcije biva dalje obrađivanja zbog:

- Brojanja insekata koji su uhvaćeni na ljepljivoj traci;
- Izdvajanja serijskog broja iz posmatrane slike.

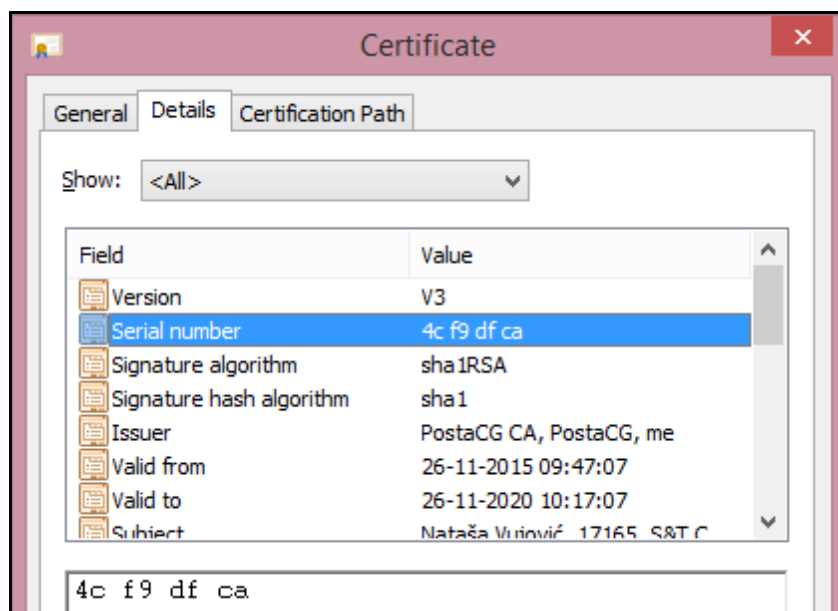
Brojanje insekata na osnovu primljene slike vrši se specijalizovanim algoritmima za brojanje. Stoga je očuvanje kvaliteta slike veoma važno, kako ne bi dolazilo do greški u brojanju, dok je tačna ekstrakcija serijskog broja važna zbog određivanja uređaja, tj. kamere koja je snimila posmatranu sliku.

### 5.3 Eksperimentalni rezultati

U nastavku je dat primjer umetnja serijskog broja u sliku snimljenu TrapView kamerom. Podsjetimo se, serijski broj predstavlja dio digitalnog sertifikata, a izgled digitalnog sertifikata je dat na slici 5.4.

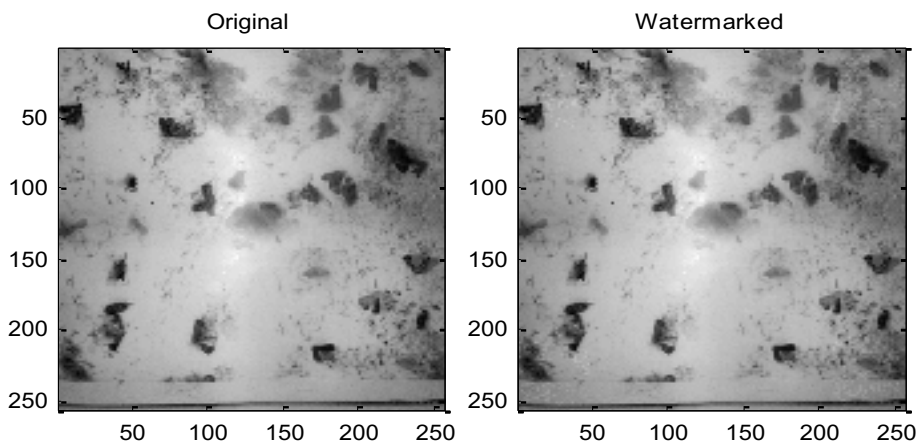
Posmatran je serijski broj u heksadecimalnom obliku: 4C F9 DF CA. Prvi korak je konverzija u binarni oblik. Nakon konverzije dobijena je sljedeća sekvenca: 0100 1100 1111 1001 1101 1111 1100 1010.

U narednom koraku se od svakog bita sekvence formira matrica (kao što je ilustrovano na slici 5.2a) i dobija se logo. Zatim se logo ponavlja 4 puta (slika 5.2b), prije nego što se umetne u 4 bit ravni. Pikseli slike se predstavljaju sa 8 bita, pa je dostupno ukupno 8 bit ravni. Granične vrijednosti za pojedine slojeve definisane su matricom  $\mathfrak{R}$ , koja mora biti poznata na prijemnoj strani. Originalna i watermarkirana slika prikazane su na slici 5.5.



