

Zaštita vlasništva reproducirane slike umetanjem digitalnog vodenog žiga

Poljićak, Ante

Doctoral thesis / Doktorski rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:482417>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

ANTE POLJIČAK

ZAŠTITA VLASNIŠTVA
REPRODUCIRANE SLIKE UMETANJEM
DIGITALNOG VODENOG ŽIGA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2011.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF GRAPHIC ARTS

ANTE POLJIČAK

COPYRIGHT PROTECTION OF A
REPRODUCED IMAGE WITH THE
IMPLEMENTATION OF A DIGITAL
WATERMARK

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2011.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

ANTE POLJIČAK

ZAŠTITA VLASNIŠTVA
REPRODUCIRANE SLIKE UMETANJEM
DIGITALNOG VODENOG ŽIGA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Lidija Mandić, doc.

Zagreb, 2011.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF GRAPHIC ARTS

ANTE POLJIČAK

COPYRIGHT PROTECTION OF A
REPRODUCED IMAGE WITH THE
IMPLEMENTATION OF A DIGITAL
WATERMARK

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Lidija Mandić, PhD

Zagreb, 2011.

UDK 655.3.026:004.932:347.78

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Grafička tehnologija
Institucija u kojoj je izrađen rad: Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet

Voditelj rada: doc. dr. sc. Lidija Mandić
Broj stranica: 139
Broj slika: 82
Broj tablica: 18
Broj literaturnih referenci: 72
Jezik teksta: Hrvatski
Jezik sažetka: Hrvatski i Engleski

Povjerenstvo za ocjenu i obranu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Darko Agić, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, predsjednik
2. doc. dr. sc. Lidija Mandić, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, mentorica
3. prof. dr. sc. Sonja Grgić, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, vanjska članica
4. prof. dr. sc. Miroslav Gojo, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, zamjenski član
5. prof. dr. sc. Mislav Grgić, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, zamjenski vanjski član

Datum obrane doktorske disertacije: 30. lipnja 2011.g.

Mjesto obrane doktorske disertacije: Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije donijelo je sljedeću odluku:

„Obranio – jednoglasnom odlukom Povjerenstva“

Rad je pohranjen u knjižnici Grafičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Getaldićeva 2, te u Nacionalnoj i Sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Hrvatske bratske zajednice bb.

Zagreb, 30. lipnja 2011.

Za strica Milu,
zbog bijelog lista papira.

Htio bih se zahvaliti svim ljudima koji su mi svojom pomoći omogućili da započnem put prema doktoratu i da ga uspješno završim. Veliko hvala mojoj mentorici Lidiji Mandić čija dobrota i strpljenje nemaju premca. Zahvaljujem Darku Agiću i Sonji Grgić koji su svojim komentarima uvelike doprinijeli kvaliteti ove disertacije. Hvala Ani Kešini koja je ovu disertaciju lektorirala. Zahvaljujem Maji Strgar-Kurečić i Krešimiru Dragčeviću koji su mi, svaki na svoj način, svakodnevnim razgovorima pomogli više no što misle. Osobito hvala Diani Milčić koja je imala volje pomoći mi kada drugi nisu.

Zahvaljujem svojoj majci Silvestri i ocu Tomislavu koji su me podupirali na početku mog školovanja, te sestri Elizabeti koja je tu podršku nastavila.

Najveće hvala mom stricu Mili koji me uputio prema doktorskom studiju i koji me svojim savjetima i svesrdnom pomoći stalno potiče da doživim nova iskustva i naučim nova znanja.

Ante Poljičak

SAŽETAK

U ovom doktorskom radu je razvijena metoda zaštite vlasništva slike umetanjem digitalnog vodenog žiga. S obzirom da je pristup zaštite otisnutih slika digitalnim vodenim žigom nedovoljno istražen, postojala je potreba da se razvije metoda zaštite prilagođena zahtjevima grafičke reprodukcije, prvenstveno neznatnom utjecaju na kvalitetu originalne slike prilikom označavanja, i snažnoj otpornosti na proces reprodukcije i naknadne digitalizacije.

Razvijena metoda zaštite vlasništva otisnutih proizvoda temeljena na digitalnom vodenom žigu predstavlja odmak od dosadašnjeg pristupa problemu zaštite. Naime, zaštita grafičkih proizvoda uglavnom se temeljila na primjeni posebnih tehnika i/ili materijala prilikom otišivanja. Suprotno tome, korištenje digitalnog vodenog žiga ne zahtjeva posebne tehnike tiska ili posebne materijale već se metoda zaštite temelji se na manipulaciji slike u njenom digitalnom obliku, prije digitalno-analogne konverzije.

U radu su definirani parametri vodenog žiga koji utječu na kvalitetu označene slike i provedeno je ispitivanje otpornosti vodenog žiga na najčešće oblike procesiranja koji se mogu pojaviti u reprodukcijском процесу. Ispitivanje je provedeno na bazi od 1000 različitih slika. Rezultati su pokazali da je metoda prilagođena potrebama grafičke reprodukcije jer se označavanjem ne narušava kvaliteta slike, a umetnuti vodeni žig je, osim na proces grafičke reprodukcije, otporan i na cijeli niz drugih oblika procesiranja kao što su kompresija, izrezivanje, filtriranje, šum, rotacija i skaliranje.

Ključne riječi: Digitalni vodeni žig, zaštita, autorska prava, slika, reprodukcija, PS proces

ABSTRACT

In this thesis the method of the copyright protection of printed images using a digital watermark is developed. Since the field of the copyright protection of printed images is not sufficiently researched, there existed a need to develop a method of protection adapted to the process of graphic reproduction in terms of quality of the watermarked image and the robustness of the watermark against graphic reproduction.

The developed method of copyright protection based on digital watermark represents one step ahead from the existing approaches. The protection of the printed products was usually based on utilization of special technics and/or special materials during reproduction. In contrast, a digital watermark does not require special printing technics or special materials. The method is based on the manipulation of an image in its digital form, before the digital-analog conversion.

In the thesis the parameters of the digital watermark that affect the quality of a printed image are defined. Also, the robustness of the digital watermark against the most common image processing attacks is determined. Tests were conducted on 1000 different images. The results show that the developed method is suitable for graphic reproduction since the quality of the watermarked image is very high and the watermark is very resistant against the different types of processing such are printing, compression, cropping, noise, rotation, and scaling.

Keywords: digital watermark, protection, copyright, image, reproduction, PS process

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Označavanje slika vodenim žigom | 5 |
| 2.1. Opći model označavanja slika vodenim žigom | 6 |
| 2.2. Podjela metoda za označavanje slika | 7 |
| 2.2.1. Označavanje slika u prostornoj domeni | 8 |
| 2.2.2. Označavanje slika u frekvencijskoj domeni | 10 |
| 2.3. Svojstva metode za označavanje slika | 10 |
| 2.4. Mogući oblici procesiranja unutar komunikacijskog kanala | 13 |
| 2.4.1 Geometrijske transformacije | 14 |
| 2.4.2. Izrezivanje | 16 |
| 2.4.3. Filtriranje | 16 |
| 2.4.4. JPEG kompresija | 19 |
| 2.4.4.1. Princip JPEG kompresije | 20 |
| 2.4.5. Rastriranje | 22 |
| 2.4.6. Print-Sken proces | 25 |
| 2.4.7. Print-Kam proces | 28 |
| 3. Fourierova Transformacija | 30 |
| 3.1. Jednodimenzionalna Fourierova transformacija | 32 |
| 3.2. Dvodimenzionalna diskretna Fourierova transformacija | 33 |
| 3.2.1. Spektar i faza | 34 |
| 3.3. Brza Fourierova transformacija - FFT | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Evaluacija metode za označavanje slika | 40 |
| 4.1. Baza testnih slika | 40 |
| 4.2. Evaluacija kvalitete označenih slika | 41 |
| 4.2.1. PSNR | 42 |
| 4.3. Evaluacija robusnosti metode za označavanje slika | 43 |
| 4.3.1. Greška I. vrste – KPD | 45 |
| 4.3.2. Greška II. vrste – KND | 47 |
| 4.3.3. ROC krivulje | 48 |
| 5. Eksperimentalni dio | 50 |
| 5.1. Metoda označavanja | 51 |
| 5.1.2. Generator pseudo-slučajnih brojeva | 51 |
| 5.1.3. Koder | 52 |
| 5.1.4. Dekoder | 55 |
| 5.2. Utjecaj parametara digitalnog vodenog žiga na kvalitetu označene slike. | 59 |
| 5.3. Modifikacija kodera s ciljem veće prilagodljivosti | 67 |
| 5.4. Metoda evaluacije | 69 |
| 6. Diskusija rezultata | 73 |
| 6.1. Označene i neoznačene slike | 73 |
| 6.2. Niskopojasni (<i>Blur</i>) filtar | 77 |
| 6.3. Izrezivanje | 81 |
| 6.4. JPEG kompresija | 84 |
| 6.5. Laplacov i <i>Unsharp</i> filtar | 87 |
| 6.6. Rotacija | 90 |
| 6.7. Skaliranje | 93 |
| 6.8. Šum | 96 |

| | |
|--|------------|
| 6.9. AM raster | 99 |
| 6.9.1. Kružni rasterski element | 99 |
| 6.9.2. Eliptični rasterski element | 103 |
| 6.9.3. Linijski rasterski element | 106 |
| 6.10. PS proces | 110 |
| 6.11. PK proces | 114 |
| 6.12. Usporedba s ostalim relevantnim metodama | 118 |
| 8. Zaključak | 121 |
| Bibliografija | 123 |
| Popis slika | 132 |
| Popis tablica | 138 |

1. UVOD

Stalni tehnološki napredak mijenja način života ljudi na svim razinama, od zabave i učenja do komunikacije i poslovanja. Današnja tehnologija omogućava brži i produktivniji rad, lakšu proizvodnju i razmjenu multimedijalnog sadržaja. Uz prednosti, današnja tehnologija ima i svoje nedostatke, jer omogućava vrlo jednostavno ilegalno umnožavanje te nezakonitu distribuciju digitalnih i tiskanih informacija. Stoga ne čudi da je gorući problem široka dostupnost informacija, sigurnost, autentičnost i autorska prava multimedijalnog sadržaja. Navedeni problemi su glavni motiv za izradu ovog doktorskog rada čiji je cilj razviti model zaštite tiskane informacije na način da se prije procesa tiska, dok je informacija još u digitalnom obliku, umetne digitalni vodeni žig otporan na degradaciju u procesu otiskivanja i naknadne digitalizacije.

Potreba da se povežu i unaprijede tehnike zaštite u digitalnom i analognom okruženju kako bi se razvila metoda koja omogućuje zaštitu otisnutih slika bez uporabe posebnih materijala ili tehnika pri reprodukciji glavni je motiv za pisanje ovog rada. Naime, metode zaštite digitalnih i tiskanih informacija su, zbog razlike u mediju, temeljene na različitim osnovama. Dok se zaštita digitalne informacije temelji na digitalnoj manipulaciji u kriptografskom i/ili steganografskom okviru, tiskana informacija se u pravilu štiti manipulacijom proizvodnog procesa u okviru specijalnih tehnika tiska i tiskarskih materijala. Kako je sam proces grafičke proizvodnje dobrim dijelom digitaliziran, te se većina tiskanih informacija u procesu grafičke proizvodnje, u jednom trenutku nalazi u digitalnom obliku, otvorena je mogućnost da se buduća tiskana informacija zaštititi metodama koje spadaju u domenu digitalne zaštite informacija. Jedini preduvjet koju takva vrsta zaštite mora imati je otpornost na degradaciju prilikom procesa tiska te naknadne digitalizacije otisnute informacije.

Digitalni vodeni žig kao metoda zaštite poznata je 1980-ih godina [1]. Vodeni žig obično sadržava informaciju kojom se dokazuje vlasništvo digitalnog signala, no može sadržavati i druge važne informacije. Zaštita se temelji na umetanju informacije u digitalni signal na na-

čin da ju je teško ukloniti. Iako digitalni signal može biti i audio ili video signal, pod pojmom „digitalni signal“, sa stajališta grafičke tehnologije podrazumijeva se slika. Ovisno o namjeni, digitalni vodeni žig može biti vidljiv ili nevidljiv. Ukoliko se digitalni signal označen digitalnim vodenim žigom umnoži, sve kopije će sadržavati i sam digitalni vodeni žig koji sadrži informaciju o vlasništvu digitalnog signala.

Rigoroznije istraživanje digitalnog vodenog žiga kao mogućeg elementa zaštite digitalnog signala intenzivirano je u zadnjih nekoliko godina. Istraživane teme uključuju generalni pregled problematike [2-8]. Izvrstan pregledni rad metoda za označavanje slika otpornih na rotaciju, translaciju i skaliranje napisali su Zheng i suradnici [9], dok Meerwald i Uhl [10] daju pregled algoritama koji koriste wavelet domenu.

Zheng i suradnici [11] razvili su metodu, baziranu na Fourierovoj transformaciji, otpornu na JPEG kompresiju, rotaciju i translaciju no slabo otpornu na skaliranje. Uz to, ta metoda je računalno zahtjevna pošto predloženi algoritam koristi logaritamsko-polarno mapiranje.

Cai i Du [12] predlažu metodu koja kombinira radon i Fourierovu transformaciju. U njihovom radu otpornost na geometrijske napade je ostvarena tako da se radon transformacijom originalne slike odrede fiksne koordinate - ishodište koje je invarijantno na rotaciju, translaciju i skaliranje. Najveći nedostatak ove metode je osrednja otpornost na translaciju.

Al-Haj [13] kombinira wavelet i kosinusnu transformaciju kako bi razvio metodu otpornu na JPEG kompresiju. Zahvaljujući svojstvima wavelet transformacije, ova metoda postiže vrlo dobre rezultate sa stajališta utjecaja označavanja na kvalitetu slike. Međutim, predložena metoda je nedovoljno otporna na rotaciju i izrezivanje.

Sa stajališta otpornosti na PS proces, dvije sposobnije metode su objavili Lin i suradnici [14] te Kang i suradnici [15]. Obje metode se baziraju na DFT te su vrlo otporne na geometrijske transformacije, s osnovnom razlikom što se kod metode u [15] koristi i log-polarnu transformaciju. Autori oba rada su proveli i ispitivanje otpornosti na PS process. Metoda u [14]

je samo donekle otporna na PS process. Metoda u [15] je vrlo otporna na PS proces i na cijeli niz drugih degradacija, međutim, glavni nedostatak je znatna računalna zahtjevnost.

Osim metoda baziranih na nekoj matematičkoj transformaciji, postoje i drugačiji pristupi problemu zaštite autorskih prava slika. Bulan i suradnici [16] ispituju mogućnost zaštite otisnutih slika modulacijom orijentacije rasterskih elemenata. Svoje istraživanje temelje na premissi da konvencionalne metode nisu dobre za zaštitu otisnutih slika, jer nisu prilagođene procesu tiska. Oni predlažu novi okvir zaštite, modulacijom orijentacije eliptičnog rasterskog elementa. Njihova metoda predstavlja vrlo dobro rješenje za označavanje slika koje se tiskaju amplitudno moduliranim rasterom. Nedostatak je što se slike označavaju prilikom rastriranja, te se metoda ne može koristiti za zaštitu digitalnih slika.

Postoji i pristup pri kojem se slika označava korištenjem matematički definiranih momenata slike koji posjeduju neka privlačna svojstva, kao invarijantnost na šum, rotaciju, itd. Ismail i suradnici [17] koriste moment dobiven mapiranjem vrijednosti elemenata slike na skup kompleksnih zernike polinoma. Prednost ove metode je mala računalna zahtjevnost i otpornost na rotaciju, translaciju, kompresiju i šum. Nedostatak ove metode, kao i drugih metoda koje se temelje na momentima slike, je velika osjetljivost na izrezivanje.

Kao glavne zapreke kod primjene postojećih metoda zaštite digitalnih slika pri zaštiti otisnutih slika, autori navode promjenu medija koji nosi slikovnu informaciju, te samu degradaciju prilikom procesu otiskivanja i naknadne digitalizacije. Valorizacijom postojećih metoda zaštite koje koriste digitalni vodeni žig u kontekstu njihove otpornosti na proces otiskivanja i naknadne digitalizacije, utvrđeno je da najviše potencijala nude metode zaštite koje rasprše (raspodjele) energiju digitalnog vodenog žiga po cijelom digitalnom signalu [16-19]. Takav pristup posjeduje inherentnu otpornost prema degradaciji koju unosi proces otiskivanja i naknadne digitalizacije koja proizlazi iz samih svojstava matematičke transformacije na kojoj se pristup i temelji. Najčešće korištene matematičke transformacije u metodama zaštite

digitalnim vodenim žigom su diskretna kosinusna transformacija (DCT), diskretna wavelet transformacija (DWT) te diskretna Furierova transformacija (DFT) [13].

Gotovo sva navedena istraživanja su provedena u polju informatičke tehnologije, baveći se uglavnom problemom zaštite slike u njezinom digitalnom obliku, samo se povremeno dotičući problema koji se javljaju prilikom procesa otiskivanja i naknadne digitalizacije. Stoga postoji opravdana potreba da se ovim metodama zaštite pristupi sa stajališta grafičke tehnologije. Ovdje se u prvom redu misli na one metode koje se temelje na manipulaciji slikovnih informacija u Fourierovoj domeni, pošto one, promatrane u okviru grafičke tehnologije, posjeduju najveći potencijal.

Cilj istraživanja u okviru predložene doktorske disertacije je razvoj metode za zaštitu autorskih prava otisnutih slika. Zaštita se temelji na umetanju digitalnog vodenog žiga otpornog na proces reprodukcije. Ispitivanje je provedeno na bazi od 1000 različitih slika. Metoda je evaluirana na temelju otpornosti umetnutog vodenog žiga na različite oblike procesiranja.

Ostatak ove doktorske disertacije je organiziran kako slijedi. Drugo poglavlje se bavi problematikom označavanja slika vodenim žigom. U trećem poglavlju matematički je obrađena Fourierova transformacija. Teoretski okviri evaluacije metode za označavanje izneseni su u četvrtom poglavlju. Razvijena metoda označavanja slika iznesena je u ekperimentalnom dijelu u petom poglavlju. Rezultati evaluacije i diskusija rezultata obrađeni su u šestom i sedmom poglavlju. Zaključci su dati u posljednjem poglavlju.

2. OZNAČAVANJE SLIKA VODENIM ŽIGOM

Vodeni žig prvi put se pojavljuje kod proizvođača papira u Italiji 1282 godine [22]. Izrađivao se tako što su se na sito koje se koristilo za proizvodnju papira stavljale razne figure ili inicijali proizvođača od tanke žice. Na mjestima gdje su se nalazile te figure papir je, nakon sušenja, bio tanji i prozirniji pa su figure bile jasno vidljive ako bi se papir okrenuo prema svjetlosti [23]. Točan razlog korištenja prvih vodenih žigova nije poznat, najvjerojatnije se koristio kao dekoracija ili kako bi se znao proizvođač papira.

Kao metoda zaštite papirnatog novca vodeni žig pojavljuje se krajem 18. stoljeća. Kako to već biva, u isto vrijeme se pojavljuju krivotvoritelji koji razvijaju različite metode krivotvorenja vodenih žigova. Englez William Henry Smith je 1848. unaprijedio metodu izrade vodenog žiga tako da je u sito za proizvodnju papira utisnuo reljef s unaprijed izrađene matrice. Ovaj pristup se koristi i danas, a omogućuje izradu „višetonskog“ vodenog žiga, koji je teško krivotvoriti.

U širem smislu vodeni žig je neka informacija o objektu u koji je umetnut. Prvi dokumentirani primjer skrivenog označavanja nekog djela je iz 1954. godine. Te godine Emil Hembrooke patentira metodu umetanja vodenog žiga u glazbena djela. Korištenjem pojasnog filtra koji uklanja frekvenciju od 1 kHz u glazbeno djelo se umetala informacija kodirana Morseovim kodom [24]. Pojam digitalni vodeni žig se prvi put pojavljuje u radu [25] autora Komatsu i Tominaga iz 1988. i od tad se koristi u znanstvenoj zajednici koja se bavi zaštitom autorskih prava multimedijalnog sadržaja.

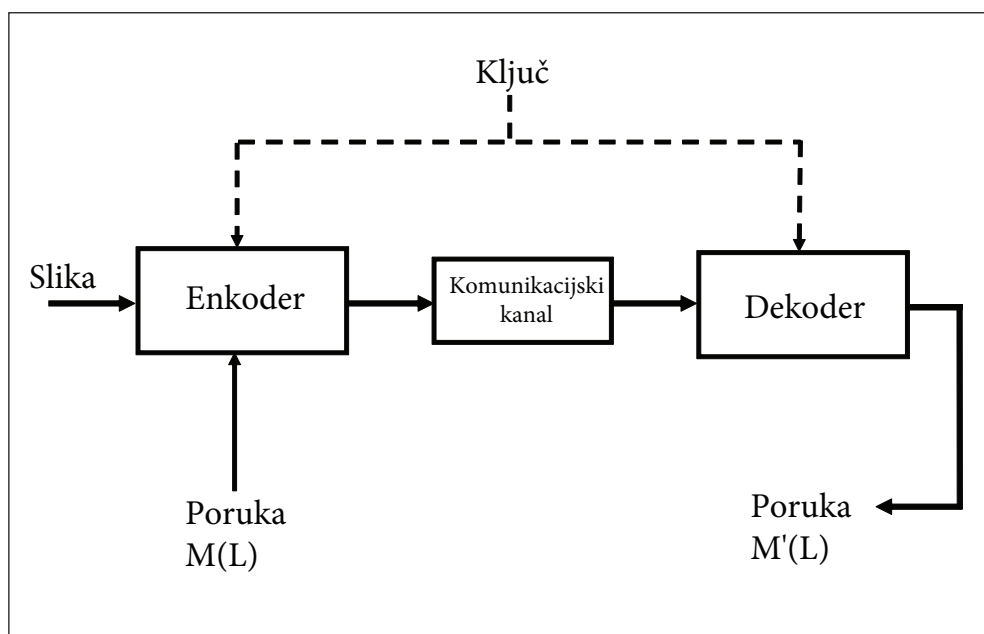
Rast interesa za metodu zaštite autorskih prava multimedijalnog sadržaja poklapa se sa rastom popularnosti Interneta i pojavom uređaja za digitalno kopiranje. Internet je omogućio jednostavan i lak pristup digitalnom multimedijalnom sadržaju, a nova tehnologija za digitalno kopiranje je omogućila da se sadržaj, čija su autorska prava zaštićena, može preoblikovati, kopirati i redistribuirati bez dozvole vlasnika autorskih prava. Štoviše, digitalno umno-

žavanje rješava problem degradacije koja se javljala prilikom kopiranja, pa je moguće iznova kopirati neki sadržaj bez utjecaja na kvalitetu.

Digitalni vodeni žigovi danas su općeprihvaćeni kao metoda zaštite autorskih prava, ali tehnologija je još uvijek u povojima i postoji još prostora za unaprjeđenje postojećih i razvoj novih aplikacija.

2.1. Opći model označavanja slika vodenim žigom

Metode označavanja slika se najčešće modeliraju kao oblik komunikacije, gdje se, putem komunikacijskog kanala, informacija prenosi od kodera do dekoder (Slika 1).



Slika 1. Opći model označavanja slika vodenim žigom

U koderu se poruka P na određeni način, definiran samom metodom označavanja, umeće u sliku S . Koder za umetanje zahtjeva i ključ k , koji se naknadno koristi pri ekstrakciji poruke. Označena slika S_0 se putem komunikacijskog kanala šalje dekoderu koji na osnovu ključa k ekstrahira skrivenu poruku P' .

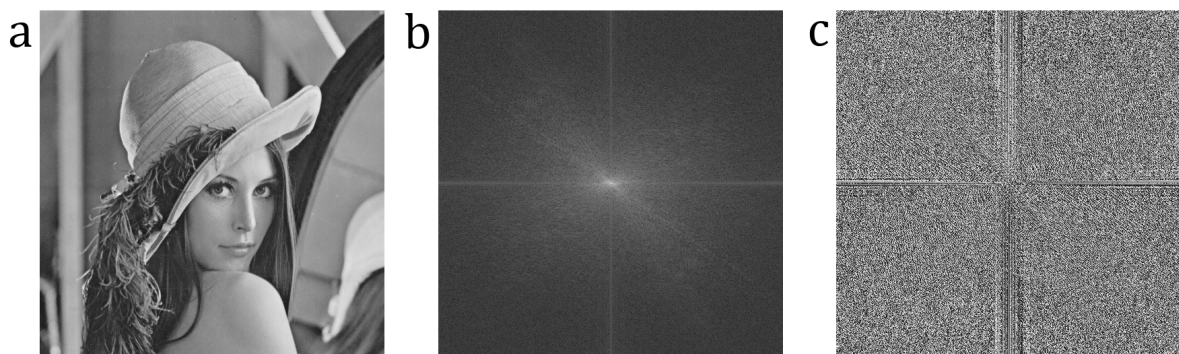
Prilikom slanja kroz komunikacijski kanal, označena slika S_o može biti izložena nekom obliku procesiranja koje predstavlja šum n u komunikacijskom kanalu. Procesiranje u komunikacijskom kanalu može biti dobronamjerno i zlonamjerno. Ukoliko se procesiranje provodi s ciljem poboljšanja slike ili nekog njezinog svojstva riječ je o dobronamjernom procesiranju (kompresija slike, filtriranje s ciljem poboljšavanja vizualne kvalitete slike, itd). Zlonamjerno procesiranje za cilj ima otežati detekciju ili potpuno ukloniti umetnutu poruku.

2.2. Podjela metoda za označavanje slika

Metode za označavanje slika mogu se, prema svojstvima umetnutnog vodenog žiga, podijeliti na više kategorija, prema informiranosti detektora, vidljivosti vodenog žiga i domeni koja se koristi za označavanje slike.

- Prema **informiranosti detektora**, metoda se može temeljiti na **slijepoj detekciji** pri kojoj, za ekstrakciju vodenog žiga, nije potrebna originalna slika i **informiranoj detekciji**, gdje je za ekstrakciju vodenog žiga originalna slika potrebna. Primjerice, metode koje su predložili Barni i suradnici [26], te Nikolaidis i Pitas [27] pripadaju kategoriji slijepe detekcije, dok metode Coxa i suradnika [28] te Swansona i suradnika [29] pripadaju kategoriji informirane detekcije.
- Prema **vidljivosti vodenog žiga** razlikuju se metode kod kojih se na označenoj slici vodeni žig vidi prostim okom i metode koje implementiraju vodeni žig nevidljiv prostim okom. Dobre primjere označavanja vidljivim vodenim žigom predložili su Yung i suradnici [30] te Wolfgang i suradnici [31]. Metode označavanja nevidljivim vodenim žigom su puno brojnije od metoda označavanja s vidljivim vodenim žigom. Dobre primjere nevidljivog označavanja mogu se pronaći u [20, 32, 33].
- Metode za označavanje mogu se kategorizirati i prema **domeni koja se koristi za označavanje slika**. Razlikuje se prostorna i frekvencijska domena. U **prostornoj do-**

meni slika je definirana kao diskretna funkcija $f(x,y)$, gdje (x,y) predstavljaju prostorne koordinate. Ova diskretna funkcija se iz prostorne domene može transformirati u **frekvencijsku domenu** korištenjem frekvencijskih transformacija kao što su diskretna Fourierova transformacija (DFT), diskretna kosinusna transformacija (DCT) i diskretna wavelet transformacija (DWT). U frekvencijskoj domeni, slika je definirana kao diskretna funkcija $F(u,v)$, gdje (u,v) predstavljaju različite frekvencije. Slika 2 prikazuje sliku u prostornoj domeni te vizualizaciju spektra i faze u Fourierovoj domeni.



Slika 2. Slika u (a) prostornoj domeni, (b) njen spektar i (c) faza u Fourierovoj domeni

Kako označavanje u prostornoj ili frekvencijskoj domeni ima svoje prednosti i nedostatke, postoje i hibridne metode označavanja koje koriste i prostornu i neku od frekvencijskih domena. Primjerice, Pramila i suradnici [34] kombiniraju prostornu i Fourierovu domenu, a Al-Hunaity i suradnici [35] kombiniraju prostornu i wavelet domenu.

2.2.1. Označavanje slika u prostornoj domeni

Označavanje slika u prostornoj domeni temelji se na direktnoj modifikaciji vrijednosti elementata slike u prostornoj domeni. Općenito, metode označavanja slika u prostornoj domeni nisu računalno zahtjevne i ne trebaju originalnu sliku kako bi se ekstrahirao vodeni žig. U pravilu posjeduju vrlo veliki kapacitet i neke metode mogu skriti do 1 bit po elementu slike. Uz to pružaju dobar kompromis između robusnosti, kapaciteta i kvalitete označene slike.

Međutim, nedostatak metoda za označavanje slika u prostornoj domeni je izražena osjetljivost na uobičajne metode računalne obrade slike jer umetnuti vodeni žig nije distribuiran po svim elementima slike, stoga i jednostavna obrada slike poput izoštravanja može uništiti vodeni žig. Metode označavanja slike u prostornoj domeni mogu se podijeliti na supstitucijske i aditivne metode.

- Metode označavanja slika **supstitucijom** predstavljaju najjednostavniji oblik označavanja [36, 37, 38]. Označavanje supstitucijom provodi se tako da se prvo definiraju lokacije za označavanje. Na primjer, zadnji bit svih elemenata slike. Prilikom označavanja vrijednosti elemenata slike se pretvore u binarne vrijednosti te se mijenja vrijednost zadnjeg bita. Kako zadnji bit najmanje doprinosi ukupnoj vrijednosti elementa slike, označena slika će biti gotovo indentična originalnoj. Detekcija vodenog žiga je jednostavna i ne zahtjeva originalnu sliku.
- **Additivne** metode označavanja slika ne mijenjaju specifičan bit elemenata slike, već implementiraju vodeni žig zbrajanjem elemenata slike s elementima vodenog žiga, odnosno:

$$g(x, y) = f(x, y) + a(x, y) \cdot v(x, y), \quad (1)$$

gdje $g(x, y)$ predstavljaju elemente označene slike, $f(x, y)$ su elementi originalne slike, $a(x, y)$ je faktor implementacije, a $v(x, y)$ predstavlja elemente vodenog žiga.

Ovakav pristup je nešto otporniji na računalnu obradu, no ima i veći utjecaj na kvalitetu označene slike. Drugi nedostatak je potreba za originalnom slikom prilikom detekcije.

2.2.2. Označavanje slika u frekvencijskoj domeni

Vodeni žig se može umetnuti modifikacijom elemenata slike transformirane nekom od frekvencijskih transformacija kao što su DFT, DCT ili DWT. Frekvencijske transformacije dokoreliraju prostorni odnos između elemenata slike te većinu energije elemenata slike koncentriraju u koeficijente niske i srednje frekvencije transformirane slike [39]. Ukoliko se mijenjaju vrijednosti koeficijenata, ta promjena će, nakon povratka u prostornu domenu, biti raspoređena na sve elemente slike. Ovime se postiže manji utjecaj na kvalitetu slike i veća otpornost vodenog žiga na računalnu obradu označene slike. Metode označavanja slika u frekvencijskoj domeni mogu se podijeliti na supstitucijske i multiplikativne metode.

- **Supstitucijske** metode označavanja slika u frekvencijskoj domeni su, u osnovi, slične supstitucijskim metodama označavanja slika u prostornoj domeni. Osnovna razlika je što se vodeni žig implementira supstitucijom koeficijenata u frekvencijskoj domeni.
- **Multiplikativne** metode označavanja slika u frekvencijskoj domeni temelje se na modifikaciji koeficijenata originalne slike transformirane u frekvencijsku domenu korištenjem izraza:

$$g(u,v) = f(u,v)[a(u,v) \cdot v(u,v)], \quad (2)$$

Gdje $g(u,v)$, $f(u,v)$, $a(u,v)$ i $v(u,v)$, predstavljaju koeficijente, redom, označene slike, originalne slike, faktora implementacije i vodenog žiga.

2.3. Svojstva metode za označavanje slika

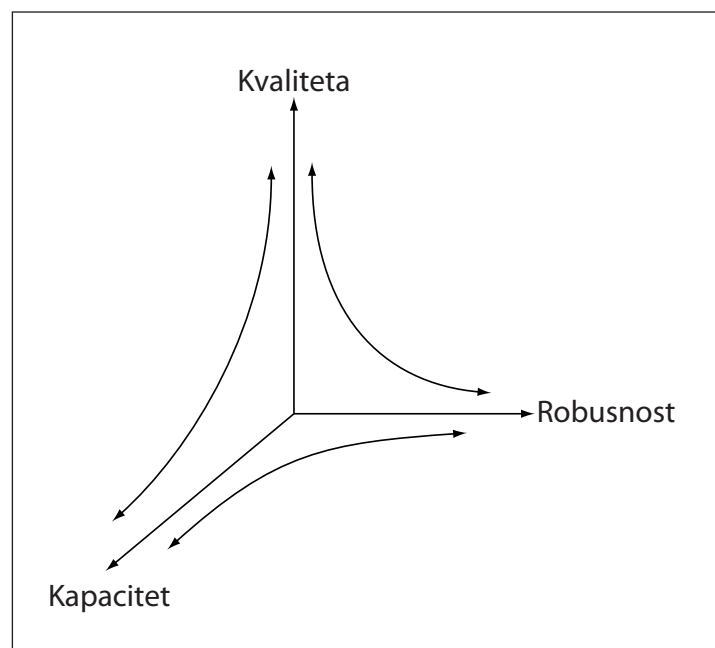
Svaka metoda za označavanje digitalnim vodenim žigom posjeduje niz svojstava. Važnost pojedinog svojstva neke metode ovisi o primjeni metode i o ulozi koju ima sam vodeni žig [1]. U okviru umetanja vodenog žiga, najvažnija svojstva su efektivnost, kapacitet i vizualna

kvaliteta označene slike. Pri detekciji, najvažnija svojstva su vjerojatnost krive pozitivne detekcije i robusnost.

- **Efektivnost označavanja** definirana je kao vjerojatnost detektiranja vodenog žiga u označenoj slici prije bilo kakvog naknadnog procesiranja (npr. kompresije) slike. U praksi se najčešće koriste metode čija efektivnost iznosi 100%. Međutim, valja imati na umu da visoka efektivnost, obično utječe na ostala svojstva kao što su vjernost označene slike originalnoj i vjerojatnost krive detekcije.
- **Kvaliteta** označene slike se odnosi na vizualnu sličnost originalne i označene slike. Ukoliko komunikacijski kanal kojim se slika prenosi do korisnika također unosi degradaciju (PS proces, kompresija), kvalitetu slike je bolje definirati kao usporedbu označene i neoznačene slike nakon degradacije u komunikacijskom kanalu. Prilikom umetanja vodenog žiga dolazi do neželjene degradacije slike koja se ne može izbjeći, no današnje metode omogućavaju kontrolu stupnja degradacije, obično pod cijenu robusnosti i kapaciteta označavanja.
- **Kapacitet** je definiran kao broj bitova koji se mogu umetnuti u sliku. Različite primjene sustava za označavanje zahtijevaju različiti kapacitet. Za zaštitu prava vlasništva, najčešće je dovoljan samo jedan bit informacija te se provjerava je li vodeni žig, kojim se dokazuje vlasništvo, umetnut u sliku ili nije.
- **Robusnost – otpornost** se odnosi na sposobnost detekcije vodenog žiga nakon što je označena slika izložena nekom obliku procesiranja kao što su filtriranje, kompresija, ispisivanje i skeniranje, geometrijske transformacije (rotacija, translacija, skaliranje), itd. Nije potrebno da metoda označavanja slika bude otporna na sve ove oblike procesiranja, već je potrebno metodu označavanja prilagoditi primjeni. Tako je za metodu kojom se žele zaštititi autorska prava slika koje će biti otisnute, najvažnije da bude otporna na degradaciju koja nastaje otiskivanjem, dok je robusnost na kompresiju manje važna.

U nekim slučajevima robusnost može biti nevažna ili čak nepoželjna. Kod označavanja slike postoji i grana istraživanja koja se bavi krhkim vodenim žigovima (*fragile watermarking*). U ovom slučaju, bilo kakvo procesiranje označene slike vodi ka gubitku vodenog žiga. Pregled metoda označavanja krhkim vodenim žigovima dali su Song i Tan [40], a dobri primjeri ovakvog tipa označavanja dati su u [41, 42].

Između kapaciteta, robusnosti i kvalitete postoji izražena sprega [43]. Naime, ukoliko je potrebna velika robusnost određenog vodenog žiga, tada je nužno, ili smanjiti kapacitet, ili odustatu od izrazite vjernosti označene slike prema originalu. Isto tako, kada je važan kapacitet i kvaliteta označene slike, energija koju enkoder koristi za umetanje vodenog žiga će biti mala, pa će rezultat biti označena slika male otpornosti. Sprega između kapaciteta, robusnosti i kvalitete prikazana je na Slici 3.



Slika 3. Sprega između kapaciteta, robusnosti i kvalitete

- **Kriva pozitivna detekcija (KPD)** je detekcija vodenog žiga u neoznačenoj slici. Ova mjera se koristi statistički. Određuje se na većem broju slika i govori kolika je vjerojatnost da detektor, za neke dane uvjete, detektira vodeni žig u neoznačenoj slici. U lite-

raturi se mogu pronaći dvije različite definicije vjerojatnosti krive pozitivne detekcije [1, 40]. Prva definicija se odnosi na slučaj kada postoji mali broj slika u koje se može umetnuti velik broj različitih vodenih žigova. U ovom slučaju, vjerojatnost ovisi gotovo isključivo o načinu na koji se generira vodeni žig.

Druga definicija se odnosi na slučaj kada postoji velik broj različitih slika koje se označavaju. U ovom slučaju vjerojatnost ovisi isključivo o distribuciji vrijednosti elemenata slika koje se označavaju. Tako će se vjerojatnost krive pozitivne detekcije za medicinske slike značajno razlikovati od vjerojatnosti za računalno generirane slike. Iz tog se razloga vjerojatnost krive pozitivne detekcije mora određivati unutar okvira primjene pojedine metode označavanja, odnosno unutar statističke raspodjele vrijednosti elemenata slike za danu bazu slika.

2.4. Mogući oblici procesiranja unutar komunikacijskog kanala

Prilikom prolaska označene slike kroz komunikacijski kanal od kodera do dekodera označena slika može biti izložena dobronamjernom ili zlonamjernom procesiranju – obradi. Dobronamjerno procesiranje za cilj ima poboljšanje jednog ili više svojstava same slike. Za primjer se može uzeti JPEG kompresija, kojom se smanjuje veličina datoteke, ili *unsharp* filter za izoštravanje slike. Zlonamjerno procesiranje za cilj ima uvesti deformaciju kojom se onemogućuje detekcija umetnutog vodenog žiga. Svako procesiranje označene slike utječe na sposobnost detekcije umetnute poruke u označenoj slici i to u pravilu negativno.

U općem komunikacijskom kanalu mnogo je mogućih oblika procesiranja slike i teško je, ako ne i nemoguće, sve ih predvidjeti. Stoga se pri razvoju robusne metode označavanja slika, treba analizirati stvarni komunikacijski kanal na koji će se nailaziti u stvarnoj primjeni.

Općenito, najčešće vrste procesiranja slike su geometrijske transformacije, izrezivanje, filtriranje, kompresija, itd.

2.4.1 Geometrijske transformacije

Pod geometrijske transformacije slike spadaju linearne transformacije koordinata slike. Drugim riječima, geometrijske transformacije mijenjaju prostorni odnos između elemenata slike [44]. Geometrijske transformacije slike mogu se podijeliti na dvije operacije:

- Transformacija koordinata
- Interpolacija vrijednosti intenziteta transformiranih koordinata

Transformacija koordinata elementa slike nekim operatorom T iz (x,y) u (u,v) dana je izrazom:

$$(v,u) = T\{(x,y)\}, \quad (3)$$

Gdje su (x,y) koordinate originalne slike, a (u,v) koordinate transformirane slike, a T je operator transformacije.

Transformacija koordinata može se izraziti i u matičnom obliku [45]:

$$\mathbf{b} = \mathbf{aT}, \quad (4)$$

odnosno,

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Ova transformacija, ovisno o vrijednostima elemenata matrice \mathbf{T} može rotirati, skalirati ili translirati koordinate. U tablici 1. dani su oblici matrica koji izvode rotaciju, skaliranje i translaciju. Očita prednost matičnog zapisa je u tome što se jednostavnim množenjem ma-

trica može dobiti operator koji simultano izvodi više operacija. Koordinate se mogu transformirati u početno stanje množenjem rezultata iz (4) sa inverznom matricom \mathbf{T}^{-1} .

Tablica 1. Oblik matrice \mathbf{T} za rotaciju, translaciju i skaliranje

| | |
|-------------------|--|
| Jedinična matrica | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| Rotacija | $\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| Skaliranje | $\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| Translacija | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix}$ |

Nakon što su nove koordinate izračunate potrebno je interpolirati vrijednosti elemenata slike na novim koordinatama. To se radi na način da se koriste vrijednosti susjednih elemenata ulazne slike da se odredi vrijednost elemenata izlazne slike. U praksi se koriste tri metode interpolacije, preuzimanjem vrijednosti najbližeg susjednog elementa slike, bilinearnom interpolacijom četiri najbliža susjedna elementa slike ili bikubnom interpolacijom devet najbližih susjednih elemenata slike.

2.4.2. Izrezivanje

Izrezivanjem se ekstrahira dio slike, a ostatak se uklanja. Dio slikovnih informacija se gubi i nije moguće sliku vratiti u prvobitno stanje. Izrezivanje se može definirati kao množenje slike $f(x,y)$ dimenzija X redaka i Y stupaca sa maskom $m(x,y)$. Ako se pretpostavi da se izrezivanjem slika svodi na X' redaka i Y' stupaca (gdje je $X' \leq X$ i $Y' \leq Y$), te se uzme da je maska $m(x,y)$ definirana kao:

$$m(s,t) = \begin{cases} 1 & X'_1 \leq x \leq X'_2; Y'_1 \leq y \leq Y'_2 \\ 0 & \text{u protivnom} \end{cases} \quad (6)$$

Gdje X'_1 , X'_2 , Y'_1 i Y'_2 predstavljaju redom, gornju, donju, lijevu i desnu granicu izrezivanja, tako da je $X' = X'_2 - X'_1 + 1$, a $Y' = Y'_2 - Y'_1 + 1$. Izrezana slika $g(x,y)$ je dana izrazom:

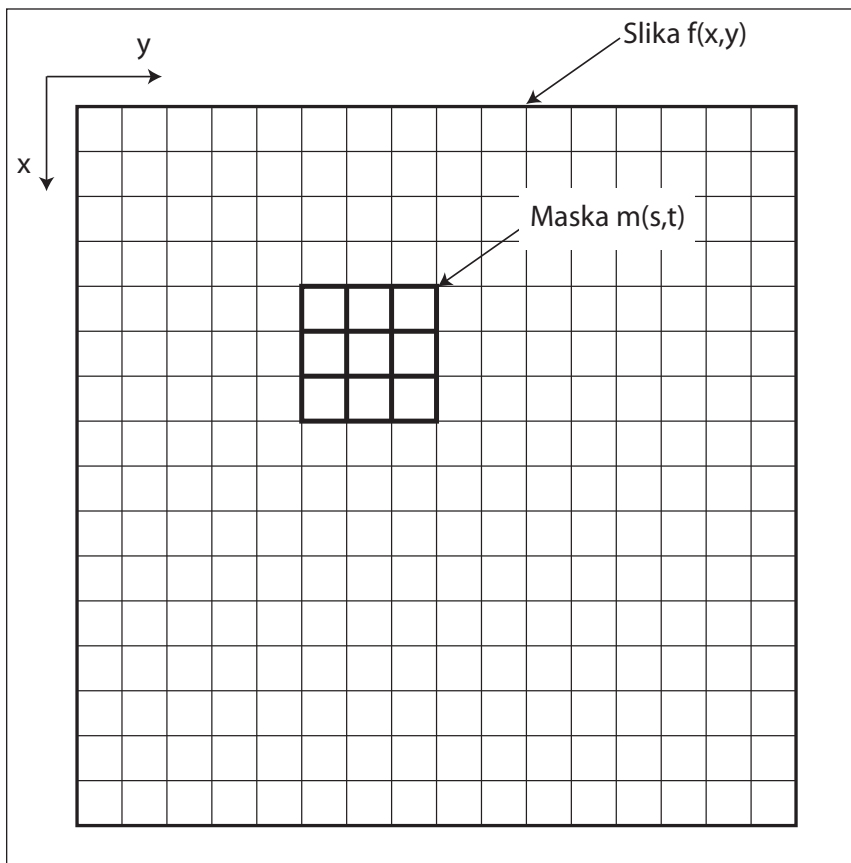
$$g(x,y) = f(x,y) \times m(s,t), \quad (7)$$

2.4.3. Filtriranje

Filtriranje nekog signala provodi se na način da se određene frekvencije propuštaju, a druge blokiraju. Tako, na primjer, nisko pojasni filter propušta samo niske frekvencije signala, a visoke frekvencije blokira. Pošto se slika može promatrati kao signal, za obradu slika mogu se primjeniti i tehnike obrade signala.

Filtriranje slike može se provoditi na dva načina. Sliku je moguće filtrirati u prostornoj domeni ili ju se može filtrirati nakon transformacije u frekvencijsku domenu. Štoviše, postoji odnos jedan na jedan između linearnih prostornih filtara i frekvencijskih filtara [44]. Ipak, prostorni filtri se pri obradi slika mnogo češće koriste jer nude i mogućnost nelinearnog filtriranja (npr. median filter), što nije moguće u frekvencijskoj domeni.

Prostorno filtriranje se provodi pomoću prostornog filtra (maske) koja je u pravilu relativno mala u odnosu na sliku koja se filtrira (3×3 ili 5×5 elemenata). Maska prelazi preko svakog elementa slike te se pomoću koeficijenata maske i vrijednosti intenziteta susjednih elemenata slike računa intenzitet elementa filtrirane slike (Slika 4.).



Slika 4. Princip prostornog filtriranja slike

Općenito, prostorno filtriranje slike $f(x,y)$ maskom $m(s,t)$ dano je izrazom:

$$g(x,y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b m(s,t) f(x+s, y+t), \quad (8)$$

gdje $g(x,y)$ označava filtriranu sliku.