Slika 5. 4: Izgled digitalnog sertifikata sa detaljima vezanim za serijski broj

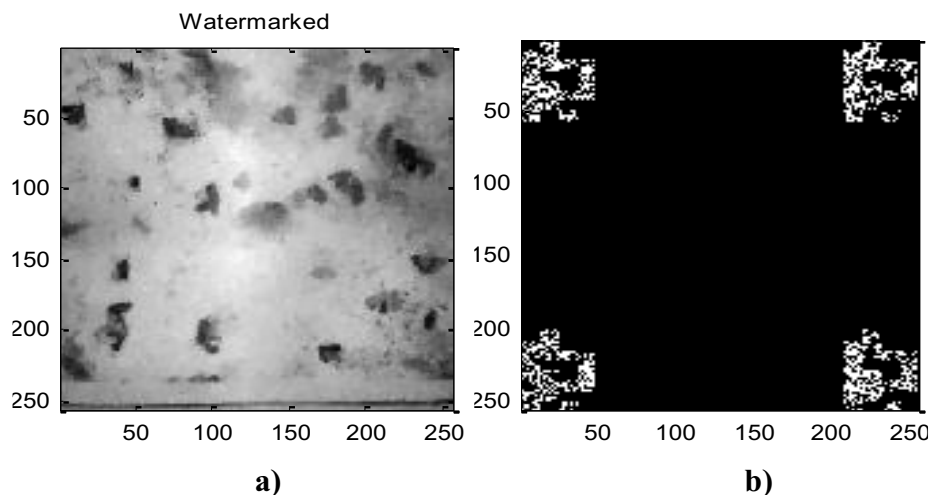




**Slika 5. 5: Originalna i watermarkirana slika**

Kao što je moguće primijetiti posmatranjem slike 5.5, watermark ne narušava kvalitet fotografije. U cilju smanjenja količine informacije koja se šalje na TrapView platformu, i povećanja brzine rada aplikacije, šalje se samo 21% slučajno odabranih koeficijenata watermarkirane slike. Rekonstrukcija slike na prijemnoj strani zasnovana je na TV-minimizaciji. Nakon rekonstrukcije ekstrahuje se logo a zatim i serijski broj. Rekonstruisana slika prikazana je na slici 5.6a a izvučeni logo prikazan je na slici 5.6b.

Osim vizuelnog poređenja originalne i rekonstruisane slike, kao mjera kvaliteta slike računat je i *peak signal to noise ratio* (PSNR) za rekonstruisanu sliku. Dobijena je vrijednost od 30.0082 dB, pa je i numerički pokazano da rekonstrukcija daje zadovoljavajuće rezultate. Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da CS atak neće uticati na tačnost brojanja insekata. Što se tiče detekcije serijskog broja, ona se vrši na osnovu logoa ekstrahovanog iz rekonstruisane slike. Ekstrahovani logo prikazan je na slici 5.6b. Kao što se vidi, logo je u određenoj mjeri oštećen. Znajući da jedan bit serijskog broja formira matricu veličine  $n \times 4m$ , brojanjem nula i jedinica u toj matrici dolazi se do zaključka da li je posmatrani bit serijskog broja jednak nuli ili jedinici. Naime, ukoliko je izbrojeno više nula nego jedinica, uzima se da je taj bit serijskog broja jednak nuli, a ukoliko je izbrojano više jedinica, uzima se da je posmatrani bit serijskog broja jednak jedinici.











**Slika 5. 6: a) Slika rekonstruisana korišćenjem 21% od ukupnog broja koeficijenata slike; b) logo ekstrahovan iz slike prikazane na slici 5.6 a)**

Ekstrakcija serijskog broja se vrši 4 puta, imajući u vidu da je isti logo umetnut u 4 ivice slike. Serijski broj se provjerava 4 puta, i ako makar jednom imamo poklapanje sa originalnim serijskim brojem onda je identifikacija uređaja (tj. kamere koja je snimila sliku) uspješna. U našem slučaju smo dobili tačno poklapanje za sva 4 izdvojena serijska broja.

Važno je napomenuti da je procenat uzetih mjerenja, 21%, ujedno i najmanji mogući procenat koji je neophodan da bi se slika mogla uspješno rekonstruisati a da se sačuva watermark. Ovo nije bio slučaj kod slike koja nije watermarkirana, već se uspješna rekonstrukcija mogla dobiti i za mnogo manji procenat mjerenja (oko 3%).