Neki od najčešće korištenih filtara kod obrade slike su niskopojasni, Gaussov, Laplacov, median i *unsharp* filtar. Matematičke funkcije tih filtara i koeficijenti maski dani su u tablici 2.

- **Niskopojasni filtar** zamjenjuje vrijednost intenziteta nekog elementa slike sa srednjom vrijednosti intenziteta susjednih elemenata slike. Na taj način se smanjuju razlike između susjednih elemenata slike. Ovaj filtar dobar je za uklanjanje šuma, no veliki nedostatak je što istovremeno zamućuje sliku. Najraširenija primjena niskopojasnih prostornih filtra je uklanjanje manjih elemenata na slici, koji se, zbog zamućenja, izjednače sa okolinom te se samim time ističu veći elementi.
- **Gaussov filtar** je modifikacija gore spomenutog filtra. Koeficijenti maske filtra su podešeni tako da se utjecaj na rezultat srednje vrijednosti smanjuje što su elementi slike dalje od ciljanog elementa slike. Ovim pristupom se donekle smanjuje zamućenje slike prilikom filtriranja.
- **Laplacov filtar** se u praksi koristi kako bi se istaknula područja na slici gdje postoji nagla promjena intenziteta. Najčešće se koristi za otkrivanje kontura u slici. Laplacov filtrom slike se mogu izoštriti. Ukoliko se slika filtrirana Laplacovim filtrom superponira na originalnu sliku, ističu se elementi slike gdje dolazi do nagle promjene u intenzitetu, što za rezultat ima izoštrjenje originalne slike. Ovakvo filtriranje se zove ***Unsharp filtriranje*** i vrlo je rašireno kod svakodnevne obrade slike u praksi.
- **Medijan filtar** je nelinearni filtar koji, kako mu samo ime govori, originalnu vrijednost elementa slike zamjenjuje sa medijanom susjednih elemenata slike. Pošto je medijan puno manje osjetljiv na ekstremne vrijednosti od aritmetičke sredine medijan filtar je odličan filtar za uklanjanje takozvanog „*salt-and-pepper*“ šuma u slici.

Tablica 2. Najčešće korištene maske za prostorno filtriranje

| Filtar | Matematička definicija | Maska | | | | | | | | | |
|---------------------|--|---|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| Niskopojasni filtar | $g(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 f(x + s, y + t)$ | <table border="1"> <tr><td>1/9</td><td>1/9</td><td>1/9</td></tr> <tr><td>1/9</td><td>1/9</td><td>1/9</td></tr> <tr><td>1/9</td><td>1/9</td><td>1/9</td></tr> </table> | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 | | | | | | | | | |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 | | | | | | | | | |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 | | | | | | | | | |
| Gaussov filtar | $g(x, y) = \sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 e^{-\frac{s^2+t^2}{2\sigma^2}} f(x + s, y + t)$ | <table border="1"> <tr><td>1/16</td><td>1/8</td><td>1/16</td></tr> <tr><td>1/8</td><td>1/4</td><td>1/8</td></tr> <tr><td>1/16</td><td>1/8</td><td>1/16</td></tr> </table> | 1/16 | 1/8 | 1/16 | 1/8 | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/8 | 1/16 |
| 1/16 | 1/8 | 1/16 | | | | | | | | | |
| 1/8 | 1/4 | 1/8 | | | | | | | | | |
| 1/16 | 1/8 | 1/16 | | | | | | | | | |
| Laplacov filtar | $g(x, y) = \nabla^2 f(x, y)$ $\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$ | <table border="1"> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>5</td><td>-1</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> </table> | 0 | -1 | 0 | -1 | 5 | -1 | 0 | -1 | 0 |
| 0 | -1 | 0 | | | | | | | | | |
| -1 | 5 | -1 | | | | | | | | | |
| 0 | -1 | 0 | | | | | | | | | |
| Medijan filtar | $g(x, y) = \text{med} \{f(x + s, y + t) s, t = -1, 0, 1\}$ | | | | | | | | | | |
| Unsharp filtar | $g(x, y) = f(x, y) - \nabla^2 f(x, y)$ | <table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>-4</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table> | 0 | 1 | 0 | 1 | -4 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | |
| 1 | -4 | 1 | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | |

2.4.4. JPEG kompresija

JPEG je akronim od *Joint Photographic Experts Group*. Ova grupa je oformljena od strane organizacija *Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunications Union* (ITU-T) i *International Organization for Standardization* (ISO). JPEG grupa počela je s radom 1987. godine, kako bi se našao standard koji bi omogućio uključivanje slikovnih

elemenata u tadašnje elektroničke dokumente. Prvi izvještaj je objavljen 1991. godine. JPEG standard se pokazao vrlo uspješnim, osobito pri kompresiji slika za web stranice. JPEG je ujedno i metoda kompresije za nepokretne slike. Nudi visok stupanj kompresije (10:1 – 20:1) uz relativno malu degradaciju kvalitete slike, a omogućava i kompresiju bez gubitka kvalitete (*Lossless*) sa stupnjem kompresije oko 2:1. Kako ova metoda u jednom od svojih koraka koristi DCT, najbolje rezultate daje kod kompresije slika koje imaju visoku prostornu korelaciju između susjednih elemenata slike. Efikasnost kompresije opada smanjenjem korelacije [46] te se kod 1-bitnih slika ovaj način kompresije treba izbjegavati.

2.4.4.1. Princip JPEG kompresije

JPEG datoteka se može enkodirati na nekoliko načina, ali proces najčešće ima ove korake [47]:

- Transformacija prostora boja
- Uzorkovanje –*Downsampling*
- Podjela slike u blokove
- DCT
- Kvantizacija
- Entropijsko kodiranje

Ljudsko oko je mnogo osjetljivije na promjene u luminanciji nego na promjene tona boje. Iz tog razloga je pogodno prvo informaciju o luminanciji izdvojiti od informacije o boji. JPEG to izvodi tako da se slika u boji (za crno-bijele slike ovaj se korak preskače) transformira u $Y C_B C_R$ prostor boja. U tom prostoru informacija o luminanciji je izdvojena u Y kanal dok je informacija o boji zapisana u kromatskim kanalima C_B i C_R . Isti ovaj prostor boja koristi se u

digitalnoj televiziji u boji i kod video DVD standarda, a sličan je i prostoru boja koji se koristi u PAL sistemu.

Kad je informacija o luminanciji u zasebnom kanalu na ostala dva kromatska kanala se može provesti *downsampling* – odnosno uzorkovanje kojim se smanjuje prostorna rezolucija. Najčešće se vrši redukcija sa faktorom 2 u horizontalnom i vertikalnom smjeru (2h2v ili 4:1:1 *downsampling*). No postoje i drugi načini, recimo 4:2:2 ili 2h1v gdje se kromatski kanali reduciraju faktorom 2 horizontalno, a 4:4:4 predstavlja slučaj kada se *downsampling* ne radi.

Prije transformacije, slika se podjeli u blokove po 8×8 elemenata slike. Ukoliko ukupan broj elemenata slike u retku ili stupcu nije djeljiv s 8, prije podjele u blokove posljednji donji redak elemenata slike, odnosno posljednji desni stupac elemenata slike kopira se onoliko puta koliko je potrebno da se dobije broj djeljiv s 8.

Na svakom bloku se odvojeno provodi DCT. Tu može doći do malog gubitka informacije o slici zbog ograničene aritmetičke preciznosti računala, no taj gubitak je u pravilu mali i ima zanemariv utjecaj na kvalitetu rekonstruirane slike.

Na svakom od blokova se nakon transformacije provodi kvantizacija tako da se svaka od 64 vrijednosti u frekvencijskoj domeni dijeli sa kvantizacijskim koeficijentom za određenu frekvenciju i zatim se kvocijent zaokružuje na najbliži cijeli broj. Ovo je “lossy” korak JPEG kompresije. Spomenute koeficijente korisnik može definirati osobno, ali uglavnom se koriste preporučene tablice s kvantizacijskim koeficijentima. Što je kvantizacijski koeficijent veći, negativniji je utjecaj na kasniju točnu rekonstrukciju vrijednosti koja je podijeljena sa tim koeficijentom. Kako ljudsko oko razlike u svjetlini lakše razaznaje na relativno velikom području (niske frekvencije), nego na malom području (visoke frekvencije), tako su i ti kvantizacijski koeficijenti veći za veće frekvencije, a manji za manje.

Ukoliko je kvantizacija ispravno izvedena, svaki od blokova će sadržavati uglavnom nule sa samo nekoliko brojeva različitih od nule u nižim frekvencijama kosinusne domene. Na-

kon kvantizacije se provodi entropijsko kodiranje. 64 koeficijenta u matrici svakog bloka se poredaju “zig-zag” skeniranjem. Ovaj postupak se provodi kako bi se brojevi različiti od 0 smjestili na početak niza sa mnogo 0 koje slijede. Zatim se primjeni *Run Length Encoding* (RLE) algoritam koji kodira vrijednost bita i broj uzastopnog ponavljanja tog bita. Naposljetku se primjeni Huffmanov algoritam koji osigurava da se dobiveni niz kodira sa što kraćom duljinom bitova.

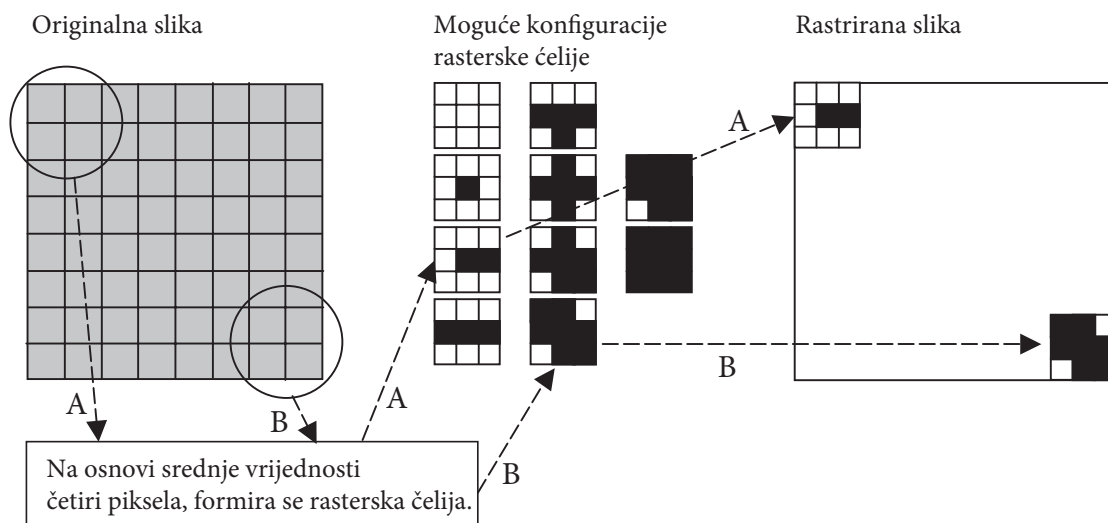
2.4.5. Rastriranje

Digitalne slike su u računalnoj memoriji pohranjene kao niz diskretnih elemenata slike kojima je dodijeljena neka vrijednost intenziteta. Kada je riječ o crno-bijelim slikama, u pravilu, ta je vrijednost kodirana s 8 bita pa može poprimiti vrijednost od 0 do 2^8-1 , odnosno svaki element slike može imati jednu od 256 nijansi sive, od bijele (255) do crne (0). Kod slika u boji, boja svakog elementa slike je definirana s tri osnovne boje, crvenom, zelenom i plavom. Svaka od te tri boje je kodirana s 8 bita pa svaki element na slici može poprimiti 2^{24} različitih nijansi boje. Kako većina uređaja za reprodukciju slika može reproducirati samo ograničeni broj boja i jedan ton, digitalna slika se mora prilagoditi uređaju za reprodukciju, odnosno, mora se rastrirati. Rastriranje je, dakle, transformacija višebitne (višetonске) slike u jednobitnu (jednotonsku) kako bi se omogućila njena reprodukcija na reprodukcijском uređaju kao što je pisac ili tiskarski stroj.

Rastriranje se provodi na način da se srednja vrijednost intenziteta određene skupine elemenata originalne slike prikaže rasterskom ćelijom odgovarajuće pokrivenosti (Slika 5.).

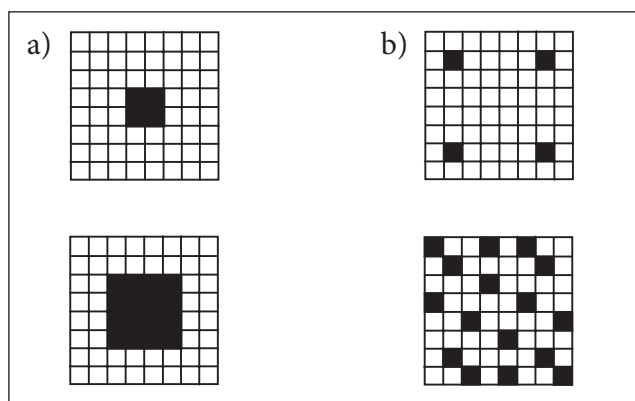
Ovisno o načinu formiranja rasterske ćelije postoje dva osnovna pristupa rastriranju:

- Amplitudno modulirano (AM) rastriranje
- Frekventno modulirano (FM) rastriranje



Slika 5. Osnovni princip rastriranja [48]

Kod AM rastera, mijenja se amplituda, odnosno, veličina rasterskog elementa, a frekvencija ostaje ista (Slika 6. a). Kod FM rastera je veličina rasterskog elementa konstantna, a frekvencija varira (Slika 6. b). I jedan i drugi pristup imaju svoje prednosti i nedostatke. AM rastriranje je računalno manje zahtjevno, formacija rasterskog elementa je stabilna i moguće je formirati različite oblike rasterskog elementa (linija, krug, elipsa, itd). Sa druge strane, AM rastriranje daje lošije rezultate kod prikaza sitnih detalja, te se zbog pravilnog rasporeda rasterskih elemenata može pojaviti *moiré*. FM raster bolje prikazuje sitne detalje, i *moiré* se ne može pojaviti, no formacija rasterskih elemenata je računalno vrlo zahtjevna i osjetljivi su na prirast rasterskih elemenata.



Slika 6. AM (a) i FM (b) rasterske ćelije (nasuprotne ćelije predstavljaju isti ton originalne slike)

Rastriranje se može provesti na dva osnovna načina:

- Tabličnim rastriranjem
- Matričnim rastriranjem

Kod tabličnog rastriranja, dio originalne slike se mijenja sa jednom od mogućih konfiguracija ćelija čija srednja vrijednost najbliže odgovara srednjoj vrijednosti tog dijela slike (Slika 5.).

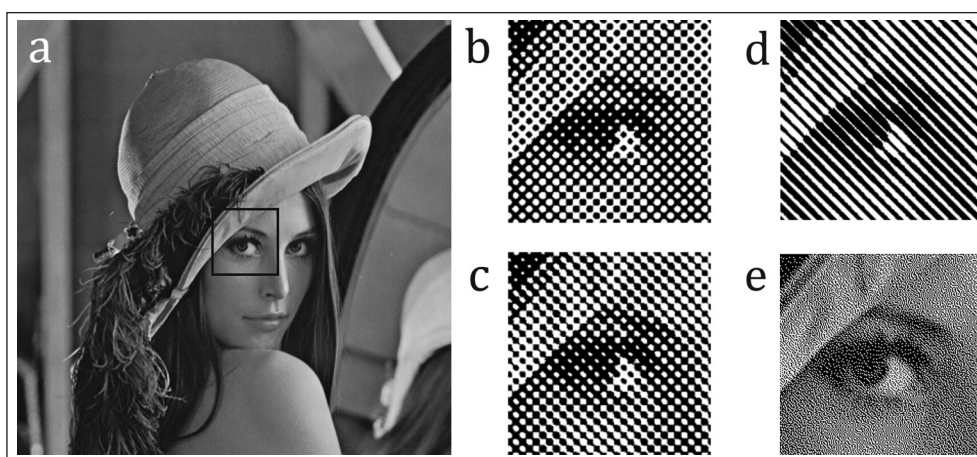
Kod matričnog rastriranja, ćelije nisu unaprijed određene već se formiraju tako da se vrijednost elemenata originalne slike uspoređuje sa elementom matrice. Ukoliko je vrijednost elemenata originalne slike veća od vrijednosti elementa matrice, na rastriranoj slici odgovarajući element slike poprima vrijednost 1, a u suprotnom slučaju poprima vrijednost 0. Ova usporedba se matematički da izraziti kao:

$$H(i, j) = \begin{cases} 1 & I(i, j) \geq T(i, j) \\ 0 & I(i, j) < T(i, j) \end{cases} \quad (9)$$

gdje (i, j) predstavlja koordinate, a H , I i T predstavljaju redom: rastriranu sliku, originalnu sliku i matricu za rastriranje.

O vrijednosti elemenata matrice T ovisi rezultat ovakvog rastriranja, te je moguće dobiti ne samo AM i FM rastriranu sliku već i različite oblike rasterskog elementa (Slika 7).

Optimalan način rastriranja ovisi o primjeni. AM raster daje najbolje rezultate kod reprodukcijских sustava visoke rezolucije kao što su tiskarski strojevi, jer je veći rasterski element otporniji na prirast rasterskog elementa i lako se kalibriraju. FM raster je bolje prilagođen kod reprodukcijских sustava niske rezolucije kao što su stolni pisači i ekrani [49].



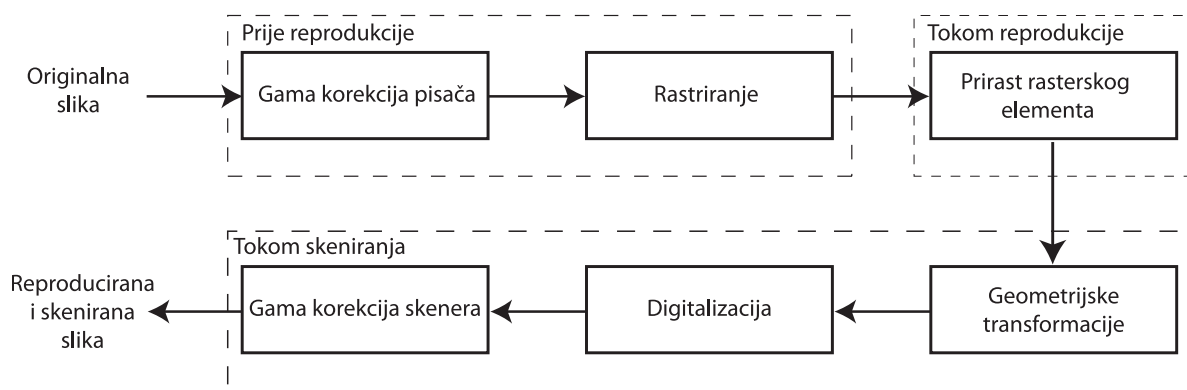
Slika 7. Različiti rezultati matričnog rastriranja a) originalna slika; b), c), i d) AM rasteri s, redom, okruglim, eliptičnim i linijskim rasterskim elementom; e) FM raster.

2.4.6. Print-Sken proces

Dosad su pojedinačno nabrojani različiti oblici procesiranja slike koji se javljaju u komunikacijskom kanalu, a koji mogu ugroziti detekciju umetnutog vodenog žiga. No da bi pregled bio potpun potrebno je uzeti u obzir kombinaciju različitih transformacija. Međutim, bilo bi nepraktično ispitivati kombinacije svih nabrojanih transformacija, već treba ustanoviti, u okviru primjene metode zaštite autorskih prava slika, koje kombinacije se najčešće javljaju u praksi. Sa stajališta grafičke proizvodnje to je svakako reprodukcija digitalnih slika i njihova naknadna digitalizacija. Štoviše, ta jednostavnost prijenosa slikovnih informacija iz jednog medija u drugi, predstavlja i glavni motiv za razvojem metode zaštite autorskih prava otisnutih slika.

Print-Scan (PS) proces predstavlja transformaciju slike iz digitalnog u analogno okruženje i obrnuto. Iako sastavljen od dva odvojena postupka, ispisivanja i skeniranja, sa stajališta zaštite slika digitalnim vodenim žigom, valja ga promatrati kao jedinstven proces. Razlog leži u tome što se umetanje i detekcija vodenog žiga provodi u digitalnom okruženju, dok se označena slika može koristiti i u digitalnom i u analognom okruženju.

U literaturi postoji nekoliko različitih pokušaja izrade modela PS procesa. Poljičak i suradnici [50] razvijaju model degradacije RGB vrijednosti prilikom reprodukcijskog procesa. Lin i Chang [51] su PS proces promatrali kao dva odvojena postupka, promjene vrijednosti intenziteta elemenata slike i geometrijske transformacije. Nadogradnju na njihov rad dali su Solanki i suradnici [52, 53] koji PS proces promatraju kao niz odvojenih podprocesa, gdje svaki podproces uvodi određenu degradaciju u označenu sliku. Takvim pristupom razvijen je model prikazan na slici 8. gdje su navedene različite transformacije slike koje se događaju prilikom PS procesa.



Slika 8. Transformacije slike u PS procesu

- **Gama korekcija pisača:** Kako bi ispisana slika izgledala slično kao na monitoru, pisač u pravilu ima nelinearnu krivulju prijenosa tonova sličnu nekalibriranom monitoru. Naime, svaki monitor ima eksponencijalni odziv intenziteta elemenata slike u odnosu na upravljački signal koji je dan jednadžbom (10). Ovo znači da će monitor neki element slike intenziteta $f(x,y)$ prikazati kao element slike intenziteta $g(x,y)$.

$$g(x,y) = c[f(x,y)]^\gamma, \quad (10)$$

Proces kompenzacije ove nelinearne transformacije zove se gama korekcija. Gama korekcijom se vrijednosti $f(x,y)$ prije tiska potenciraju sa γ , gdje je γ pretpostavljena vri-

jednost nekalibriranog monitora (obično 2.5), kako bi se kompenzirala razlika između slike prikazane na monitoru i otisnute slike.

- **Rastriranje:** Prije samog ispisivanja slike provodi se rastriranje kako bi se omogućio prikaz višetonske slike na uređajima za ispisivanje, koji su u pravilu jednotonski. Rastriranje omogućuje modulaciju tonova višetonske slike zahvaljujući činjenici da se sustav ljudskog vida ponaša slično niskopojasnom filtru.
- **Prirast rasterskog elementa:** Otisnuti rasterski elementi u pravilu budu veći nego što bi trebali biti. Prilikom tiska dolazi do određenog širenja otisnutog rasterskog elementa, odnosno mehaničkog prirasta rasterskog elementa. Razlozi ovakvog prirasta su mehaničke prirode, kao što su pritisak između tiskovnog i temeljnog cilindra, interakcija tiskovne podloge i bojila, i slično. Postoji i optički prirast rasterskog elementa koji nema veze sa mehaničkim procesima u tisku. Optički prirast rasterskog elementa, također znan kao Yule-Nielsen efekt, je prividno povećanje rasterskih elementa prouzrokovan interakcijom svjetla i tiskovne podloge [54, 55].
- **Gama korekcija skenera:** Kod skeniranja, stupanj refleksije pojedinog dijela slike se pomoću senzora pretvara u električni signal koji se zatim digitalizira. Da bi skenirana slika bila ispravno prikazana na monitoru, mora se provesti korekcija intenziteta elemenata slike. Gama korekcija definirana je jednačinom 10. koja se provodi prilikom skeniranja ovisi o monitoru na kojemu će slika biti prikazana te o operativnom sustavu, a većina skenera dolazi s programskom podrškom koja omogućava kontrolu vrijednosti gama korekcije. Gama korekcijom se vrijednosti $f(x,y)$ nakon skeniranja potenciraju sa $1/\gamma$, gdje je γ pretpostavljena vrijednost game monitora koji prikazuje sliku, kako bi se kompenzirala razlika između skenirane slike i slike prikazane na monitoru.
- **Digitalizacija:** Prilikom skeniranja provodi se i kvantizacija vrijednosti intenziteta skeniranih elemenata slike, što uvodi greške zaokruživanja. Greška zaokruživanja je

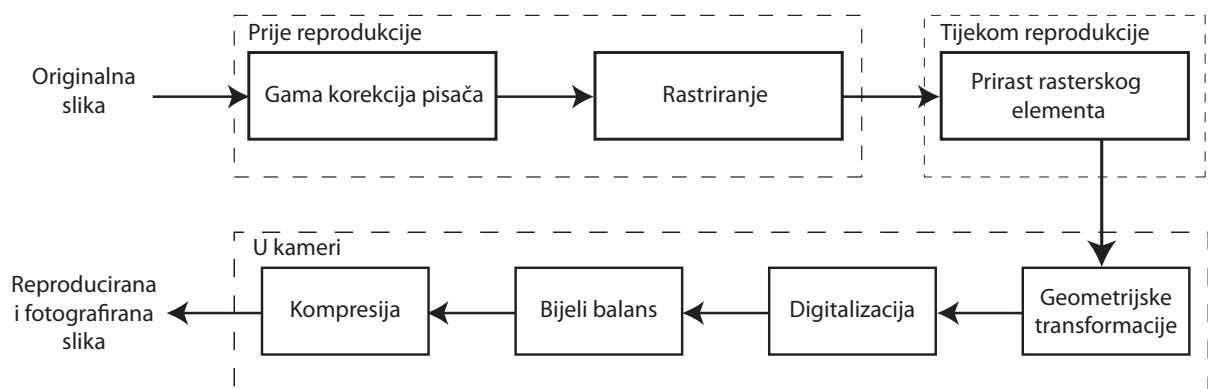
posljedica činjenice da se realni brojevi na računalu predstavljaju s konačnim brojem znamenaka tj. konačnom preciznošću.

- **Geometrijske transformacije:** Prilikom skeniranja, slika je uvijek izložena geometrijskim transformacijama, kao što su rotacija, skaliranje, translacija i izrezivanje.

2.4.7. Print-Kam proces

U praksi, osobito u grafičkoj tehnologiji, skeniranje je najčešći način digitalizacije otisnutih slika. Naravno, ovo nije jedini mogući način digitalizacije. Otisnutu sliku se, uz malo vještine, može prilično kvalitetno digitalizirati digitalnom kamerom. Štoviše, tu leži i veća opasnost za povredu autorskih prava jer je neku zaštićenu sliku puno lakše neovlašteno fotografirati digitalnom kamerom nego ju skenirati. Ako se k tome uzme u obzir i činjenica da su danas i najjednostavniji mobilni uređaji opremljeni digitalnom kamerom, jasno je da metoda zaštite autorskih prava digitalnih slika mora uzeti u obzir i mogućnost digitalizacije digitalnom kamerom.

Print-Kam (PK) proces, kao i u slučaju kod PS procesa, iako sastavljen od dva odvojena postupka, reprodukcije i fotografiranja, valja promatrati kao jedinstven proces. Proces otiskivanja je isti kao i kod PS procesa, no povratak u digitalnu domenu fotografiranjem je drugačiji od postupka skeniranja (Slika 9.).



Slika 9. Transformacije slike u PK procesu

- **Bijeli balans:** Najveća razlika između skeniranja i fotografiranja je razlika u izvoru svjetla. Naime, kod skenera je izvor svjetla ugrađen u sam uređaj, a fotoosjetljivi elementi su podešeni upravo za taj izvor svjetla. Kod kamera, izvor svjetla nije ugrađen u uređaj (iznimka je bljeskalica koja, ako je i ugrađena u uređaj, ionako predstavlja samo suplementarni izvor svjetla). Ova razlika značajno utječe na kvalitetu digitalizirane slike, jer se kod snimanja moraju uzeti u obzir i intenzitet i temperatura svjetla. Intenzitet svjetla kojom je scena osvijetljena utječe na srednju vrijednost intenziteta elemenata cijele slike po svim kanalima (RGB) jednako, što kao rezultat može dati *svjetliju* ili *tamniju* sliku. Temperatura svjetla, odnosno spektralni sastav svjetla s kojim je scena koja se fotografira osvijetljena, ima različit utjecaj na pojedine kanale, što u konačnici utječe na informaciju o boji. Utjecaj intenziteta svjetla može se kontrolirati mehanički, otvorom zaslona objektiva, prije same digitalizacije, no utjecaj temperature svjetla se kod digitalnih kamera mora obraditi računalno, nakon digitalizacije.

Postoji nekoliko različitih metoda korekcije bijelog balansa [56]. U svojem osnovnom obliku, bijeli balans se provodi na način da se kamerom (automatski ili ručno) definiraju $R_w G_w B_w$ vrijednosti elemenata bijele površine. Nakon toga se vrijednosti svih elemenata slike korigiraju prema definiranoj bijeloj boji pomoću izraza:

$$\begin{bmatrix} R_g \\ G_g \\ B_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 255 / R_w & 0 & 0 \\ 0 & 255 / G_w & 0 \\ 0 & 0 & 255 / B_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_f \\ G_f \\ B_f \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdje $R_g G_g B_g$ predstavljaju RGB vrijednosti elemenata korigirane slike $g(x,y)$, $R_w G_w B_w$ predstavljaju definirane RGB vrijednosti bijele boje na originalnoj slici $f(x,y)$, a $R_f G_f B_f$ označavaju RGB vrijednosti elemenata slike prije korekcije bijelog balansa.

- **Kompresija:** Većina kamera digitaliziranu sliku u memoriju pohrani nakon nekog oblika kompresije, od kojih je najčešća JPEG kompresija.

3. FOURIEROVA TRANSFORMACIJA

Zaštita otisnutih slika mora se provoditi tako da energija umetnutog vodenog žiga bude dovoljno velika da ne bude uništen prilikom procesa reprodukcije. Opsežnim pregledom raspoloživih publikacija ustanovljeno je da se vodeni žig mora umetnuti u sliku nakon što se slika transformira iz prostorne u frekventnu domenu. Ovaj pristup omogućava raspodjelu umetnute energije po cijeloj slici, što u konačnici dovodi do manjeg utjecaja na kvalitetu označene slike.

Slika se iz prostorne domene može transformirati u frekvencijsku domenu korištenjem nekoliko različitih matematičkih transformacija kao što su diskretna Fourierova transformacija (DFT), diskretna kosinusna transformacija (DCT), i diskretna wavelet transformacija (DWT).

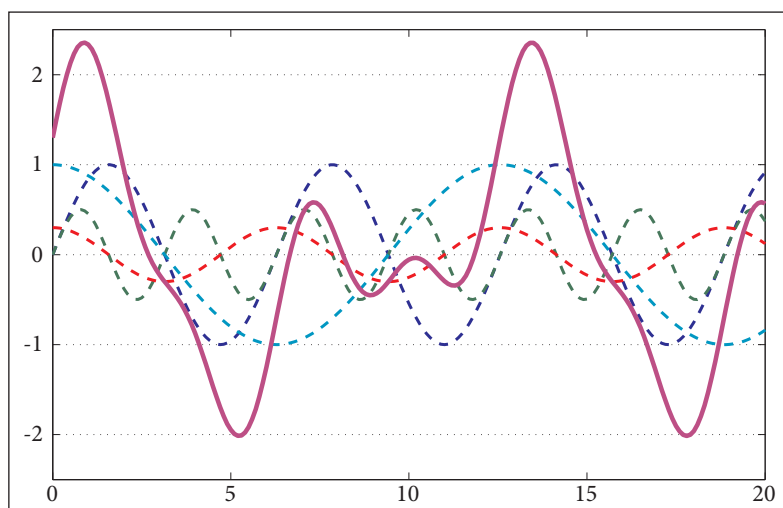
Metode zaštite koje koriste DCT posjeduju određenu otpornost na degradaciju slike prilikom JPEG kompresije, što je razumljivo, s obzirom da se JPEG kompresija temelji na DCT. DWT omogućava analizu višedimenzionalnih signala po pojedinim dimenzijama i po pojedinim frekventnim pojasevima. Stoga DWT osigurava dobru prostornu lokalizaciju i multirezolucijske karakteristike slične teoretskom modelu ljudskog vida [13]. Metode koje u svojoj rutini koriste DFT pokazuju inherentnu otpornost na geometrijske transformacije kao što su rotacija, translacija i skaliranje.

Vlasništvo reproducirane slike se najčešće osujeti tako da se neovlašteno redistribuira nakon što se digitalizira skeniranjem ili fotografiranjem. Pošto se kod ovih postupaka gotovo uvijek javlja neki oblik geometrijske transformacije, metoda zaštite otisnutih slika treba se temeljiti na DFT.

Francuski matematičar Jean Baptiste Joseph Fourier svoj najveći doprinos objavio je u knjizi „La Théorie Analytique de la Chaleur“ [44]. Početkom 19 stoljeća on je, promatrajući pro-

blem širenja topline u metalnoj ploči, došao na ideju da neku periodičku funkciju prikaže kao sumu (Fourierov red), odnosno linearnu kombinaciju više trigonometrijskih funkcija različitih amplituda i faza. Problem je postavio korištenjem diferencijalne jednačbe koju je riješio razvojem funkcije u beskonačan trigonometrijski red. Fourierov pristup se može primijeniti i na itegrabilne funkcije koje nisu periodičke, u obliku Fourierove transformacije. Važno svojstvo Fourierove transformacije je mogućnost da se transformirana funkcija vrati u prvotni oblik inverznom Fourierovom transformacijom. Naknadni razvoj digitalne tehnologije i otkriće brze Fourierove transformacije omogućilo je praktičnu obradu i široku primjenu Fourierove transformacije od telekomunikacija do računalne obrade slike.

Koristeći Fourierovu transformaciju svaki signal se može raščlaniti na sumu sinusa i kosinusa. Ova suma se, preko Eulerove formule, može zapisati kao suma kompleksnih eksponenata umnoženih odgovarajućim koeficijentima [57]. Tim postupkom se određuje frekventni sadržaj nekog signala, odnosno njegov spektar (Slika 10.). Ukoliko digitalnu sliku promatramo kao signal, ovim postupkom se vrijednosti intenziteta pojedinih elemenata slike u prostornoj domeni mogu transformirati u vremensku domenu, gdje je tada slika određena amplitudom i fazom pojedinih frekvencija.



Slika 10. Originalni signal (puna linija) i spektar signala različitih frekvencija dobiven Fourierovom transformacijom (iscrtane linije)

3.1. Jednodimenzionalna Fourierova transformacija

U ovom poglavlju biti će izneseni teorijski temelji Fourierove transformacije i frekvencijske domene, od Fourierove transformacije kontinuirane funkcije s jednom varijablom do diskretne Fourierove transformacije (DFT) dvodimenzionalne funkcije.

Fourierova transformacija funkcije $f(x)$ je funkcija:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i u x} dx, \quad (12)$$

gdje je funkcija $F(u)$ Fourierova transformacija kontinuirane funkcije $f(x)$, u i x su kontinuirane varijable.

Njena inverzna funkcija definirana je kao:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) e^{2\pi i u x} du, \quad (13)$$

gdje je funkcija $f(x)$ inverzna Fourierova transformacija kontinuirane funkcije $F(u)$, u i x su kontinuirane varijable.

Jednadžbe (12) i (13) čine par Fourierove transformacije, i potvrđuju važno svojstvo Fourierove transformacije, a to je mogućnost rekonstrukcije prvobitne funkcije $f(x)$ iz transformirane funkcije $F(u)$.

U praksi, osobito u digitalnoj obradi slike, rijetko se radi s kontinuiranim funkcijama. Puno češći slučaj je da se prije transformacije neka kontinuirana funkcija uzorkuje kako bi se dobio diskretan skup brojeva. Za diskretan skup brojeva definicija iz (12) prelazi u:

$$F(u) = \sum_{x=0}^{n-1} f(x) e^{\frac{-2\pi i u x}{n}}, \quad (14)$$

za $u=0,1,2,\dots,n-1$;

gdje je $F(u)$ diskretna Fourierova transformacija funkcije $f(x)$, x je varijabla diskretnog skupa brojeva, a n je ukupan broj elemenata u skupu.

Inverzna funkcija ove funkcije je definirana kao:

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{u=0}^{n-1} F(u) e^{\frac{2\pi i u x}{n}}, \quad (15)$$

za $x=0,1,2,\dots,n-1$;

gdje je $f(x)$ inverzna diskretna Fourierova transformacija funkcije $F(u)$, u je diskretna varijabla, a n je ukupan broj elemenata u skupu.

3.2. Dvodimenzionalna diskretna Fourierova transformacija

S obzirom da su digitalne slike dvodimenzionalne, često ih se prikazuje kao funkciju sa dvije varijable $f(x,y)$ stoga valja proširiti definiciju jednodimenzionalne diskretne Fourierove transformacije na dvije dimenzije. Dvodimenzionalna diskretna Fourierova transformacija slike $f(x,y)$ definirana je kao:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-2i\pi \left[\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n} \right]}, \quad (16)$$

za $u=0,1,2,\dots,n-1$; $v=0,1,2,\dots,m-1$

gdje je $F(u,v)$ diskretna dvodimenzionalna Fourierova transformacija slike $f(x,y)$ dimenzija $m \times n$.

Inverzna diskretna Fourierova transformacija funkcije s dvije varijable definirana je kao:

$$f(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{n-1} F(u, v) e^{2i\pi \left[\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n} \right]}, \quad (17)$$

za $x=0,1,2,\dots,n-1$; $y=0,1,2,\dots,m-1$

gdje je $f(x,y)$ inverzna diskretna Fourierova transformacija funkcije $F(u,v)$.

Jednadžbe (16) i (17) čine par dvodimenzionalne diskretne Fourierove transformacije.

3.2.1. Spektar i faza

Pošto je dvodimenzionalna diskretna Fourierova transformacija kompleksa funkcija, može se izraziti u polarnom obliku pomoću spektra i faze. Polarni oblik funkcije $F(u,v)$ definiran je kao:

$$F(u,v) = |F(u,v)|^{-i\phi(u,v)}, \quad (18)$$

za $u=0,1,2,\dots,n-1$; $v=0,1,2,\dots,m-1$

gdje je $|F(u,v)|$ amplituda (Fourierov spektar), a $\phi(u,v)$ je faza funkcije $F(u,v)$,

amplituda i faza funkcije $F(u,v)$ definirane kao:

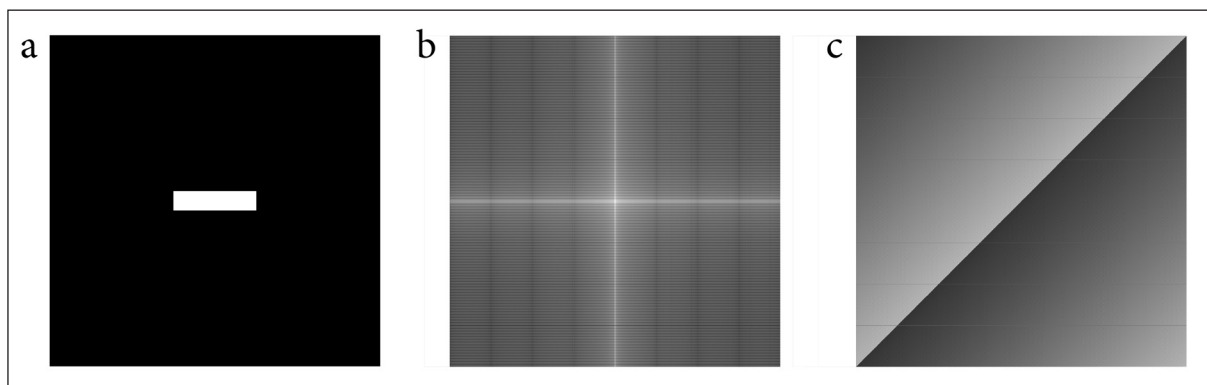
$$|F(u,v)| = \sqrt{R^2(u,v) + I^2(u,v)}, \quad (19)$$

$$\phi(u,v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u,v)}{R(u,v)} \right], \quad (20)$$

za $u=0,1,2,\dots,n-1$; $v=0,1,2,\dots,m-1$

gdje R i I predstavljaju realni i imaginarni dio funkcije $F(u,v)$.

Primjer neke funkcije $f(x,y)$, njen spektar $|F(u,v)|$ i faza $\phi(u,v)$ prikazani su na Slici 11.



Slika 11. Prikaz a) funkcije $f(x)$, b) njenog spektra $|F(u,v)|$ i faze $\phi(u,v)$

3.3. Brza Fourierova transformacija - FFT

Uporaba DFT u računalnoj obradi slike bila bi gotovo nemoguća da ne postoji algoritam za brzu Fourierovu transformaciju. Direktna implementacija jednadžbi (16) i (17) zahtijeva algoritam vremenske složenosti $T(n)=O(n^2)$. Ovo znači da bi za izračun DFT za sliku dimenzija $M \times N$ bilo potrebno $(M \times N)^2$ elementarnih operacija što za sliku sa 1024×1024 elemenata iznosi više od 10^{12} elementarnih operacija. S druge strane stupanj vremenske složenosti FFT algoritma iznosi $T(n)=O(n \log_2 n)$. U ovom slučaju za izračun DFT za slike sa 1024×1024 elemenata potrebno je samo 2×10^6 elementarnih matematičkih operacija.

Pošto je metoda označavanja slika temeljena na Fourierovoj transformaciji, valja iznijeti objašnjenje principa FFT algoritma i napomenuti neke činjenice. Prva poznata uporaba FFT može se pripisati poznatom matematičaru J.F. Gaussu. On je do algoritma došao prilikom korištenja Fourierove transformacije u svojim astronomskim proračunima, no on svoj algoritam nikad nije službeno objavio [58]. Nakon Gaussa FFT algoritam je iznova otkrivan nekoliko puta, no širi interes za brzu Fourierovu transformaciju se pojavio tek kad su Cooley i Tukey objavili svoj algoritam [59]. Valja imati na umu da postoji više modifikacija FFT algoritma koje, ovisno o vrsti ulaznog signala (funkcije) efikasnije ili manje efikasno računaju DFT.

U nastavku je obrađen izvorni *rekurzivni* algoritam kojeg su objavili Cooley i Tukey, čiji je uvjet da vektor za koji se računa DFT ima n članova takav da je n potencija od dva, odnosno da je $n=2^a$, $a \in \mathbb{Z}$

Neka je:

$$\omega_n = e^{\frac{2\pi i}{n}}, \quad (21)$$

Lako je pokazati da po definiciji iz (21) za bilo koji cijeli broj $n \geq 0$, $u \geq 0$ i $d > 0$ vrijedi:

$$\omega_n^{du} = \omega_n^u, \quad (22)$$

Za paran cijeli broj $n > 0$ vrijedi:

$$\omega_n^{n/2} = \omega_2 = -1, \quad (23)$$

Iz čega proizlazi da je:

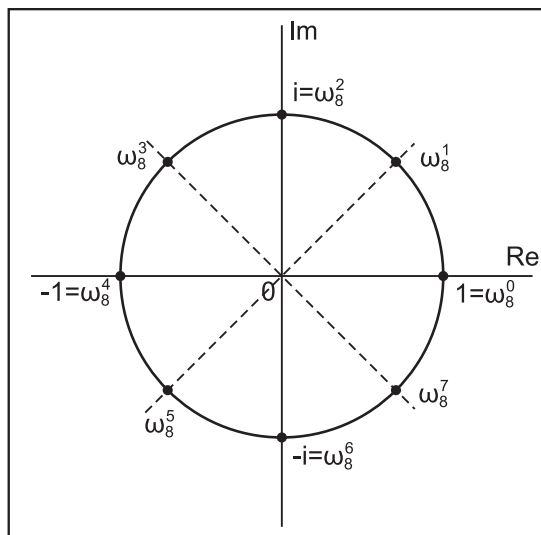
$$\omega_n^{u+n/2} = -\omega_n^u, \quad (24)$$

Ako je $n > 0$ paran broj, onda su kvadrati n rješenja n -tog kompleksnog korijena iz 1 jednaka $n/2$ rješenja kompleksnog $(n/2)$ -tog kompleksnog korijena iz 1, odnosno:

$$(\omega_n^u)^2 = (\omega_n^{u+n/2})^2 = \omega_n^u, \quad (25)$$

Ako imamo n kompleksnih brojeva ω_n^u , takav da je n paran, a $u = 0, 1, \dots, n-1$, iz (25) se da zaključiti da će u prvoj polovici tog skupa, tj. za $u = 0, 1, \dots, n/2 - 1$, svaki ω_n^u imati para suprotnog predznaka u drugoj polovici tog skupa, $\omega_n^{u+n/2}$. Za potrebe bržeg računanja DFT-a,

odgovarat će nam n -ti kompleksan korijen broja 1 takav da je n paran; stoga što za parne n , skup rješenja tog korijena sadrži parove suprotnih predznaka (Slika 12.).



Slika 12. Rješenja osmog kompleksnog korijena iz 1

Supstitucijom iz (21) i raspisivanjem sume iz (14) dobije se:

$$F(u) = \sum_{x=0}^{n-1} f(x)(\omega_n^u)^x, \quad (26)$$

$$F(u) = f(n-1)(\omega_n^u)^{n-1} + f(n-2)(\omega_n^u)^{n-2} + \dots + f(1)(\omega_n^u) + f(0), \quad (27)$$

za $u = 0, \dots, n-1$, uz pretpostavku da je n paran. Članovi u ovoj sumi grupiraju se tako da na lijevoj strani budu svi oni gdje je x paran, a na desnoj članovi gdje je x neparan,

$$F(u) = \left[f(n-2)(\omega_n^u)^{n-2} + \dots + f(0) \right] + \left[f(n-1)(\omega_n^u)^{n-1} + \dots + f(1)(\omega_n^u) \right], \quad (28)$$

Iz desne zagrade izluči se ω_n^u ,

$$F(u) = \left[f(n-2)(\omega_n^u)^{n-2} + \dots + f(0) \right] + \omega_n^u \left[f(n-1)(\omega_n^u)^{n-2} + \dots + f(1) \right], \quad (29)$$

gdje je $u = 0, 1, \dots, n-1$. Koristeći (27) članove u lijevoj zagradi može se preoblikovati na sljedeći način:

$$\begin{aligned} & f(0) + f(2)(\omega_n^u)^2 + f(4)(\omega_n^u)^{2 \cdot 2} + \dots + f(n-2)(\omega_n^u)^{2(n/2-1)} = \\ & = f(0) + f(2)(\omega_{n/2}^u) + f(4)(\omega_{n/2}^u)^2 + \dots + f(n-2)(\omega_{n/2}^u)^{n/2-1}, \end{aligned} \quad (30)$$

Analogno se pristupa i članovima u desnoj zagradi. Time se dobije općeniti izraz za $F(u)$ u novom obliku

$$F(u) = \left[f(n-2)(\omega_{n/2}^u)^{n/2-1} + \dots + f(2)(\omega_{n/2}^u) + f(0) \right] + \omega_n^u \left[f(n-1)(\omega_{n/2}^u)^{n/2-1} + \dots + f(3)(\omega_{n/2}^u) + f(1) \right], \quad (31)$$

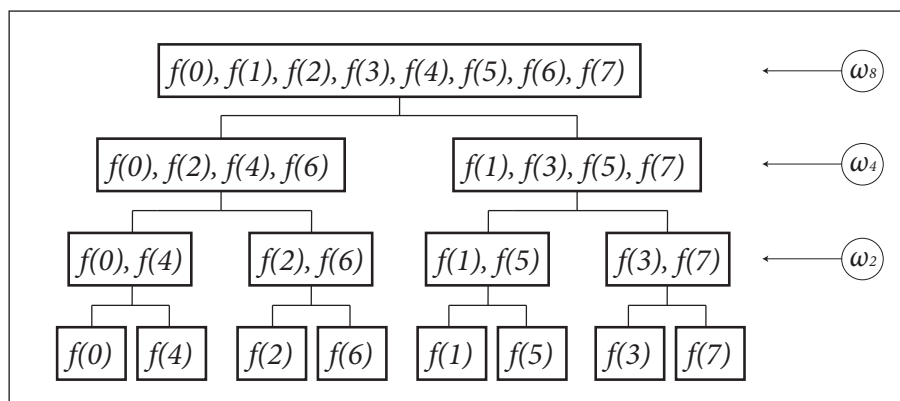
Izrazi u lijevoj i desnoj zagradi predstavljaju dva nova DFT-a sa dvostruko manje članova, a time i dvostruko manje kompleksnih korijena, pa se gornji izraz može formulirati kao:

$$F(u) = DFT_{n/2}(f(e)) + \omega_n^u DFT_{n/2}(f(o)), \quad (32)$$

Gdje su $e=0, 2, \dots, n-2$; i $o=1, 3, \dots, n-1$. Pošto je $\omega_{n/2}^{u+n/2} = \omega_{n/2}^u$, te $\omega_n^{u+n/2} = -\omega_n^u$ iz (32) vidi se da se za članove $F(u)$ i $F(u+n/2)$, za $u=0, 1, \dots, n/2-1$, na ovom nivou rekurzije, računa ista DFT, sa razlikom što u $F(u+n/2)$ ispred desne zagrade stoji predznak minus, odnosno:

$$F(u+n/2) = DFT_{n/2}(f(e)) - \omega_n^u DFT_{n/2}(f(o)), \quad (33)$$

Ovim *divide-and-conquer* korakom uštedi se pola računa na ovom nivou rekurzije, a isto tako se može postupiti i na idućem nivou za $f(e)$ i $f(o)$ gdje se DFT računa uz kompleksna rješenja $(n/2)$ -tog korijena iz 1. No da bi se rekurzija mogla nastaviti, potrebno je da n bude potencija od dva, odnosno da je $n=2^a$. FFT rekurzija za $n=8$ prikazan je na Slici 13.



Slika 13. FFT rekurzija za $n=8$

4. EVALUACIJA METODE ZA OZNAČAVANJE SLIKA

Kako bi se mogla ocijeniti uspješnost neke metode za označavanje slika potrebno je definirati okvire u kojima će se ta evaluacija provoditi. Jasno je da neka metoda označavanja ne može biti jednako uspješna za sve moguće aplikacije. Stoga se, prema budućoj primjeni, mora odrediti i način na koji će se neka metoda evaluirati. Ovo je ujedno razlog zašto ne postoji neki opće prihvaćeni standard za evaluaciju. U literaturi postoji samo nekoliko radova koji se bave problemom evaluacije [1, 60, 61, 62].

Prema [60] za evaluaciju neke metode označavanja slika potrebno je:

- Definirati glavne parametre po kojima se vrši evaluacija (robusnost, kvaliteta, itd)
- Odrediti vrstu degradacije (napada) koja se javlja ili se može javiti u primjeni (JPEG kompresija, geometrijske transformacije, itd.)
- Provesti ispitivanje na velikoj bazi testnih slika
- Statistički obraditi ostvarene rezultate (točnost detekcije, ROC krivulja)

Iako ne postoji standard za evaluaciju metoda za označavanje slika, većina autora se slaže da je, za objektivnu ocjenu uspješnosti neke metode, potrebna evaluacija utjecaja na kvalitetu označene slike i evaluacija otpornosti na degradacije koje se mogu javiti u komunikacijskom kanalu. Ispitivanje je potrebno provesti na testnoj bazi s mnogo slika.

4.1. Baza testnih slika

Pošto greške pri detekciji, među ostalim čimbenicima, ovise i o samim slikama, važno je sastaviti što je moguće objektivniju bazu testnih slika. Objektivna baza testnih slika mora se sastojati od širokog raspona različitih vrsta slika, kao što su medicinske slike, slike zasićenih boja, slike portreta, slike različitih uzoraka, itd. Ipak, baza testnih slika se mora i prilagoditi primjeni koju će metoda za označavanje slika imati u praksi. Na primjer, za evaluaciju

metode označavanja medicinskih slika treba sastaviti takvu bazu slika koju uglavnom čine medicinske slike.

4.2. Evaluacija kvalitete označenih slika

Prilikom umetanja vodenog žiga u neku sliku se, kao i kod svake druge računalne obrade slike, dio slikovne informacije mijenja. Ova promjena utječe na vizualnu kvalitetu slike pa postoji potreba da se ona kvantitativno izrazi. Da bi se utjecaj nekog procesa na vizualnu kvalitetu slike kvantitativno izrazio moguća su dva pristupa:

- **Subjektivni pristup** – ljudskom vizualnom usporedbom originalne i obrađene slike.
- **Objektivni pristup** – kvantizacijom razlike originalne slike $f(x,y)$ i obrađene slike $g(x,y)$ nekom definiranom matematičkom funkcijom.

Označene slike se, u konačnici, gledaju. Stoga je subjektivna procjena razlike vrlo prikladna za evaluaciju utjecaja nekog procesa na sliku. Obično se provodi na način da veći broj promatrača, u kontroliranim uvjetima, uspoređuje originalnu i obrađenu sliku, a da razliku ocjeni po nekoj unaprijed dogovorenoj skali. Iako je subjektivni pristup prirodni za evaluaciju slika, u pravilu je vrlo zahtjevan i često nepraktičan.

S druge strane, objektivna evaluacija omogućava brzu i jednostavnu kvantizaciju razlike originalne i obrađene slike, a temelji se na definiciji matematičke funkcije kojom se razlika objektivno izražava. Glavni nedostatak ovog pristupa je činjenica da se matematički definirana razlika ne poklapa s vizualnom dojmom razlike. Dobar primjer je činjenica da je ljudski vid manje osjetljiv na razlike u slici koja sadrži izražene tekture nego u slici koja sadrži jednolike površine [63].

Postoji više različitih objektivnih mjera kvalitete slike. SNR – (eng. *Signal to Noise Ratio*), PSNR – (eng. *Peak Signal to Noise Ratio*) su samo neki od njih [64, 65]. Svim tim mjerama je

zajedničko da na matematički definiran način određuju razliku između elemenata originalne slike $f(x,y)$ i elemenata obrađene slike $g(x,y)$.

4.2.1. PSNR

Najčešća objektivna mjera za evaluaciju utjecaja umetanja vodenog žiga na kvalitetu slike je PSNR. Definiran je kao omjer maksimalne moguće vrijednosti signala i šuma u signalu. Ako je originalna slika $f(x,y)$, a obrađena slika $g(x,y)$ tada je PSNR definiran kao:

$$PSNR = 10 \cdot \log \left(\frac{MAX^2}{\frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} \|g(x,y) - f(x,y)\|^2} \right), \quad (34)$$

gdje je MAX najveća moguća vrijednost koju element slike može imati (za slike dubine 8 bita ova vrijednost iznosi 255), a m i n predstavljaju dimenzije slike.

PSNR je izražen u decibelima. Vrijednosti iznad 40 dB označavaju malu razliku između originalne i obrađene slike (dobra kvaliteta), dok vrijednosti ispod 20 dB označavaju veliku razliku (loša kvaliteta) [66]. Ipak, treba imati na umu da je glavni nedostatak PSNR mjere loša korelacija sa subjektivnom procjenom kvalitete slike [67]. Na Slici 14. je jasno prikazan ovaj nedostatak. Slika 14.a) prikazuje originalnu sliku, Slike 14.b i 14.c prikazuju obrađene slike. Slika 14.b je obrađena tako da je prvi redak i prvi stupac elemenata slike dupliciran, a svi ostali elementi slike su pomaknuti za jedan stupac ulijevo i jedan redak nadolje. Iako se vizualno ova slika gotovo ne razlikuje od originala, PSNR vrijednost za ovu sliku u usporedbi sa originalom iznosi 25,43 dB. Slika 14.c je obrađena tako da su djevojci ucrtani brkovi. Iako ovakva obrada slike znatno narušava vizualnu kvalitetu slike, PSNR vrijednost slike 14.c u usporedbi sa originalom iznosi 30,12 dB.



Slika 14. Nedostatak PSNR mjere. a) originalna slika; b) Pomak svih elemenata slike lijevo i dolje (PSNR= 25,43 dB); c) ucrtani brkovi (PSNR=30,12 dB).

Unatoč ovom nedostatku PSNR mjera je općeprihvaćena u istraživačkoj zajednici za računalnu obradu slike kao način objektivne procjene kvalitete slike. Bilo da je riječ o kompresiji ili označavanju slika PSNR predstavlja odličan alat za usporedbu utjecaja različitih metoda obrade slike na kvalitetu slike.

4.3. Evaluacija robusnosti metode za označavanje slika

Robusnost neke metode za označavanje slika je sposobnost detekcije vodenog žiga nakon što je označena slika izložena nekom obliku procesiranja. Kako bi se evaluirala robusnost metode za označavanje slika potrebno je označene slike podvrgnuti različitim “napadima“ (filtriranje, kompresija, ispisivanje i skeniranje, geometrijske transformacije, itd.) te analizirati kakve se greške javljaju prilikom detekcije.

Svaki sustav za označavanje slika u određenim slučajevima griješi pri detekciji. Greške se ne mogu u potpunosti izbjeći, no može ih se svesti na prihvatljivu mjeru, koja ovisi o primjeni sustava. Vrste grešaka koje se mogu javiti ovise o samom sustavu, a određuju se njegovom analizom. Općenito, za analizu grešaka pri detekciji, dovoljno je analizirati detektor sustava za označavanje slika.

Uloga detektora u sustavu za označavanje slika je provjeravanje je li slika koja se testira označena ili nije. Detektor, ovisno o pragu detekcije, „odlučuje“ je li testirana slika označena odgovarajućim vodenim žigom ili nije. Ukoliko je detektirana vrijednost iznad praga detekcije, detektor određuje da je testirana slika označena, u suprotnom detektor određuje da testirana slika nije označena. Ovaj test se, dakle, svodi na testiranje dviju hipoteza od kojih je samo jedna istinita [60]:

- H_0 : slika je označena
- H_1 : slika nije označena

Kod testiranja hipoteza moguća su četiri ishoda (Tablica 3.).

- Ispravna odluka da je slika označena – Točna pozitivna detekcija (TPD)
- Kriva odluka da je slika označena – Kriva pozitivna detekcija (KPD) – greška I. vrste
- Ispravna odluka da slika nije označena – Točna negativna detekcija (TND)
- Kriva odluka da slika nije označena – Kriva negativna detekcija (KND) – greška II. vrste

Tablica 3. Mogući ishodi testiranja hipoteza

| | | Odluka | |
|--------|-------|-----------------------|------------------------|
| | | odbaci H_0 | prihvati H_0 |
| Istina | H_0 | KPD – greška I. vrste | TND |
| | H_1 | TND | KND – greška II. vrste |

Jasno je da vrijednost praga detekcije – t direktno utječe na ponašanje detektora, te se ovisno o vrijednosti t mijenja i vjerojatnost greške I. vrste – α i vjerojatnost greške II. vrste – β koje su definirane kao:

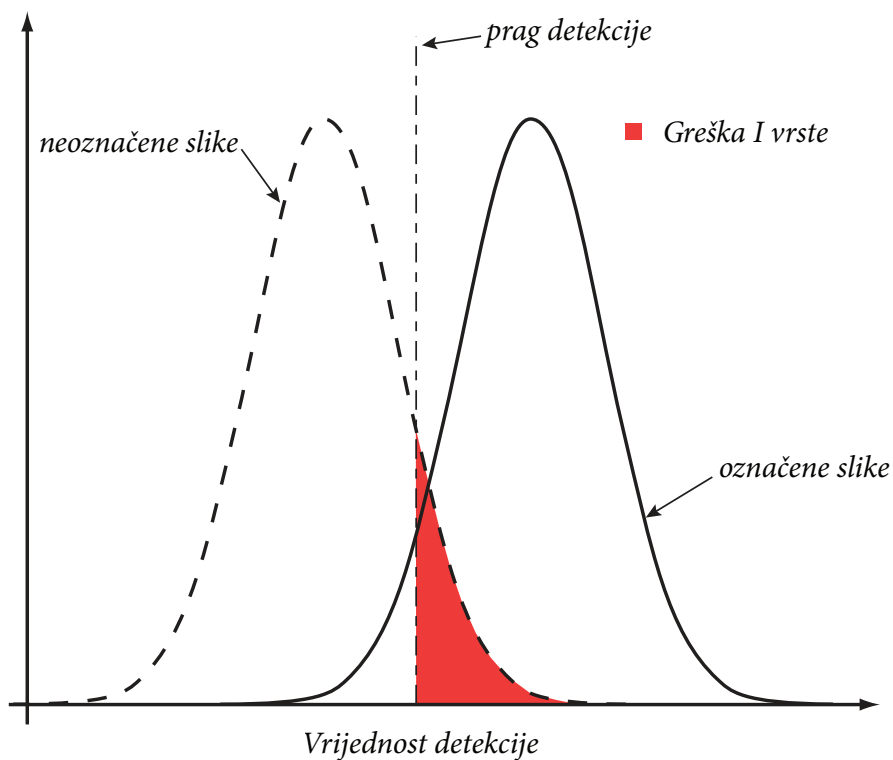
$$\alpha = P(x \geq t / H_0), \quad (35)$$

$$\beta = P(x < t / H_1), \quad (36)$$

Drugim riječima, ukoliko se definira preniska vrijednost praga detekcije, povećava se vjerojatnost greške I. vrste – α . S druge strane previsoka vrijednost praga detekcije, povećava vjerojatnost greške II. vrste – β .

4.3.1. Greška I. vrste – KPD

Greška I. vrste odnosno kriva pozitivna detekcija (KPD) se javlja kada detektor registrira prisutnost vodenog znaka u neoznačenoj slici. Na Slici 15. je prikazano zašto dolazi do greške I. vrste. Iscrtanom linijom je prikazan histogram vrijednosti detekcije za skup neoznačenih testnih slika. Punom linijom je prikazan histogram vrijednosti detekcije za skup označenih testnih slika. Prag detekcije t je označen sa vertikalnom iscrtanom linijom. Ukoliko je za neku sliku detektirana vrijednost manja od t detektor određuje da vodeni žig nije prisutan, u suprotnom detektor određuje da je vodeni žig prisutan.

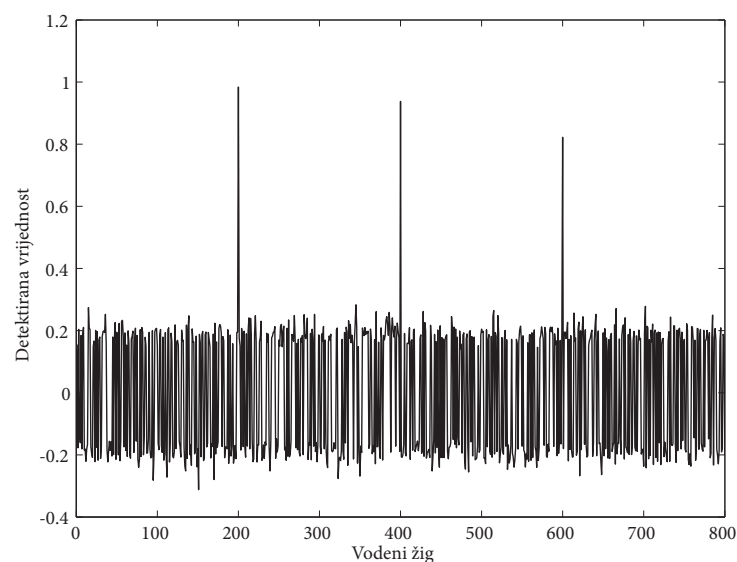


Slika 15. Ovisnost greške I. vrste o pragu detekcije

Na Slici 15. crveno je označena vjerojatnost α definirana u (35). Iznos α ovisi o pragu detekcije t i obliku krivulje, dok sam oblik krivulje ovisi o algoritmu za detekciju i načinu na koji se detekcija provodi. Iz tog proizlazi da glavni utjecaj na vjerojatnost greške I. vrste imaju statistička svojstva vodenog žiga i slike. Važno je razlikovati dva slučaja koja se mogu pojaviti u praksi:

- Kada detektor traži jedan od više mogućih vodenih žigova u jednoj slici i
- Kada detektor traži jedan vodeni žig u mnogo različitih slika.

Ovisno o ova dva slučaja, statistički se modelira vjerojatnost greške I. vrste. Za prvi slučaj, kada detektor traži jedan od više mogućih vodenih žigova u jednoj slici, vodeni žig se smatra slobodnom varijablom, a slika se smatra konstantom. Iako primjena ovakvog modela u praksi gotovo i ne postoji, u literaturi se često navodi jer je sama analiza relativno laka, te se njome opisuje sposobnost nekog detektora da razlikuje umetnute vodene žigove (Slika 16.).

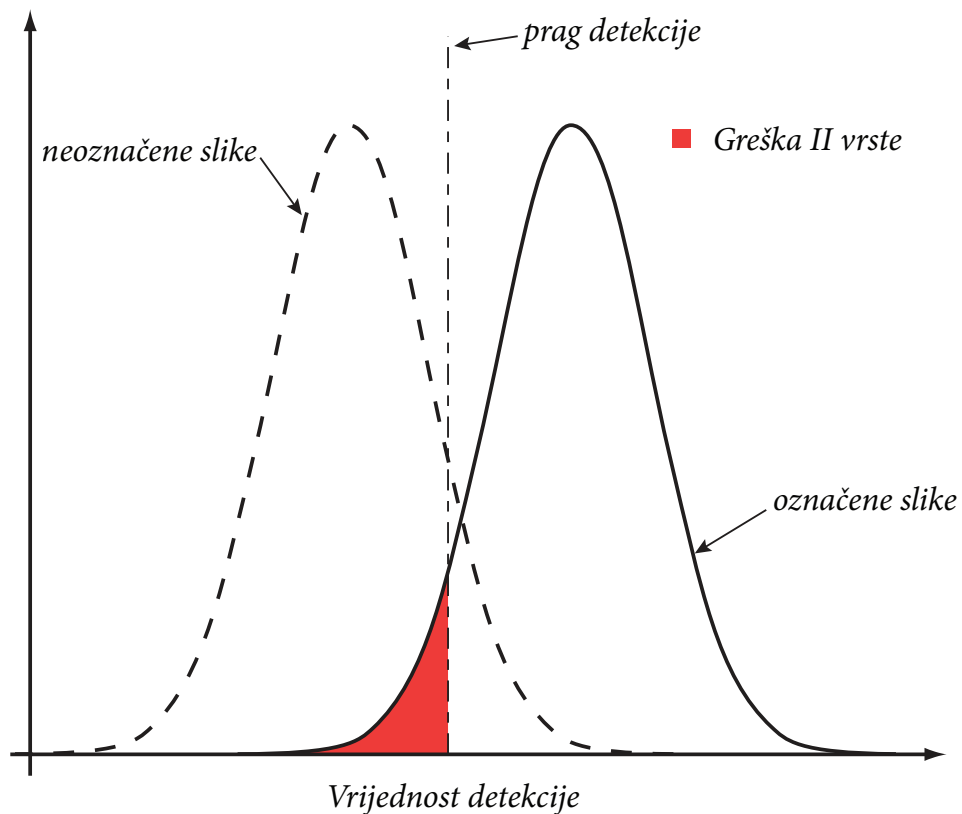


Slika 16. Ispitivanje prisutnosti 800 različitih vodenih žigova u slici u koju su umetnuta 3 vodena žiga

S analitičkog stajališta puno je važniji drugi slučaj, kada detektor traži jedan vodeni žig u mnogo različitih slika. U ovom se slučaju, vodeni žig smatra konstantom, a slika slobodnom varijablom.

4.3.2. Greška II. vrste – KND

Greška II. vrste ili kriva negativna detekcija (KND) se javlja kada detektor ne detektira vodeni žig u označenoj slici. Zašto dolazi do greške II. vrste prikazano je na Slici 17.



Slika 17. Ovisnost greške II. vrste o pragu detekcije

Iscrtanom linijom je prikazan histogram vrijednosti detekcije za skup neoznačenih testnih slika. Punom linijom je prikazan histogram vrijednosti detekcije za skup označenih testnih slika. Prag detekcije t je označen sa vertikalnom iscrtanom linijom. Ukoliko je za neku ozna-

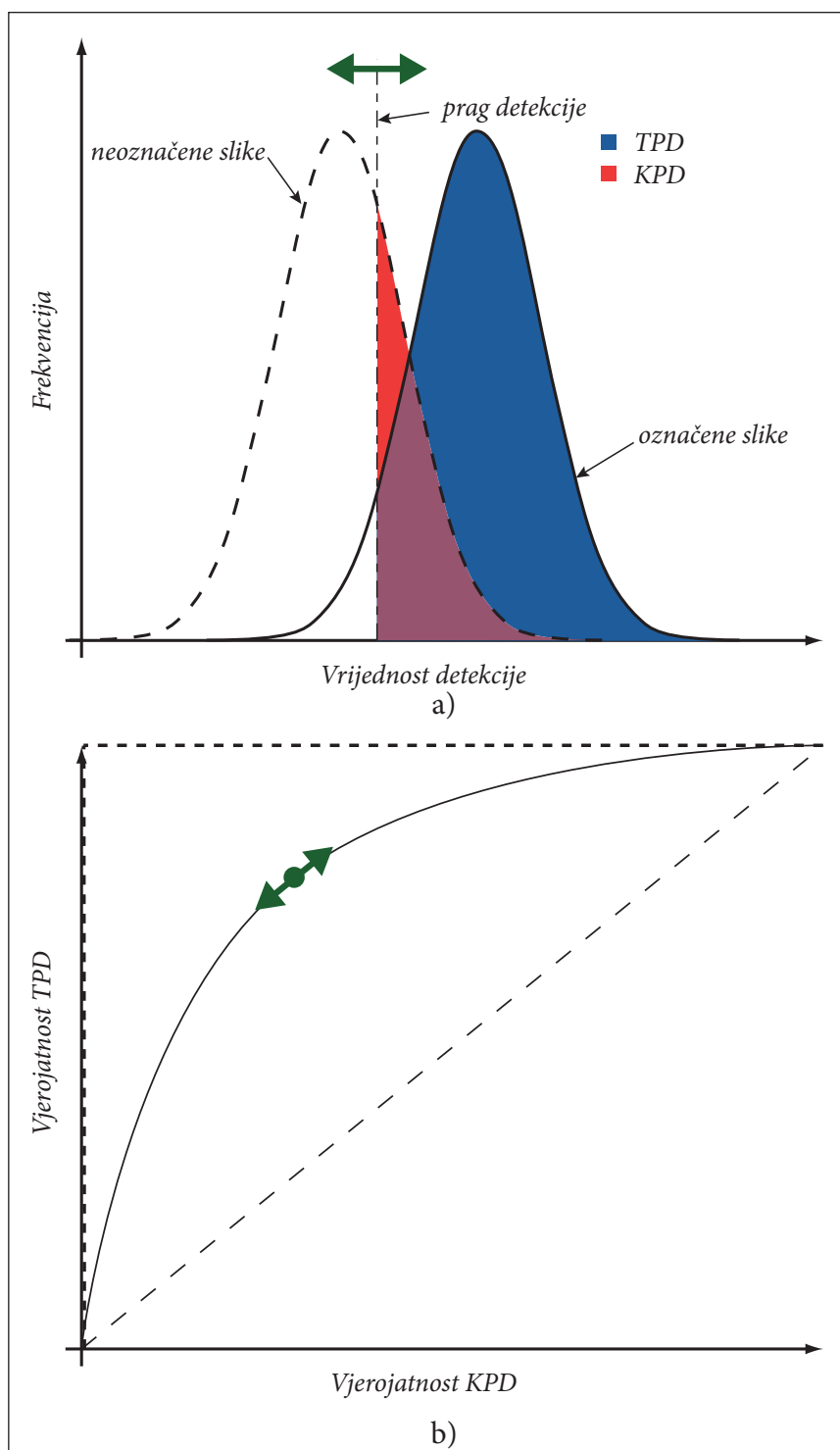
čenu sliku detektirana vrijednost manja od τ detektor krivo određuje da vodeni žig nije prisutan. Na Slici 17. crvenom bojom označena je vjerojatnost β .

Analiza vjerojatnosti greške II. vrste je slična analizi vjerojatnosti greške I. vrste. Ipak, na vjerojatnost greške II. vrste utječe puno više faktora. Vjerojatnost β ne ovisi samo o statističkim svojstvima vodenog žiga i slike, već i o načinu implementacije vodenog žiga i načinu njegove detekcije. Uz to, na β značajno utječe svako procesiranje koje označena slika prolazi od implementacije vodenog žiga do njegove detekcije. Štoviše, procesiranje označene slike koja se dogodi u komunikacijskom kanalu između enkodera i dekodera u pravilu povećava vjerojatnost greške II. vrste. Stoga se analiza vjerojatnosti II. vrste treba vršiti u okviru komunikacijskog kanala, odnosno, ovisno o mogućem procesiranju koje označena slika prolazi.

4.3.3. ROC krivulje

Iz razmatranja prethodna dva poglavlja, jasno je da kod svakog sustava za označavanje slika postoji sprega između vjerojatnosti greške I. vrste i vjerojatnosti greške II. vrste. Ta sprega je zapravo definirani prag detekcije, o kojemu ovise obje vjerojatnosti. Kako se vrijednost praga detekcije povećava, vjerojatnost greške I. vrste raste, a vjerojatnost greške II. vrste pada. Drugim riječima, povećanjem praga detekcije raste i vjerojatnost da detektor ne detektira vodeni žig u označenoj slici, a pada vjerojatnost da detektor krivo detektira vodeni žig u neoznačenoj slici. Dakle, za analizu sustava za označavanje slika potrebno je uzeti u obzir obje vjerojatnosti istodobno. Najbolji alat za analizu sprege između vjerojatnosti I. i II. vrste je *Receiver Operating Characteristic* (ROC) krivulja.

ROC krivulja je standardan grafički alat za analizu komunikacijskih sustava [68]. Ona pokazuje vezu između vjerojatnosti točne pozitivne detekcije i vjerojatnosti krive pozitivne detekcije (Slika 18.).



Slika 18. a) Histogram detektiranih vrijednosti b) ROC krivulja

ROC krivulja idealnog detektora ide od ishodišta do gornjeg lijevog kuta dijagrama, a zatim do gornjeg desnog kuta (Slika 18.b). Dijagonala prikazuje ROC krivulju detektora koji slučajno detektira vodeni žig, odnosno točan je u samo 50% slučajeva.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ove doktorske disertacije je razvoj metode zaštite autorskih prava **otisnutih** slika ume-tanjem **digitalnog** vodenog žiga. Osnovni zahtjevi ove metode su visoka kvaliteta označenih slika i velika otpornost vodenog žiga na degradacije koje se javljaju u komunikacijskom ka-nalu. Važno je da metoda bude robusna na što više različitih oblika obrade označene slike, no prvenstveno je bitno da je otporna na PS i PK proces, osnovnu obradu slike (izoštavanje, izrezivanje, itd.) i kompresiju (JPEG).

Analizom postojećih metoda zaštite slika, ustanovljeno je da Fourierova domena zbog svoje invarijantnosti na translaciju, i djelomične otpornosti na rotaciju predstavlja najbolji pristup za zaštitu slika koje prolaze kroz PS i PK proces. Inherentna robusnost na geometrijske tran-sformacije, zajedno sa svojstvom disperzije energije vodenog žiga preko cijele slike, pruža kvalitetnu osnovu za razvoj metode za zaštitu autorskih prava otisnutih slika.

Solanki i suradnici [69] detaljno su proučili utjecaj PS procesa na koeficijente spektra u Fou-rierovoj domeni i navode sljedeće zaključke:

- Koeficijenti niskih i srednjih frekvencija su puno otporniji na PS proces od koeficije-nata visokih frekvencija.
- U nisko-frekventnom i srednje-frekventnom pojasu koeficijenti male amplitude su izloženiji šumu od koeficijenata velike amplitude.
- Mala modifikacija koeficijenata amplitude u nisko-frekventnom i srednje-frekven-tnom pojasu ne izaziva značajnu vizualnu degradaciju slike.

Iz gore navedenih razloga, metoda označavanja slika koja se temelji na DFT predstavlja naj-bolji pristup označavanja slika za primjenu gdje dolazi do promjene iz digitalnog u analogni medij.

5.1. Metoda označavanja

Metoda označavanja slika razvijena u ovom doktorskom radu spada u multiplikativne metode označavanja u frekvencijskoj domeni [70]. Vodeni žig se u pravilu formira množenjem niza slučajnih brojeva (generiranih generatorom pseudoslučajnih brojeva), transformiranim koeficijentima originalne slike i faktora implementacije. Opći oblik multiplikativne metode dan je jednadžbom:

$$\mathbf{M}_v = \mathbf{M}(1 + \alpha \cdot \mathbf{V}), \quad (37)$$

gdje matrice \mathbf{M}_v , \mathbf{M} i \mathbf{V} predstavljaju, redom, označenu sliku, originalnu sliku, i formirani vodeni žig, a α je skalar kojim se kontrolira energija vodenog žiga u označenoj slici.

5.1.2. Generator pseudo-slučajnih brojeva

Generator pseudo-slučajnih brojeva je algoritam kojim se generira niz „slučajnih“ brojeva. Generirani niz nije potpuno slučajan jer je određen malim brojem unaprijed zadanih početnih vrijednosti. Osnovno svojstvo generatora pseudo-slučajnih brojeva je da je generirani niz brojeva uvijek isti za iste početne uvjete. Najvažniji algoritmi su linearni kongruentni generator (*eng. Linear Congruent Generator*), Fibonacciev generator (*eng. Lagged Fibonacci Generator*), Blum Blum Shub generator, Marsenneov twister, itd.

Kvalitetan generator pseudo-slučajnih brojeva mora imati sljedeća svojstva:

- Vjerojatnost pojave nekog niza slučajnih brojeva treba biti podjednaka za sve nizove slučajnih brojeva koji se mogu pojaviti.
- Ne smije biti korelacije između različitih dijelova istog generiranog niza brojeva.
- Period generatora mora biti što je moguće veći.

Donedavno, najčešći algoritam za generiranje pseudo-slučajnih brojeva bio je linearni kongruentni generator. Algoritam je vrlo brz, zahtijeva malo memorije, s teoretskom periodom do 2^{64} . Glavni nedostatak ovog algoritma, među ostalim, je uočena korelacija između podnizova generiranog niza brojeva.

Većina programskih jezika, kao osnovni algoritam za generiranje pseudo-slučajnih brojeva danas koristi Marsenneov twister. Marsenneov twister su 1997. godine razvili Makoto Matsumoto i Takuji Nishimura [71]. Ovaj algoritam generira nizove brojeva koja imaju izvrsna statistička svojstva, izuzetno je brz, i posjeduje iznimno veliku periodu od $2^{19937}-1$.

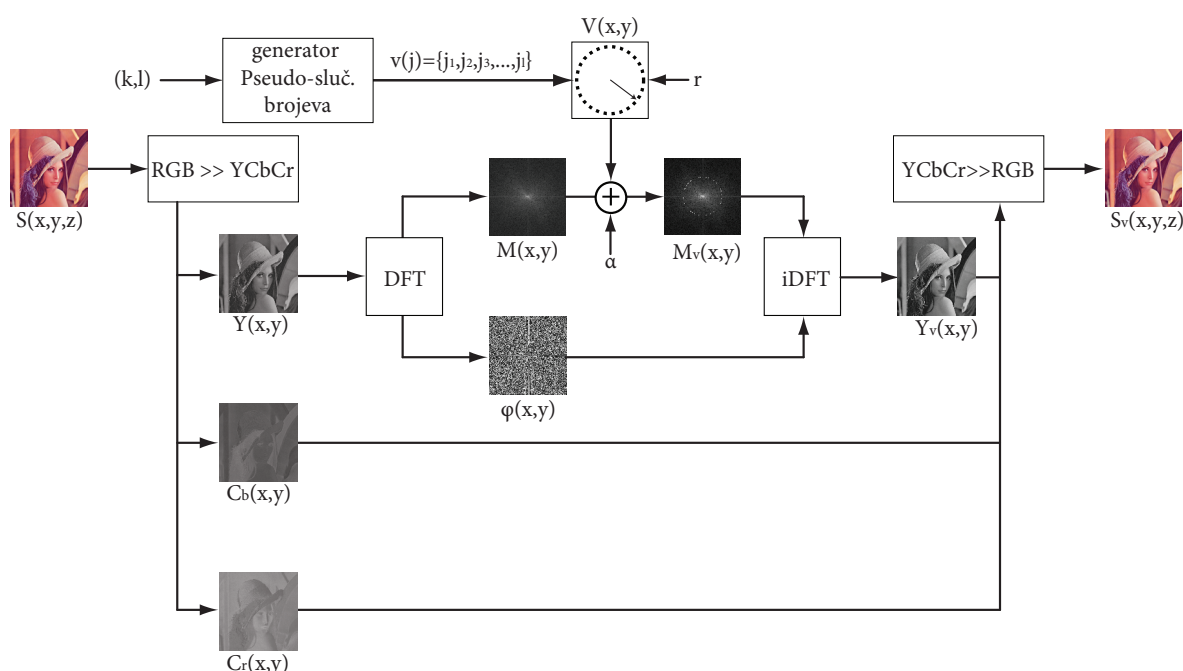
5.1.3. Koder

Koderom se slika označava modifikacijom koeficijenata amplitude u frekvencijskoj domeni. Blok dijagram koderu je prikazan na Slici 19. Proces označavanja slike može se podijeliti na sljedeće korake:

- Konverzija prostora boja
- DFT Y kanala slike
- Određivanje koeficijenata amplitude i faze
- Formiranje vodenog žiga
- Umetanje vodenog žiga
- Inverzna DFT
- Konverzija prostora boja

Slika koja se označava mora biti, ili 24 bitna slika u RGB prostoru boja, ili 8 bitna crno bijela slika. Slika se transformira u $Y C_b C_r$ prostor boja, kako bi se odvojila informacija o svjetlini elemenata slike, od informacije o boji (za 8 bitne slike ovaj korak se preskače). Nakon toga

se Y kanal slike $Y(x,y)$ iz prostorne domene prebaci u frekvencijsku domenu s DFT. Kako bi se olakšala implementacija vodnog žiga potrebno je pomaknuti periodu DFT, tako da koeficijent $F(0,0)$ bude u centru slike, odnosno da bude na koordinati $(m/2, n/2)$. Ovime se niske frekvencije pomiču u centar, a visoke na rubove slike. Nakon korekcije periode, izrazima (19) i (20) odvajaju se faza i amplituda. Koeficijenti faze se spremaju u memoriju, dok se koeficijenti amplitude koriste za formaciju vodnog žiga.



Slika 19. Koder sustava za označavanje slike.

Vodeni žig je matrica iste veličine kao i slika koju se označava, a formira se pomoću koeficijenta amplitude (spektra) originalne slike, radijusa implementacije i vektora generiranog generatorom pseudo-slučajnih brojeva. Formacija vodnog žiga odvija se u dva koraka:

- Generator pseudo-slučajnih brojeva na temelju ključa k i faktora duljine l , generira binarni niz brojeva duljine l .

- Pomoću generiranog niza brojeva v , definiranog radijusa r i koeficijenata amplitude originalne slike, formiraju se elementi vodenog žiga $V(x,y)$ korištenjem izraza:

$$V(x_i, y_i) = v(j) \cdot \left(\frac{1}{9} \sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 M_k(x_i + s, y_i + t) \right), \quad (38)$$

Gdje je $j=(1,2,3,\dots,l)$, v je generirani niz brojeva, M_k predstavlja koeficijente amplitude slike u Fourierovoj domeni.

Iz gornjeg je vidljivo da elementi matrice V ovise o srednjoj vrijednosti 8 najbližih elemenata u susjedstvu elementa $M_k(x_i, y_i)$. Gdje su koordinate x_i i y_i definirane kao:

$$x_i = \left(\frac{m}{2} + 1 \right) + \left\lfloor r \cos\left(\frac{j \cdot \pi}{l}\right) \right\rfloor, \quad (39)$$

$$y_i = \left(\frac{n}{2} + 1 \right) + \left\lfloor r \sin\left(\frac{j \cdot \pi}{l}\right) \right\rfloor, \quad (40)$$

gdje je $j=(1,2,3,\dots,l)$, m i n označavaju dimenzije slike, r je radijus implementacije, l označava broj elemenata generiranog niza, a operator $\lfloor \cdot \rfloor$ predstavlja zaokruživanje na prvi manji cijeli broj.

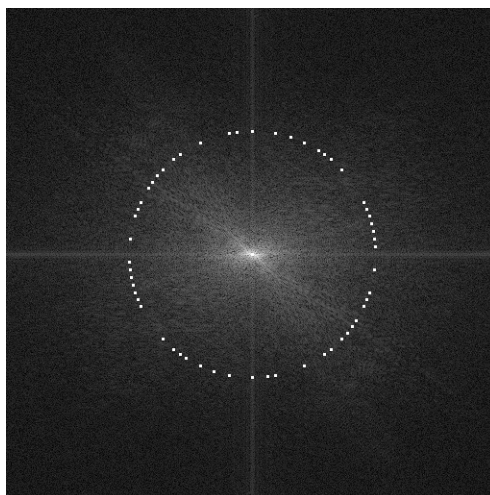
Nakon što je vodeni žig formiran, koder modificira koeficijente amplitude pomoću izraza:

$$M_v(x, y) = M(x, y) + \alpha * V(x, y), \quad (41)$$

Gdje su $M_v(x,y)$ modificirani koeficijenti amplitude, $M(x,y)$ su originalni koeficijenti amplitude, $V(x,y)$ su koeficijenti vodenog žiga, a α je faktor implementacije kojim se kontrolira energija vodenog žiga.

Modificirani koeficijenti amplitude (Slika 20.) spajaju se s koeficijentima faze te se inverznom DFT vraćaju u prostornu domenu te se dobije označen Y kanal $Y_v(x,y)$. Y_v kanal se spaja sa

originalnim C_b i C_r kanalima te se vrši transformacija prostora boja iz YC_bC_r u RGB. Rezultat je označena slika $S_v(x,y,z)$.

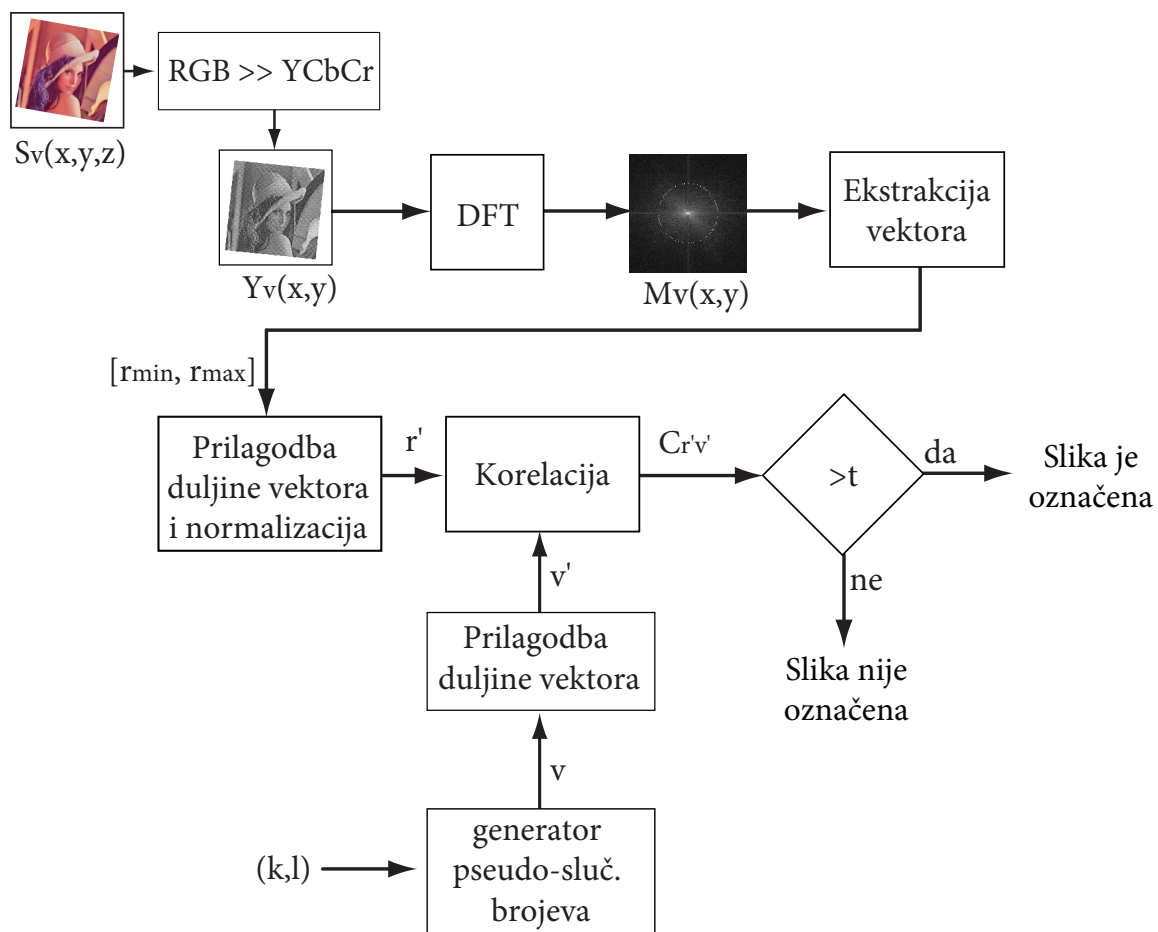


Slika 20. Vodeni žig umetnut u koeficijente amplitude u Fourierovoj domeni.

(Kako bi vodeni žig bio vidljiv na slici, korišteni faktor implementacije je bio iznimno velik $\alpha = 1000$.)

5.1.4. Dekoder

Dekoder sustava za označavanje slika temelji se na ispitivanju korelacije između vektora generiranog generatorom pseudo-slučajnih brojeva i vektora ekstrahiranih iz slike koja se ispituje. Dakle, za detekciju je potrebno imati ključ i duljinu vektora koji je korišten pri formiranju vodenog žiga. Valja naglasiti da je ovo slijepa detekcija, pošto za detekciju nije potrebna originalna slika. Detekcija je pozitivna ukoliko vrijednost korelacije prijeđe, unaprijed definirani, prag detekcije. Ukoliko je vrijednost korelacije manja od praga detekcije, detekcija je negativna.



Slika 21. Blok dijagram detektora

Blok dijagram dekodera prikazan je na Slici 21. Sam proces detekcije se sastoji od ovih koraka:

- Skaliranje slike
- Konverzija prostora boja
- DFT Y kanala slike
- Određivanje koeficijenata amplitude
- Generiranje vektora generatorom pseudo-slučajnih brojeva
- Ekstrakcija vektora iz koeficijenata amplitude

- Normalizacija vektora
- Računanje korelacije
- Usporedba vrijednosti korelacije
- Odluka

Slika koja se testira prvo se skalira na veličinu 512×512 elemenata. Empirijski je ustanovljeno da ovaj stupanj skaliranja nema znatan utjecaj na vrijednost detekcije, dok s računalnog aspekta znatno olakšava i ubrzava ostatak procesa. Zatim se vrši transformacija iz RGB prostora boja u $YCbCr$, kako bi se odvojila informacija o svjetlini elemenata slike, od informacije o boji (za 8 bitne slike ovaj korak se preskače). Y kanal se tada s DFT prebacuje u frekvencijsku domenu slike, perioda se podešava tako da $F(0,0)$ bude u centru slike, odnosno na koordinatama $(m/2, n/2)$, te se pomoću (19) računa spektar fourierove domene .

Prije ispitivanja slike na prisutnost vodenog žiga potrebno je, na osnovu ključa k , generatorom pseudo-slučajnih brojeva generirati binarni niz brojeva sa l elemenata. Ovaj niz predstavlja vektor v s kojim se uspoređuju vektori ekstrahirani iz spektra Fourierove domene.

Pošto dekođer ne zna koji je radijus korišten za implementaciju vodenog žiga, vrši se ekstrakcija više vektora iz definiranog područja od r_{min} do r_{max} . Ukoliko je pri detekciji poznat točan radijus koji je korišten za formiranje vodenog žiga potrebno je ekstrahirati samo jedan vektor. Međutim, valja imati na umu da se, računalnom obradom slike (npr. izrezivanjem), može utjecati na radijus traženog vektora. Stoga se većim definiranim područjem povećava vjerojatnost detekcije vodenog žiga.

Svaki vektor se ekstrahira element po element, na način da se odredi najveći element između koeficijenta $M_v(x_p, y_i)$ i njegovih 8 najbližih susjeda, odnosno:

$$V_{r_i}(k) = \max\{M_v(xi + s, yi + t) | s, t \in [-1, 0, 1]\}, \quad (42)$$

za $k=(1,2,3,\dots,k_n)$, a koordinate x_i i y_i su definirane kao:

$$x_i = \left(\frac{m}{2} + 1 \right) + \left[r_i \cos \left(\frac{k}{2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2r_i} \right)} \right) \right], \quad (43)$$

$$y_i = \left(\frac{n}{2} + 1 \right) + \left[r_i \sin \left(\frac{k}{2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2r_i} \right)} \right) \right], \quad (44)$$

za $k=(1,2,3,\dots,k_n)$, m i n označavaju dimenzije slike, $r_i \in [r_{min}, r_{max}]$ je radijus implementacije, a operator $\lfloor \cdot \rfloor$ predstavlja zaokruživanje na prvi manji cijeli broj.