Osim kompresivnog odabiranja, robustnost predložene procedure testirana je korišćenjem uobičajenih ataka koji se javljaju u realnim aplikacijama. Testirana je uspješnost ekstrakcije serijskog broja, a rezultati su prikazani u Tabeli 4.

**Tabela 4: Rezultati ekstrakcije logoa i serijskog broja za različite tipove ataka na sliku**

| <i>Atak</i>                      | <i>Gausov šum</i>   | <i>Impulsni šum</i>  |
|----------------------------------|---|--|
| <i>Detektovani logo</i>          |    |    |
| <i>Detektovani serijski broj</i> | Detektovana sva 4 serijska broja  | Detektovana sva 4 serijska broja   |
|                                  | PSNR=10.1167 Db   | 40% koeficijenta slike je zahvaćeno šumom  |
| <i>Atak</i>                      | <i>JPEG kompresija, faktor kvaliteta = 10</i>                                       | <i>CS atak, 21% odbiraka je dostupno</i>   |
| <i>Detektovani logo</i>          |    |    |
| <i>Detektovani serijski broj</i> | Detektovana sva 4 serijska broja  | Detektovana sva 4 serijska broja   |
| <i>Atak</i>                      | <i>Posvjetljavanje slike (80%)</i>  | <i>Potamnivanje slike</i>  |
| <i>Detektovani logo</i>          |  |  |
| <i>Detektovani serijski broj</i> | Detektovana sva 4 serijska broja  | Detektovana sva 4 serijska broja   |
| <i>Atak</i>                      | <i>Filtriranje medijan filtrom</i>  | <i>Zamućenje slike</i>   |
| <i>Detektovani logo</i>          |  |  |
| <i>Detektovani serijski broj</i> | Detektovana sva 4 serijska broja  | Detektovana sva 4 serijska broja   |

## 6. Zaključak

Rad se bavi primjenom pristupa kompresivnog odabiranja u sistemu za monitoring štetočina. Naime, TrapView je automatizovani sistem za monitoring štetočina u poljima i vinogradima, koji može imati i do 1000 klopki. Svaka klopka je opremljena kamerom koja snimljene slike šalje na dalju obradu čiji je cilj prebrojavanje zarobljenih insekata. Ukoliko je broj zarobljenih insekata veliki, zamka se mora zamijeniti. Međutim, snimljene slike su relativno velike, veličine oko 2MB, što na godišnjem nivou zahtijeva memoriji i do 1 TB za skladištenje ovih podataka. Takođe, slanje ovih slika komunikacionim kanalom zahtijeva veliki protok i relativno dosta vremena za prenos. Primjenom kompresivnog odabiranja i algoritama za rekonstrukciju signala iz značajno manje dostupnih piksela nego što je to bio slučaj sa tradicionalnim metodama, pokazano je da je moguće postići zadovoljavajući kvalitet slike na primjenu uz značajnu uštedu memorijskih resursa i smanjeno vrijeme prenosa. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je optimizacijom snimljenih fotografija prije nego se one pošalju mobilnom mrežom na TrapView platformu, moguće smanjenja troškova skladištenja do 30 puta kao i višestruko povećanja brzine rada TrapView aplikacije jer se vrši 100% uspješna analiza na rekonstruisanim slikama koje su umanjene na minimalnih 3% veličine originalne slike.

Osim analize mogućnosti rekonstrukcije slika iz malog broja uzoraka, posmatrane slike su zaštićene umetanjem watermark-a u vidu logoa. Logo slika je dobijena hexadecimalnom derivacijom jedinstvenog 8-cifrenog serijskog broja PKI digitalnog sertifikata, dodijeljenog svakom pojedinačnom izvoru. Testirana je mogućnost detekcije logo slike a onda i jedinstvenog 8-cifrenog serijskog broja nakon što je slika podvrgnuta selekciji piksela a zatim rekonstrukciji iz selektovanih uzoraka primjenom pristupa kompresivnog odabiranja. Vršena je selekcija bit ravni u koje se umeće watermark. Izbjegnuto je umetanje logoa u najniže bit ravni u cilju bolje robusnosti. Umetanje u najviše bit ravni može dovesti do perceptualno vidljivog logo-a, pa se odabir srednjih bit ravni pokazao optimalnim. Nad ovako modifikovanom slikom sa watermark logom je

izvršen CS atak, i na rekonstrukciju je poslat samo 21% uzorak, a kao rezultat logo slika a samim tim i jedinstveni 8-cifreni serijski broj je uspješno očitano.

Osim vizuelnog i aplikativnog poređenja originalne i rekonstruisane slike, kao mjera kvaliteta slike računat je i *peak signal to noise ratio* (PSNR) za rekonstruisanu sliku. Dobijene su vrijednosti od preko 30 dB što je pokazalo da rekonstrukcija daje zadovoljavajuće rezultate.

Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da CS atak neće uticati na tačnost rada TrapView aplikacije prilikom računanja koncentracije insekata niti da će narušiti process detekcije watermark-a koji može poslužiti za dokazivanje vlasništva nad digitalnim sadržajem. CS i watermark zaštita su veoma efikasne metode optimizacije i identifikacije video materijala koji se obrađuje, uprkos višestruko redukovanom broju mjerenja. Stalni napredak procesorske tehnologije donijeće ovim metodama sve veću pristupačnost i upotrebljivost u širokoj praksi.

## Literatura

- [1] E. J. Candes, and M. B. Wakin, "An Introduction to Compressive Sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 21, 30, March 2008.
- [2] A. Majumdar „Compressed sensing for engineers“, CRC Press, Published November 30, 2018, 292 Pages International Standard Book Number-13: 978-0-8153-6556-3 (Hardback)
- [3] S. Stanković, I. Orović, E. Sejdić, *Multimedia Signals and Systems: Basic and Advance Algorithms for Signal Processing*, Springer-Verlag, New York, 2015.
- [4] Y. C. Eldar, G. Kutyniok, "Compressed Sensing: Theory and Applications", Cambridge University Press, May 2012.
- [5] R. Baraniuk, "Compressive Sensing", *Lecture Notes in IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, July 2007.
- [6] L. Stankovic, I. Orovic, S. Stankovic, M. Amin, "Compressive Sensing Based Separation of Non-Stationary and Stationary Signals Overlapping in Time-Frequency," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 18, pp. 4562-4572, September 2013.
- [7] L. Stankovic, S. Stankovic, I. Orovic, M. Amin, "Robust Time Frequency Analysis based on the L-estimation and Compressive Sensing," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 499- 502, 2013.
- [8] D. Angelosante, G.B. Giannakis, E. Grossi, "Compressed sensing of time-varying signals," *16th International Conference on Digital Signal Processing*, pp.1-8, July 2009.
- [9] S. Stankovic, LJ. Stankovic, I. Orovic, "L-statistics combined with compressive sensing," *SPIE Defense, Security and Sensing*, Baltimore, Maryland, United States, 2013.
- [10] S. Stankovic, I. Orovic, M. Amin, "Compressed Sensing Based Robust Time-Frequency Representation for Signals in Heavy-Tailed Noise," *Information Sciences, Signal Processing and their Applications, ISSPA 2012*, Canada, 2012.
- [11] I. Orovic, S. Stankovic, M. Amin, "Compressive Sensing for Sparse Time-Frequency Representation of Nonstationary Signals in the Presence of Impulsive Noise," *SPIE Defense*, vol. 8717, United States, 2013.
- [12] E. Sejdic, A. Cam, L.F. Chaparro, C.M. Steele, T. Chau, "Compressive sampling of swallowing accelerometry signals using time-frequency dictionaries based on modulated discrete prolate spheroidal sequences", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012:101.
- [13] I. Orovic, A. Draganic, S. Stankovic, "Sparse Time-Frequency Representation for Signals with Fast Varying Instantaneous Frequency," *IET Radar, Sonar & Navigation*, Online ISSN 1751-8792, Available online: 20 August, 2015.
- [14] R. Monteiro, and I. Adler, "Interior path following primal-dual algorithms. Part I: Linear programming, *Mathematical Programming*," 44 (1989), pp. 27–41.
- [15] I. Orovic, S. Stankovic, T. Thayaparan, "Time-Frequency Based Instantaneous Frequency Estimation of Sparse Signals from an Incomplete Set of Samples," *IET Signal Processing, Special issue on Compressive Sensing and Robust Transforms*, volume:8, issue: 3, pp. 239 - 245, ISSN: 1751-9675, May, 2014.
- [16] S. Stankovic, LJ. Stankovic, I. Orovic, "Relationship between the Robust Statistics Theory and Sparse Compressive Sensed Signals Reconstruction," *IET Signal Processing, Special issue on Compressive Sensing and Robust Transforms*, volume:8, issue: 3, pp. 223 - 229, ISSN: 1751-9675, May, 2014.
- [17] LJ. Stankovic, S. Stankovic, I. Orovic, M. Amin, "Robust Time-Frequency Analysis based on the L-estimation and Compressive Sensing," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 499-502, 2013.
- [18] P. Boyd, L. Vandenberghe, "Convex Optimization," Cambridge University Press, March 8, 2004 - Business & Economics - 716 pages.
- [19] S. Vujović, A. Draganic, M. Lakičević, I. Orović, M. Daković, M. Beko, S. Stanković, "Sparse Analyzer Tool for Biomedical Signals," *Sensors*, 20(9), 2602.