Broj elemenata vektora V_{r_i} ovisi o radijusu r_i i definiran je s jednađbom:

$$k_n = \frac{\pi}{2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2r_i} \right)}, \quad (45)$$

Gdje je k_n broj elemenata vektora V_{r_i} , a $r_i \in [r_{min}, r_{max}]$

Prije određivanja korelacije, ekstrahirani vektori se moraju normalizirati na interval $[0, 1]$, te se broj elemenata generiranog vektora v i svakog ekstrahiranog vektora r_i mora se svesti na broj elemenata najdužeg ekstrahiranog vektora za $r_i = r_{max}$. Maksimalan broj elemenata vektora se dobije izrazom:

$$k_{nmax} = r_{max} * \pi, \quad (46)$$

Gdje je $k_{n \max}$ maksimalni broj elemenata, a r_{\max} označava maksimalni radijus ekstrahiranih vektora.

Prilagodba broja elemenata provodi se interpolacijom elemenata po metodi najbližeg susjeda (*Nearest neighbour*).

Kada su vektori normalizirani i imaju isti broj elemenata, za svaki ekstrahirani vektor v'_i pojedinačno, određuje se korelacija s generiranim vektorom r' , prema izrazu:

$$C_{rv}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{k_n-|m|-1} \left(r'(n+m) - \frac{1}{k_n} \sum_{i=0}^{k_n-1} r'_i \right) \left(v'_i{}^* - \frac{1}{k_n} \sum_{i=0}^{k_n-1} v'_i{}^* \right), & m \geq 0 \\ C_{rv}^*(-m), & m < 0 \end{cases} \quad (47)$$

gdje C_{rv} označava korelaciju između vektora r i v , k_n označava njihovu duljinu, a operator $*$ označava kompleksnu konjugaciju.

Ukoliko je vrijednost korelacije bilo kojeg ekstrahiranog vektora v'_i veća od definiranog praga detekcije, detektor određuje da je slika označena, u suprotnom, slika nije označena.

5.2. Utjecaj parametara digitalnog vodenog žiga na kvalitetu označene slike.

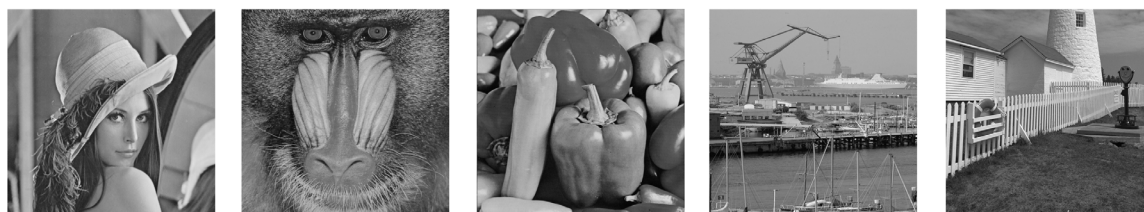
Koder prikazan na Slici 20. ubacuje vodeni žig u sliku uzimajući u obzir samo srednju vrijednost elemenata u susjedstvu koeficijenta koji se treba modificirati. Stoga je ovakav koder nefleksibilan i ne može se prilagoditi slici koja se označava. Da bi se mogla osigurati prilagodljivost koderu potrebno je definirati parametre digitalnog vodenog žiga i ustanoviti kako oni utječu na kvalitetu označene slike.

Iz izraza (38) i (41) da se zaključiti, a iz Slike 20. se jasno vidi da je sam vodeni žig definiran s tri varijable, to su:

- Faktor implementacije α
- Radijus implementacije r
- Duljina vektora v

Ova tri parametra direktno utječu na degradaciju koju metoda unosi u sliku prilikom implementacije vodenog žiga. Faktor implementacije kontrolira energiju koju sadrži vodeni žig. O radijusu implementacije ovisi koje frekvencije u spektru slike će biti modificirane, a o duljini vektora ovisi koliko će koeficijenta spektra biti modificirano.

Kako bi se mogao odrediti pojedinačni utjecaj svakog parametra, provedena su ispitivanja na nekoliko testnih slika (Slika 22.). Svaka slika je označena s formiranim vodenim žigom kod kojeg se jedan parametar kontinuirano mijenjao, a druga dva su bila konstantna. Nakon što bi slika bila označena, uspoređena je sa originalom, a kao objektivna mjera utjecaja na kvalitetu korišten je PSNR definiran jednadžbom (34).



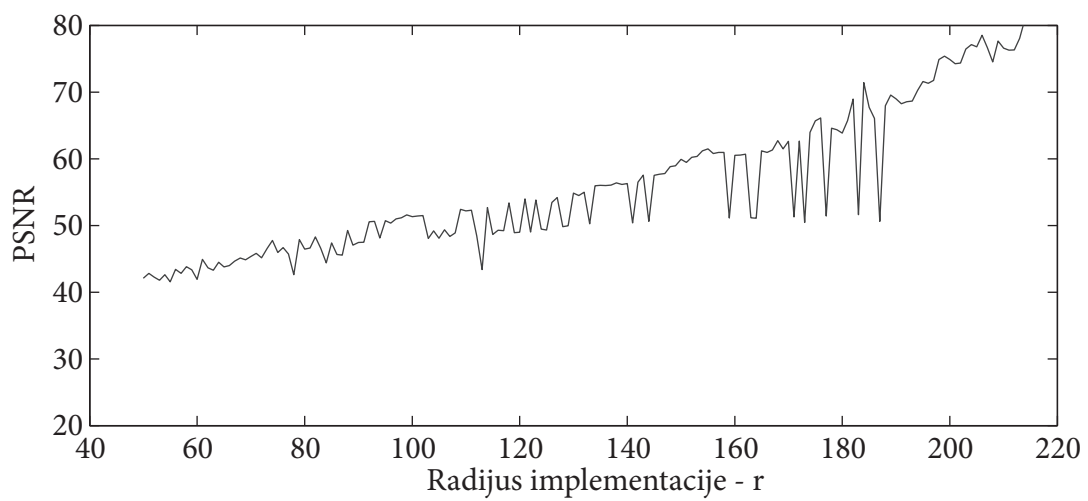
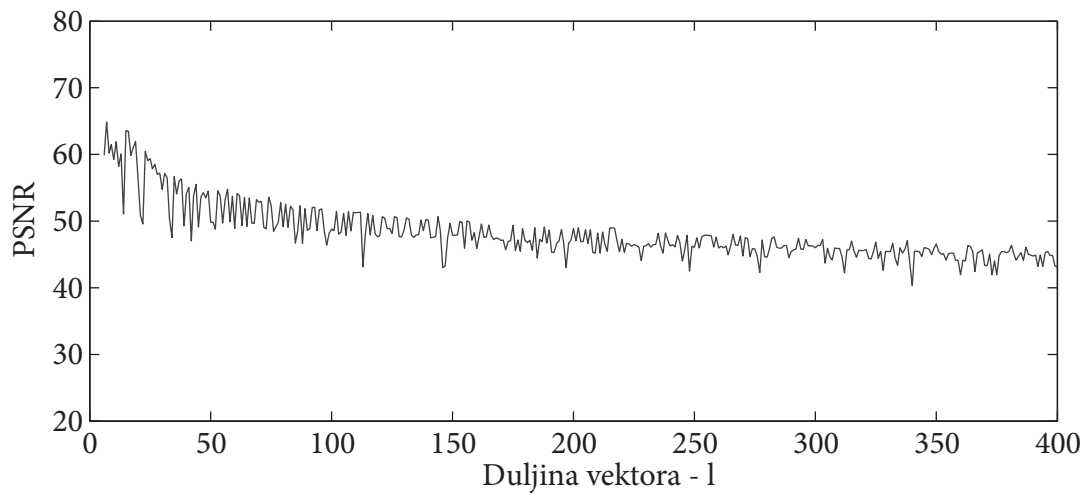
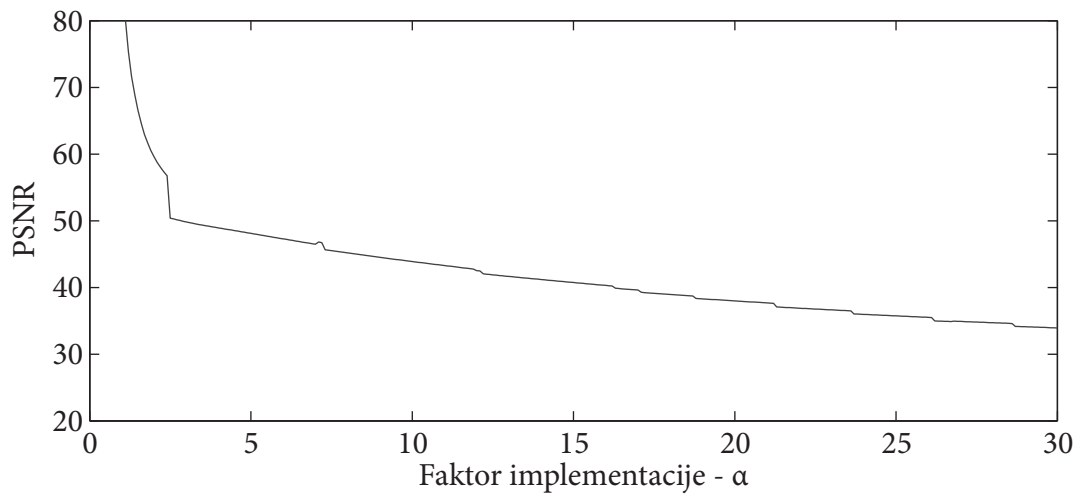
Slika 22. Slike korištene pri evaluaciji utjecaja parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike

Pri ispitivanju utjecaja faktora implementacije, faktor implementacije kretao se u intervalu $\alpha \in [0,30]$, radijus implementacije bio je postavljen na $r = 128$, a duljina vektora iznosila je $v = 50$ elemenata. Kao što je i očekivano, povećanjem faktora implementacije, povećava se energija unesena u označenu sliku, što za rezultat ima smanjenje PSNR vrijednosti, odnosno smanjenje kvalitete.

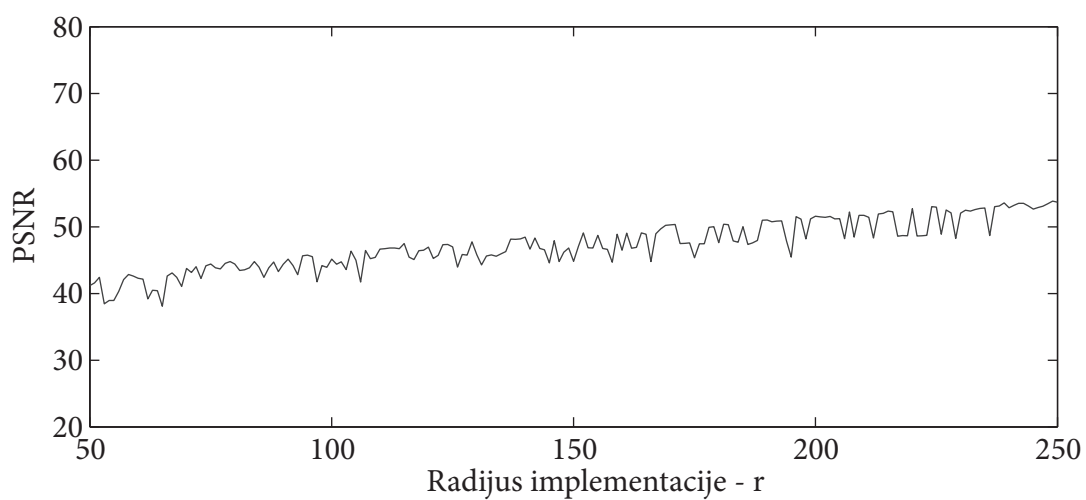
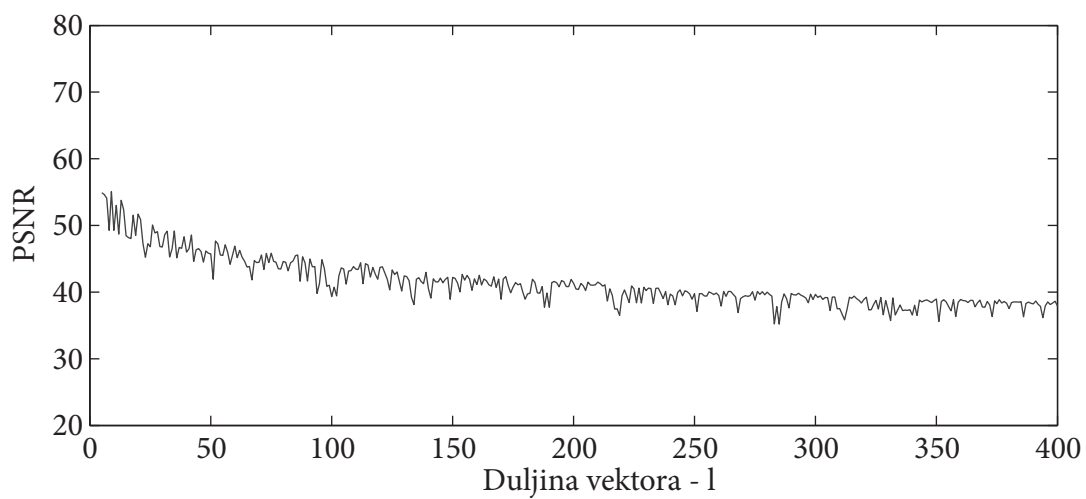
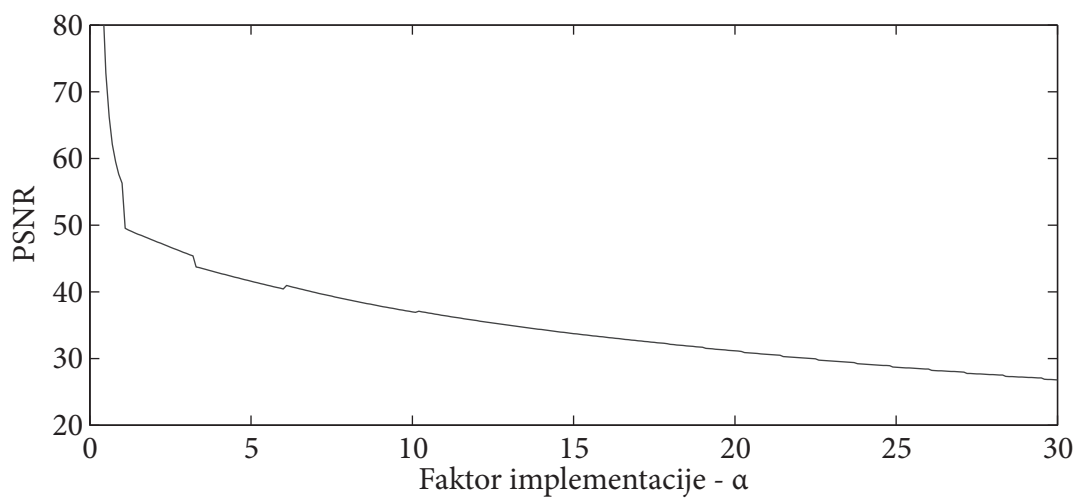
Kod određivanja utjecaja radijusa implementacije, faktor implementacije i duljina vektora su bili konstantni, $\alpha = 3$, $\nu = 50$, dok se radijus implementacije kretao u intervalu $r \in [25, 250]$. Što je manji radijus implementacije vodenog žiga u spektru slike, to je manja frekvencija koeficijenta koje se modificira. Manipulacijom nižih frekvencija je utjecaj na kvalitetu slike veći nego kod manipulacije viših frekvencija. Odnosno što je radijus manji, to je utjecaj označavanja veći.

Utjecaj duljine vektora ν na kvalitetu označene slike je određen tako da su radijus i faktor implementacije bili konstantni, $r = 128$, $\alpha = 3$, a duljina vektora se kretala u intervalu $\nu \in [1, 400]$. Rezultati su pokazali da se povećanjem duljine vektora povećava utjecaj na kvalitetu označene slike.

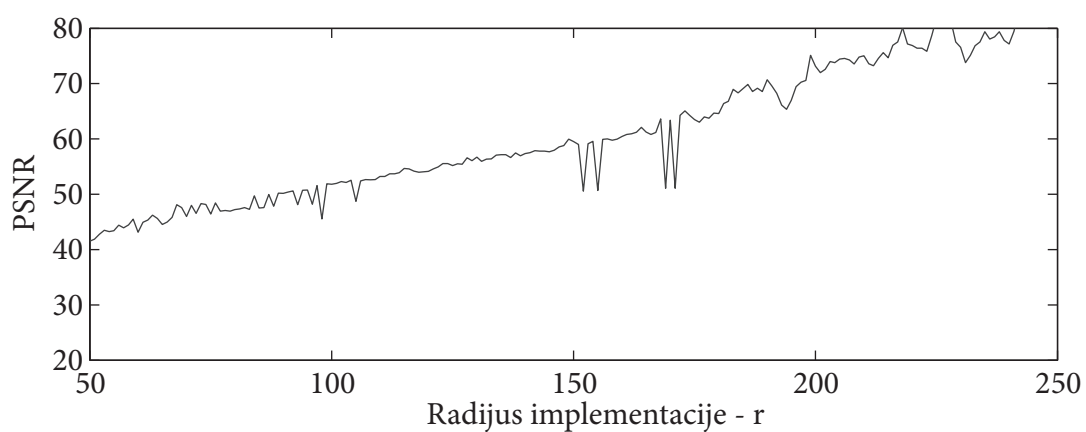
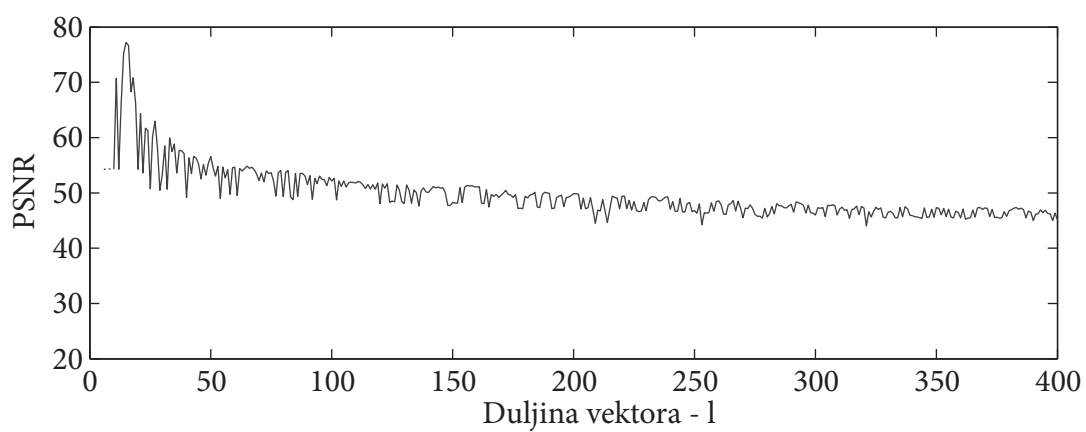
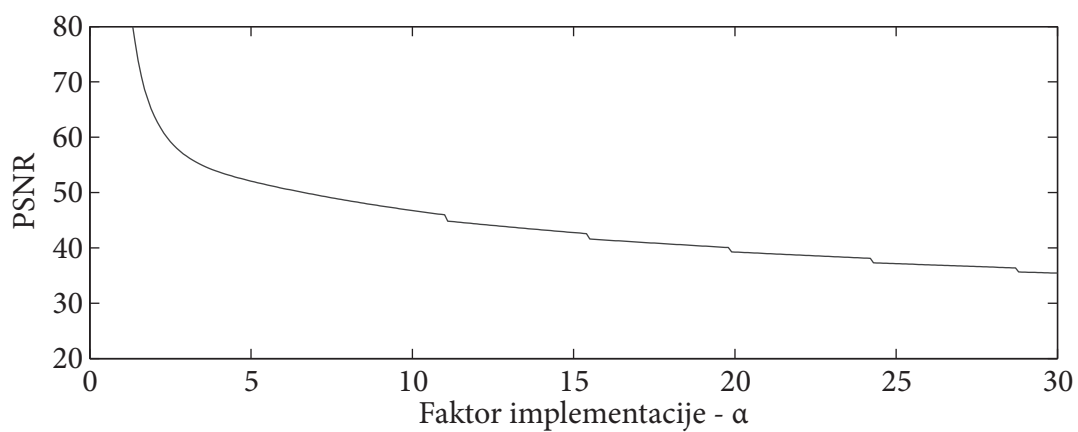
Rezultati su prikazani na slikama 23–27.



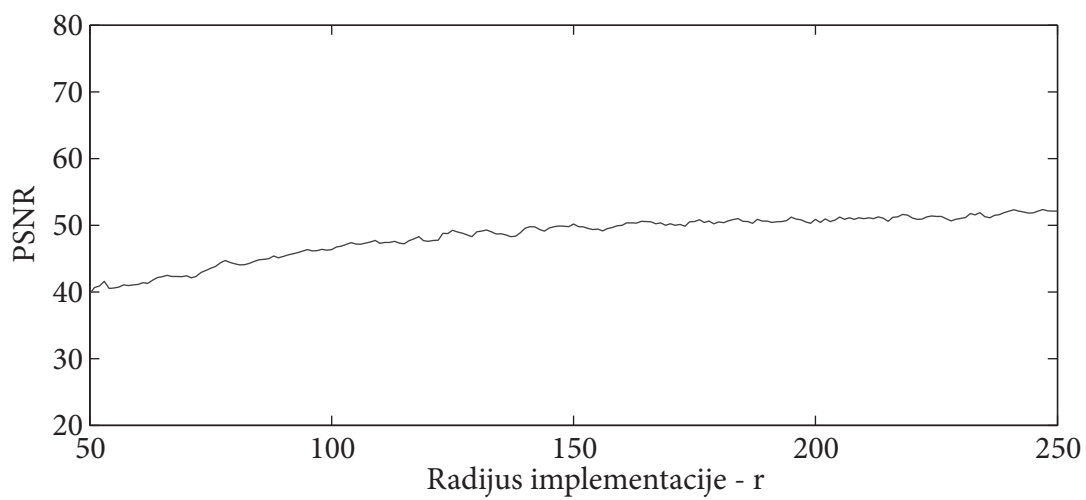
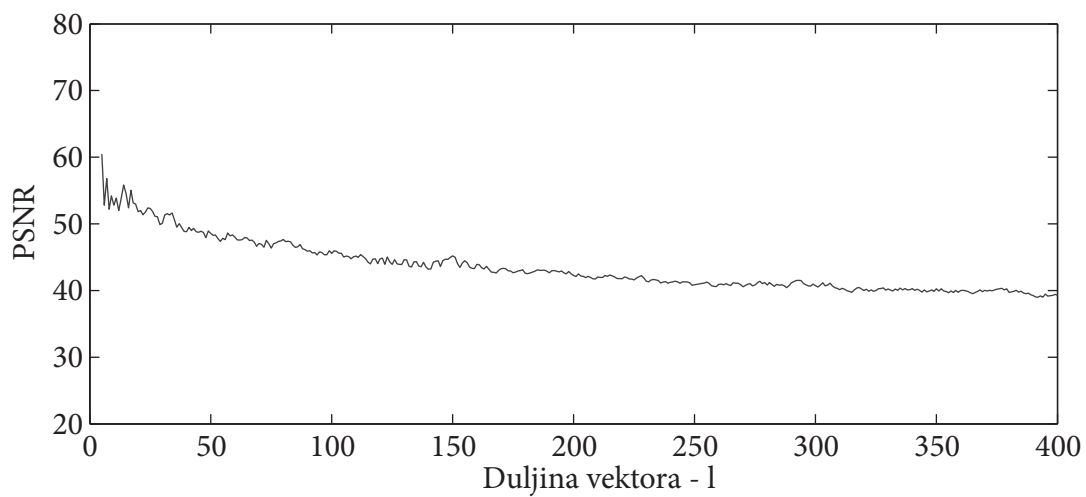
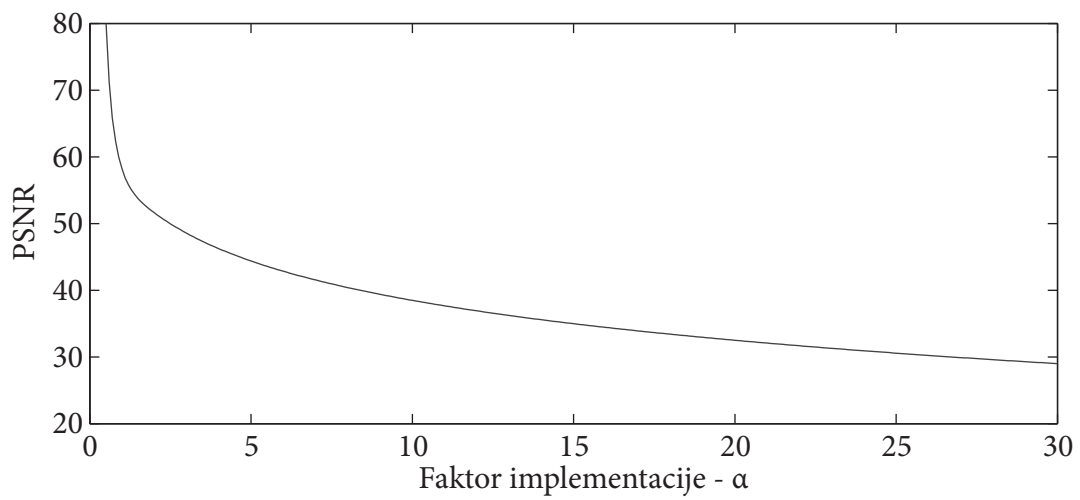
Slika 23. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Lena“)



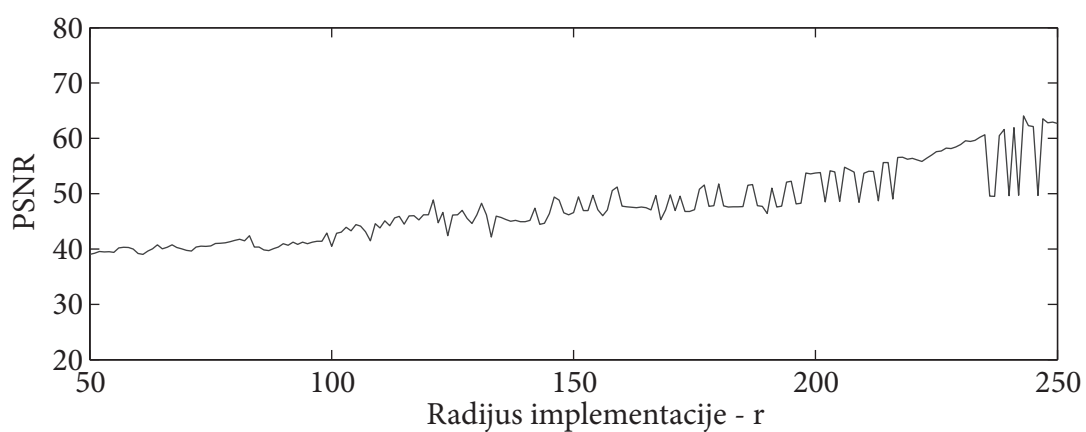
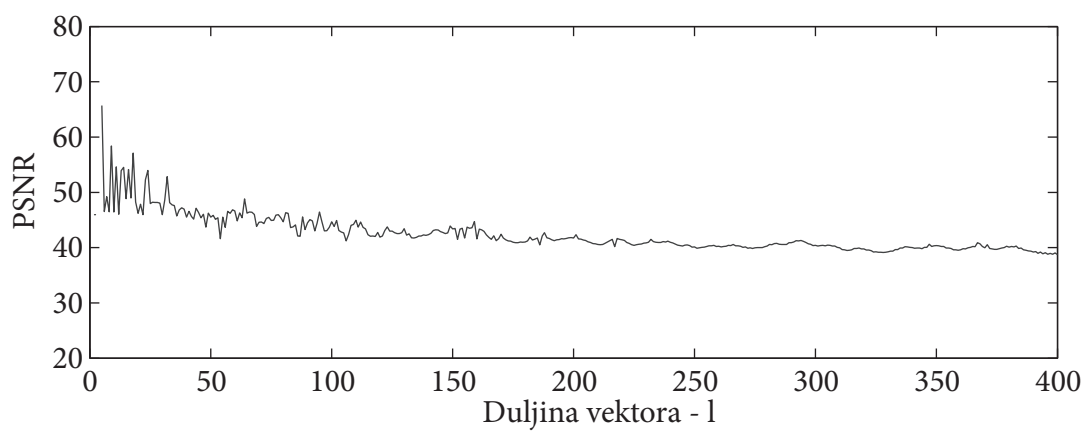
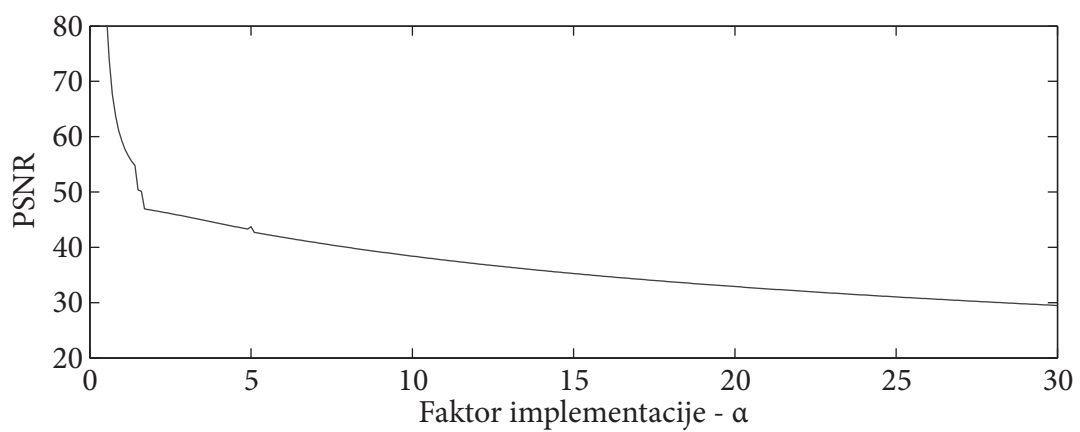
Slika 24. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Mandrill“)



Slika 25. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Peppers“)



Slika 26. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Kiel“)



Slika 27. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Lighthouse“)

Rezultati ispitivanja utjecaja različitih parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike su sljedeći:

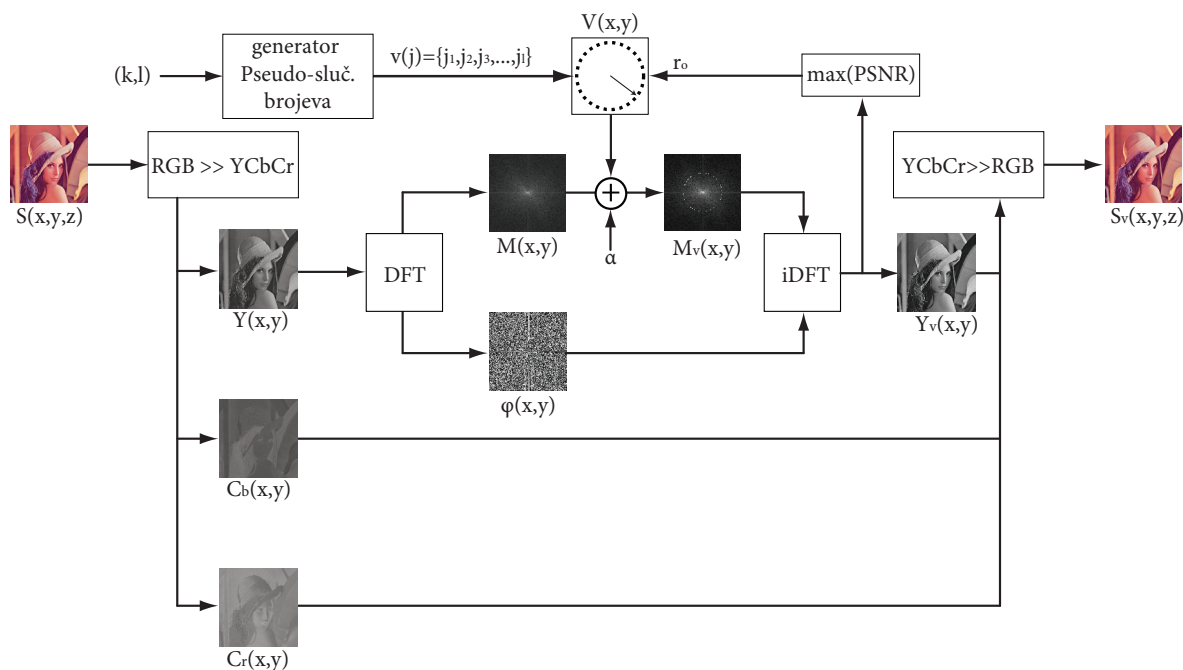
- S povećanjem faktora implementacije PSNR vrijednost monotono pada. Pri malim vrijednostima α , kvaliteta označene slike naglo pada, no kako α raste, pad kvalitete se usporava.
- Duljina vektora djeluje na kvalitetu označene slike manje predvidljivo nego faktor implementacije. U pravilu PSNR pada kako se broj elemenata vektora povećava. Međutim, za određene intervale duljine vektora postoje lokalni maksimumi vrijednosti PSNR.
- Sa povećanjem radijusa u pravilu se povećava i vrijednost PSNR. No, kao i kod duljine vektora, utjecaj na kvalitetu slike nije potpuno determiniran, i neki radijusi su, sa stajališta kvalitete označene slike, puno prihvatljiviji za implementaciju od drugih radijusa.

5.3. Modifikacija kodera s ciljem veće prilagodljivosti

Rezultati ispitivanja navedeni u prijašnjem poglavlju otvaraju mogućnost unaprjeđenja kodera. Činjenica da funkcija ovisnosti PSNR vrijednosti o radijusu i duljini vektora posjeduje lokalne maksimume, može se iskoristiti pri označavanju slika, na način da se koder modificira tako da postoji povratna veza između PSNR vrijednosti i radijusa implementacije ili duljine vektora. Tu valja napomenuti da je, u praksi, moguće primijeniti samo povratni vezu između PSNR vrijednosti i radijusa implementacije. Ostvariti povratnu vezu između PSNR vrijednosti i duljine vektora, nije moguće budući da duljina vektora v ovisi o varijabli l kojom se definira početno stanje generatora pseudo-slučajnih brojeva.

Koder sa slike 20 je modificiran tako da se u algoritam ugradila povratna veza kojom se računa PSNR vrijednost za svaki radijus implementacije u intervalu $r_i \in [r_{min}, r_{max}]$. Koder

uspoređuje sve ostvarene vrijednosti i izabire optimalni radijus r_0 za koji je vrijednost PSNR označene slike najveća. Blok dijagram modificiranog koda je prikazan na Slici 28.



Slika 28. Blok dijagram modificiranog koda

Rezultat ovakve modifikacije je mogućnost prilagodbe vodenog žiga slici koja se označava. Pronalaskom optimalnog radijusa, smanjuje se degradacija slike, što u konačnici omogućuje i povećanje kvalitete označene slike i povećanje otpornosti vodenog žiga u komunikacijskom kanalu.

Usporedba uspješnosti originalnog koda i njegove modificirane verzije dana je u tablici 4. Rezultati su dobiveni umetanjem vodenog žiga formiranog korištenjem istog ključa, duljine vektora ($l = 200$) i faktora implementacije ($\alpha=5$). Jedina razlika je što je originalni koder formirao vodeni žig korištenjem konstantnog radijusa implementacije ($r=175$) dok je modificirani koder tražio optimalni radijus implementacije u intervalu $[120,180]$.

Tablica 4. Usporedba srednje PSNR vrijednosti postignute originalnim i modificiranim koderom.

| | srednja vrijednost r | srednja vrijednost PSNR |
|--------------------|----------------------|-------------------------|
| Originalni koder | 175 | 49,2 |
| Modificirani koder | 175,4 | 53,3 |

Vrijednost za konstantni radijus od 175 je izabrana jer je ostvarena srednja vrijednost radijusa implementacije kod modificiranog koder iznosila 175,4. Ovime se osigurala objektivna usporedba dva načina umetanja vodenog žiga. Iz tablice 4 vidi se da se prosječna PSNR vrijednost povećala za približno 8 %, što je vrlo dobar rezultat, no prava prednost adaptivnog koder je vidljiva ako se usporede pojedinačni rezultati označavanja. Za neke slike je radijus implementacije znatno smanjen u odnosu na fiksnu vrijednost od 175 (najniži postignuti optimalni radijus implementacije iznosio je 135). Pošto se radijusom kontrolira frekventni pojas u kojem se modificiraju koeficijenti spektra, niži radijus znači i nižu frekvenciju modificiranih koeficijenata što doprinosi povećanju otpornosti metode označavanja.

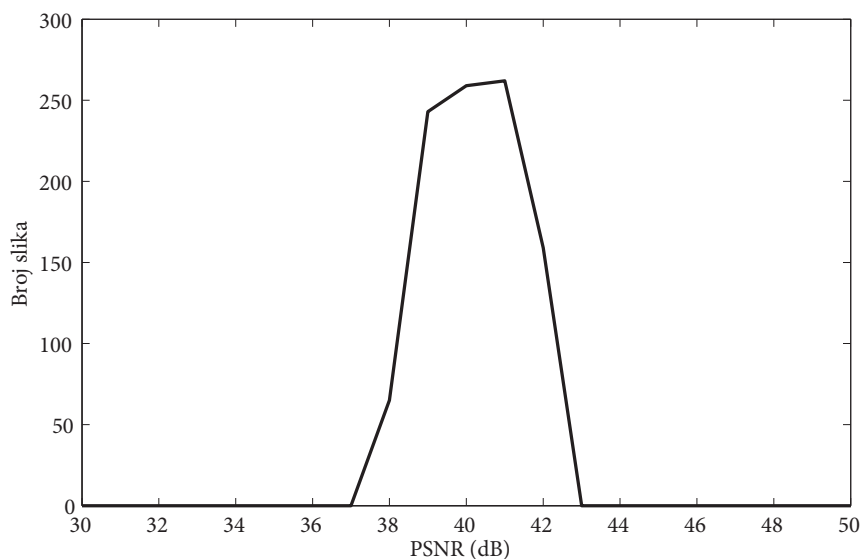
5.4. Metoda evaluacije

Kako bi se ocijenila uspješnost metode provedeno je ispitivanje na testnoj bazi slika sačinjenoj od 1000 različitih slika. Ispitivanje je provedeno tako da su sve slike označene vodenim žigom koji je formiran na osnovi istog ključa. Duljina generiranog vektora je iznosila 200. Koder je sam određivao optimalni radijus u intervalu od 130 do 160. Empirijski je određeno da ovaj interval daje najbolje rezultate. Ukoliko se koristi manji radijus, modificiraju se koeficijenti niske frekvencije, što dovodi do velikog utjecaja na kvalitetu slike. S druge strane, većim radijusom modificiraju se koeficijenti više frekvencije, koji nisu otporni na niskopojasno filtriranje koje se događa u PS i PK procesu. Stoga interval od 130 do 160 predstavlja optimum jer osigurava kompromis između prevelikog utjecaja na kvalitetu i premale otpor-

nosti. Faktor implementacije je za svaku sliku podešen tako da bi PSNR vrijednost označene slike u usporedbi s originalnom slikom iznosila oko 40 dB (Slika 29.). Faktor implementacije se kretao od 3,5 do 30, sa srednjom vrijednosti oko 7. Odabir drugačijeg faktora implementacije za svaku sliku omogućuje maksimalnu moguću otpornost vodenog žiga pri konstantnom utjecaju na kvalitetu označene slike. Histogram ostvarenih PSNR vrijednosti označenih slika prikazan je na Slici 30.



Slika 29. Usporedba (a) originalne slike i (b) označene slike (PSNR=42 dB)



Slika 30. Histogram PSNR vrijednosti označenih slika

Slike su nakon označavanja bile podvrgnute degradaciji te se ispitivao utjecaj degradacije na detektiranu vrijednost korelacije koju je davao detektor. Vrsta degradacije i parametri korišteni pri evaluaciji otpornosti predložene metode dani su u tablici 5.

Za ispitivanje utjecaja na PS proces korišteni su laserski pisač u boji Xerox 6250N i skener Microtek 8700. PK proces je ispitivan korištenjem istog pisača, a za digitalizaciju slika korišten je fotoapararat Sony DSC-T70.

Tablica 5. Vrsta degradacije i parametri korišteni pri evaluaciji otpornosti predložene metode

| Vrsta degradacije | Parametri |
|------------------------------------|--|
| 1 <i>Blur</i> filtar | Veličina filtra: 3×3, 5×5, 7×7 |
| 2 Izrezivanje | Odnos veličine originalne i izrezane slike u postocima: 20%, 40%, 60%, 80% |
| 3 JPEG kompresija | Stupanj JPEG kvalitete: 20,40,60,80, 100 |
| 4 Laplacov i <i>unsharp</i> filtar | - |
| 5 Rotacija | Kut rotacije: -90°, -60°, -30°, 30°, 60°, 90° |
| 6 Skaliranje | Postotak povećanja (smanjenja) 30%, 50%, 75%, 150%, 200% |
| 7 Šum | 3,5,7,9,11 |
| 8 Rastriranje | Oblik rast. elementa: krug, elipsa, linija Linijatura: 10, 13, 15, 40, 60 lin/cm |
| 9 PS proces | Rezolucija ispisa: 600 dpi; Veličina izlazne slike: 13×13 cm Rezolucija skaniranja: 130 dpi |
| 10 PK proces | Postavke kamere: 3 milijuna elemenata slike, JPEG kompresija: visoka kvaliteta |

Nakon djelovanja degradacije, ispitivane su postignute detektirane vrijednosti. Te vrijednosti su zatim statistički obrađene i nakon toga vizualno prikazane pomoću histograma detektiranih vrijednosti, ovisnosti vjerojatnosti TPD o pragu detekcije, te ROC krivulje.

Histogram detektiranih vrijednosti prikazuje distribuciju detektiranih vrijednosti i omogućava dobar uvid u ponašanje detektora ovisno o degradaciji kojoj su slike podvrgnute. Ovisnost TPD o pragu detekcije prikazuje ponašanje detektora ukoliko se mijenja prag detekcije. ROC krivuljom se prikazuje ovisnost vjerojatnosti TPD i vjerojatnosti KPD.

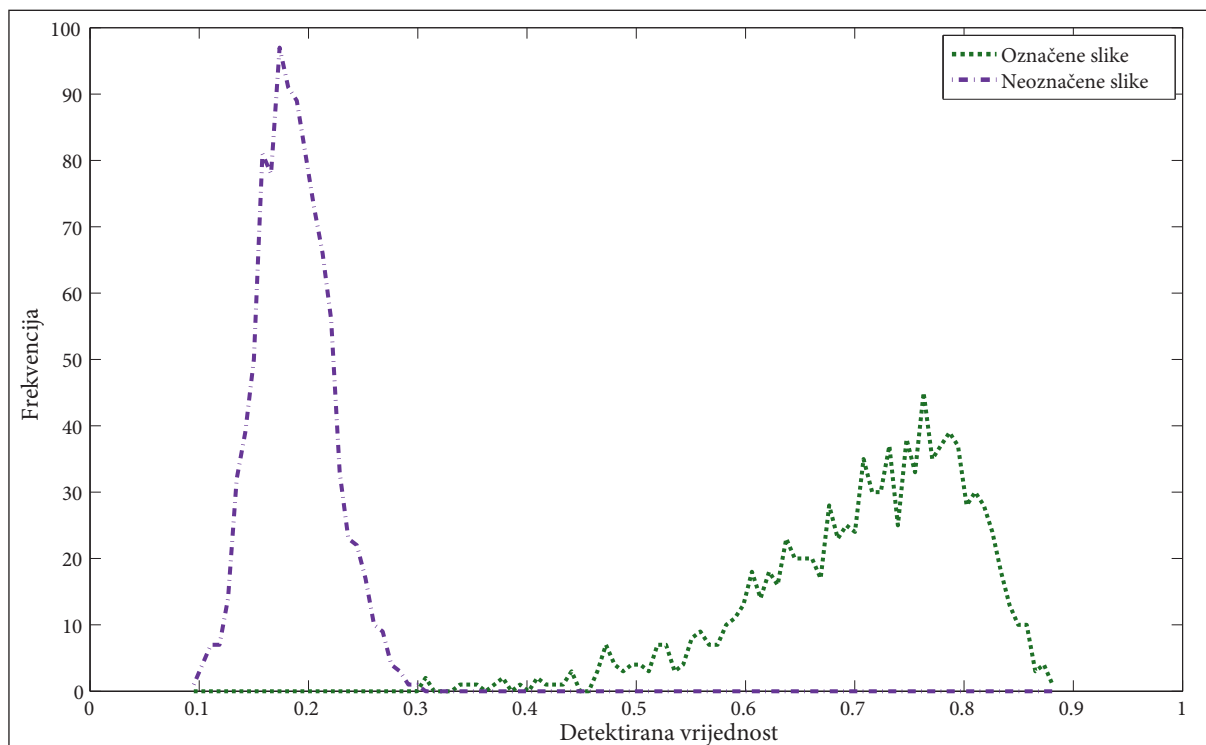
Kako bi se prikazala efikasnost metode u stvarnim uvjetima, dan je i postotak uspješnosti detekcije vodenog žiga za slučaj kada definirani prag detekcije iznosi 0.30. Ova vrijednost predstavlja optimalnu vrijednost za promatranu bazu testnih slika budući da je maksimalna detektirana vrijednost neoznačenih slika iznosila 0.29, a minimalna vrijednost označenih slika prije bilo kakve degradacije iznosila je 0.30.