- [20] S. Stankovic, I. Orovic, M. Amin, "L-statistics based Modification of Reconstruction Algorithms for Compressive Sensing in the Presence of Impulse Noise," *Signal Processing*, vol.93, no.11, pp. 2927-2931, 2013.
- [21] A. Draganic, M. Brajovic, I. Orovic, S. Stankovic, "A Software Tool for Compressive Sensing based Time-Frequency Analysis," *57th International Symposium*, ELMAR-2015, Zadar, 2015.
- [22] E. Candes, J. Romberg, "11-magic: Recovery of Sparse Signals via Convex Programming", October 2005.
- [23] S. Zukovic, M. Medenica, A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, "A Virtual Instrument for Compressive Sensing of Multimedia Signals," *56th International Symposium ELMAR 2014*, Zadar, Croatia, 2014
- [24] M.A. Davenport, P.T. Boufounos, M.B. Wakin, R.G. Baraniuk, "Signal Processing With Compressive Measurements", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 4(2): 445 – 460, 2010.
- [25] A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, "Blind Signals Separation in wireless communications based on Compressive Sensing," *22nd Telecommunications Forum*, TELFOR, 2014.
- [26] I. Orovic, S. Stankovic, "Improved Higher Order Robust Distributions based on Compressive Sensing Reconstruction," *IET Signal Processing*, volume:8, issue: 7, pp. 738 - 748, ISSN : 1751-9675, May, 2014.
- [27] T. Zhang, "Sparse Recovery with Orthogonal Matching Pursuit Under RIP," *IEEE Transactions on Information Theory*, 57(9), 2011, pp. 6215-6221.
- [28] T. Blumensath, M. Davies, "Iterative hard thresholding for compressed sensing", *Appl. Comput. Harmon. Anal.* 27(3), 265–274.
- [29] J. Wang, S. Kwon, B. Shim, "Generalized orthogonal matching pursuit", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 12, pp. 6202 – 6216, 2012
- [30] G. Huang, L. Wang, "Soft-thresholding orthogonal matching pursuit for efficient signal reconstruction", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2013, pp. 2543 -2547.
- [31] D. L. Donoho, I. Drori, Y. T. Saig, J. L. Starck. "Sparse Solution of Underdetermined Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit" [R]. Stanford University, 2006.
- [32] J. A. Tropp, "Greed is good: algorithmic results for sparse approximation," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.50, no.10, pp.2231-2242, October 2004.
- [33] M. Davenport and M. Wakin, "Analysis of orthogonal matching pursuit using the restricted isometry property", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 9, pp.4395 -4401, 2010.
- [34] G. Pope, "Compressive Sensing: a Summary of Reconstruction Algorithms", Eidgenossische Technische Hochschule, Zurich, Switzerland, 2008;
- [35] M. A. Davenport, and M. B. Wakin, "Analysis of Orthogonal Matching Pursuit Using the Restricted Isometry Property," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.56, no.9, pp. 4395-4401, September 2010.
- [36] S. Stankovic, I. Orovic, LJ. Stankovic, A. Draganic, "Single-Iteration Algorithm for Compressive Sensing Reconstruction," *Telfor Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 36-41, 2014
- [37] LJ. Stanković, M. Daković, S. Vujović, "Adaptive Variable Step Algorithm for Missing Samples Recovery in Sparse Signals," *IET Signal Processing*, vol. 8, no. 3, pp. 246 -256, 2014.
- [38] S. Vujovic, M. Dakovic, I. Orovic, S. Stankovic, "An Architecture for Hardware Realization of Compressive Sensing Gradient Algorithm," *4th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO - 2015*, Budva, Montenegro, 2015.
- [39] S. Bahmani, "Algorithms for Sparsity-Constrained Optimization", Springer Theses, Series Volume 261, ISBN 978-3-319-01880-5, 2014. M.
- [40] A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, X. Li, Z. Wang, " An approach to classification and under-sampling of the interfering wireless signals," *Microprocessors and Microsystems*, Volume 51, June 2017, Pages 106-113.
- [41] J. Music, T. Marasovic, V. Papic, I. Orovic, S. Stankovic, "Performance of compressive sensing image reconstruction for search and rescue," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Volume: 13, Issue: 11, pp. 1739 - 1743, Nov. 2016.
- [42] T. Blumensath, and M. E. Davies, "Gradient Pursuits," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.56, no.6, pp.2370-2382, June 2008.