6. DISKUSIJA REZULTATA

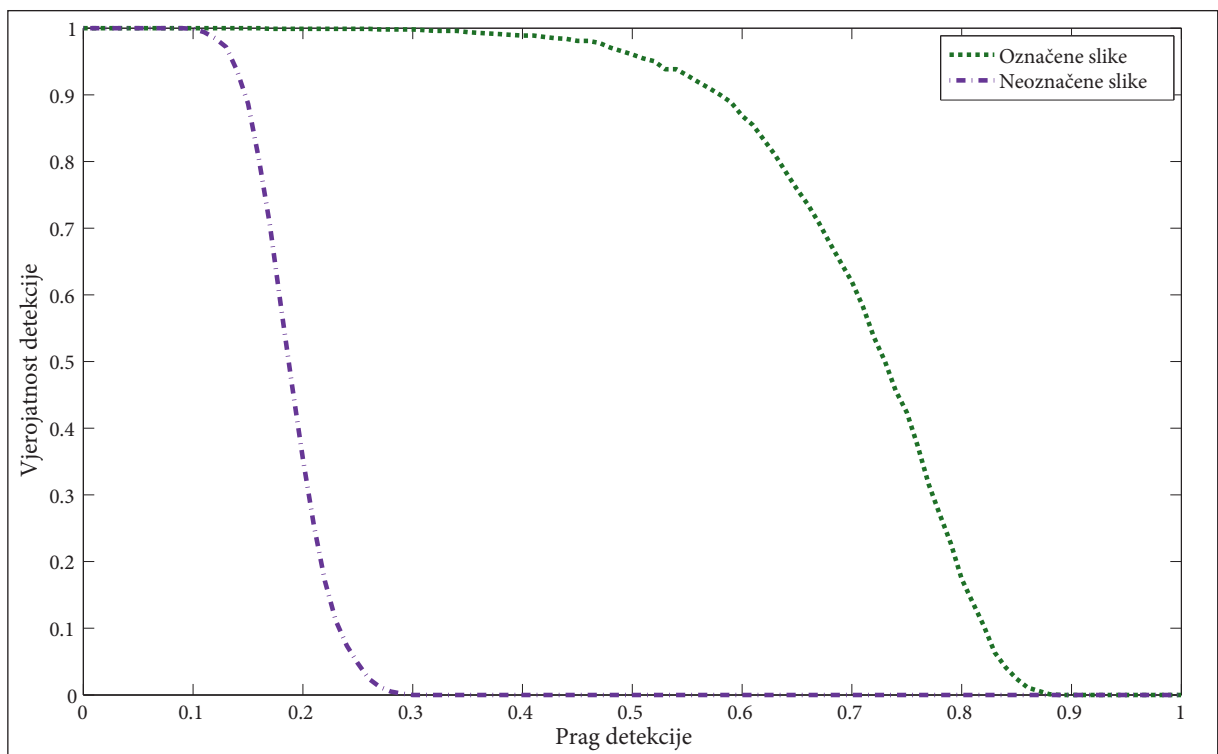
6.1. Označene i neoznačene slike

Tablica 6. Vrijednosti detekcije – Označene i neoznačene slike

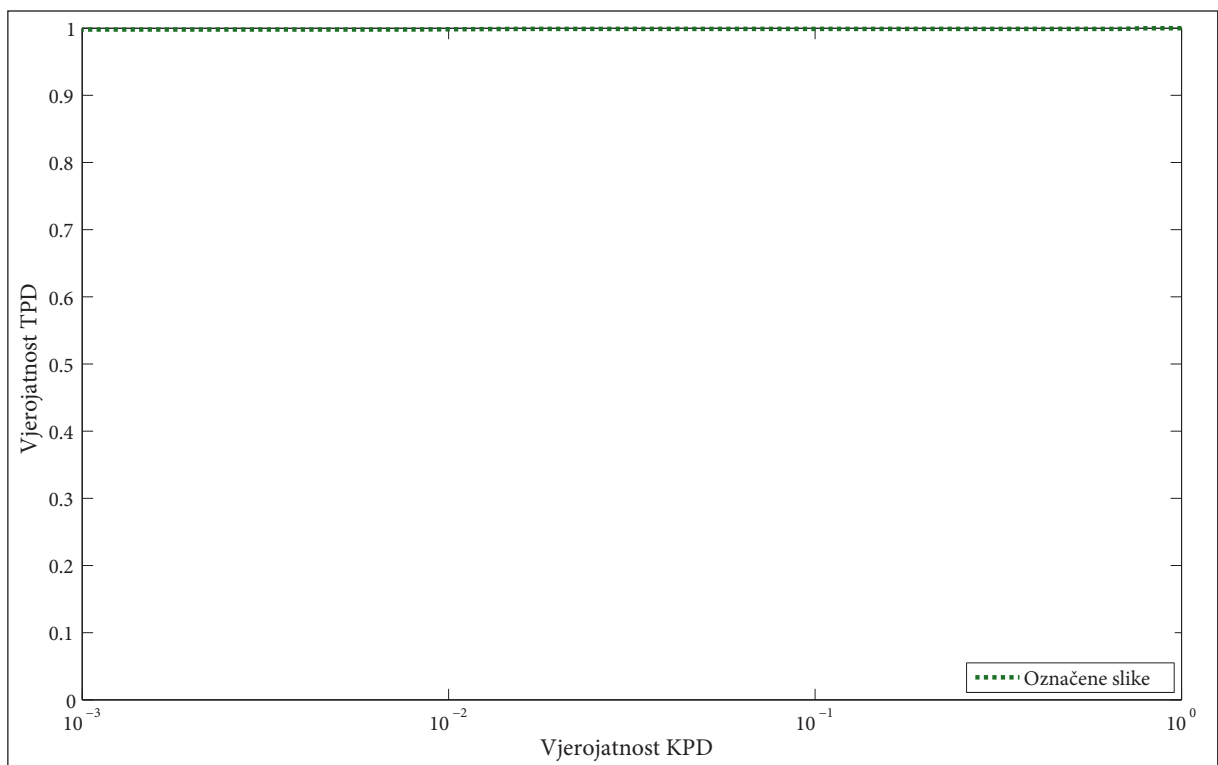
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |



Slika 31. Histogram vrijednosti detekcije – Označene i neoznačene slike



Slika 32. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Označene i neoznačene slike



Slika 33. ROC krivulja – Označene slike

U tablici 6, analiza vrijednosti detekcije neoznačenih slika pokazuje da maksimalna detektirana vrijednost korelacije iznosi 0.29. Ova vrijednost predstavlja donju granicu praga detekcije. Ukoliko se za prag detekcije odabere manja vrijednost od 0.30 detektor će neoznačene slike određivati kao označene. S druge strane, kod označenih slika koje nisu bile podvrgnute nikakvoj degradaciji minimalna detektirana vrijednost korelacije iznosi 0.30. Ovo znači da detektor, za prag detekcije manji od 0.30 krivo odlučuje da je slika neoznačena.

Jasno je da je optimalni prag detekcije u ovom slučaju 0.30. Ovim se osigurava da detektor ne radi grešku II. vrste kod neoznačenih slika i grešku I. vrste kod označenih slika prije no što su podvrgnute degradaciji. Međutim, valja imati na umu da je u eksperimentu korišteno 1000 slika. Ovo je dovoljno veliki broj da se dobiju statistički značajni rezultati, no moguće je da bi se kod veće baze testnih slika, pojavile slike kod kojih bi vrijednost praga detekcije od 0,30, dalo grešku I. ili II. vrste.

Iz histograma detektiranih vrijednosti prikazanih na Slici 31. vidi se razlika između označenih i neoznačenih slika. Srednja vrijednost detektiranih vrijednosti neoznačenih slika iznosi 0,19. Sve detektirane vrijednosti su koncentrirane oko te vrijednosti (standardna devijacija iznosi 0.03). Ovakva srednja vrijednost detektirane korelacije na prvi pogled iznenađuje, pošto očekivana vrijednost korelacije između dvije slučajne varijable s normalnom distribucijom iznosi 0. Razlog ostvarene srednje vrijednosti leži u činjenici što detektor uzima maksimalnu vrijednost korelacije između pseudo-slučajno generiranog vektora i niza vektora ekstrahiranih iz slike. Srednja vrijednost označenih slika iznosi je 0.71. Vrijednosti su u ovom slučaju više raspršene, standardna devijacija iznosi 0.1.

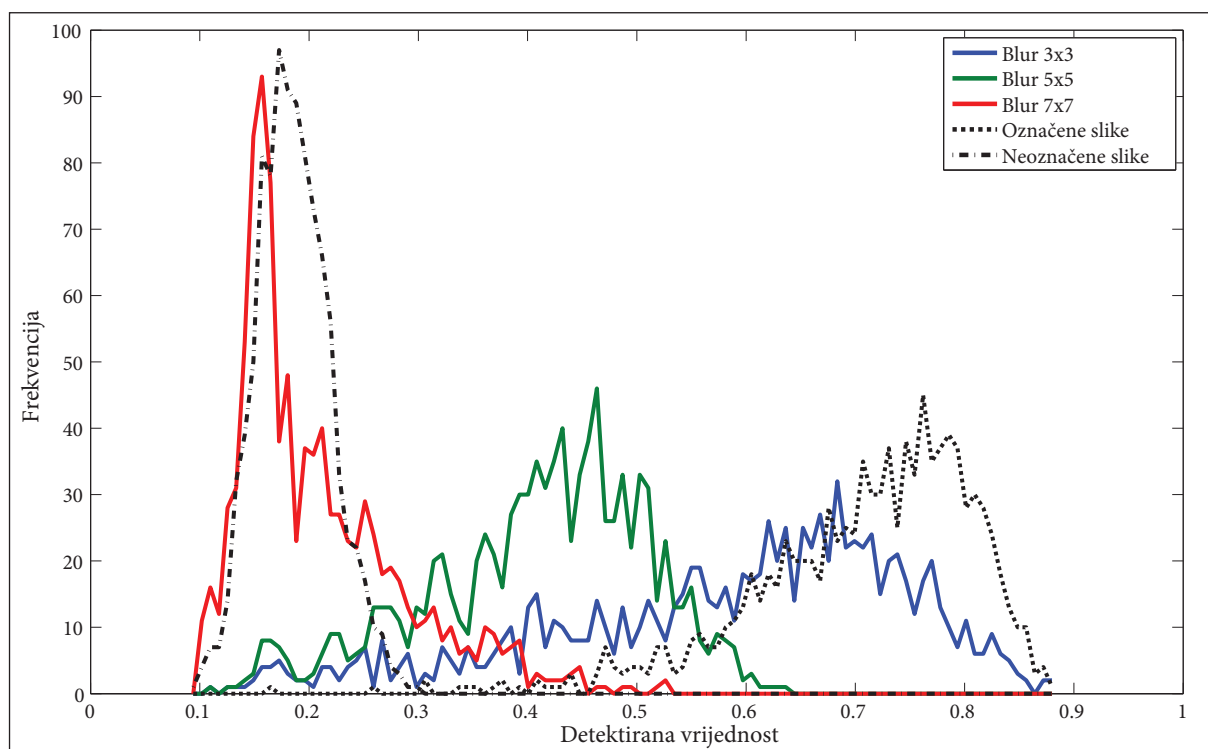
Na Slici 32. prikazana je ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije. Za neoznačene slike ova vjerojatnost predstavlja vjerojatnost KPD, odnosno grešku II. vrste. Iz dijagrama se vidi da vjerojatnost detekcije počne padati nakon praga detekcije 0.1, te pada na nulu za prag detekcije veći od 0.3. U slučaju označenih slika, vjerojatnost počne padati oko 0.35, a pada na nulu za prag detekcije veći od 0.88.

Slika 33. prikazuje ROC krivulju za označene slike prije nego su podvrgnute degradaciji, odnosno funkciju vjerojatnosti TPD u ovisnosti o KPD. Dijagram prikazuje da je metoda 100% točna za vjerojatnosti KPD do 10^{-3} . Ova vjerojatnost predstavlja donju granicu do koje se ovaj sustav mogao empirijski ispitati, pošto najmanja izračunata vjerojatnost KPD iznosi 0.0013 za prag detekcije 0.29.

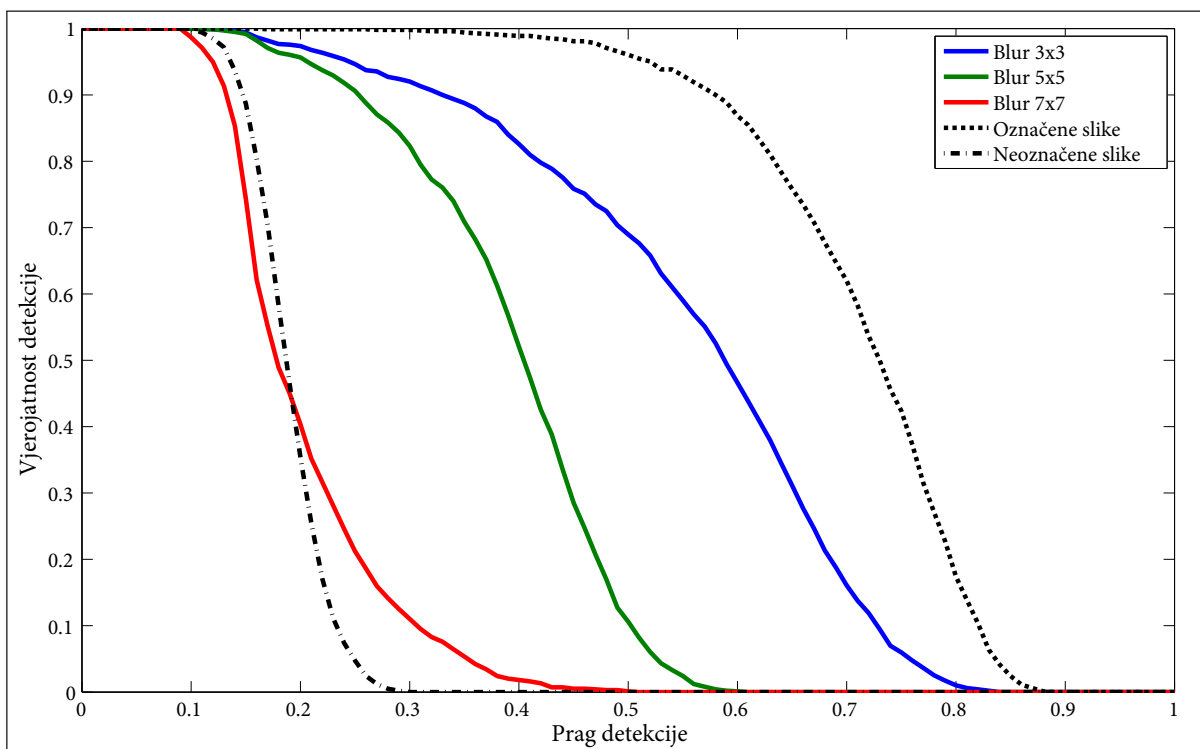
6.2. Niskopojasni (*Blur*) filtar

Tablica 7. Vrijednosti detekcije - *Blur*

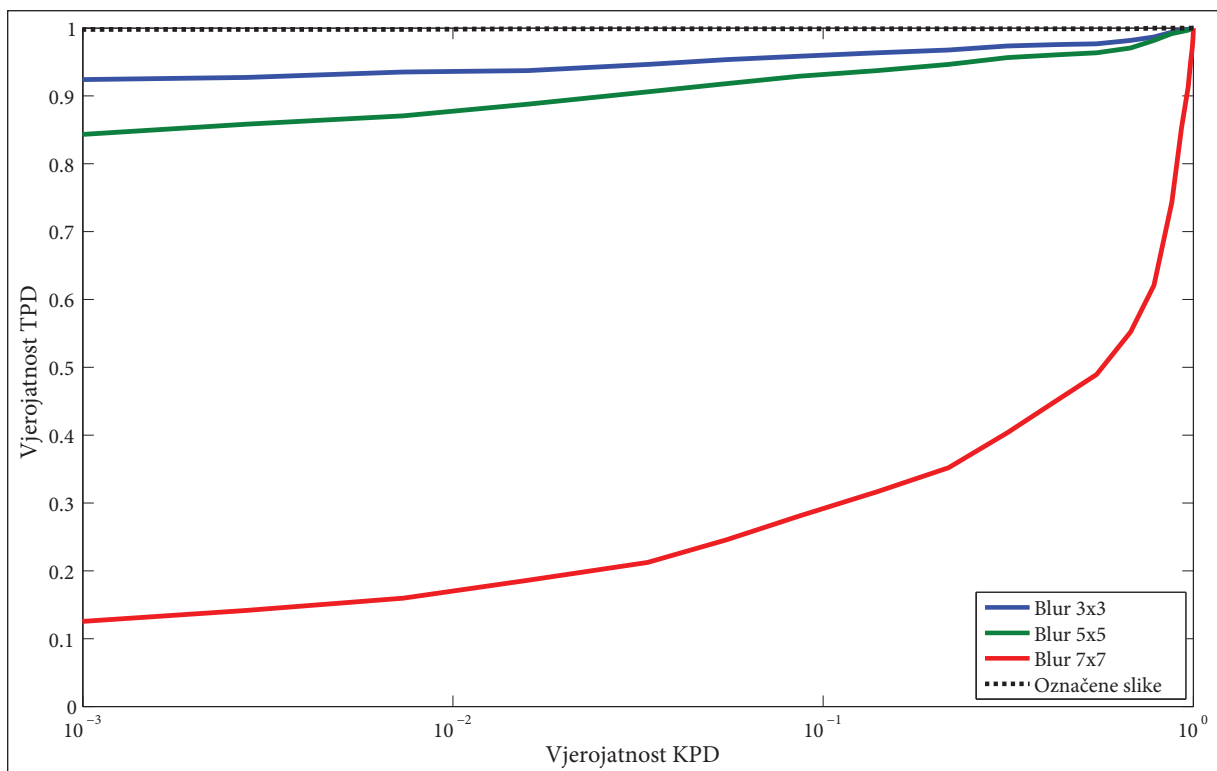
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| <i>Blur</i> 3×3 | 0.11 | 0.83 | 0.56 | 0.59 | 0.15 | 95,1 |
| <i>Blur</i> 5×5 | 0.10 | 0.60 | 0.39 | 0.41 | 0.10 | 91,1 |
| <i>Blur</i> 7×7 | 0.09 | 0.50 | 0.20 | 0.18 | 0,07 | 21,7 |



Slika 34. Histogram vrijednosti detekcije - *Blur*



Slika 35. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - *Blur*



Slika 36. ROC krivulja - *Blur*

Nisko-pojasno filtriranje provedo se *blur* filtrom koristeći tri različite dimenzije filtra 3×3 , 5×5 i 7×7 . Primjer nisko-pojasnog filtriranja prikazan je na Slici 37.



Slika 37. Primjer nisko-pojasnog filtriranja korištenog u experimentu.

a) Filtar veličine 5×5 i b) 7×7

Vrijednosti detekcije nakon utjecaja *blur* filtra dane su u tablici 7. Vidi se da utjecaj *blur* filtra značajno ovisi o veličini filtra. Srednja vrijednost detekcije za filter veličine 3×3 , 5×5 i 7×7 je redom 0.56, 0.39, i 0.20. Vjerojatnost detekcije za prag $t=0.3$ također značajno pada. Za filter veličine 3×3 i 5×5 metoda označavanja je donekle otporna i ostvarena vjerojatnost detekcije je 95,1% i 91,1%. Međutim za filter veličine 7×7 vjerojatnost detekcije je samo 21,7%.

Iz histograma detekcije na Slici 34. zorno se vidi kako nisko-pojasno filtriranje smanjuje vrijednosti detekcije ovisno o veličini filtra. Za većinu slika nakon djelovanja *blur* filtra veličine 3×3 i 5×5 vrijednost detekcije je i dalje iznad 0.3, no na filter veličine 7×7 samo petina slika se razlikuje od neoznačenih slika.

Dijagram ovisnosti vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije (Slika 35.) pokazuje da nakon djelovanja *blur* filtra veličine 3×3 i 5×5 vjerojatnost počinje padati pri pragu detekcije 0.25. Za veličinu 3×3 vjerojatnost pada na nulu kod praga detekcije većeg od 0.85, a za veli-

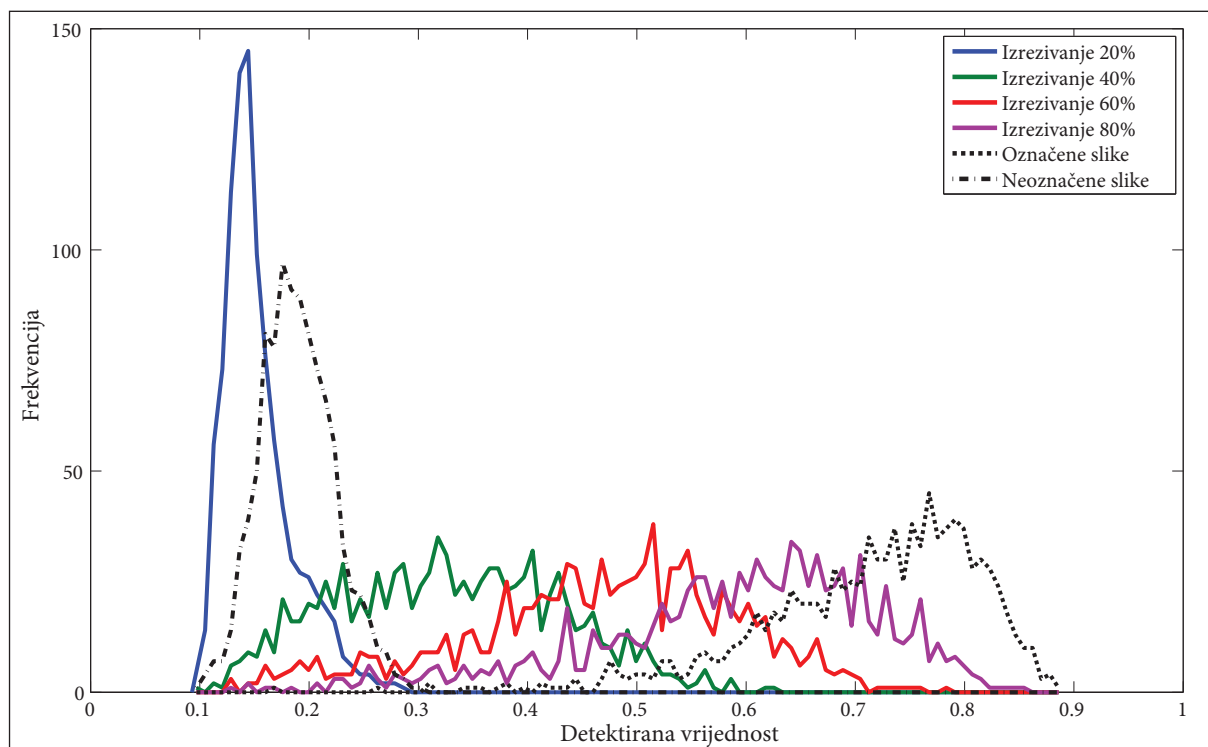
činu 5×5 vjerojatnost pada na nulu kod praga detekcije od 0.6. U slučaju filtra veličine 7×7 vjerojatnost pozitivne detekcije naglo pada već kod praga detekcije od 0.15, te iznosi nula za prag detekcije iznad 0.5.

ROC krivulja (Slika 36.) potvrđuje gornja razmatranja. Ispitivana metoda pokazuje dobru otpornost na nisko-pojasno filtriranje filterima veličine 3×3 i 5×5 , no ukoliko je filter veći metoda nije dovoljno otporna za praktičnu primjenu.

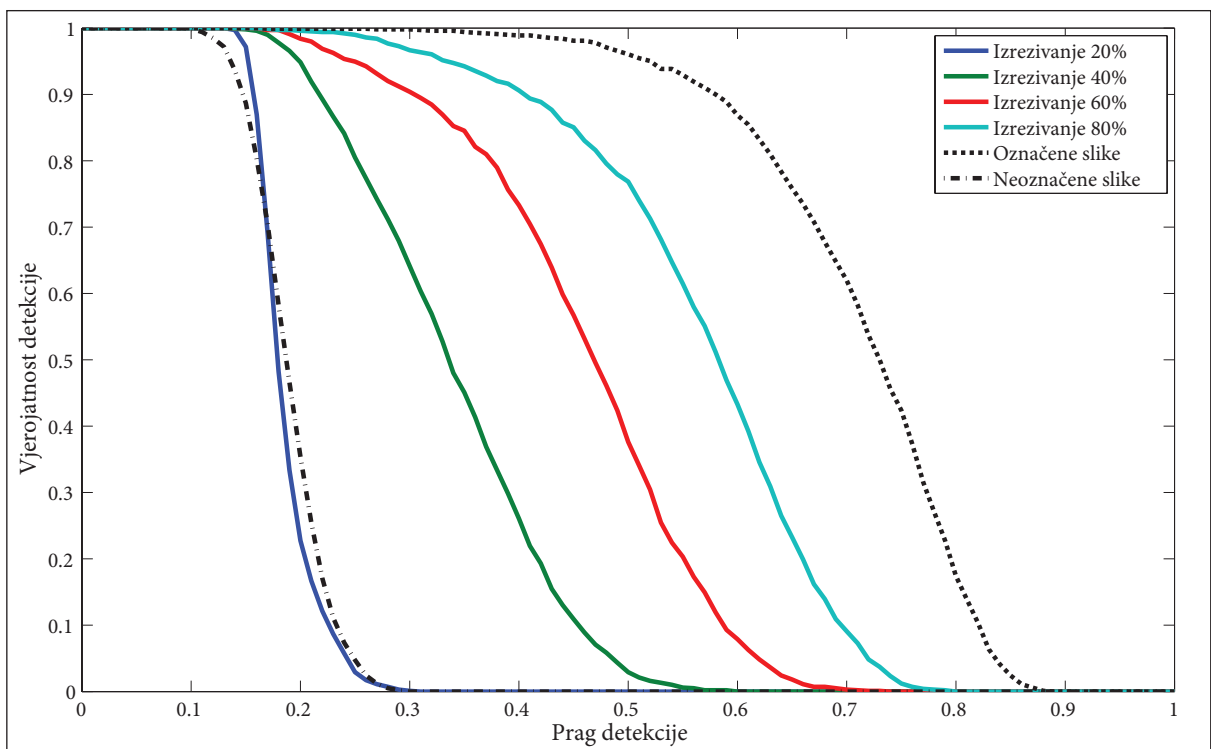
6.3. Izrezivanje

Tablica 8. Vrijednosti detekcije - Izrezivanje

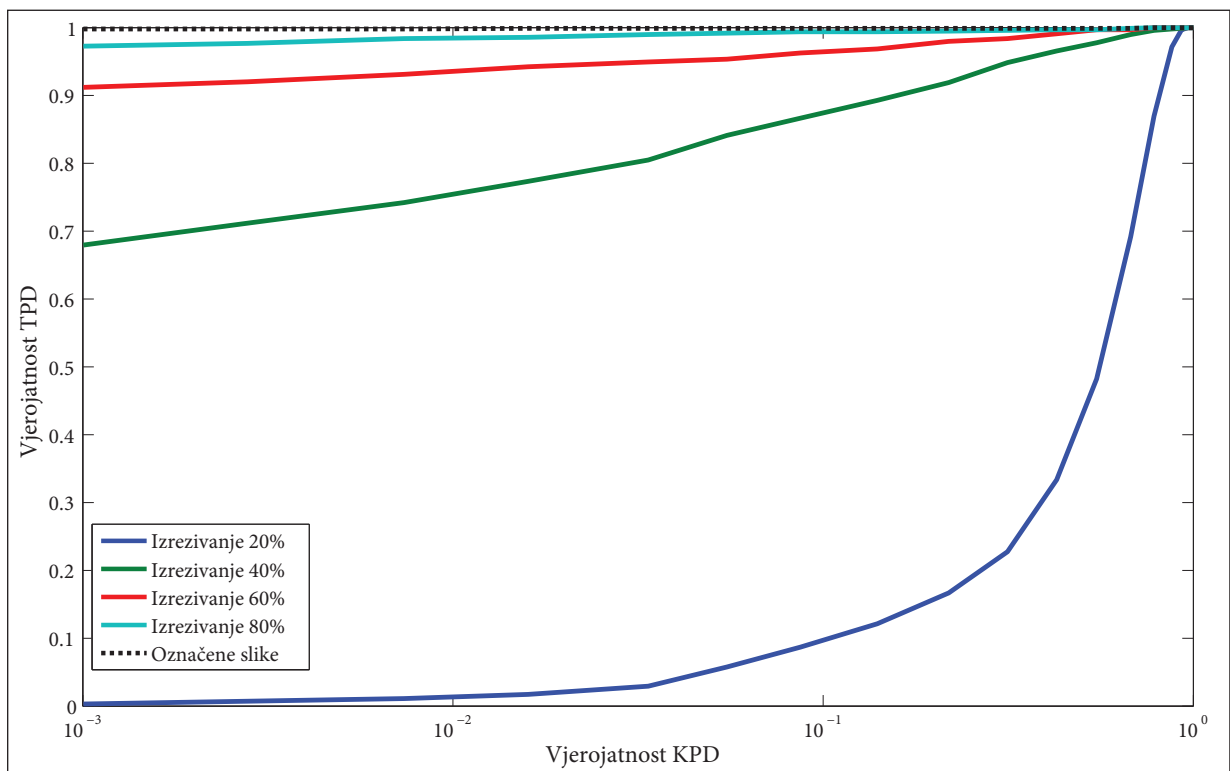
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Izrezivanje 20% | 0.14 | 0.30 | 0.19 | 0.18 | 0.03 | 3,4 |
| Izrezivanje 40% | 0.14 | 0.60 | 0.33 | 0.34 | 0.09 | 81,0 |
| Izrezivanje 60% | 0.16 | 0.73 | 0.46 | 0.46 | 0.11 | 95,4 |
| Izrezivanje 80% | 0.17 | 0.80 | 0.56 | 0.58 | 0.11 | 99,5 |



Slika 38. Histogram vrijednosti detekcije - Izrezivanje

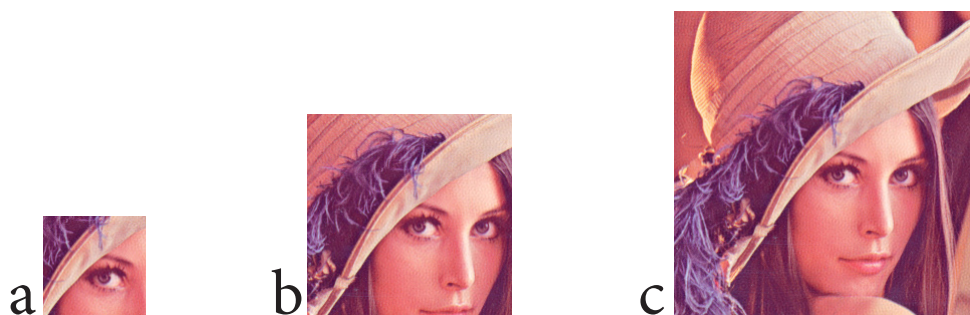


Slika 39. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Izrezivanje



Slika 40. ROC krivulja – Izrezivanje

Izrezivanje se provelo tako da se od originalne slike zadržalo 20, 40, 60 i 80 posto površine originalne slike. Manji postotak znači veću degradaciju slike. Primjer izrezivanja prikazan je na Slici 41.



Slika 41. Primjer izrezivanja a) 20%, b) 40%, c) 60%, d) 80%

Tablica 8 prikazuje rezultate detektiranih vrijednosti korelacije nakon izrezivanja. Srednja vrijednost detektiranih vrijednosti za 20%, 40%, 60% i 80% je redom 0.19, 0.33, 0.46, i 0.56, a postotak detekcije je 3.4%, 81%, 95.4% i 99,5%.

Histogram detektiranih vrijednosti nakon izrezivanja (Slika 38.) prikazuje relativno jednoliko smanjenje detektiranih vrijednosti povećanjem stupnja izrezivanja. Iznimka je slučaj gdje je zadržano samo 20% površine originalne slike, pri čemu detektirana vrijednost svih slika pada u usko područje od 0.1 do 0.2.

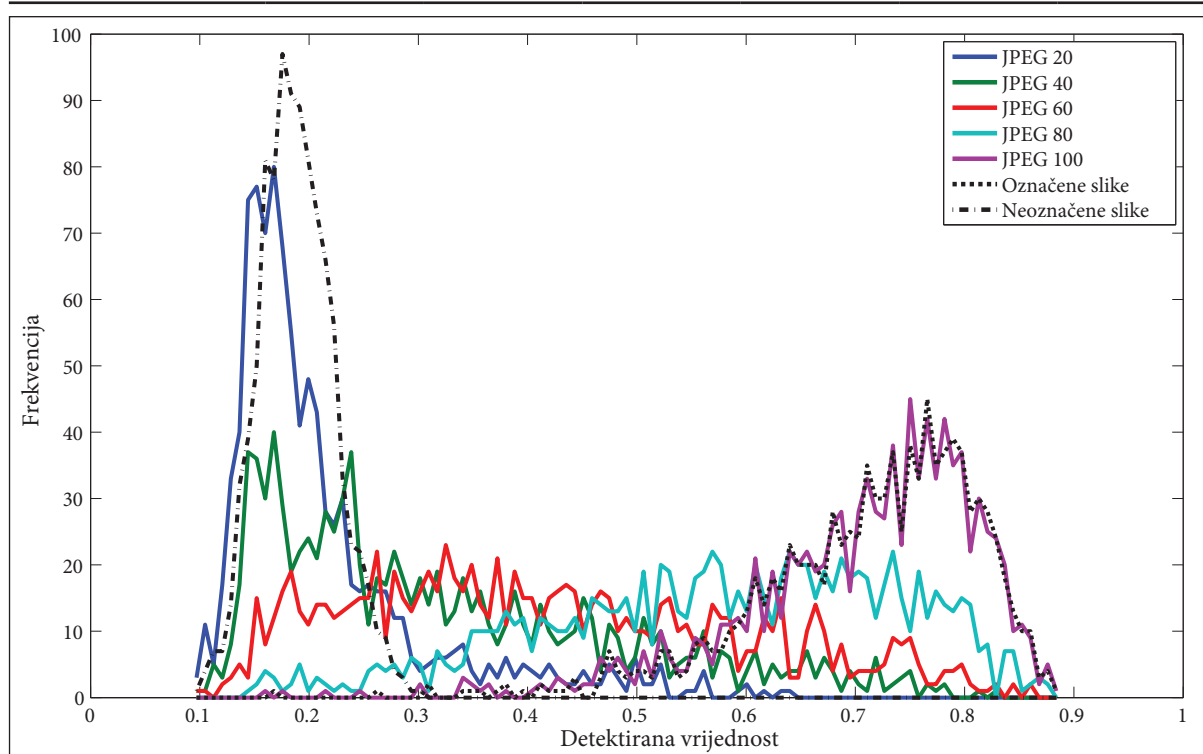
Dijagram ovisnosti vjerojatnosti detekcije o pragu detekcije također prikazuje gotovo linearnu ovisnost stupnja točne detekcije o stupnju izrezivanja (Slika 39.). Manji postotak zadržane slike nakon izrezivanja znači i manju vjerojatnost detekcije. Tako za izrezivanje od 40%, 60% i 80% vjerojatnost detekcije počinje padati kod praga detekcije, redom, 0.25, 0.28, 0.30.

ROC krivulja nakon izrezivanja (Slika 40.) pokazuje da je metoda otporna ako se prilikom izrezivanja zadrži više od 60% površine originalne slike. Pri tom stupnju izrezivanja čak i za malu vjerojatnost KPD od 10^{-3} , vjerojatnost TPD je i dalje vrlo visokih 0.91. Otpornost pri većim stupnjevima izrezivanja znatno opada.

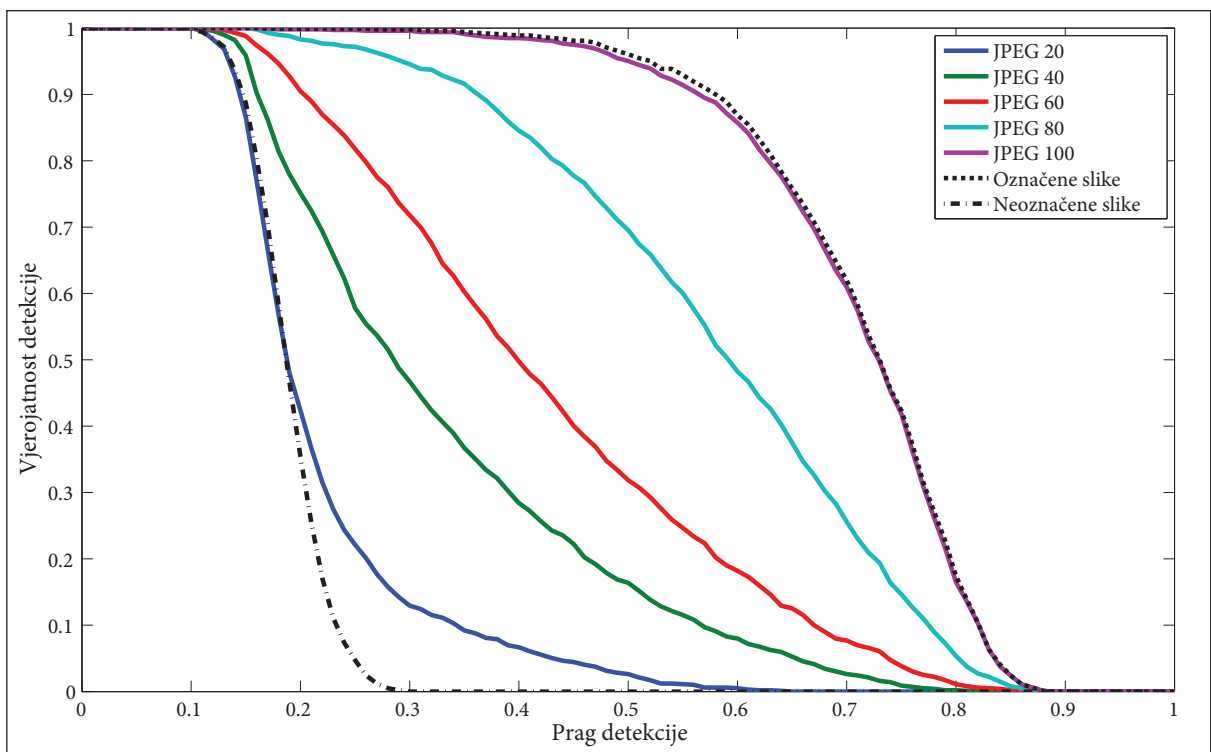
6.4. JPEG kompresija

Tablica 9. Vrijednosti detekcije – JPEG kompresija

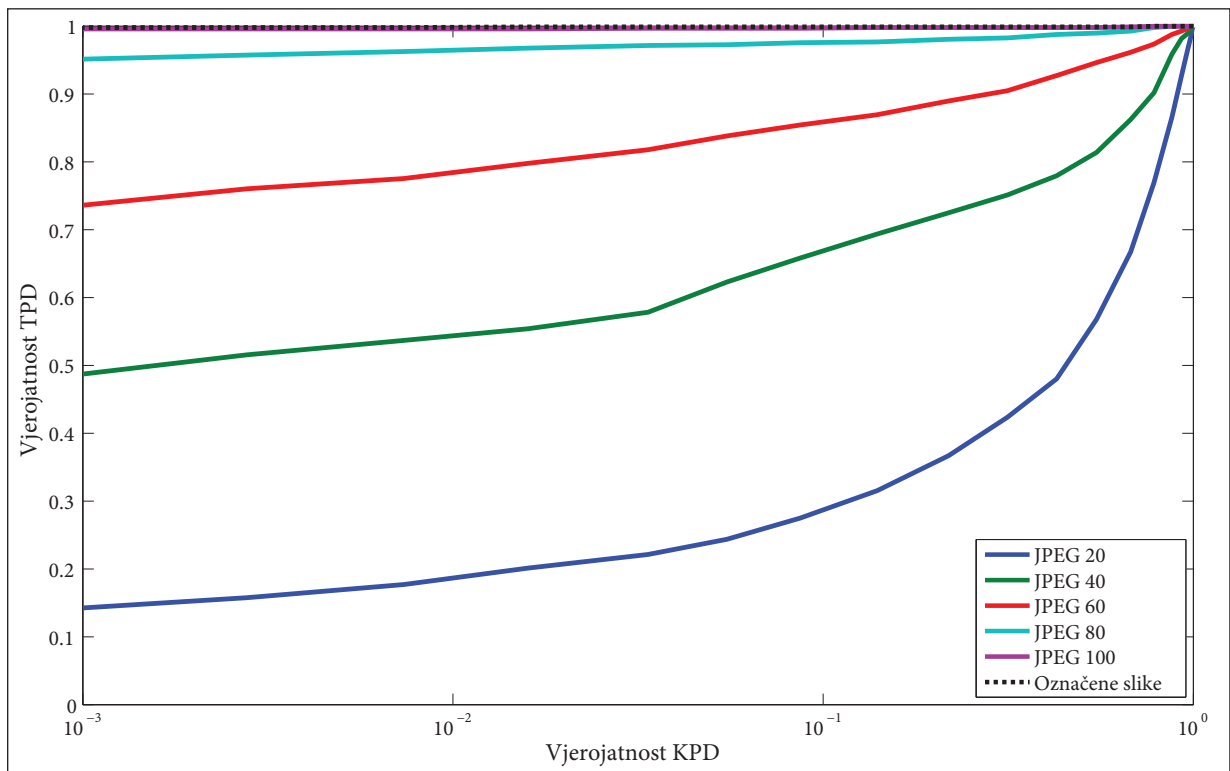
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| JPEG 20% | 0.10 | 0.64 | 0.22 | 0.19 | 0.09 | 22.6 |
| JPEG 40% | 0.11 | 0.83 | 0.33 | 0.29 | 0.16 | 58.3 |
| JPEG 60% | 0.11 | 0.86 | 0.42 | 0.40 | 0.17 | 82.3 |
| JPEG 80% | 0.15 | 0.87 | 0.58 | 0.59 | 0.16 | 97.7 |
| JPEG 100% | 0.25 | 0.89 | 0.71 | 0.73 | 0.11 | 100 |



Slika 42. Histogram vrijednosti detekcije – JPEG kompresija



Slika 43. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - JPEG kompresija



Slika 44. ROC krivulja – JPEG kompresija

Ispitivanje otpornosti na JPEG kompresiju se provelo tako da se originalna označena slika komprimirala JPEG metodom kompresije pri faktoru kvalitete 20, 40, 60, 80, i 100 (veći faktor kvalitete znači manju degradaciju slike.). Primjer JPEG kompresije pri različitim faktorima kvalitete dan je na Slici 45.



Slika 45. Primjer JPEG kompresije pri različitim faktorima kvalitete a) JPEG 20, b) JPEG 40

Tablica 9 prikazuje rezultate detektiranih vrijednosti korelacije nakon JPEG kompresije. Vjerojatnosti točne detekcije nakon kompresije faktorima kvalitete 20, 40, 60, 80 i 100 su redom 22.6%, 58.3%, 83.3%, 97.7%, i 100%, a srednja vrijednost detekcije iznosi 0.22, 0.33, 0.42, 0.58, i 0.71.

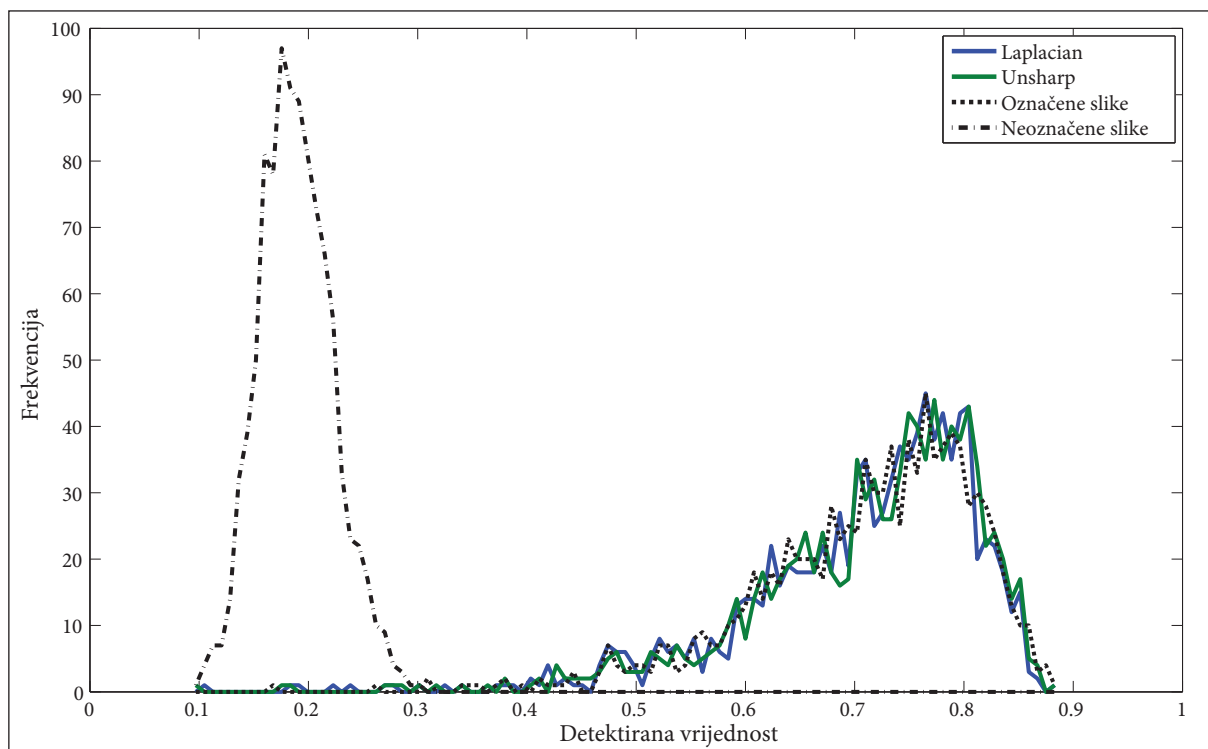
Iz histograma detektiranih vrijednosti na Slici 42. vidi se da JPEG 100 ima zanemarivo mali utjecaj na detektirane vrijednosti. Za manje faktore kvalitete smanjuju se i detektirane vrijednosti. Nakon JPEG kompresije faktorom 80 i 60 kod većina slika se i dalje postižu detektirane vrijednosti iznad 0.3, dok je za JPEG 20 histogram sličan histogramu neoznačenih slika.

Krivulje ovisnosti detekcije o pragu detekcije (Slika 43.) i ROC krivulje (Slika 44.) nakon JPEG kompresije potvrđuju kako je ispitivana metoda otporna na JPEG kompresiju za JPEG faktor kvalitete iznad 60. Ukoliko se rabi manji faktor kvalitete (JPEG 40) metoda je donekle otporna, dok je praktički neotporna za kompresije faktorom kvalitete manjim od 40.

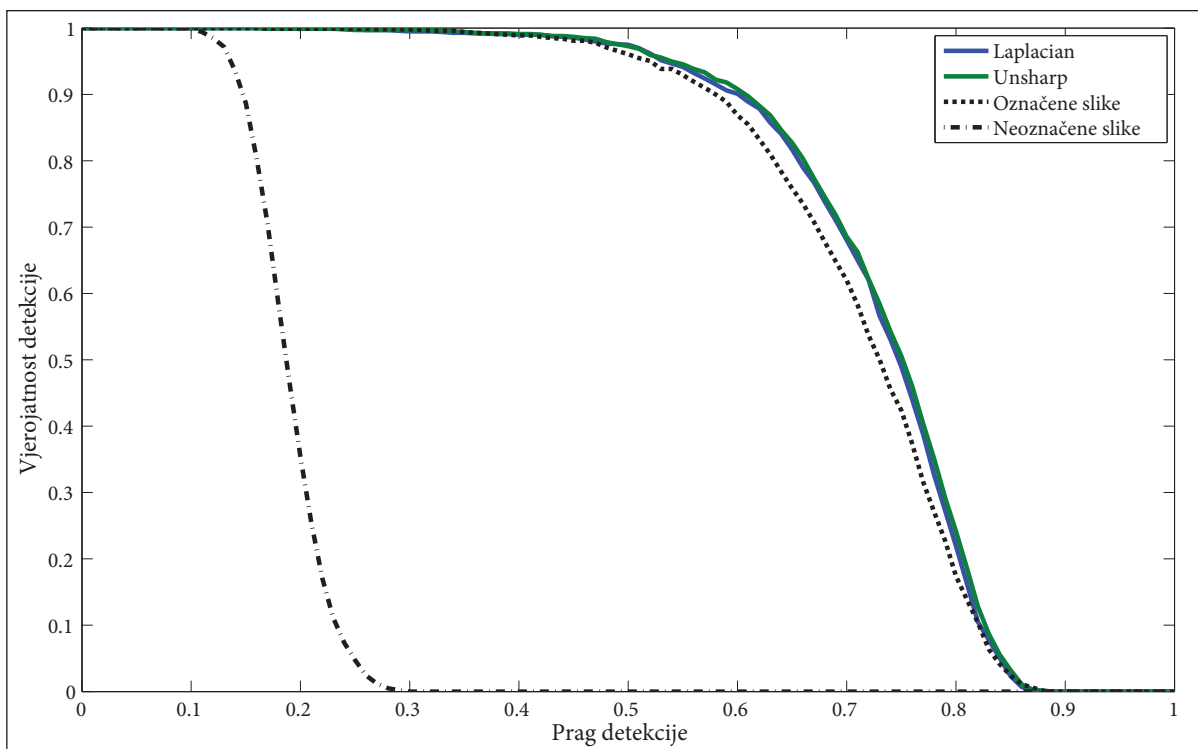
6.5. Laplacov i *Unsharp* filtar

Tablica 10. Vrijednosti detekcije – Laplacov i *Unsharp* filtar

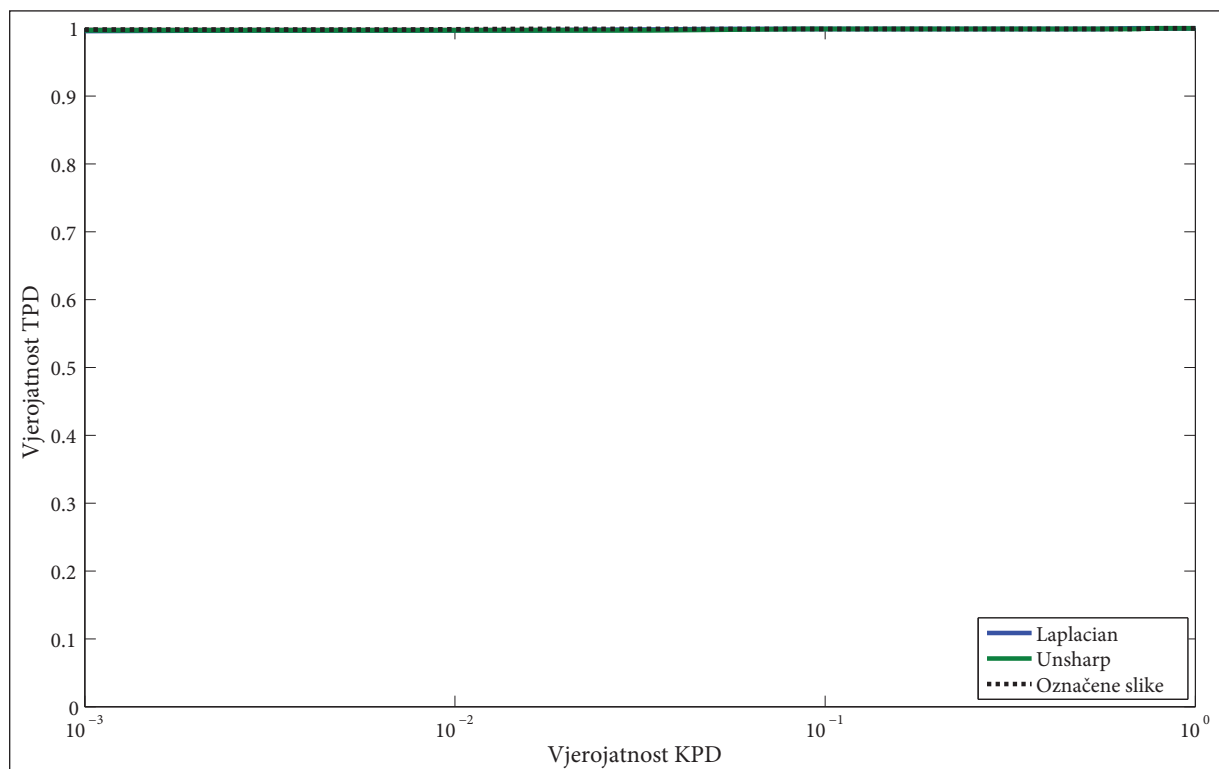
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|-----------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Laplacov filtar | 0.27 | 0.89 | 0.73 | 0.72 | 0.10 | 100 |
| <i>Unsharp</i> filtar | 0.26 | 0.89 | 0.73 | 0.73 | 0.10 | 100 |



Slika 46. Histogram vrijednosti detekcije – Laplacov i *Unsharp* filtar



Slika 47. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Laplacov i *Unsharp* filtar



Slika 48. ROC krivulja – Laplacov i *Unsharp* filtar

Primjer Laplacovog i *unsharp* filtriranja prikazan je na Slici 49.



Slika 49. Primjer a) *unsharp* i b) Laplacovog filtriranja

Tablica 10 pokazuje da Laplacovo i *unsharp* filtriranje djeluju povoljno na detekciju vodenog žiga. Srednja vrijednost detekcije nakon filtriranja je u oba slučaja porasla na 0.73. Vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ nakon filtriranja iznosi 100 %.

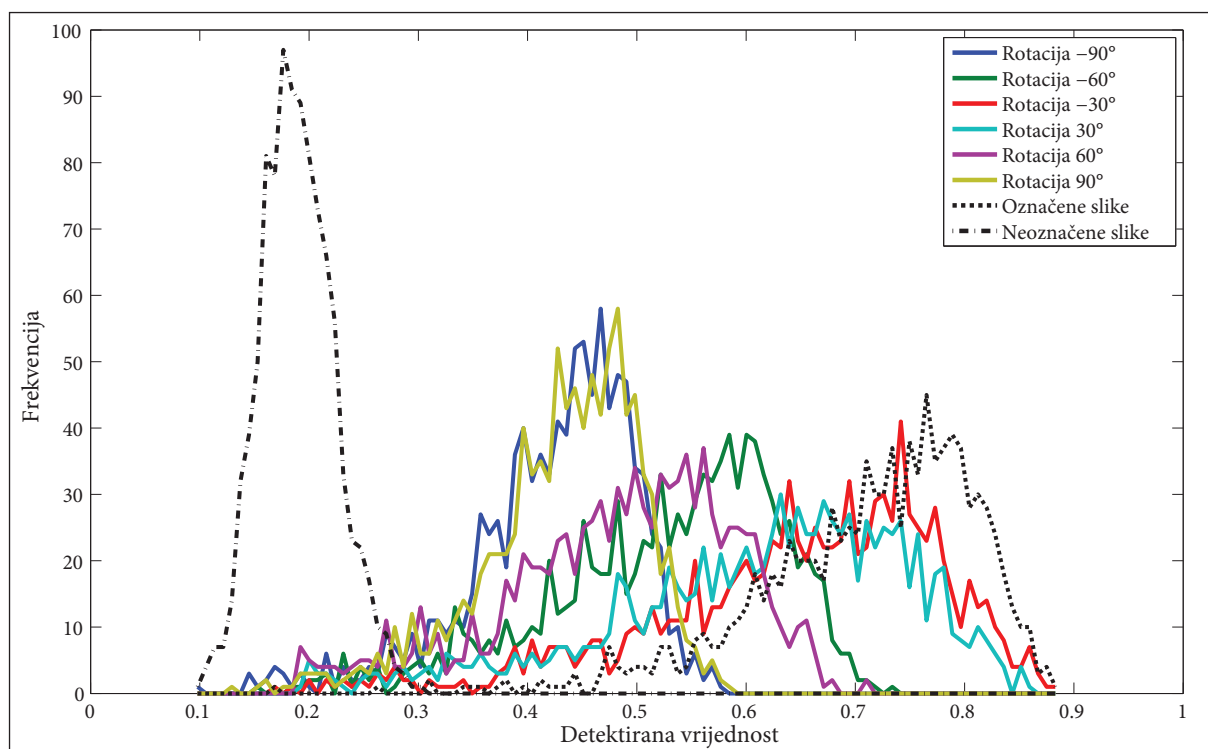
Histogram detektiranih vrijednosti pokazuje da ni Laplacov ni *unsharp* filter ne mijenjaju distribuciju detektiranih vrijednosti u odnosu na označene slike prije degradacije. Vjerojatnost pozitivne detekcije filtriranjem Laplacovim i *unsharp* filtrom se povećava, osobito pri pragu detekcije od 0.5 do 0.8 (Slika 46.).

Da Laplacov i *unsharp* filter imaju pozitivan učinak pokazuju i krivulje ovisnosti vjerojatnosti detekcije o pragu detekcije (Slika 47.) i ROC krivulje (Slika 48.). ROC krivulja u oba slučaja ima idealan oblik, odnosno vjerojatnost TPD je 1 za bilo koju vjerojatnost KPD.

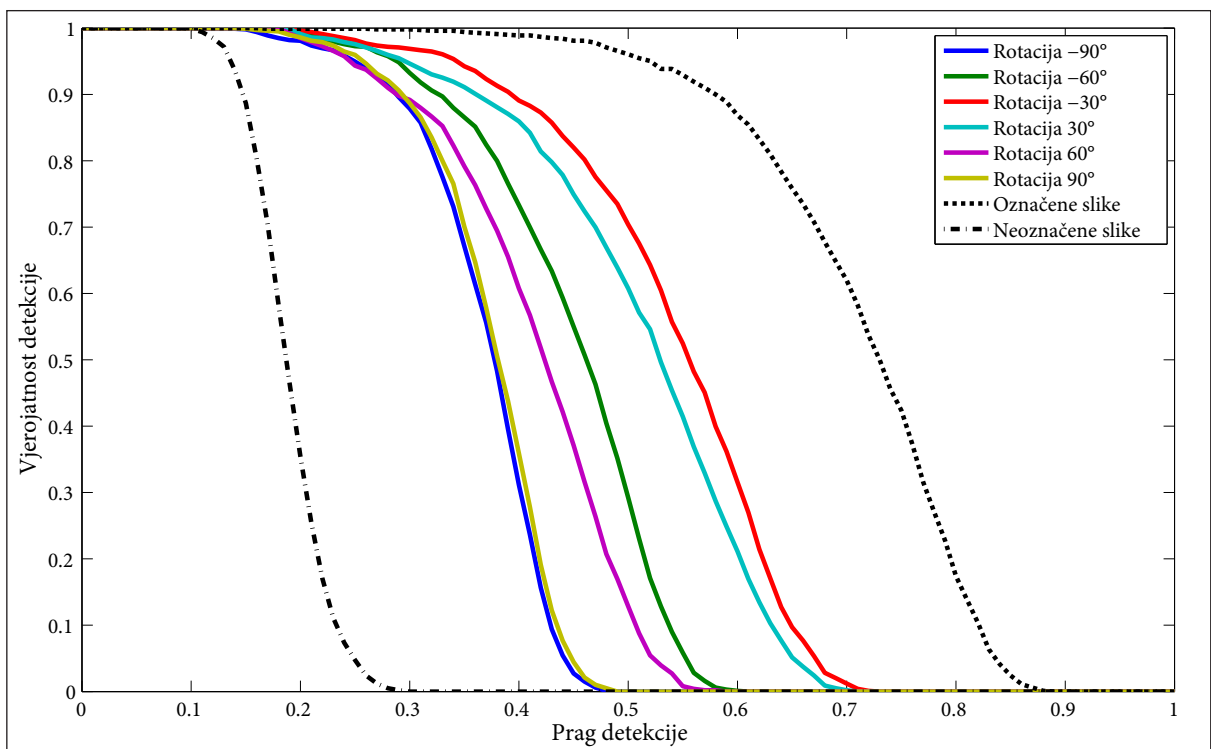
6.6. Rotacija

Tablica 11. Vrijednosti detekcije – Rotacija

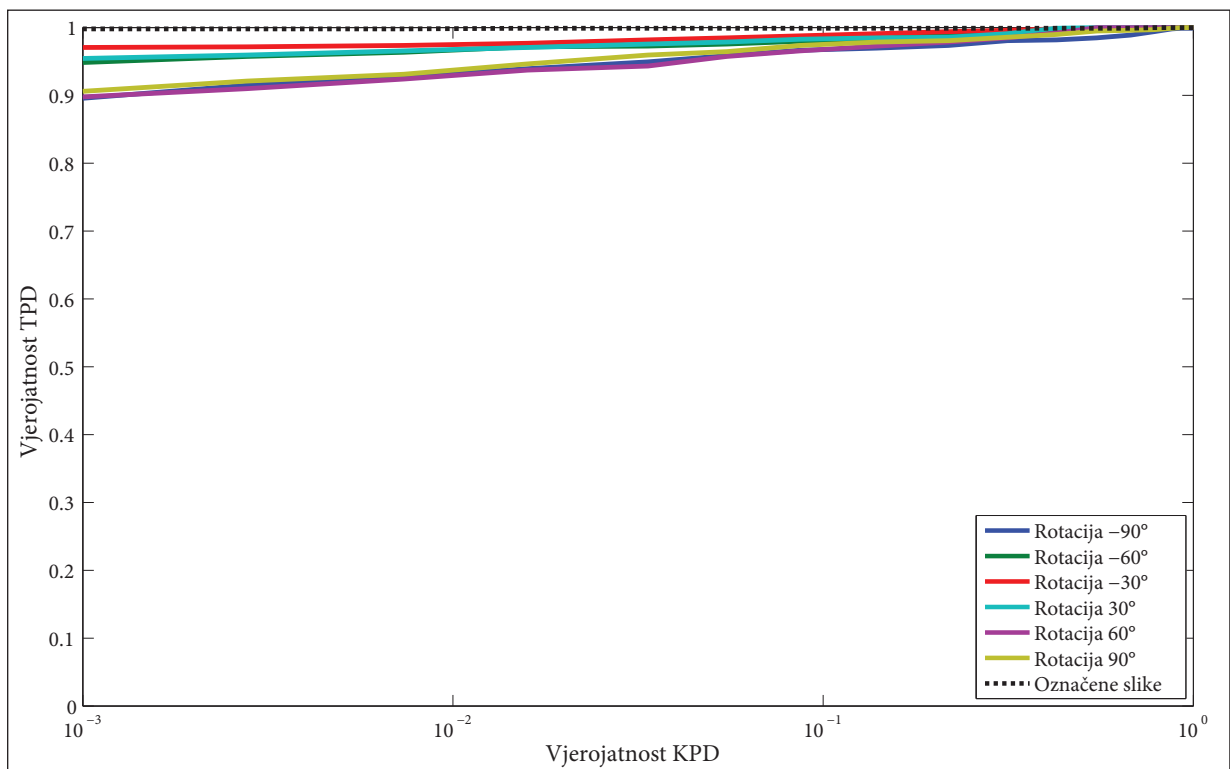
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|----------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Rotacija -90° | 0.11 | 0.49 | 0.37 | 0.38 | 0.06 | 95.4 |
| Rotacija -60° | 0.16 | 0.61 | 0.45 | 0.46 | 0.08 | 97.8 |
| Rotacija -30° | 0.17 | 0.73 | 0.54 | 0.56 | 0.10 | 98.7 |
| Rotacija 30° | 0.19 | 0.70 | 0.51 | 0.53 | 0.11 | 98.1 |
| Rotacija 60° | 0.18 | 0.59 | 0.41 | 0.43 | 0.08 | 94.8 |
| Rotacija 90° | 0.14 | 0.49 | 0.37 | 0.38 | 0.06 | 96.5 |



Slika 50. Histogram vrijednosti detekcije – Rotacija

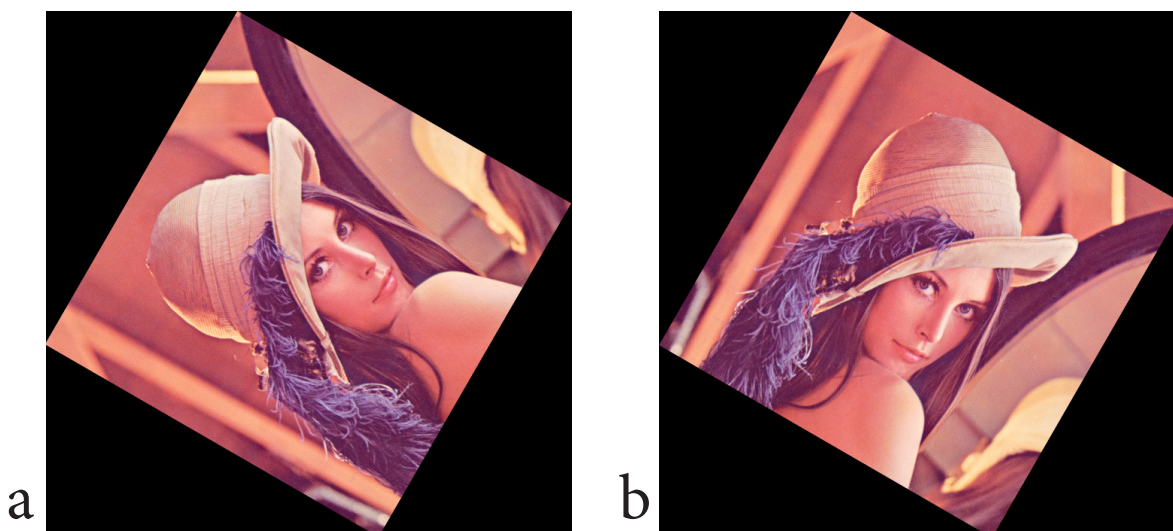


Slika 51. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Rotacija



Slika 52. ROC krivulja - Rotacija

Ispitivanje otpornosti na rotaciju provedeno je tako da su označene slike rotirane za različite kutove od -90 do 90 stupnjeva. Kutovi veći od 90° i manji od -90° nisu uzimani u obzir jer su zbog svojstva periodičnosti DFT kutovi iznad 90° jednaki manjim kutovima (na primjer kut od 135° jednak je kutu od 45°). Primjer rotacije slike pri različitim kutovima prikazan je na Slici 53.



Slika 53. Primjer rotacije označene slike a) 60° b) -30°

U tablici 11 prikazani su rezultati detekcije nakon rotacije označenih slika. Ostvarena srednja vrijednost detekcije je za veće kutove manja nego za manje kutove. Jasno se vidi i simetrija DFT jer se vrijednosti detekcije mijenjaju gotovo jednako za pozitivni i negativni kut. Vjerojatnost detekcije za $+90^\circ$ iznosi oko 95.5%, za $\pm 60^\circ$ iznosi oko 96%, a za $\pm 30^\circ$ iznosi 98%.

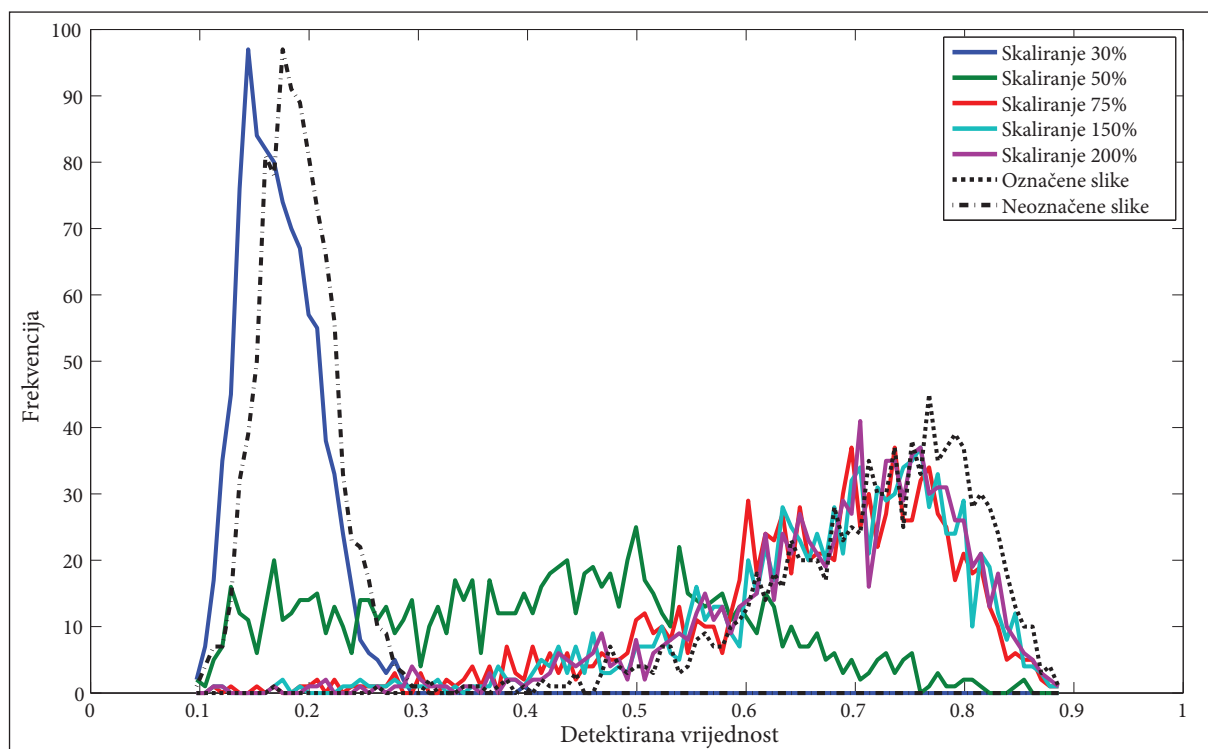
Simetrija za pozitivni i negativni kut najbolje se vidi na histogramu detektiranih vrijednosti (slika 50). Distribucija detektiranih vrijednosti je vrlo slična za jednak kut zakretanja u pozitivnom i negativnom smjeru.

Robusnost ispitivane metode na rotaciju se vidi iz ROC krivulja (Slika 52.), gdje je, bez obzira na kut, ostvarena visoka vjerojatnost TPD čak i za relativno malu vjerojatnost KPD od 10^{-3} . Ova otpornost na rotaciju je očekivana zahvaljujući inherentnom svojstvu periodičnosti DFT.

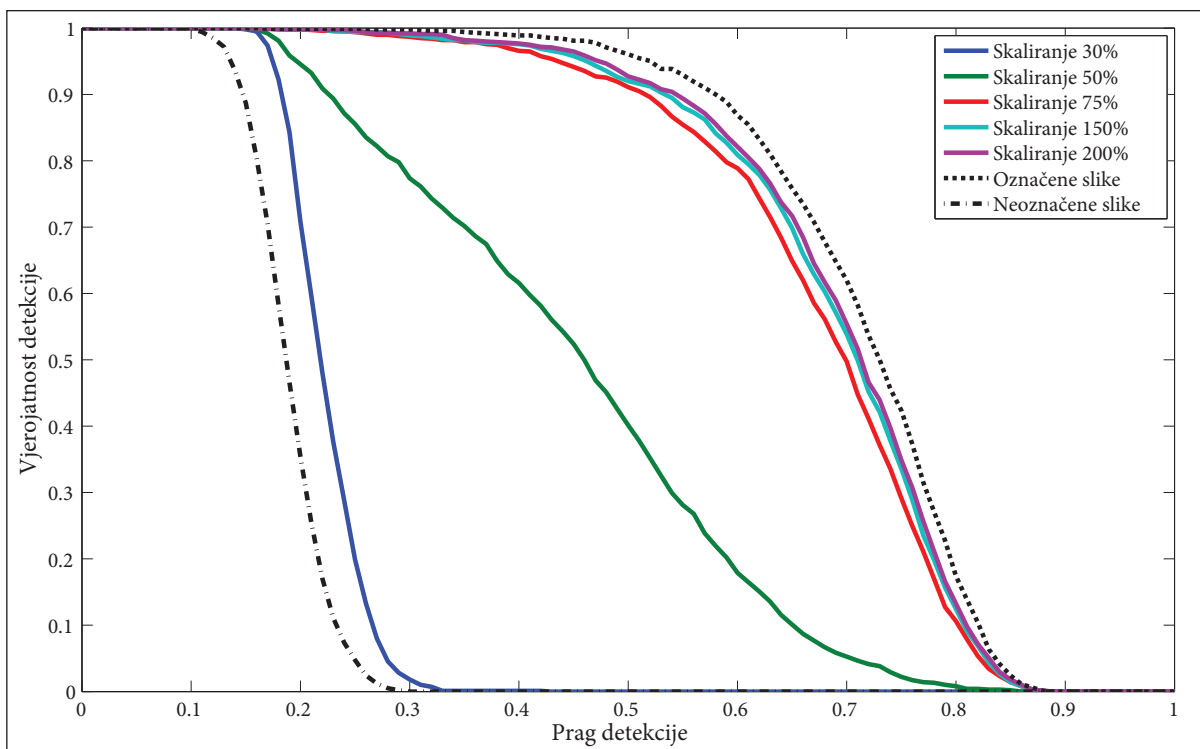
6.7. Skaliranje

Tablica 12. Vrijednosti detekcije – Skaliranje

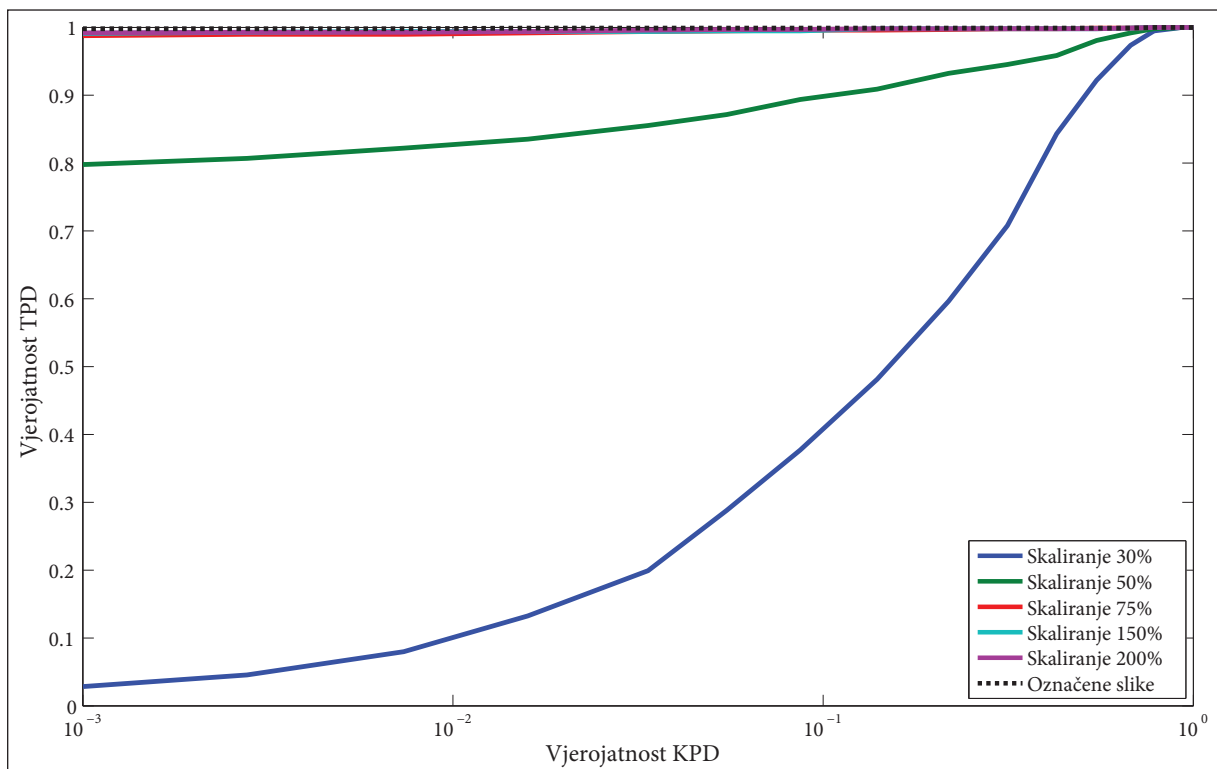
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Skaliranje 30% | 0.15 | 0.43 | 0.22 | 0.22 | 0.03 | 20.4 |
| Skaliranje 50% | 0.15 | 0.86 | 0.45 | 0.46 | 0.16 | 86,0 |
| Skaliranje 75% | 0.16 | 0.89 | 0.67 | 0.70 | 0.12 | 99,9 |
| Skaliranje 150% | 0.30 | 0.89 | 0.69 | 0.71 | 0.12 | 100 |
| Skaliranje 200% | 0.30 | 0.89 | 0.71 | 0.71 | 0.11 | 100 |



Slika 54. Histogram vrijednosti detekcije – Skaliranje



Slika 55. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Skaliranje



Slika 56. ROC krivulja – Skaliranje

Ispitivanje otpornosti na skaliranje provedeno je tako da su označene slike skalirane za određeni postotak (30%-200%). Za slučaj kada je skaliranje manje od 100% slika se smanji, dok se u suprotnom slučaju slika poveća. Primjer skaliranja prikazan je na Slici 57.

U tablici 12 dane su vrijednosti detekcije postignute nakon skaliranja označenih slika. Iz rezultata se vidi da smanjenje slike na srednju vrijednost detekcije utječe znatno više nego povećanje slike. Štoviše, povećanje označene slike gotovo da i nema utjecaj na detekciju. To se vidi i iz vjerojatnosti detekcije za $t=0.30$. Dok je kod skaliranja od 30%, 50%, i 75%, točnost detekcije iznosila redom, 20.4%, 86.0% i 99.9%, pri skaliranju većem od 100% detektor ne griješi za niti jednu sliku, odnosno točnost detekcije iznosi 100%.



Slika 57. Primjer skaliranja označene slike a) 50% c) 125%

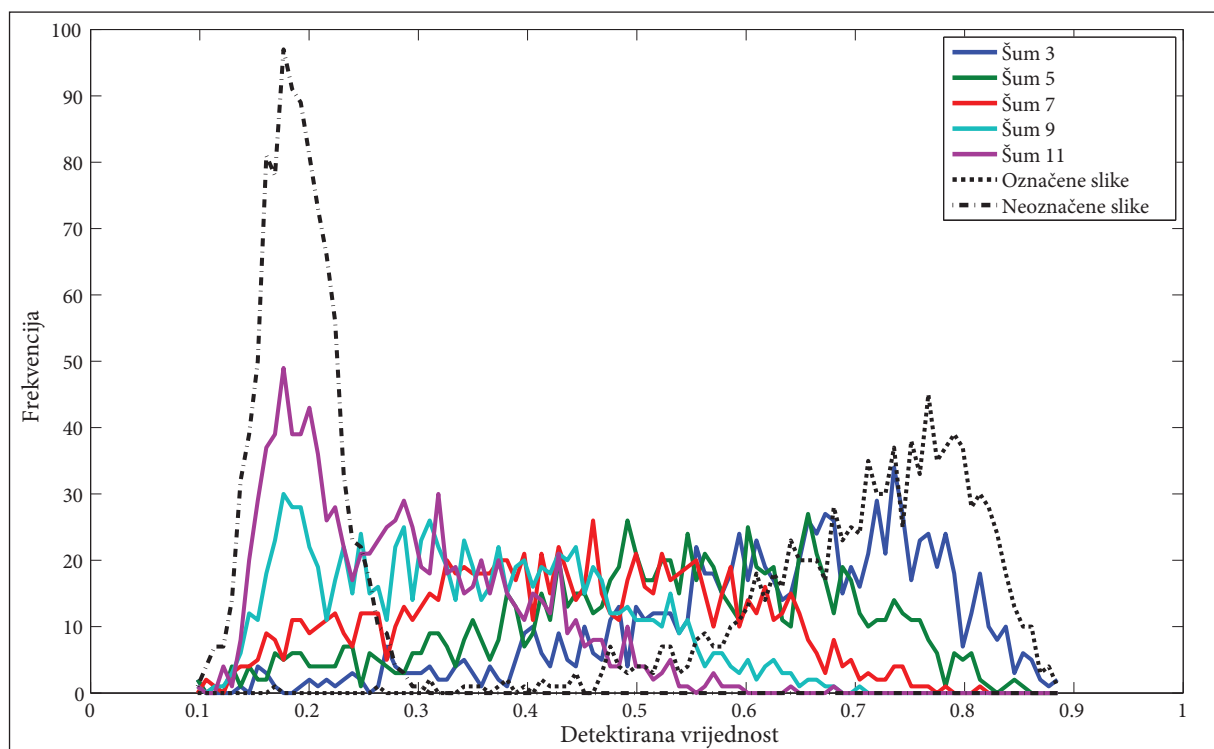
Distribucija vrijednosti detekcije prikazana je na Slici 54. Vidljivo je da povećanje slike ima vrlo mali utjecaj na distribuciju detektiranih vrijednosti. Smanjenje slike na manje od 50% originalne veličine značajno utječe na distribuciju detektiranih vrijednosti.

Ova osjetljivost na skaliranje slike na veličinu manju od 50% originalne slike vidi se pri analizi ovisnosti vjerojatnosti detekcije o pragu detekcije (Slika 55.) i pri analizi ROC krivulje (Slika 56.). Jasno je da smanjenje slike nepovoljno djeluje na vjerojatnost detekcije, pa se može zaključiti da je ispitivana metoda otporna na smanjenje do 50% veličine originalne slike. Prilikom skaliranja na manju veličinu točnost dekodera se smanji na neprihvatljivu vrijednost.

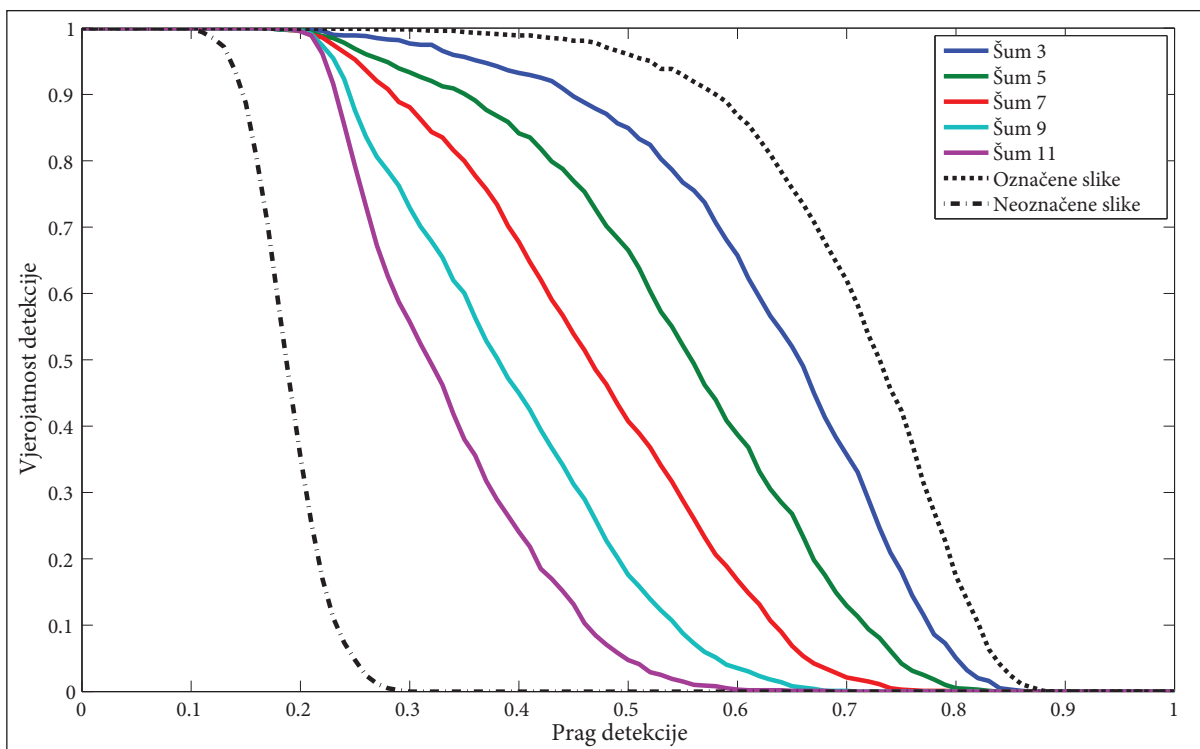
6.8. Šum

Tablica 13. Vrijednosti detekcije – Šum

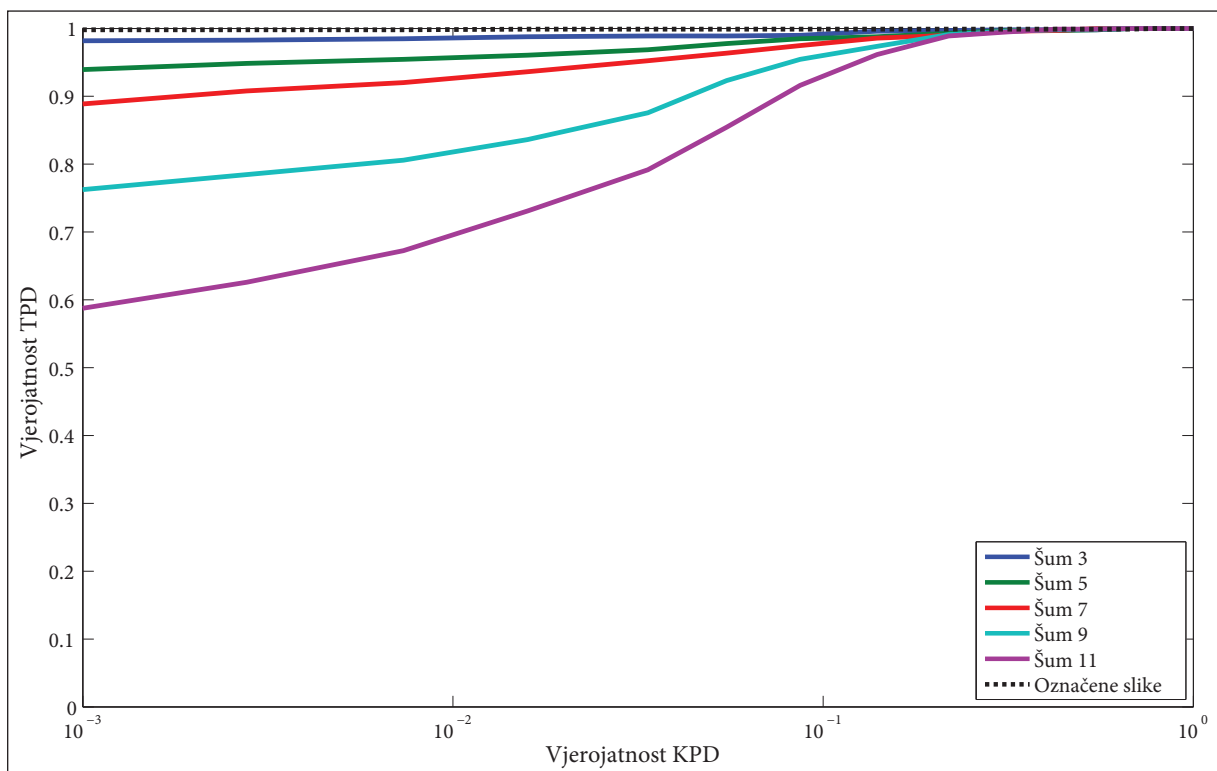
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Šum 3 | 0.17 | 0.86 | 0.63 | 0.66 | 0.13 | 99.7 |
| Šum 5 | 0.18 | 0.83 | 0.55 | 0.56 | 0.14 | 97.4 |
| Šum 7 | 0.18 | 0.79 | 0.47 | 0.46 | 0.13 | 95.8 |
| Šum 9 | 0.17 | 0.70 | 0.39 | 0.38 | 0.11 | 88.1 |
| Šum 11 | 0.17 | 0.68 | 0.33 | 0.32 | 0.09 | 79.7 |



Slika 58. Histogram vrijednosti detekcije – Šum



Slika 59. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Šum



Slika 60. ROC krivulja - Šum

Ispitivanje otpornosti na šum provedeno je tako da se u originalnu označenu sliku unio šum normalne distribucije. Vrijednosti degradacije šumom su normalizirane što znači da se pri degradaciji šumom 0 dobije slika identična originalnoj dok šum 100 daje potpuno uništi sliku. Primjer utjecaja šuma na označene slike prikazan je na Slici 61.

U tablici 13 dani su rezultati ispitivanja utjecaja šuma na vrijednosti korelacije. Srednja detektirana vrijednost opada kako se udio šuma povećava. Za šum 3 iznosi 0.63, dok za šum 11 iznosi 0.33. Točnost detekcije također opada, 99.7% za šum 3, i 79.7% za šum 11.

Histogram na Slici 58. prikazuje distribuciju detektiranih vrijednosti nakon degradacije označenih slika šumom. Vidljivo je da se vrijednosti detekcije smanjuju kako se povećava stupanj degradacije.



Slika 61. Primjer utjecaja šuma na sliku. a) Šum 7, b) Šum 11.

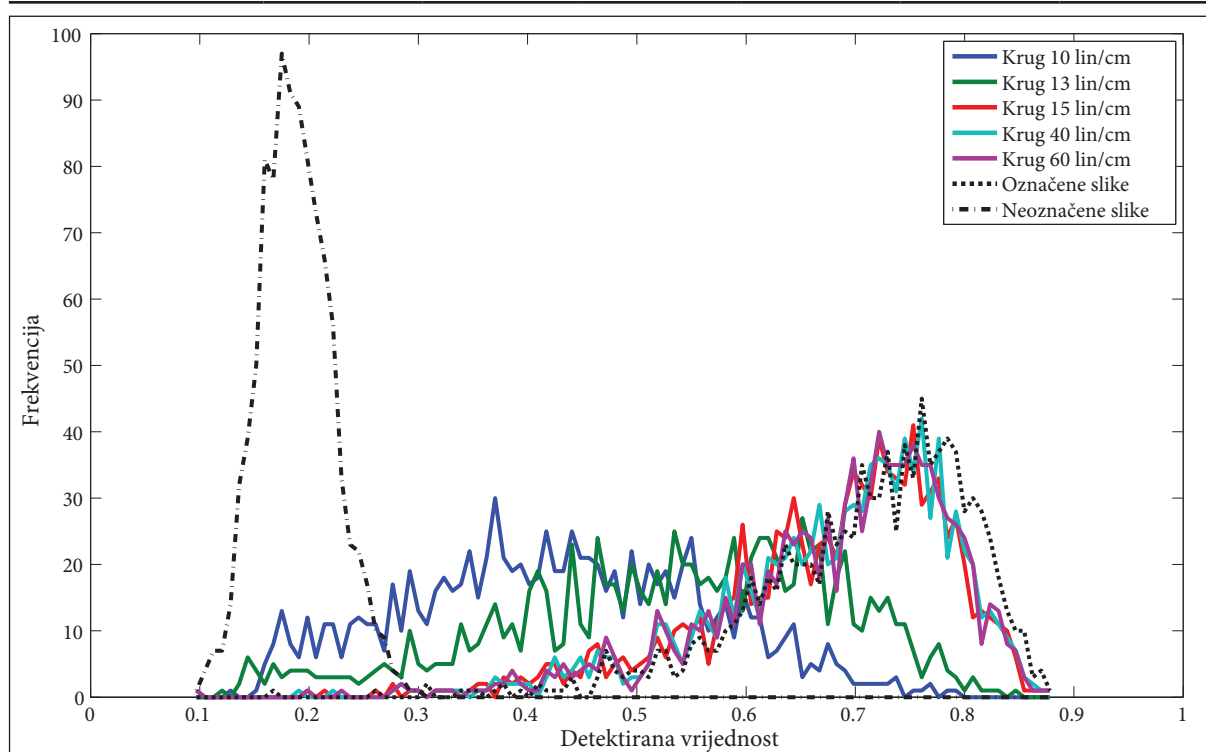
Iz analize ovisnosti vjerojatnosti TPD o pragu detekcije (Slika 59.) vidi se da vjerojatnost detekcije, bez obzira na stupanj degradacije šumom, iznosi 1 za sve vrijednosti praga detekcije manje od 0.25. Nakon ove vrijednosti vjerojatnost detekcije počinje padati brže ili sporije, ovisno o stupnju degradacije. Iz analize ROC krivulja (Slika 60.) da se zaključiti isto. Vjerojatnost TPD je maksimalna za slučaj kada je vjerojatnost KPD veća od 10^{-1} . Cjelokupnom analizom utjecaja šuma na detekciju, može se zaključiti da je ispitivana metoda otporna na djelovanje šuma do stupnja degradacije šuma 7.