- [43] M. Brajovic, I. Orovic, M. Dakovic, S. Stankovic, "Gradient-based signal reconstruction algorithm in the Hermite transform domain," *Electronic Letters*, 2015.
- [44] T. Blumensath, and M. E. Davies, "Iterative Thresholding for Sparse Approximations," *Journal of Fourier Analysis and Applications*, vol. 14, no. 5-6, pp 629-654, December 2008.
- [45] J. M. Boiucas-Dias, and M. A. T. Figueiredo, "A New TwIST: Two-Step Iterative Shrinkage/Thresholding Algorithms for Image Restoration," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 16, December 2007.
- [46] E.J. Candes, J. Romberg, T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.52, no.2, pp. 489-509, 2006.
- [47] LJ. Stankovic, M. Dakovic, S. Stankovic, I. Orovic, "Sparse Signal Processing," in the Book: *Digital Signal Processing*, L. Stankovic, CreateSpace, Amazon, 2015, 2015
- [48] S. Stankovic, I. Orovic, L. Stankovic, "An Automated Signal Reconstruction Method based on Analysis of Compressive Sensed Signals in Noisy Environment," *Signal Processing*, vol. 104, pp. 43 - 50, 2014.
- [49] R. Chartrand, "Exact reconstructions of sparse signals via nonconvex minimization". *IEEE Signal Processing Letters*, 14(10): 707-710, 2007
- [50] I. Orovic, A. Draganic, N. Lekic, S. Stankovic, "A System for Compressive Sensing Signal Reconstruction," *17th IEEE International Conference on Smart Technologies*, IEEE EUROCON 2017, 6th-8th July 2017, Ohrid, Macedonia, 2017.
- [51] E. J. Candes, and T. Tao, "Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies?," *IEEE Transactions on Information Theory* 52(12), 5406-5425 (2006).
- [52] A. Draganic, I. Orovic, N. Lekic, M. Dakovic, S. Stankovic, "Architecture for Single Iteration Reconstruction Algorithm," *4th Mediterranean Conference on Embedded Computing*, MECO 2015, 2015.
- [53] M. A. T. Figueiredo, R. D. Nowak, S. J. Wright, "Gradient Projection for Sparse Reconstruction: Application to Compressed Sensing and Other Inverse Problems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol.1, no.4, pp.586-597, Dec. 2007.
- [54] L. Stankovic, S. Stankovic, and M. Amin, "Missing Samples Analysis in Signals for Applications to L-estimation and Compressive Sensing," *Signal Processing*, 94: 401-408, 2014.
- [55] J. Romberg, "Imaging via Compressive Sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, March 2008.
- [56] L. Rudin, S. Osher, E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms", *Physica D*, 60:259-268, 1992.
- [57] M. Lustig, D. L. Donoho, J. M. Santos, and J. M. Pauly, "Compressed Sensing MRI," *IEEE Signal Processing Magazine*, March 2008.
- [58] A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, X. Li, "ISAR Reconstruction from Incomplete Data using Total Variation Optimization," *5th Mediterranean Conference on Embedded Computing*, (MECO 2016), 2016.
- [59] M. Medenica, S. Zukovic, A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, "Comparison of the algorithms for CS image reconstruction," *Informacione tehnologije IT 2014*, Zabljak, 2014.
- [60] S. Stankovic, I. Orovic, "An Approach to 2D Signals Recovering in Compressive Sensing Context," *Circuits, Systems & Signal Processing*, Volume 36, Issue 4, pp. 1700-1713, April 2017.
- [61] LJ. Stanković, M. Daković, and S. Vujović, "Adaptive Variable Step Algorithm for Missing Samples Recovery in Sparse Signals," *IET Signal Processing*, vol. 8, no. 3, pp. 246 -256, 2014.
- [62] A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, "On some common compressive sensing recovery algorithms and applications - Review paper," *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, Vol 30, No 4, pp. 477-510, 2017.
- [63] A.C. Gurbuz, J.H. McClellan, W. R. Scott, "A Compressive Sensing Data Acquisition and Imaging Method for Stepped Frequency GPRs," *IEEE Trans. Geosc. and Rem. Sens.*, vol. 57. no. 7, pp. 2640-2650, 2009.
- [64] N. Lekić, M. Lakičević, I. Orović, S. Stanković, "Adaptive gradient-based analog hardware architecture for 2D under-sampled signals reconstruction," *Microprocessors and Microsystems*, Volume 62, October 2018, Pages 72-78.
- [65] M. Duarte, M. Davenport, D. Takhar, J. Laska, T. Sun, K. Kelly, R. Baraniuk "Single-pixel imaging via compressive sampling", *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2): 83 - 91, 2008.



- [66] J. Wen, Z. Chen, Y. Han, J. D. Villasenor, S. Yang, "A compressive sensing image compression algorithm using quantized DCT and noiselet information," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, 2010, pp. 1294-1297.
- [67] I. Stankovic, I. Orovic, S. Stankovic, "Image Reconstruction from a Reduced Set of Pixels using a Simplified Gradient Algorithm," *22nd Telecommunications Forum TELFOR 2014*, Belgrade, 2014.
- [68] L. C. Potter, E. Ertin, J. T. Parker, M. Cetin, "Sparsity and Compressed Sensing in Radar Imaging," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no.6, pp.1006-1020, June 2010.
- [69] J. M. Boiucas-Dias, M. A. T. Figueiredo, "A New TwIST: Two-Step Iterative Shrinkage/Thresholding Algorithms for Image Restoration," *IEEE Trans. on Image Proc.*, vol. 16, No 12, pp. 2992 – 3004, November 2007.
- [70] A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic, X. Zhang, X. Wang, "Compressive Sensing Approach in the Table Grape Cold Chain Logistics," *6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017*, Bar, Montenegro, 2017.
- [71] M. Lustig, D. L. Donoho, J. M. Santos, J. M. Pauly, "Compressed Sensing MRI," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no 2, pp. 72-82, March 2008.
- [72] M. Lustig, D. Donoho, J. M. Pauly, "Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging", *Magnetic Resonance in Medicine*, vol. 58, no.6, pp. 1182 - 1195, 2007.
- [73] H. Yu, G. Wang, "Compressed sensing based interior tomography", *Physics in Medicine and Biology*, vol. 54, 2009, pp. 2791–2805.
- [74] G. Voyatzis, N. Nikolaidis, I. Pitas, "Digital watermarking: An overview," *Proceedings of European Signal Processing Conference EUSIPCO*, Rhode, Greece, Sept. 1998, pp. 9-12.
- [75] I. Orovic, A. Draganic, S. Stankovic, "Compressive Sensing as a Watermarking Attack," *21st Telecommunications Forum TELFOR 2013*, Novembar, 2013.
- [76] F. Hartung, M. Kutter, "Multimedia Watermarking Techniques," *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 7, pp. 1079-1107, July 1999.
- [77] S. Stankovic, I. Orovic, B. Mobasseri, M. Chabert, "A Robust Procedure for Image Watermarking based on the Hermite Projection Method," *Automatika - Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, vol 53, no 4, Nov. 2012.
- [78] S. Stankovic, I. Orovic, M. Chabert, B. Mobasseri, "Image Watermarking based on the Space/Spatial-Frequency Analysis and Hermite Functions Expansion," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 22, no. 1, 013014, 2013.
- [79] D. Kirovski and H. Malvar, "Spread-spectrum Watermarking of Audio Signals," *IEEE Trans. On Signal Processing*, vol. 51, No 4, April 2003.
- [80] I. Orovic, M. Orlandic, S. Stankovic, "An Image Watermarking Based on the pdf Modeling and Quantization Effects in the Wavelet Domain," *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1-17, 2012.
- [81] I. J. Cox, M. L. Miller, J. A. Bloom, Digital Watermarking. Academic Press, 2002.
- [82] J. R. Hernandez, M. Amado, F. Perez Gonzeles, "DCT-domain watermarking techniques for still images: Detector performance analysis and a new structure," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, no 1, pp. 55-68, 2000.
- [83] B. G. Mobaseri, "Digital watermarking in the joint time-frequency domain," *IEEE International Conference on Image Processing*, New York, vol. 3, pp. 481-484, September 2002.
- [84] S. Stankovic, I. Orovic, N. Zaric, C. Ioana, "Two Dimensional Time-Frequency Analysis based Eigenvalue Decomposition Applied to Image Watermarking," *Multimedia Tools and Applications*, Vol.49, No. 3, pp. 529-543, 2010.
- [85] N. Zaric, I. Orovic, S. Stankovic, "Singular Value Decomposition And Space/Spatial-Frequency Analysis Applied To Digital Watermarking," *Proc. Of the 20th European Signal Processing Conference EUSIPCO-2012*, Vol. 2012, pp.1698-1702, 2012.
- [86] S. Stankovic, P. Zogovic, "An application of pdf statistics to optimal watermark detection," *IEEE ISSPIT Conference*, Darmstadt, 2003.
- [87] I. Djurovic, S. Stankovic, I. Pitas, "Digital watermarking in the fractional Fourier domain," *Journal of Network and Computer Applications*, Academic Press, Vol.24, No.2,pp.167-173, 2001.
- [88] S. Stankovic, I. Djurovic, R. Herpers, L.J. Stankovic, "An approach to the optimal watermark detection," *AEUE International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 57, No. 5, pp. 355-357, 2003.