6.9. AM raster

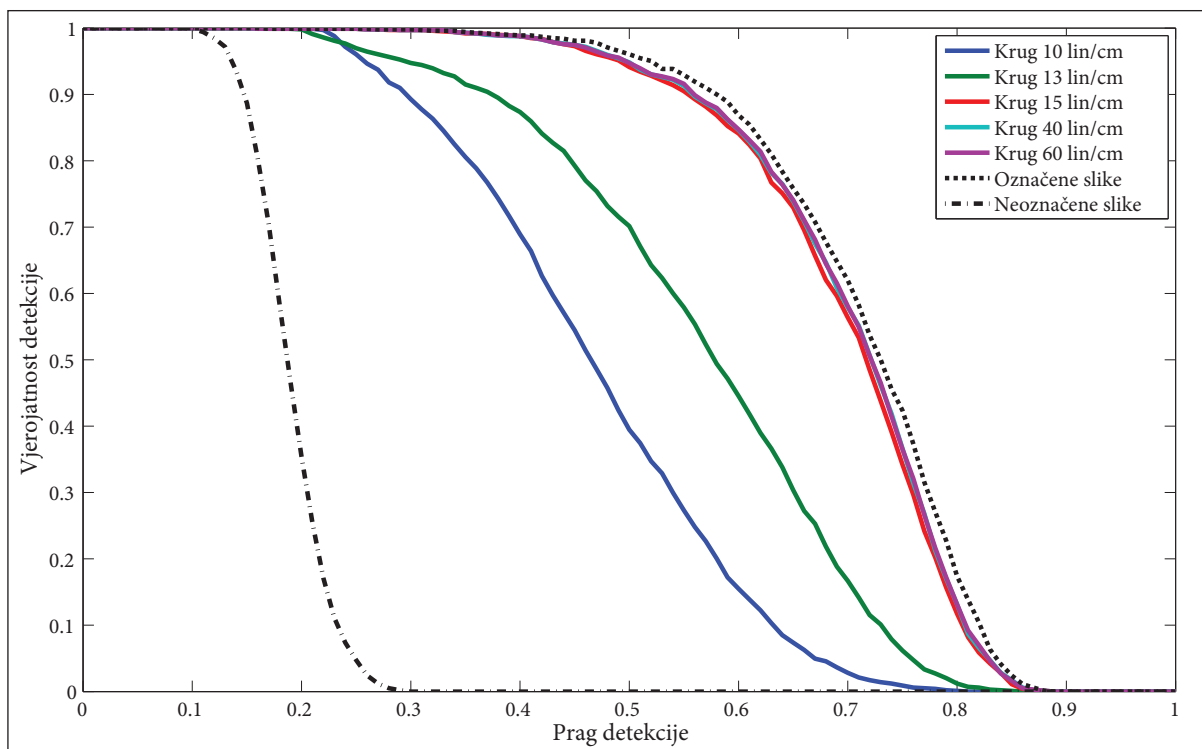
6.9.1. Kružni rasterski element

Tablica 14. Vrijednosti detekcije – Kružni rasterski element

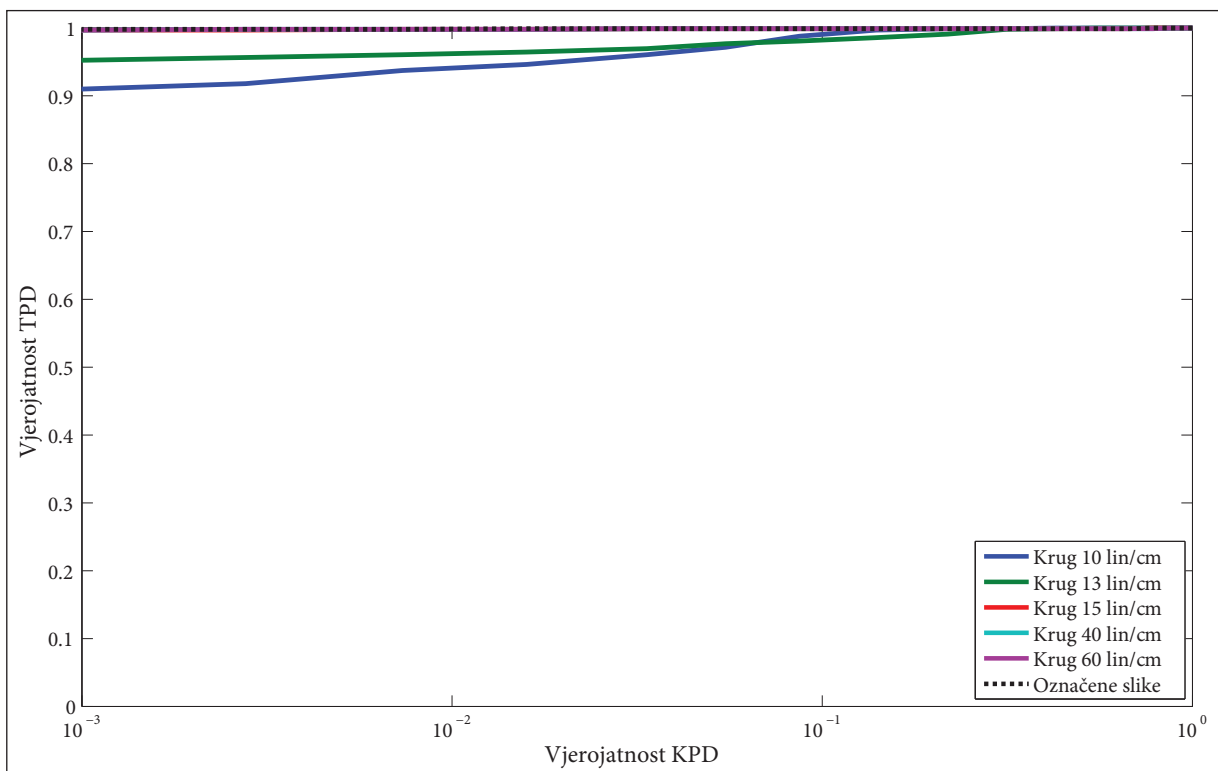
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Krug 10 lin/cm | 0.19 | 0.80 | 0.47 | 0.47 | 0.12 | 96.0 |
| Krug 13 lin/cm | 0.18 | 0.81 | 0.56 | 0.58 | 0.14 | 96.9 |
| Krug 15 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.69 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |
| Krug 40 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |
| Krug 60 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |



Slika 62. Histogram vrijednosti detekcije – Kružni rasterski element



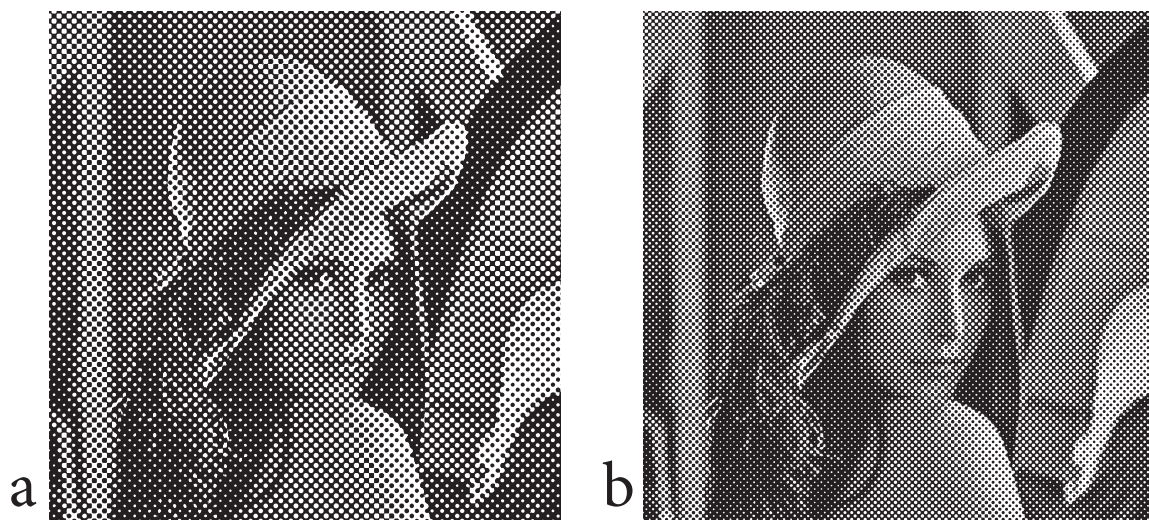
Slika 63. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Kružni rasterski element



Slika 64. ROC krivulja – Kružni rasterski element

Ispitivanje otpornosti metode na AM rastriranje provedeno je tako da su se označene rastrirale korištenjem različitog oblika rasterskog elementa (krug, linija, elipsa), te različitih linijatura (10 lin/cm – 60 lin/cm). Zbog lakšeg rastriranja, sve su slike prije rastriranja pretvorene u crno-bijele slike.

Primjer AM rastriranja označenih slika s kružnim rasterskim elementom korištenjem različitih linijatura prikazan je na Slici 65.



Slika 65. AM rastriranje s kružnim rasterskim elementom, linijature a) 10, b) 15 lin/cm.

U tablici 14 prikazani su rezultati ispitivanja nakon AM rastriranja korištenjem kružnog rasterskog elementa. Rezultati pokazuju da na vrijednosti detekcije utječu samo linijature manje od 15 lin/cm, dok se kod većih linijatura vrijednost detekcije gotovo ne mijenja. Točnost metode u najgorem slučaju (za linijaturu 10 lin/cm) iznosi 96%. Manje linijature nisu korištene u eksperimentu jer se u praksi gotovo nikad ne upotrebljavaju.

Histogram detektiranih vrijednosti (Slika 62.) pokazuje da se rastriranjem linijaturom većom od 15 lin/cm zadržava vrlo slična distribucija detektiranih vrijednosti kao i za slučaj kad slike nisu podvrgnute deformaciji.

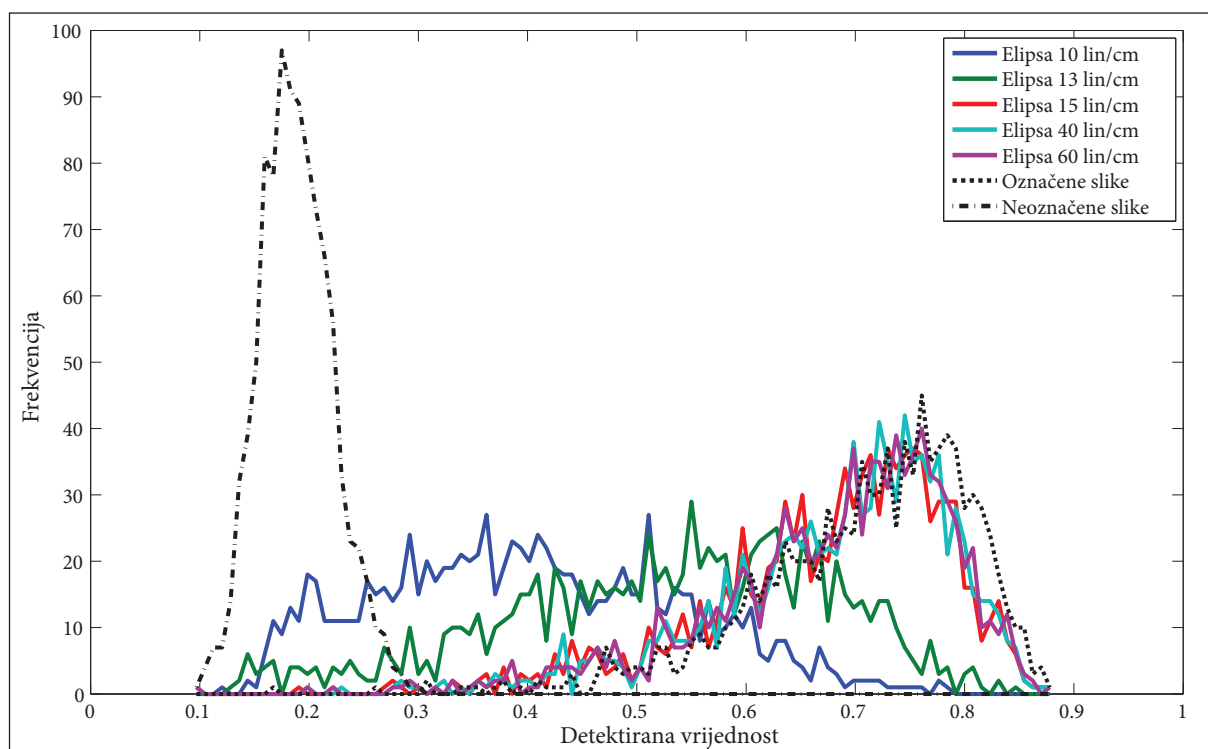
Dijagram ovisnosti vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije (Slika 63.) pokazuje da nakon rastriranja vjerojatnost detekcije počinje padati pri pragu detekcije 0.20. Za linijature od 10 i 13 lin/cm vjerojatnost, povećanjem praga detekcije, pada brže nego za veće linijature za koje je funkcija vjerojatnosti praktički jednaka kao i kod originalnih označenih slika.

ROC krivulja (Slika 54.) potvrđuje gornja razmatranja. Ispitivana metoda pokazuje iznimnu otpornost na AM rastriranje s kružnim rasterskim elementom.

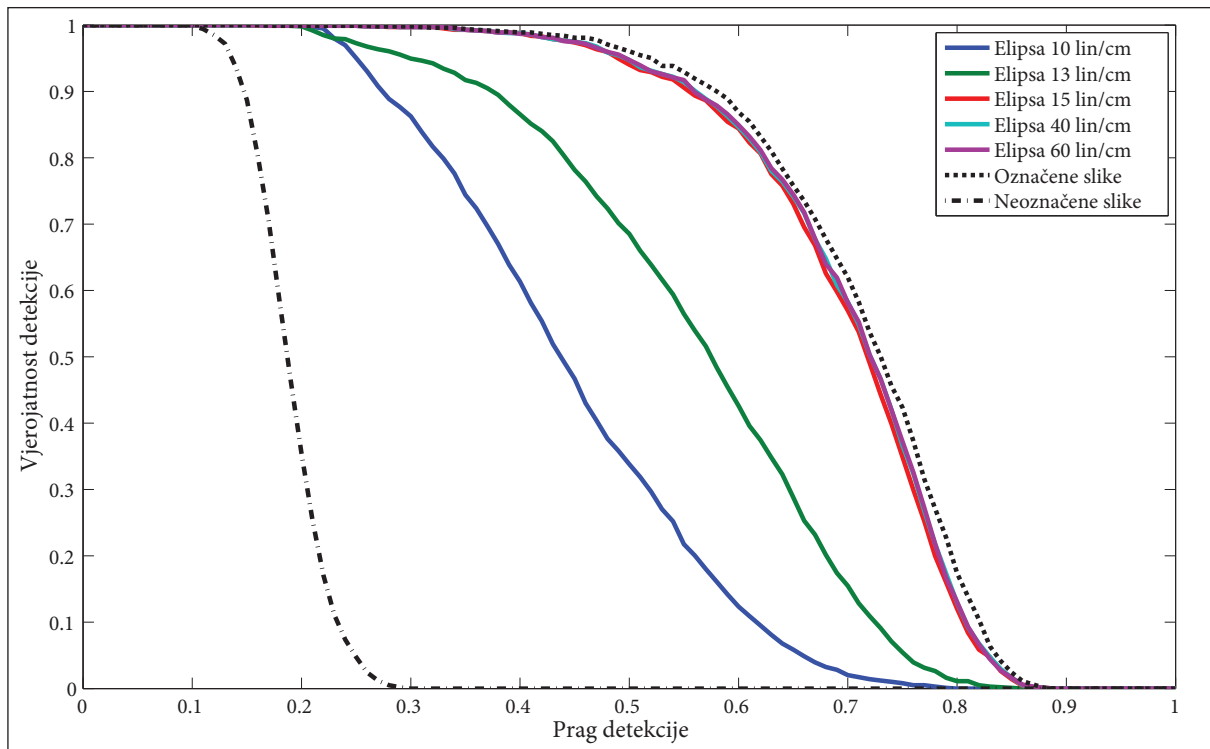
6.9.2. Eliptični rasterski element

Tablica 15. Vrijednosti detekcije – Eliptični rasterski element

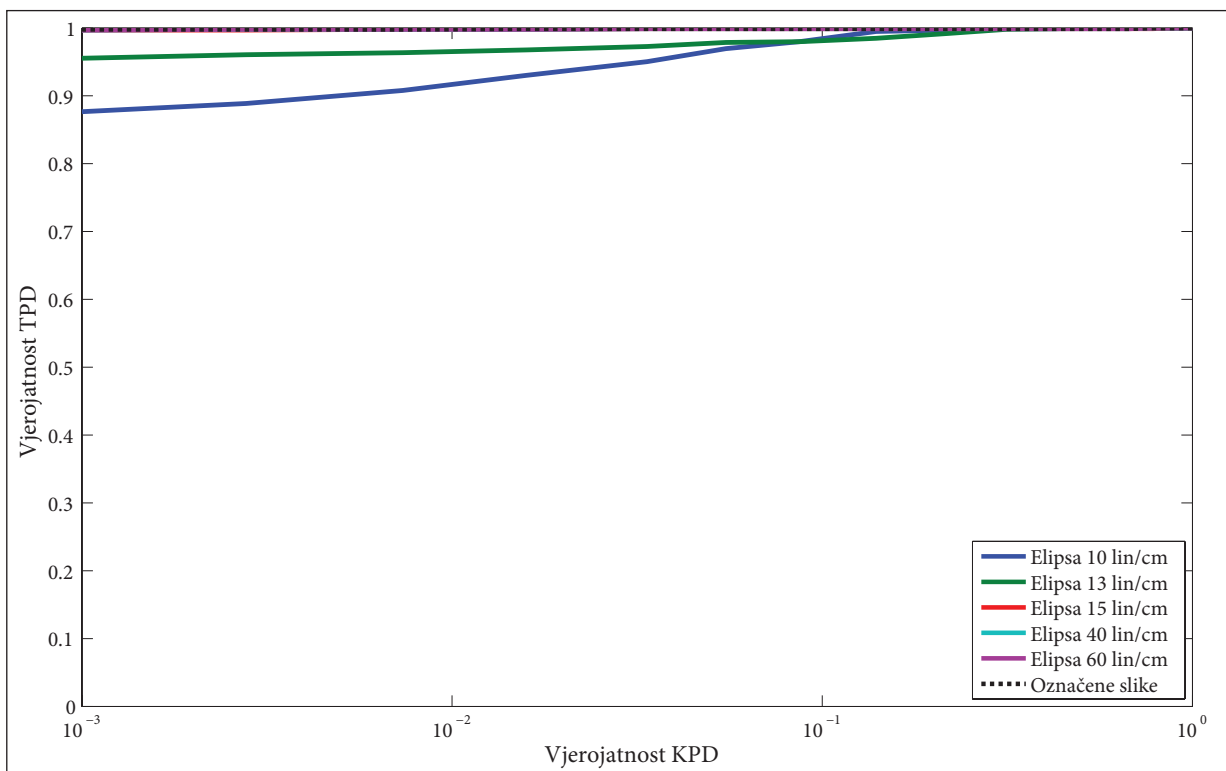
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Elipsa 10 lin/cm | 0.18 | 0.80 | 0.45 | 0.44 | 0.13 | 94.9 |
| Elipsa 13 lin/cm | 0.19 | 0.86 | 0.56 | 0.58 | 0.14 | 97.2 |
| Elipsa 15 lin/cm | 0.16 | 0.87 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |
| Elipsa 40 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |
| Elipsa 60 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |



Slika 66. Histogram vrijednosti detekcije – Eliptični rasterski element

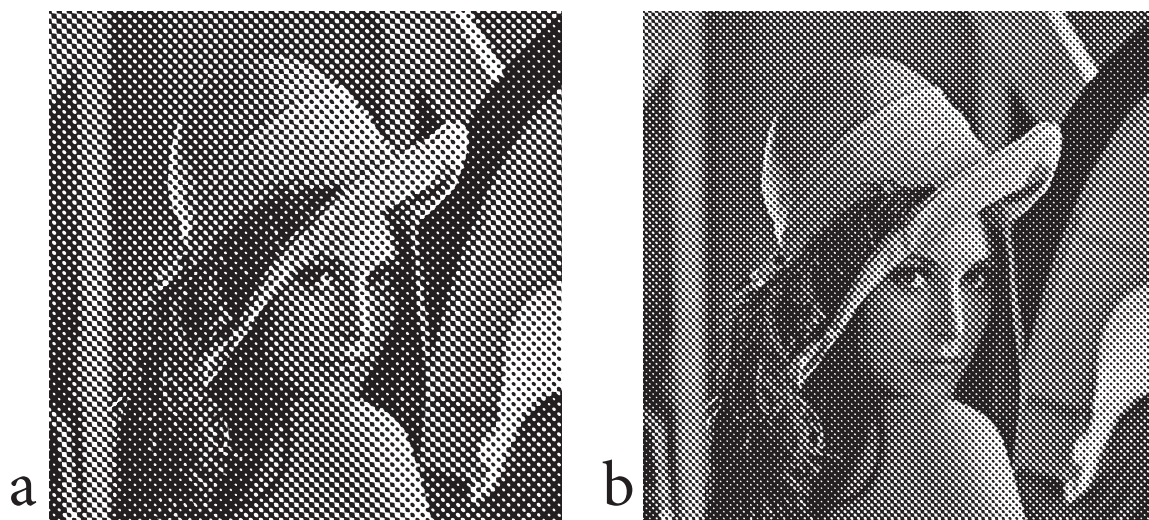


Slika 67. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Eliptični rasterski element



Slika 68. ROC krivulja – Eliptični rasterski element

Primjer AM rastriranja označenih slika s eliptičnim rasterskim elementom korištenjem različitih linijatura prikazan je na Slici 69.



Slika 69. AM rastriranje s eliptičnim rasterskim elementom, linijature a) 10, b) 15 lin/cm

U tablici 15 prikazani su rezultati ispitivanja nakon AM rastriranja korištenjem kružnog rasterskog elementa. Ostvareni rezultati su vrlo slični rezultatima za rastriranje kružnim rasterskim elementom. Rezultati pokazuju da na vrijednosti detekcije utječu samo linijature manje od 15 lin/cm, dok se kod većih linijatura vrijednost detekcije gotovo ne mijenja. Točnost metode u najgorem slučaju (za linijaturu 10 lin/cm) iznosi 94.9%.

Histogram detektiranih vrijednosti (Slika 66.) pokazuje da se rastriranjem linijaturom većom od 15 lin/cm zadržava vrlo slična distribucija detektiranih vrijednosti kao i za slučaj kad slike nisu podvrgnute deformaciji.

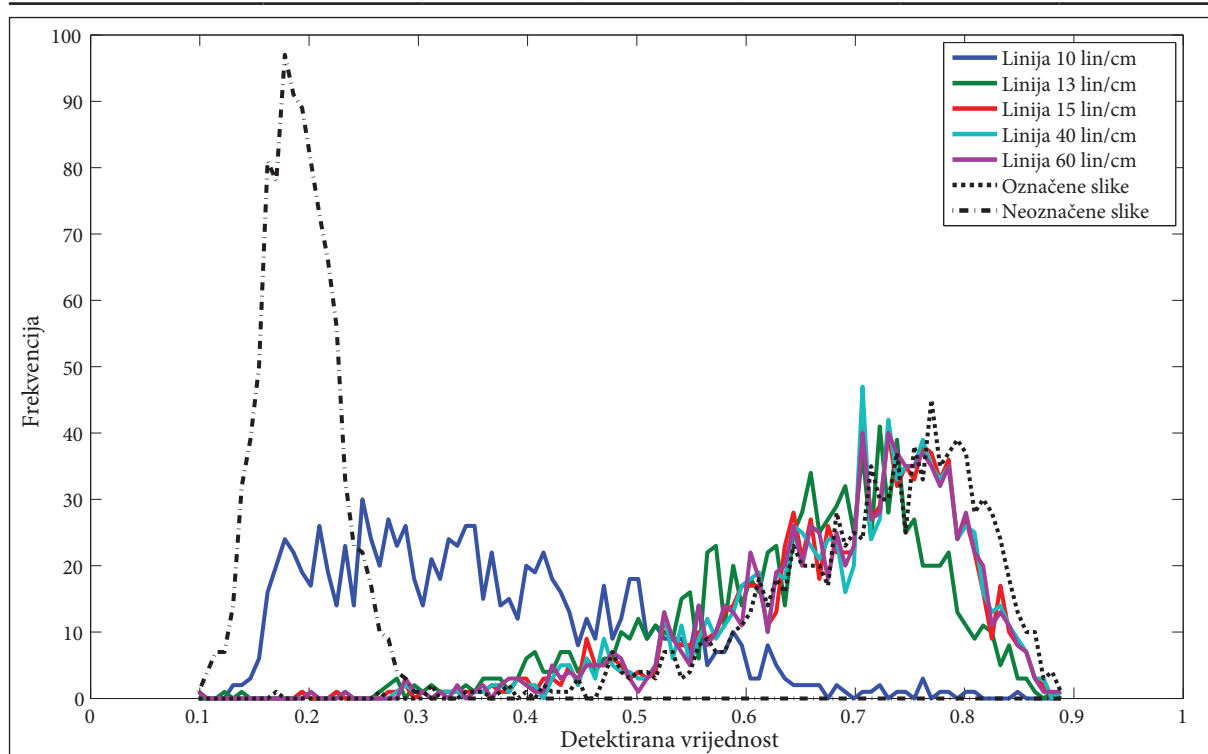
Dijagram ovisnosti vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije (Slika 57.) pokazuje da nakon rastriranja vjerojatnost detekcije počinje padati pri pragu detekcije 0.20. Za linijature od 10 i 13 lin/cm vjerojatnost, povećanjem praga detekcije, pada brže nego za veće linijature za koje je funkcija vjerojatnosti praktički jednaka kao i kod originalnih označenih slika.

ROC krivulja (Slika 68.) potvrđuje gornja razmatranja. Ispitivana metoda pokazuje jednaku otpornost na AM rastriranje s eliptičnim rasterskim elementom i kružnim rasterskim elementom.

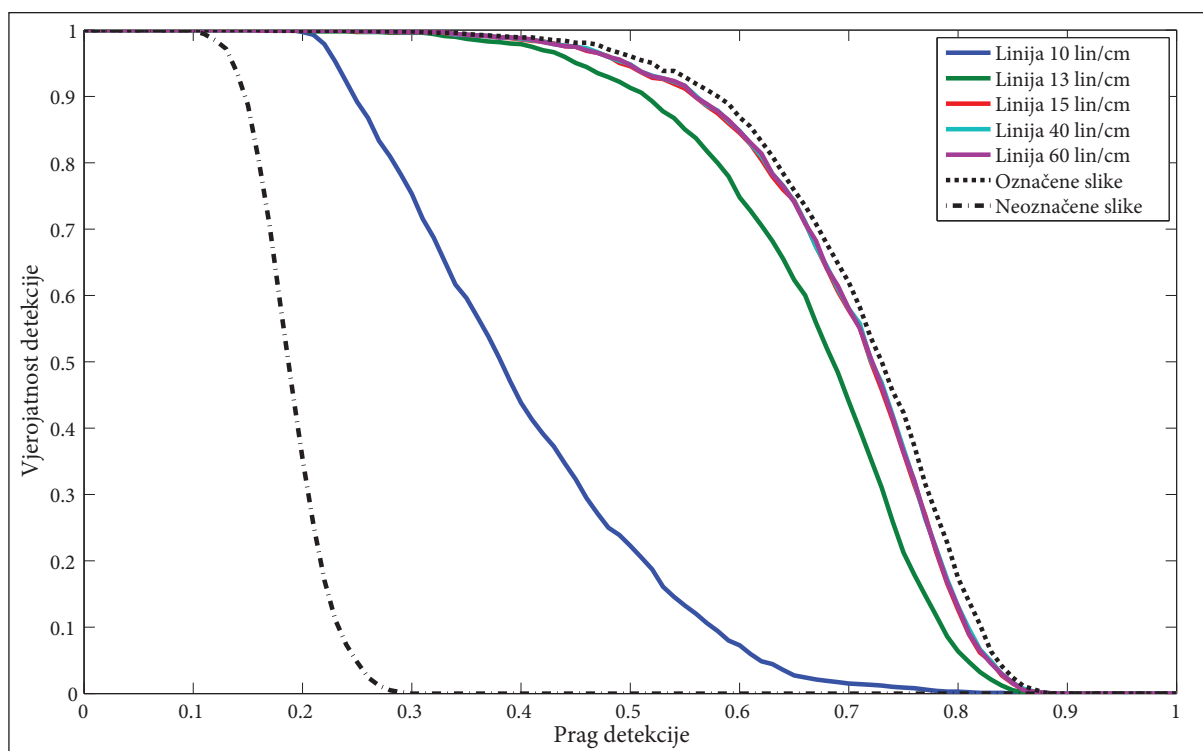
6.9.3. Linijski rasterski element

Tablica 16. Vrijednosti detekcije – Linijski rasterski element

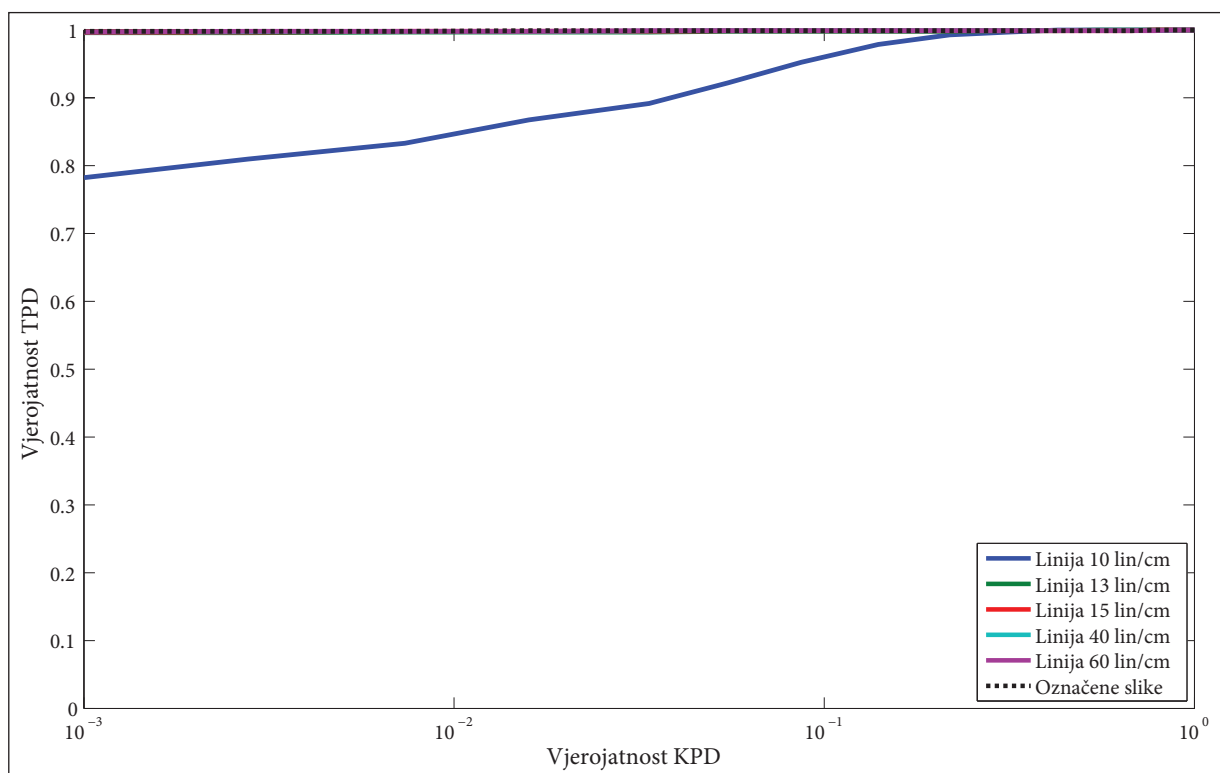
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| Linija 10 lin/cm | 0.19 | 0.85 | 0.40 | 0.38 | 0.12 | 89.1 |
| Linija 13 lin/cm | 0.19 | 0.88 | 0.66 | 0.68 | 0.10 | 99.6 |
| Linija 15 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.7 |
| Linija 40 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |
| Linija 60 lin/cm | 0.16 | 0.89 | 0.70 | 0.72 | 0.10 | 99.8 |



Slika 70. Histogram vrijednosti detekcije – Linijski rasterski element



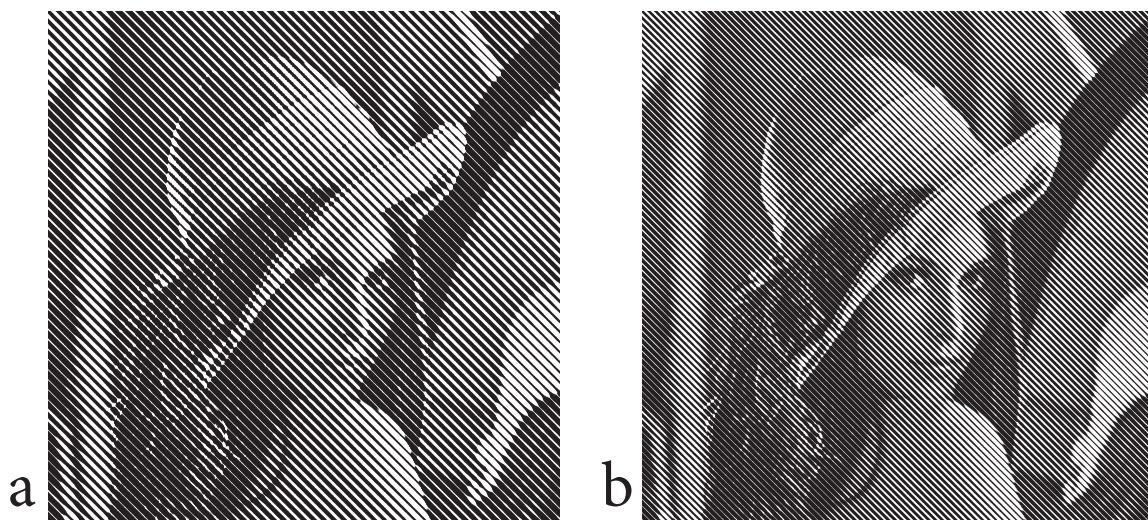
Slika 71. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Linijski rasterski element



Slika 72. ROC krivulja – Linijski rasterski element

Primjer AM rastriranja označenih slika s linijskim rasterskim elementom korištenjem različitih linijatura prikazan je na Slici 73.

U tablici 16 prikazani su rezultati ispitivanja nakon AM rastriranja korištenjem linijskog rasterskog elementa. Rezultati su nešto bolji nego pri korištenju kružnog rasterskog elementa. Rastriranje linijskim rasterom značajnije utječe na detektirane vrijednosti samo za linijature manje od 13 lin/cm, dok se kod većih linijatura srednja vrijednost detekcije gotovo ne mijenja. Točnost metode za linijski raster linijature 10 lin/cm iznosi 89%, a pri većim linijaturama je gotovo 100%.



Slika 73. AM rastriranje s linijskim rasterskim elementnom, linijature a) 10, b) 15 lin/cm

Histogram detektiranih vrijednosti (Slika 70.) pokazuje da se rastriranjem linijaturom većom od 13 lin/cm zadržava vrlo slična distribucija detektiranih vrijednosti kao i za slučaj kad slike nisu podvrgnute deformaciji.

Dijagram ovisnosti vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije (Slika 71.) pokazuje da nakon rastriranja vjerojatnost detekcije počinje padati pri pragu detekcije 0.20. Za linijaturu od 10 lin/cm vjerojatnost detekcije, povećanjem praga detekcije, pada brže nego za veće

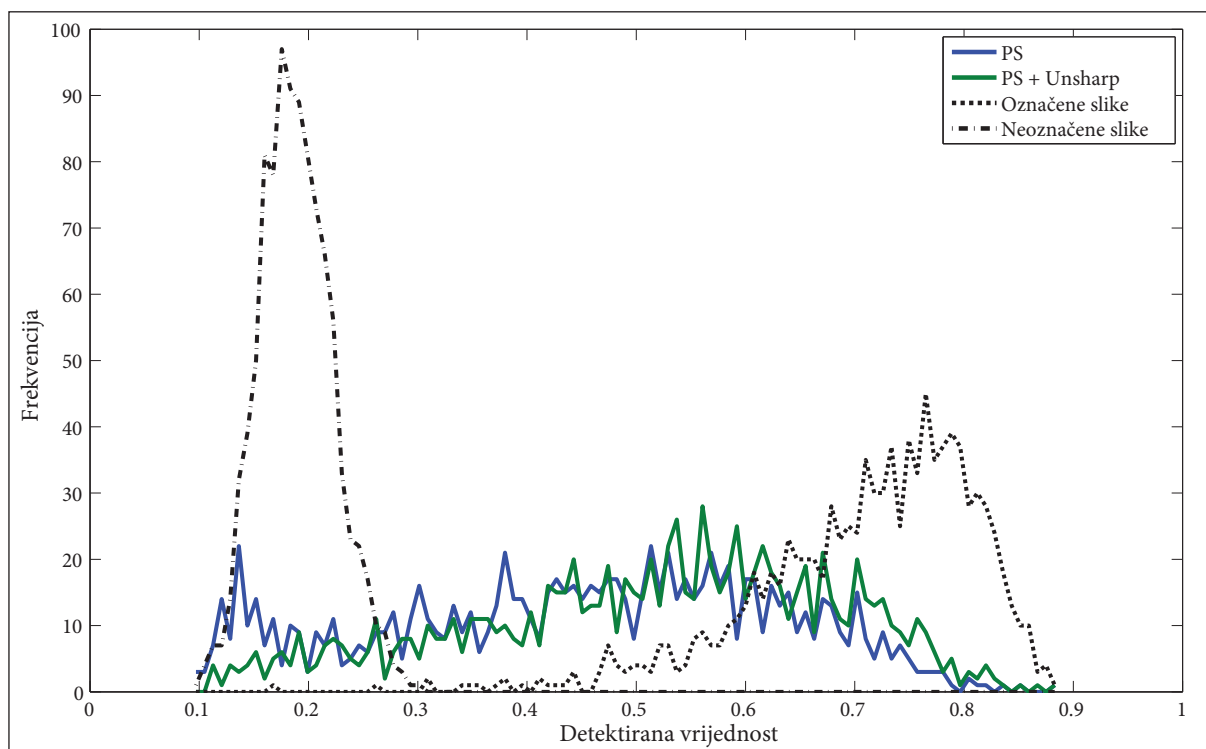
linijature za koje je funkcija vjerojatnosti praktički jednaka kao i kod originalnih označenih slika.

ROC krivulja (Slika 72.) potvrđuje gornja razmatranja. Ispitivana metoda pokazuje iznimnu otpornost na AM rastriranje s linijskim rasterskim elementom. ROC krivulja ima idealan oblik za linijature do 13 lin/cm. Otpornost metode je nešto manja za linijaturu od 10 lin/cm no i dalje je prihvatljiva. Vjerojatnost TPD iznosi oko 0.8 za vjerojatnost KPD od 10^{-3} .

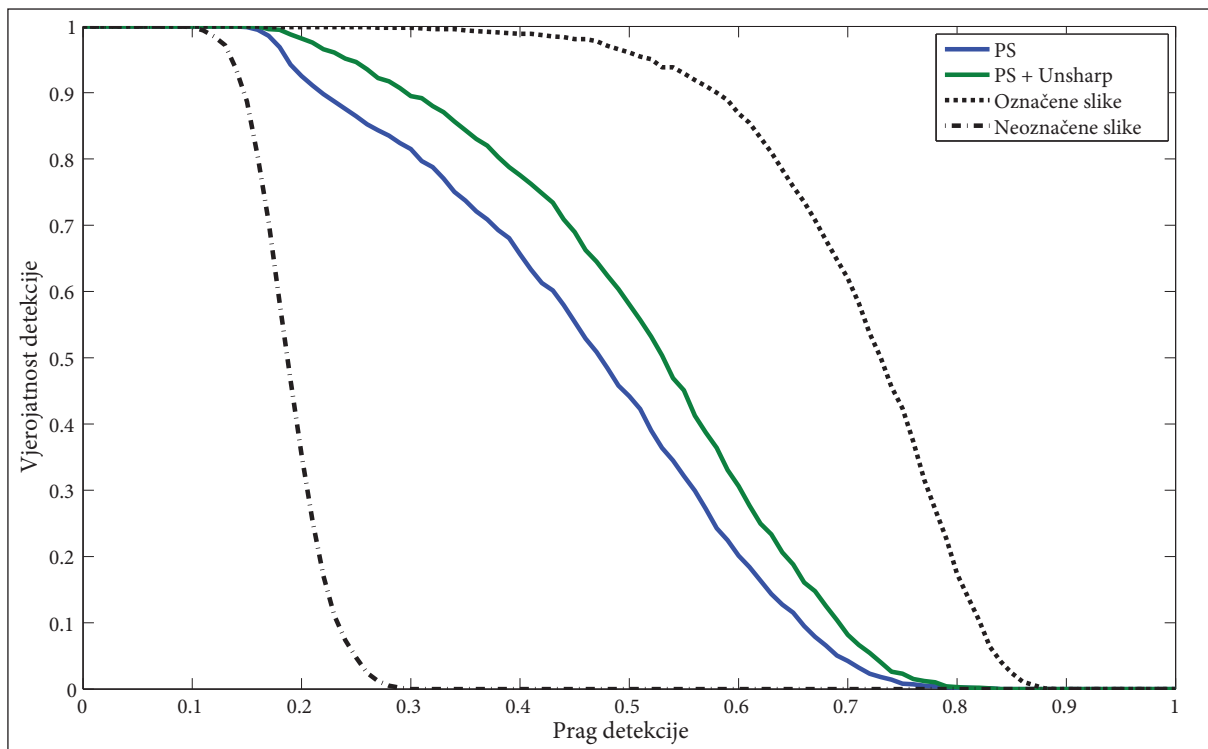
6.10. PS proces

Tablica 17. Vrijednosti detekcije – PS proces

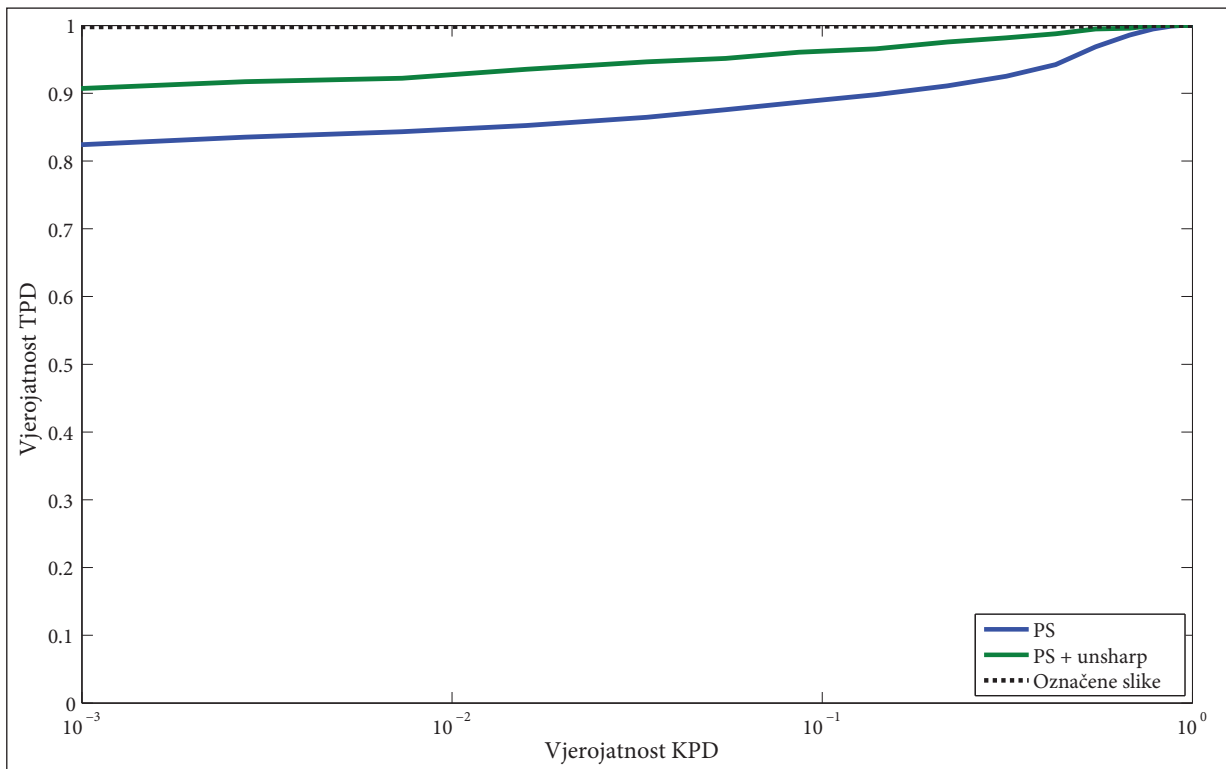
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|--------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| PS | 0.15 | 0.84 | 0.46 | 0.47 | 0.16 | 86.5 |
| PS+ <i>Unsharp</i> | 0.17 | 0.84 | 0.51 | 0.53 | 0.14 | 94.6 |



Slika 74. Histogram vrijednosti detekcije – PS proces



Slika 75. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - PS proces



Slika 76. ROC krivulja – PS proces

Ispitivanje utjecaja PS procesa provedeno je tako da su označene slike ispisane na laserskom printeru, a zatim skenirane na plošnom skeneru. Rezolucija ispisa iznosila je 600 dpi, a izlazna veličina slike bila je 13x13 cm. Rezolucija prilikom skeniranja je iznosila 130 dpi, te nije provedena korekcija tonova. Isto tako, izlazna datoteka skenera bila je bmp formata, te nije korištena kompresija. Nakon skeniranja bjelina oko slike je izrezana u programu za obradu slika te je spremljena u bmp formatu.

Kako je eksperimentom utvrđeno da se *unsharp* filtriranjem može povećati točnost detekcije, slike su nakon PS procesa izoštrene korištenjem *unsharp* filtra. Primjer označene slike podvrgnute PS procesu sa i bez *unsharp* filtriranja prikazan je na Slici 77.



Slika 77. Označena slika nakon PS procesa, a) bez *unsharp* filtriranja,
b) s *unsharp* filtriranjem

U tablici 17 prikazani su rezultati ispitivanja nakon PS procesa. Srednja vrijednost detekcije nakon PS procesa iznosi 0.46. Detekcija se znatno popravi ukoliko se prije detekcije provede izoštravanje *unsharp* filtrom. U tom slučaju srednja vrijednost detekcije iznosi 0.51. Točnost detekcije za prag detekcije $t=0.3$ iznosi 86.5% bez *unsharp* filtriranja i 94.6% nakon filtriranja.

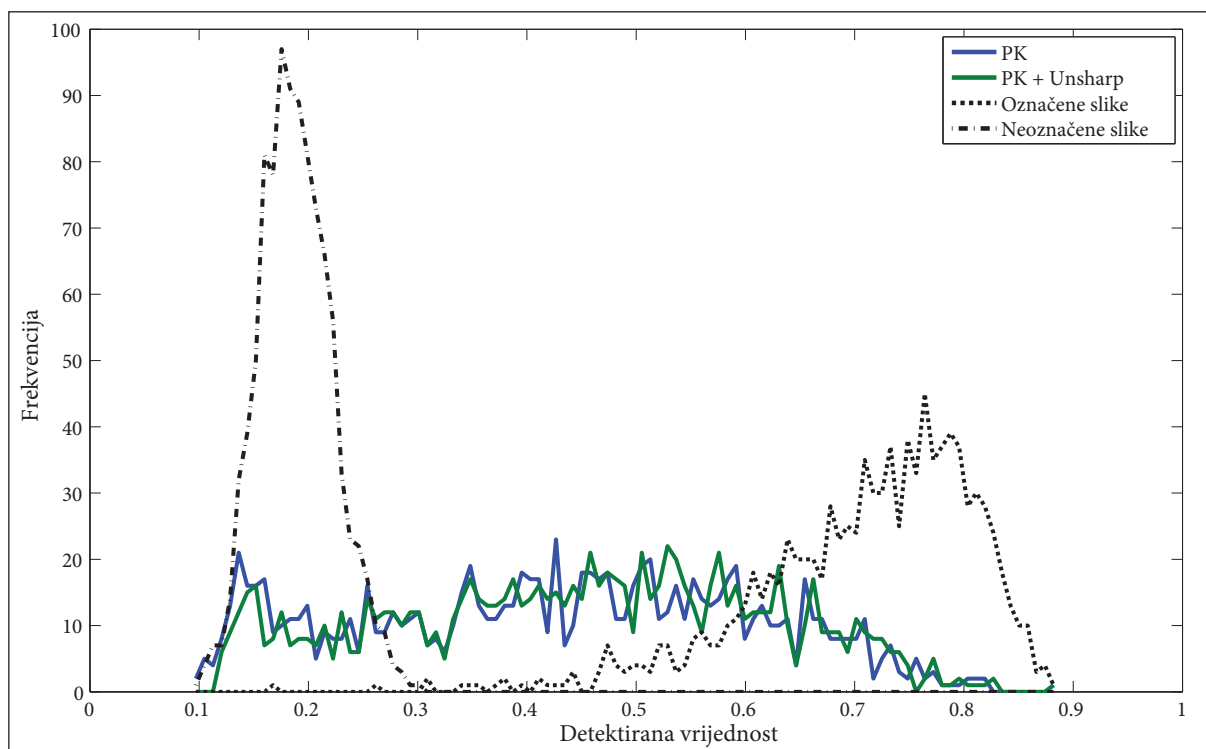
Na histogramu detektiranih vrijednosti (Slika 74.) vidi se da je distribucija detektiranih vrijednosti nakon PS procesa raspršena (standardnom devijacijom iznosi 0.16). Nakon *unsharp* filtriranja povećava se frekvencija vrijednosti iznad 0.3, što poboljšava točnost detekcije.

Pozitivan utjecaj korištenja *unsharp* filtra uočava se i kod analize funkcije vjerojatnosti detekcije (Slika 75.), i kod analize ROC krivulja (Slika 76.). Vrlo visoka vjerojatnost TPD (iznad 0.8) bez obzira na vjerojatnost KPD nameće za zaključak da je ispitivana metoda dovoljno otporna za praktičnu uporabu. Štoviše, ako se *unsharp* filter koristi prije detekcije metoda je još otpornija na PS proces.

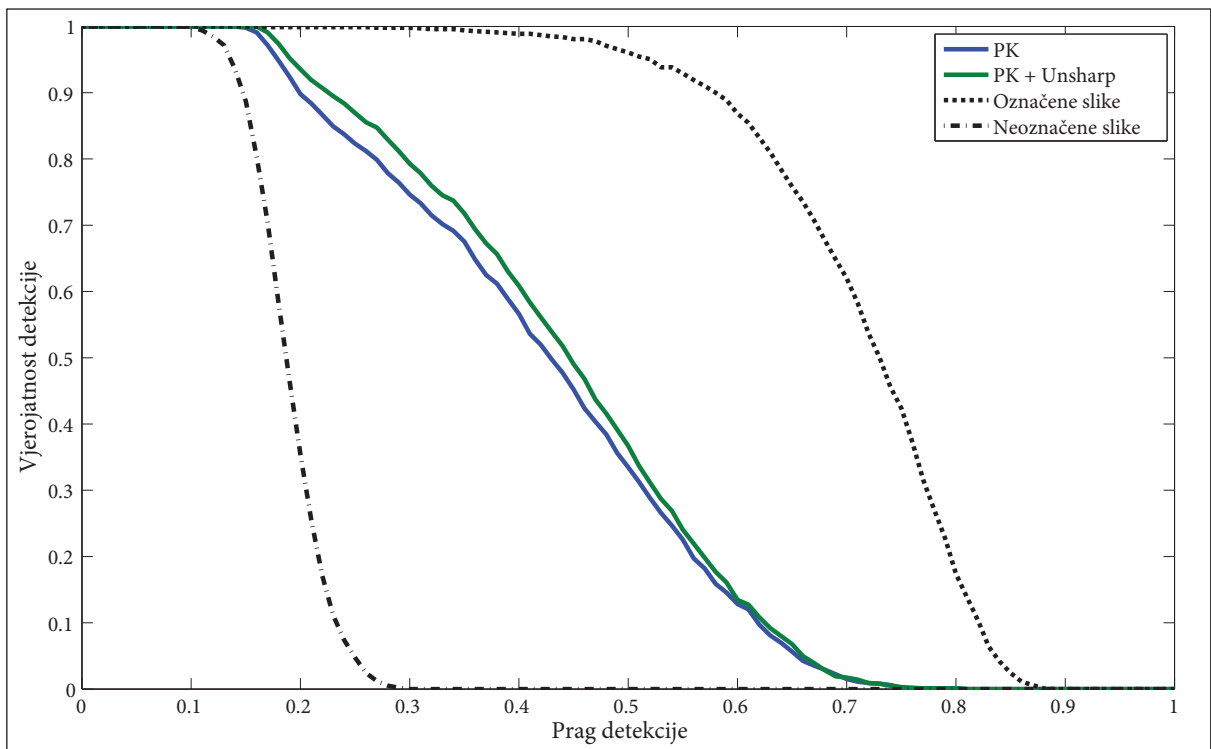
6.11. PK proces

Tablica 18. Vrijednosti detekcije – Eliptični rasterski element

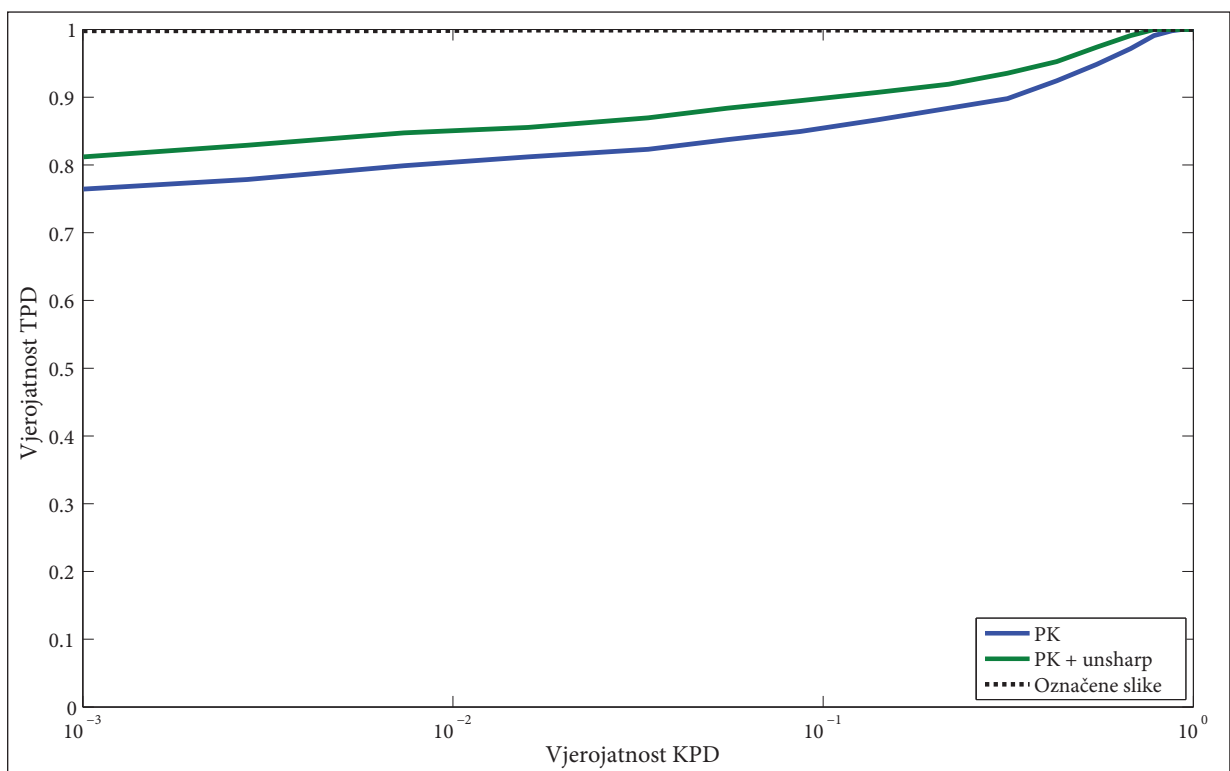
| | min | max | srednja vrijednost | median | standardna devijacija | vjerojatnost detekcije za $t=0.30$ [%] |
|--------------------|------|------|--------------------|--------|-----------------------|---|
| Neoznačene slike | 0.09 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.03 | 0 |
| Označene slike | 0.30 | 0.88 | 0.71 | 0.73 | 0.10 | 100 |
| PK | 0.14 | 0.81 | 0.42 | 0.43 | 0.15 | 82.3 |
| PK+ <i>Unsharp</i> | 0.16 | 0.80 | 0.44 | 0.45 | 0.14 | 87.0 |



Slika 78. Histogram vrijednosti detekcije – PK proces



Slika 79. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - PK proces



Slika 80. ROC krivulja – PK proces

Ispitivanje utjecaja PK procesa provedeno je tako da su označene slike ispisane na laserskom printeru, a potom digitalizirane fotografiranjem digitalnim fotoaparatom. Pri eksperimentu su korištene iste slike kao i kod ispitivanja otpornosti na PS proces. Rezolucija slike nakon fotografiranja je iznosila oko 1300×1300 elemenata. Izlazna datoteka kamere je JPEG formata. Nakon skeniranja bjelina oko slike je izrezana u programu za obradu slika te je spremljena u bmp formatu.

Kako je eksperimentom utvrđeno da se *unsharp* filtriranjem može povećati točnost detekcije, slike su nakon PK procesa izoštrene korištenjem *unsharp* filtra. Primjer označene slike podvrgnute PK procesu sa i bez *unsharp* filtriranja prikazan je na Slici 81.

U tablici 18 prikazani su rezultati ispitivanja nakon PK procesa. Srednja vrijednost detekcije nakon PS procesa iznosi 0.42, što je nešto manje nego kod PS procesa. Srednja vrijednost detekcije se donekle popravi ukoliko se prije detekcije provede izoštravanje *unsharp* filtrom. U tom slučaju srednja vrijednost detekcije iznosi 0.44. Točnost detekcije za prag detekcije $t=0.3$ iznosi 82.3% bez *unsharp* filtriranja i 87.0% nakon filtriranja.



Slika 81. Označena slika nakon PK procesa, a) bez *unsharp* filtriranja, b) s *unsharp* filtriranjem.

Unsharp filtriranje povećava vjerojatnost detekcije kod slika podvrgnutih PK procesu, no ne toliko uspješno kao kod slika podvrgnutih PS procesu. Ovo je vidljivo i pri analizi funkcije vjerojatnosti detekcije u ovisnosti o pragu detekcije (Slika 79.), i kod analize ROC krivulja (Slika 80.).

Ako se ovi rezultati usporede s onima za PS proces jasno je da je ispitivana metoda manje otporna na PK proces nego na PS proces. Razlog tome je razlika pri osvjetljenju i JPEG kompresija. Naime, skener ima definiran izvor svjetla, a izlazna datoteka skenera nije komprimirana, dok su slike prilikom fotografiranja bile osvjetljene dnevnim svjetlom (što je kamera kompenzirala koristeći algoritme za bijeli balans), te je izlazna datoteka komprimirana JPEG kompresijom. Ipak, s obzirom da se nakon PK procesa i *unsharp* filtriranja postiže visoka vjerojatnost TPD (iznad 0.8) bez obzira na vjerojatnost KPD može se zaključiti da je ispitivana metoda otporna na PK proces.

6.12. Usporedba s ostalim relevantnim metodama

U literaturi postoji tek nekoliko sličnih metoda s kojima se može provesti usporedba uspješnosti. Prednost metode razvijene u ovom doktorskom radu u odnosu na druge metode je računalna nezahtjevnost, prilagodljivost slici koja se označava i mogućnost korištenja sa svim postojećim uređajima za reprodukciju.

Solanki i suradnici u [52] imaju sličan pristup označavanju jer koriste modifikaciju elementa amplitude u Fourierovoj domeni. Međutim, autori u [52] sami navode da se njihova metoda može koristiti samo sa laserskim pisačima, dok metoda razvijena u ovom radu nema takvih restrikcija. Štoviše, ostvareni rezultati otpornosti na AM rastriranje ukazuju da se ova metoda može koristiti i kod tiskarskih strojeva. Što nije moguće kod niti jedne druge metode. Druga prednost razvijene metode u odnosu na [52] je sposobnost metode da detektira vodeni žig i pri niskim rezolucijama skeniranja. Autori u [52] navode da njihova metoda zahtjeva minimalnu rezoluciju skeniranja od 600 dpi, dok je minimalna rezolucija skeniranja predložene metode 100 dpi.

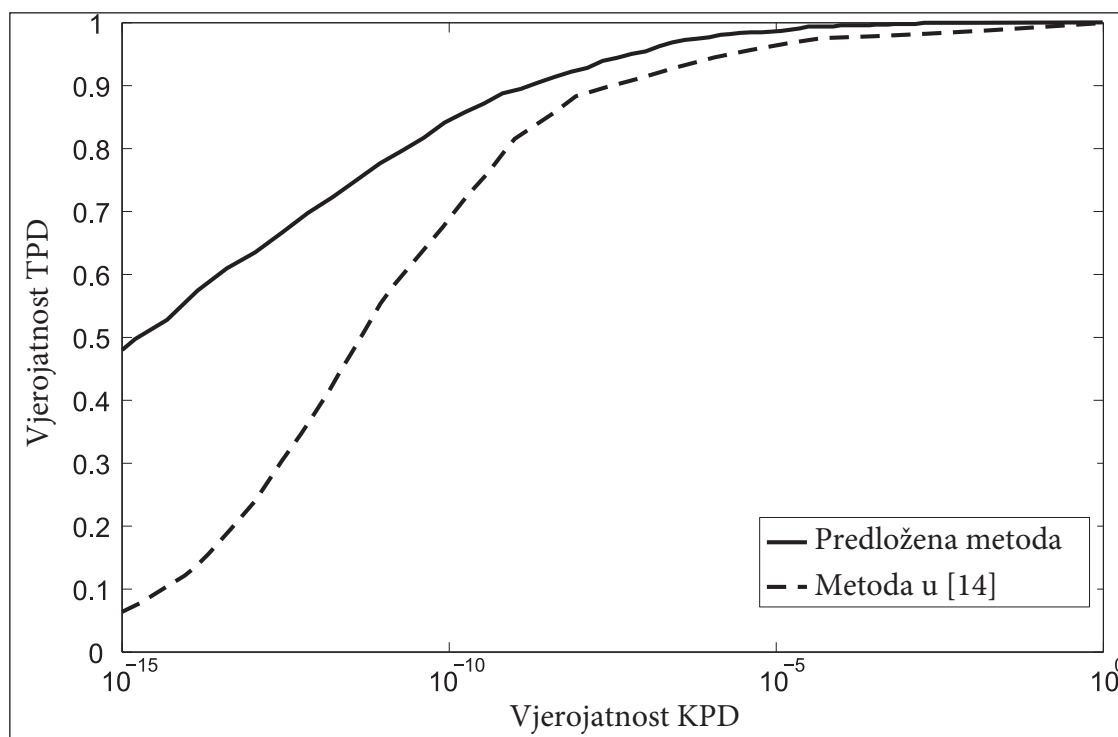
Pošto je metoda razvijena u ovom doktorskom radu računalno nezahtjevna, iznimno je brza. Stoga detektor, na dvoprocesorskom računalu sa taktom od 2.4 GHz, izvrši ekstrakciju vodenog žiga za nešto manje od jedne sekunde. Ovo je značajno poboljšanje u odnosu na rezultat iz [72], gdje Kang i suradnici navode kako je za ekstrakciju potrebno oko 29 sekundi.

Kako metoda označavanja slika iz ovog dokorskog rada ima sposobnost prilagodbe svojstava vodenog žiga prema slici koja se označava, postiže se bolja otpornost na različite deformacije uz isti utjecaj na kvalitetu. Ovu sposobnost prilagodbe ostale slične metode nemaju.

Usporedba ROC krivulja razvijene metode, sa metodom predloženom u [14] također pokazuje značajna prednost metode razvijene u ovom doktorskom radu. Ovdje je važno napomenuti da se testna baza slika koja je korištena u ovom doktoratu razlikuje od one koju su koristili Lin i suradnici u [14], no budući da je korišten veliki broj slika, rezultate je moguće

usporediti. Kod obje metode označavanja, srednja PSNR vrijednost označenih slika je iznosila oko 40 dB.

Metoda predložena u [14] temelji se na log-polarnom mapiranju (LPM) u Fourierovoj domeni, što čini ovu metodu računalno kompleksnijom od metode predložene u ovom doktoratu. Na Slici 82. prikazana je usporedba ROC krivulja nakon JPEG kompresije faktorom 70. Rezultati su direktno citirani iz [14]. U oba slučaja je korišten matematički model vjerojatnosti KPD kako bi se mogla dobiti ROC krivulja sa izuzetno malim vjerojatnostima KPD (do 10^{-15}). Kako bi se moglo usporediti rezultate korišten je isti matematički model vjerojatnosti kao i u [14].



Slika 82. Usporedba ROC krivulja različitih metoda označavanja slika

Usporedbom ROC krivulja na Slici 82. vidljivo je da je metoda predložena u ovom doktoratu značajno otpornija na kompresiju od metode predložene u [14], a rezultati usporedbe otpornosti na ostale vrste procesiranja pokazuju sličnu prednost metode predložene u ovom doktorskom radu.

Na kraju valja napomenuti da u trenutku pisanja ove doktorske disertacije, koliko je autoru poznato, ne postoji rad koji obrađuje problem robusnosti metode za označavanje slika na PS i PK process koji je proveden u sličnom obimu, jer se otpornost vodenog žiga na promjenu medija uglavnom ispituje na ograničenom broju testnih slika.

8. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja u okviru predložene teme doktorske disertacije je razvoj metode za zaštitu autorskih prava slika umetanjem digitalnog vodenog žiga koji je otporan na deformacije koje se javljaju u komunikacijskom kanalu prilikom transformacije iz digitalnog u analogni medij, odnosno prilikom reprodukcije označene slike. Razvijena metoda se temelji na umetanju vodenog žiga kojim se modificiraju koeficijenti amplitude slike prethodno transformirane u Fourierovu domenu.

Motiv ovog rada je potreba da se povežu i unaprijede tehnike zaštite u digitalnom i analognom okruženju kako bi se razvila metoda koja omogućuje zaštitu otisnutih slika bez uporabe posebnih materijala ili tehnika pri reprodukciji.

Ekperimentalni dio dokorskog rada bio je podijeljen u dva dijela. U prvom dijelu određeni su parametri digitalnog vodenog žiga, te je ispitan utjecaj tih parametara na kvalitetu označene slike, gdje je kao mjera kvalitete korištena PSNR vrijednost. U drugom dijelu ispitana je otpornost vodenog žiga na različite vrste deformacija koje se mogu javiti u komunikacijskom kanalu. Ispitivanje je provedeno na bazi od 1000 slika u koje je umetnut vodeni žig. Označene slike su zatim izložene deformaciji, te je određena točnost metode pri detekciji vodenog žiga. U eksperimentu je ispitivana otpornost vodenog žiga na niskopojasno i Laplacovo filtriranje, izoštravanje, JPEG kompresiju, izrezivanje, rotaciju, skaliranje, šum, AM rastriranje, te PS i PK proces. Za svaku deformaciju određena je točnost detekcije u ovisnosti o pragu detekcije, histogram detektiranih vrijednosti i ROC krivulja.

Rezultati ispitivanja utjecaja parametara vodenog žiga pokazali su da se njihovom prilagodbom slici koja se označava, može ostvariti veći stupanj kvalitete označene slike uz istu ili bolju otpornost na deformacije u komunikacijskom kanalu. Na temelju ovih rezultata provedena je modifikacija metode kako bi se, za svaku sliku koja se označava, pronašao optimalni radijus implementacije vodenog žiga. Ovime je osigurana veća prilagodljivost različitim slikama.

Rezultati ispitivanja otpornosti umetnutog vodenog žiga na deformacije u komunikacijskom kanalu, pokazali su da je razvijena metoda vrlo otporna na većinu degradacija korištenih u eksperimentu. Osobito je otporna na PS i PK proces, što je bio i cilj istraživanja. Korištenjem razvijene metode moguće je zaštititi autorska prava reproducirane slike jer je umetnuti vodeni žig otporan na proces reprodukcije. Osim na digitalno-analognu konverziju, metoda se može koristiti i u komunikacijskom kanalu s drugim oblicima deformacija. Metoda zaštite postiže dobre rezultate i kod izoštravanja, JPEG kompresije, te geometrijskih deformacija kao što su rotacija i skaliranje. Nadalje, metoda je otporna i na umjereno izrezivanje i šum. Vodeni žig nije otporan na izrazite deformacije kod znatnog izrezivanja i šuma, no u ovom slučaju, sama kvalitete slike je već toliko narušena, da postaje praktički neupotrebljiva. Ustanovljeno je i da se korištenjem filtra za izoštravanje prije detekcije, može povećati točnost detekcije kod slika izloženih PS i PK procesu.

U disertaciji je postignut sljedeći izvorni znanstveni doprinos:

- Određeni su parametri digitalnog vodenog žiga koji utječu na kvalitetu otisnute slikovne informacije.
- Provedena je optimizacija digitalnog vodenog žiga u okviru grafičke reprodukcije.
- Razvijen je model zaštite slikovne informacije digitalnim vodenim žigom otpornim na proces otiskivanja i naknadnu digitalizaciju.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] Cox, I. J., Miller, M. J., and Bloom, J. A , “Digital Watermarking”, Morgan Kaufmann Publishers, Academic Press, Los Altos,CA, New York, 2002.
- [2] Petitcolas, F. A. P., Anderson, R. J., and Kuhn, M. G., “Information Hiding - A Survey”, Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 7, pp. 1062-1078, July 1999.
- [3] Johnson, N. F. , Katzenbeisser, S. “A survey of steganographic techniques,” in S. Katzenbeisser and F. Petitcolas (Eds.): Information Hiding, pp 43–78. Artech House, Norwood, MA., 2000.
- [4] Vidyasagar M. Potdar, Song Han, Elizabeth Chang A Survey of Digital Image Watermarking Techniques 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN) Perth, Australia 10-12 August 2005
- [5] T. Liu and Z. ding Qiu, „The survey of digital watermarking-based image authentication techniques”, Proc. of IEEE 6th Int. Conference Signal Processing, vol. 2, pp. 1556-1559, 2002.
- [6] C. Rey and J. L. Dugelay, „A survey of watermarking algorithms for image authentication”, EURASIP Journal on Applied Signal Processing (JASP), pp. 613-621, 2002.
- [7] E.T. Lin and E.J. Delp, A review of data hiding in digital images, in: Proceedings of the Image Processing,Image Quality, Image Capture Systems Conference, PICS'99, the Society for Imaging Science and Technology, 1999, pp. 274-278.
- [8] A. Cheddad, J. Condell, K. Curran and P. Mc Kevitt, “Digital Image Steganography: Survey and Analyses of Current Methods”. Signal Processing, Volume 90, Issue 3, March 2010, Pages 727-752.

- [9] Zheng, D., Liu, Y., Zhao, J., and El Saddik, "A survey of RST invariant image watermarking algorithms". *ACM Comput. Surv.* 39, 2, Article 5 (June 2007), 91 pages DOI = 10.1145/1242471.1242473
- [10] Peter Meerwald and Andreas Uhl, "Survey of wavelet-domain watermarking algorithms", *Proc. SPIE* 4314, 505 (2001); doi:10.1117/12.435434
- [11] D. Zheng, J. Zhao, & A. El Saddik, "RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation", *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 8, pp. 753–765, Aug. 2003.
- [12] Cai, L., Du, S." Rotation, Scale and Translation Invariant Image Watermarking Using Radon Transform and Fourier Transform *IEEE 6th CAS Symp. on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Communications*. Shanghai, China. May 31 - June 2, 2004
- [13] Al-Haj, A., "Combined DWT-DCT Digital Image Watermarking", *Journal of Computer Science* 3 (9): 740-746, Science Publications 2007
- [14] C. Y. Lin, M. Wu, J. Bloom, I. Cox, M. Miller, and Y. Lui, "Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 10, no. 5, pp. 767–782, May 2001.
- [15] X. Kang, J. Huang, W. Zeng "Efficient General Print-Scanning Resilient Data Hiding Based on Uniform Log-Polar Mapping", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 5, no. 1, March 2010 pp 1-12
- [16] Bulan, O., Sharma, G., Monga, V., & Oztan, B., "Data Embedding In Hardcopy Images Via Halftone-Dot Orientation Modulation", *Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, SPIE Vol. 6819, 68190C, 2008 SPIE-IS&T

- [17] Ismail, I. A. , Shouman, M. A., Hosny, K. M., & Abdel Salam H.M. Invariant Image Watermarking Using Accurate Zernike Moments, *Journal of Computer Science* 6 (1): 52-59, 2010
- [18] S. Voloshynovskiy, O. Koval, F. Deguillaume, T. Pun, Quality enhancement of printed-and-scanned images using distributed coding, *Signal Processing*, Volume 87, Issue 6, June 2007, Pages 1301-1313
- [19] Pramila, A., Keskinarkaus, A., and Seppanen, T., "Multiple Domain Watermarking for Print-Scan and JPEG Resilient Data Hiding" Y.Q. Shi, H.-J. Kim, and S. Katzenbeisser (Eds.): *IWDW 2007, LNCS 5041*, pp. 279–293, 2008. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- [20] Shijun Xiang, Hyoung Joong Kim, Jiwu Huang, Invariant Image Watermarking Based on Statistical Features in the Low-Frequency Domain *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY*, VOL. 18, NO. 6, JUNE 2008
- [21] Tsz Kin Tsui, Xiao-Ping Zhang, Dimitrios Androutsos Color Image Watermarking Using Multidimensional Fourier Transforms *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION FORENSICS AND SECURITY*, VOL. 3, NO. 1, MARCH 2008
- [22] Dard Hunter. *Handmade Paper and Its Watermarks: A Bibliography*. B. Franklin, New York, 1967.
- [23] Aleksandar Stipčević, *Povijest Knjige*, 2. Izdanje, Matica Hrvatska, 2006.
- [24] Emil Frank Hembrooke. Identification of sound and like signals. United States Patent, 3,004,104, 1961.

- [25] N. Komatsu and H. Tominaga. Authentication system using concealed image in telematics. *Memoirs of the School of Science and Engineering, Waseda University*, 52:45–60, 1988.
- [26] Mauro Barni, Franco Bartolini, Vito Cappellini, Alessandro Piva, A DCT-domain system for robust image watermarking, *Signal Processing*, Volume 66, Issue 3, 28 May 1998, Pages 357-372, ISSN 0165-1684, DOI: 10.1016/S0165-1684(98)00015-2.
- [27] N. Nikolaidis and I. Pitas. 1998. Robust image watermarking in the spatial domain. *Signal Process.* 66, 3 (1998), 385-403. DOI=10.1016/S0165-1684(98)00017-6
- [28] Ingemar J. Cox, Senior Joe Kilian, F. Thomson Leighton, and Talal Shamoon, “Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia”, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 6, No. 12, December 1997
- [29] Swanson, M.D.; Bin Zhu; Tewfik, A.H.; “Transparent Robust Image Watermarking“ In *Proc. IEEE Int.Conf on Image Processing*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 1996
- [30] Ying Yang, Xingming Sun, Hengfu Yang, Chang-Tsun Li, “Removable visible image watermarking algorithm in the discrete cosine transform domain”. *Journal of Electronic Imaging* 17(3), 033008 (Jul–Sep 2008)
- [31] Raymond B. Wolfgang, C. I. Podilchuk, and E. J. Delp. Perceptual watermarks for digital images and video. *Proc. of the IEEE*, 87(7):1108–1126, 1999.
- [32] Minerva M. Yeung, Fred Mintzer, “An Invisible Watermarking Technique for Image Verification,” *icip*, vol. 2, pp.680, 1997 *International Conference on Image Processing (ICIP'97) - Volume 2*, 1997

- [33] Holliman, M.; Memon, N.; Counterfeiting attacks on oblivious block-wise independent invisible watermarking schemes, *IEEE Transactions on Image Processing*, Volume: 9 Issue: 3, 2000 pp 432-441
- [34] Pramila, A., Keskinarkaus, A., and Seppanen, T., "Multiple Domain Watermarking for Print-Scan and JPEG Resilient Data Hiding" Y.Q. Shi, H.-J. Kim, and S. Katzenbeisser (Eds.): *IWDW 2007, LNCS 5041*, pp. 279–293, 2008. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- [35] Mohammed F. Al-Hunaity, Salam A. Najim, Ibrahiem M. El-Emary, Colored Digital Image Watermarking using the Wavelet Technique, *American Journal of Applied Sciences* 4 (9): 658-662, 2007 ISSN 1546-9239 © 2007 Science Publications
- [36] Wolfgang, R. Delp, E. "A Watermarking Technique for Digital Imagery: Further Studies." In *Proc. Int. Conf. Imaging Science, Systems and Technology*. Las Vegas, NV, 1997
- [37] Shih, F.Y., Wu. S.Y. "Combinational Image Watermarking in the Spatial and Frequency Domains" *Pattern Recognition* 36 (2003)
- [38] I. J. Cox and M. L. Miller. A review of watermarking and the importance of perceptual modeling. In *Proceedings of SPIE, Human Vision & Electronic Imaging II*, volume 3016, pages 92–99, 1997.
- [39] Frank Hartung and Martin Kutter. Multimedia watermarking techniques. *Proc. IEEE*, 87(7):1079–1107, 1999.
- [40] Y. Song and T. Tan, „A brief review on fragile watermarking based image authentication”, *Journal of Image and Graphics*, vol. 8A, pp. 1-7, 2003.

- [41] T. Palfner, M. Schlauweg and E. Müller, A Secure Semi-fragile Watermarking Algorithm for Image Authentication in the Wavelet Domain of JPEG2000, 2nd International Conference on Innovations in Information Technology, Dubai, UAE 2005
- [42] Xinpeng Zhang, Shuozhong Wang, Fragile watermarking scheme using a hierarchical mechanism, Signal Processing, Volume 89, Issue 4, April 2009, Pages 675-679, ISSN 0165-1684, DOI: 10.1016/j.sigpro.2008.10.001.
- [43] Yan-Jun Hu, Xiao-Ping Ma, Lin-Ming Dou, and Li Gao. 2008. A Computation Model for Capacity and Robustness of Robust Image Watermarking Scheme in Spatial Domain. In Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP '08). IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 1154-1157. DOI=10.1109/IIH-MSP.2008.119 <http://dx.doi.org/10.1109/IIH-MSP.2008.119>
- [44] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, „Digital Image Processing”, 3rd Edition, Pearson Education, Inc., 2008.
- [45] G. Wolberg „Digital Image Warping“, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, 1990
- [46] D. Salomon, „Data Compression: the complete reference” 2nd Edition, Springer-Verlag New York, Inc., 2000
- [47] S. A. Khayam, „The Discrete Cosine Transform (DCT): Theory and Application” Michigan State University, 2003.
- [48] S. Gooran, „Digital Halftoning“ Course Material, Department of Science and Technology, Linköping University, Campus Norrköping, Sweden. http://staffwww.itn.liu.se/~sasgo/TNM011/Digital_Halftoning.pdf

- [49] „Digital Color Imaging Handbook“, Edited by Gaurav Sharma. CRC Press 2003
- [50] Poljičak, Ante; Mandić, Lidija; Agić, Darko; Strgar Kurečić, Maja. “The model of degradation of color values in a reproduction process”, Proceedinigs IWSSIP 2009 Karras, Dimitrios ; Voliotis, Stamatis (ur.). - Chalkida: TEI Chalkida , 2009. Chalkida, 2009. CD1-CD4
- [51] C. Y. Lin and S. F. Chang, “Distortion modeling and invariant extraction for digital image print-and-scan process,” in Intl. Symp. on Multimedia Information Processing, Dec. 1999.
- [52] K. Solanki, U. Madhow, B. S. Manjunath, and S. Chandrasekaran, “Estimating and undoing rotation for print-scan resilient data hiding,” in Proc. ICIP, (Singapore), Oct. 2004.
- [53] K. Solanki, O. Dabeer, U. Madhow, B. S. Manjunath, and S. Chandrasekaran, “Robust image-adaptive dana hiding: Modeling, source coding and channel coding,” in 42ed Annual Allerton Conf. on Communications, Control, and Computing, Oct. 2003.
- [54] Arney, J. S.; Alber, M. (1998). ”Optical Effects of Ink Spread and Penetration on Halftone Printed by Thermal Ink-Jet” Journal of Imaging Science and Technology (JIST) 42, 331-334.
- [55] Yang, L.; Gooran, S.; Kruse, B. (2001). ”Simulation of Optical Dot Gain in Multi-Chromatic Tone Reproduction” Journal of Imaging Science and Technology (JIST) 45, 198-204.
- [56] J. A. Stephen Viggiano, “Comparison of the accuracy of different white balancing options as quantified by their color constancy.” Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications V: Proceedings of the SPIE, volume 5301. Bellingham, WA: SPIE: the International Society for Optical Engineering, p 323-333 (2004)

- [57] Shih - digital watermarking and steganography
- [58] M. T. Heideman, D., H. Johnson and C. S. Burrus, "Gauss and the history of the fast Fourier transform," *Archive for History of Exact Sciences*, 34 (1985), no. 3, 265-277.
- [59] Cooley, J. W. and Tukey, J. W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Math. Computat.*, 19, 297–301.
- [60] M. Kutter and F. A. P. Petitcolas „A fair benchmark for image watermarking systems“ *Electronic Imaging '99. Security and Watermarking of Multimedia Contents*, vol. 3657, San Jose, CA, USA, 25-27 January 1999. The International Society for Optical Engineering.
- [61] Fabien A. P. Petitcolas, Ross J. Anderson, Markus G. Kuhn. Attacks on copyright marking systems, in David Aucsmith (Ed), *Information Hiding, Second International Workshop, IH'98, Portland, Oregon, U.S.A., April 15-17, 1998, Proceedings, LNCS 1525*, Springer-Verlag, ISBN 3-540-65386-4, pp. 219-239.
- [62] Fabien A. P. Petitcolas. Watermarking schemes evaluation. *I.E.E.E. Signal Processing*, vol. 17, no. 5, pp. 58–64, September 2000.
- [63] F. Pan „Digital Video Coding – Techniques and Standards“, *Studies in Computational Intelligence (SCI) 58*, 13–53 (2007) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
- [64] Kutter, M., & Hartung, F. (2000). Introduction to watermarking techniques. In F.A.P. Petitcolas & S. Katzenbeisser (Eds.), *Information hiding: Techniques for steganography and digital watermarking* (1st ed., pp. 97-120). Boston, MA: Artech House.
- [65] Kutter, M., & Petitcolas, F.A.P. (2000). „Fair evaluation methods for image watermarking systems“. *Journal of Electronic Imaging*, 9(4), 445-455.

- [66] A. Cheddad, J. Condell, K. Curran, Mc Kevitt: "Digital image steganography: Suvey and analysis of current methods" in *Signal Processing* 90, 2010, pp. 727-752.
- [67] Ching-Yung Lin, "Issues on Image Authentication" In *Multimedia Security: Steganography and Digital Watermarking Techniques for Protection of Intellectual Property*, edited by Chun-Shien Lu., 2005, Idea Group Inc.
- [68] C. W. Helstrom. *Statistical Theory of Signal Detection*. Pergamon Press, 1960.
- [69] K. Solanki, U. Madhow, B.S. Manjunath, and S. Chandrasekaran, "Modeling the print-scan process for resilient data hiding", in *Proc. Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents*, 2005, pp.418-429.
- [70] J. Cox et al „A secure, Robust Watermark for Multimedia.“ In *Proc. First int. Workshop Information Hiding*. Cambridge, UK, 1996.
- [71] M. Matsumoto and T. Nishimura, "Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator", *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation* Vol. 8, No. 1, January pp.3-30 (1998) DOI:10.1145/272991.272995
- [72] X. Kang, J. Huang, Y. Q. Shi, and Y. Lin, "A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to affine transform and JPEG compression," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 776–786, Aug. 2003.

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Opći model označavanja slika vodenim žigom | 6 |
| Slika 2. | Slika u (a) prostornoj domeni, (b) njen spektar i (c) faza u Fourierovoj domeni | 8 |
| Slika 3. | Sprega između kapaciteta, robusnosti i kvalitete | 12 |
| Slika 4. | Princip prostornog filtriranja slike | 17 |
| Slika 5. | Osnovni princip rastriranja [48] | 23 |
| Slika 6. | AM (a) i FM (b) rasterske ćelije (nasuprotne ćelije predstavljaju isti ton originalne slike) | 23 |
| Slika 7. | Različiti rezultati matričnog rastriranja a) originalna slika; b), c) i d) AM rasteri s, redom, okruglim, eliptičnim i linijskim rasterskim elementom; e) FM raster. | 25 |
| Slika 8. | Transformacije slike u PS procesu | 26 |
| Slika 9. | Transformacije slike u PK procesu | 28 |
| Slika 10. | Originalni signal (puna linija) i spektar signala različitih frekvencija dobiven Fourierovom transformacijom (iscrtane linije) | 31 |
| Slika 11. | Prikaz a) funkcije $f(x)$, b) njenog spektra $ F(u,v) $ i faze $\phi(u,v)$ | 35 |
| Slika 12. | Rješenja osmog kompleksnog korijena iz 1 | 37 |
| Slika 13. | FFT rekurzija za $n=8$ | 39 |

| | |
|---|----|
| Slika 14. Nedostatak PSNR mjere. a) originalna slika; b) Pomak svih elemenata slike lijevo i dolje (PSNR= 25,43 dB); c) ucrtani brkovi (PSNR=30,12 dB). | 43 |
| Slika 15. Ovisnost greške I. vrste o pragu detekcije | 45 |
| Slika 16. Ispitivanje prisutnosti 800 različitih vodenih žigova u slici u koju su umetnuta 3 vodena žiga | 46 |
| Slika 17. qOvisnost greške II. vrste o pragu detekcije | 47 |
| Slika 18. a) Histogram detektiranih vrijednosti b) ROC krivulja | 49 |
| Slika 19. Koder sustava za označavanje slika. | 53 |
| Slika 20. Vodeni žig umetnut u koeficijente amplitude u Fourierovoj domeni. (Kako bi vodeni žig bio vidljiv na slici, korišteni faktor implementacije je bio iznimno velik $\alpha = 1000$.) | 55 |
| Slika 21. Blok dijagram detektora | 56 |
| Slika 22. Slike korištene pri evaluaciji utjecaja parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike | 60 |
| Slika 23. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Lena“) | 62 |
| Slika 24. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Mandrill“) | 63 |
| Slika 25. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Peppers“) | 64 |
| Slika 26. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Kiel“) | 65 |
| Slika 27. Utjecaj parametara vodenog žiga na kvalitetu označene slike („Lighthouse“) | 66 |

| | |
|--|----|
| Slika 28. Blok dijagram modificiranog kodera | 68 |
| Slika 29. Usporedba (a) originalne slike i (b) označene slike (PSNR=42 dB) | 70 |
| Slika 30. Histogram PSNR vrijednosti označenih slika | 70 |
| Slika 31. Histogram vrijednosti detekcije – Označene i neoznačene slike | 73 |
| Slika 32. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Označene i neoznačene slike | 74 |
| Slika 33. ROC krivulja – Označene slike | 74 |
| Slika 34. Histogram vrijednosti detekcije - <i>Blur</i> | 77 |
| Slika 35. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - <i>Blur</i> | 78 |
| Slika 36. ROC krivulja – <i>Blur</i> | 78 |
| Slika 37. Primjer nisko-pojasnog filtriranja korištenog u experimentu a) Filtar veličine 5×5 i b) 7×7 | 79 |
| Slika 38. Histogram vrijednosti detekcije - Izrezivanje | 81 |
| Slika 39. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Izrezivanje | 82 |
| Slika 40. ROC krivulja – Izrezivanje | 82 |
| Slika 41. Primjer izrezivanja a) 20%, b) 40%, c) 60%, d) 80% | 83 |
| Slika 42. Histogram vrijednosti detekcije – JPEG kompresija | 84 |
| Slika 43. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - JPEG kompresija | 85 |

| | |
|---|----|
| Slika 44. ROC krivulja – JPEG kompresija | 85 |
| Slika 45. Primjer JPEG kompresije pri različitim faktorima kvalitete a) JPEG 20, b) JPEG 40 | 86 |
| Slika 46. Histogram vrijednosti detekcije – Laplacov i <i>Unsharp</i> filtar | 87 |
| Slika 47. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Laplacov i <i>Unsharp</i> filtar | 88 |
| Slika 48. ROC krivulja – Laplacov i <i>Unsharp</i> filtar | 88 |
| Slika 49. Primjer a) <i>unsharp</i> i b) Laplacovog filtriranja | 89 |
| Slika 50. Histogram vrijednosti detekcije – Rotacija | 90 |
| Slika 51. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Rotacija | 91 |
| Slika 52. ROC krivulja – Rotacija | 91 |
| Slika 53. Primjer rotacije označene slike a) 60° b) -30° | 92 |
| Slika 54. Histogram vrijednosti detekcije – Skaliranje | 93 |
| Slika 55. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Skaliranje | 94 |
| Slika 56. ROC krivulja – Skaliranje | 94 |
| Slika 57. Primjer skaliranja označene slike a) 50% c) 125% | 95 |
| Slika 58. Histogram vrijednosti detekcije – Šum | 96 |
| Slika 59. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Šum | 97 |

| | |
|---|-----|
| Slika 60. ROC krivulja – Šum | 97 |
| Slika 61. Primjer utjecaja šuma na sliku. a) Šum 7, b) Šum 11. | 98 |
| Slika 62. Histogram vrijednosti detekcije – Kružni rasterski element | 99 |
| Slika 63. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Kružni rasterski element | 100 |
| Slika 64. ROC krivulja – Kružni rasterski element | 100 |
| Slika 65. AM rastriranje s kružnim rasterskim elementom, linijature a) 10, b) 15 lin/cm. | 101 |
| Slika 66. Histogram vrijednosti detekcije – Eliptični rasterski element | 103 |
| Slika 67. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Eliptični rasterski element | 104 |
| Slika 68. ROC krivulja – Eliptični rasterski element | 104 |
| Slika 69. AM rastriranje s eliptičnim rasterskim elementnom, linijature a) 10, b) 15 lin/cm | 105 |
| Slika 70. Histogram vrijednosti detekcije – Linijski rasterski element | 106 |
| Slika 71. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - Linijski rasterski element | 107 |
| Slika 72. ROC krivulja – Linijski rasterski element | 107 |
| Slika 73. AM rastriranje s linijskim rasterskim elementnom, linijature a) 10, b) 15 lin/cm | 108 |

| | |
|--|-----|
| Slika 74. Histogram vrijednosti detekcije – PS proces | 110 |
| Slika 75. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - PS proces | 111 |
| Slika 76. ROC krivulja – PS proces | 111 |
| Slika 77. Označena slika nakon PS procesa, a) bez <i>unsharp</i> filtriranja, b) s <i>unsharp</i> filtriranjem | 112 |
| Slika 78. Histogram vrijednosti detekcije – PK proces | 114 |
| Slika 79. Ovisnost vjerojatnosti pozitivne detekcije o pragu detekcije - PK proces | 115 |
| Slika 80. ROC krivulja – PK proces | 115 |
| Slika 81. Označena slika nakon PK procesa, a) bez <i>unsharp</i> filtriranja, b) s <i>unsharp</i> filtriranjem. | 116 |
| Slika 82. Usporedba ROC krivulja različitih metoda označavanja slika | 119 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|-----|
| Tablica 1. Oblik matrice T za rotaciju, translaciju i skaliranje | 15 |
| Tablica 2. Najčešće korištene maske za prostorno filtriranje | 19 |
| Tablica 3. Mogući ishodi testiranja hipoteza | 44 |
| Tablica 4. Usporedba srednje PSNR vrijednosti postignute originalnim i modificiranim koderom. | 69 |
| Tablica 5. Vrsta degradacije i parametri korišteni pri evaluaciji otpornosti predložene metode | 71 |
| Tablica 6. Vrijednosti detekcije – Označene i neoznačene slike | 73 |
| Tablica 7. Vrijednosti detekcije - Blur | 77 |
| Tablica 8. Vrijednosti detekcije - Izrezivanje | 81 |
| Tablica 9. Vrijednosti detekcije – JPEG kompresija | 84 |
| Tablica 10. Vrijednosti detekcije – Laplacov i Unsharp filter | 87 |
| Tablica 11. Vrijednosti detekcije – Rotacija | 90 |
| Tablica 12. Vrijednosti detekcije – Skaliranje | 93 |
| Tablica 13. Vrijednosti detekcije – Šum | 96 |
| Tablica 14. Vrijednosti detekcije – Kružni rasterski element | 99 |
| Tablica 15. Vrijednosti detekcije – Eliptični rasterski element | 103 |

| | |
|---|-----|
| Tablica 16. Vrijednosti detekcije – Linijski rasterski element | 106 |
| Tablica 17. Vrijednosti detekcije – PS proces | 110 |
| Tablica 18. Vrijednosti detekcije – Eliptični rasterski element | 114 |