- [89] E. Muharemagić, B. Furht, Survey of watermarking techniques and applications. Chapter in Multimedia Watermarking Techniques and Applications, B. Furht and D. Kirovski, editor, Auerbach Publication, pp. 91-130, 2006.
- [90] S. Stankovic, I. Orovic, N. Zaric, "Robust watermarking procedure based on JPEG-DCT image compression," *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 17, No. 4, Page(s) 043001, 2008.
- [91] L. Le, S. Krishnan, "Time-Frequency Signal Synthesis and Its Application in Multimedia Watermark Detection," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006.
- [92] S. Stankovic, "Time-Frequency Analysis and its Application in Digital Watermarking," *Review paper, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Special Issue on Time-Frequency Analysis and its Application to Multimedia signals*, Vol. 2010, Article ID 579295, 20 pages, 2010
- [93] S. Stankovic, I. Orovic, N. Zaric, "An Application of Multidimensional Time-Frequency Analysis as a base for the Unified Watermarking Approach," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 1, No. 3, pp.736-745, 2010.
- [94] M. Al-khassaweneh and S. Aviyente, "A time-frequency inspired robust image watermarking," in *IEEE Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference*, 2004, vol. 1, pp. 392-396.
- [95] J. R. Hernandez, M. Amado, F. Perez Gonzales, "DCT-domain watermarking techniques for still images: Detector performance analysis and a new structure," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 9, pp. 55-68, Jan. 2000.
- [96] S. Stankovic, I. Djurovic, I. Pitas, "Watermarking in the space/spatial-frequency domain using two-dimensional Radon Wigner distribution," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol.10, No.4, pp.650-658, 2001.
- [97] M. Orlandic, I. Orovic, S. Stankovic, "An image watermarking technique with optimal detection in the Wavelet domain," *ETRAN 2009*, Vrnjacka Banja, Serbia, 2009.
- [98] I. Orovic, P. Zogovic, N. Zaric, S. Stankovic, "Speech Signals Protection via Logo Watermarking based on the Time-Frequency Analysis," *Annals of Telecommunication*, Vol. 63, No. 5-6, pp. 276-284, 2008.
- [99] S. Stankovic, I. Orovic, N. Zaric, "Robust speech watermarking procedure in the time-frequency domain," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2008, No. ID 519206, Page(s) 9 pages, 2008.
- [100] I. Orovic, S. Stankovic, "Compressive Sampling and Image Watermarking," *55th International Symposium ELMAR 2013*, Zadar, Croatia, Sept. 2013.
- [101] G. Hua, Y. Hiang, G. Bi, "When Compressive Sensing meets Data Hiding", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 23, No. 4, April 2016.
- [102] P. Flandrin, P. Borgnat, "Time-Frequency Energy Distributions Meet Compressed Sensing", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 8(6): 2974-2982, 2010.
- [103] M. Orovic, T. Pejakovic, A. Draganic, S. Stankovic, "MRI watermarking in the Compressive Sensing context," *57th International Symposium ELMAR-2015*, Zadar, Croatia.
- [104] M. Wu, B. Liu, "Data Hiding in Binary Image for Authentication and Annotation," *IEEE Transaction on Multimedia*, vol.6, pp. 528-538, 2004.
- [105] B. G. Mobaseri, "Digital watermarking in the joint time-frequency domain," *IEEE International Conference on Image Processing*, New York, vol. 3, pp. 481-484, September 2002.
- [106] I. Orovic, N. Zaric, S. Stankovic, "An Analysis of Quantization Influence on Optimal Detection of Multiplicative Watermark," *55th International Symposium ELMAR 2013*, Zadar, Croatia, Sept. 2013.
- [107] <http://www.trapview.com>.
- [108] A. Draganic, M. Maric, I. Orovic, S. Stankovic, "Identification of Image Source Using Serial Number Based Watermarking under Compressive Sensing Conditions," *40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, MIPRO 2017.
- [109] M. Maric, I. Orovic, S. Stankovic, "Compressive Sensing based image processing in TrapView pest monitoring system," *39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, (MIPRO 2016), 2016.