

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOMENT TABANLI NORMALLEŞTİRMEYE DAYALI
SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA YÖNTEMLERİ**

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Serap KAZAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cabir VURAL

Temmuz 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOMENT TABANLI NORMALLEŞTİRMEYE DAYALI
SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA YÖNTEMLERİ


DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Serap KAZAN


Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 29/07/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Etem KÖKLÜKAYA
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Sarp ERTÜRK
Üye


Doç. Dr. Cabir VURAL
Üye


Doç. Dr. Oğuzhan Urhan
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ali GÜLBAĞ
Üye

TEŞEKKÜR

Sayısal görüntü damgalama konusunda çalıőmamı destekleyen ve çalıőmalarım süresince bilgilerini benimle paylaőan, çalıőmalarımı yönlendiren danıőman hocam Doç. Dr. Cabir VURAL'a teşekkür ederim.

Ayrıca haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim anne ve merhum babama, çalıőmalarım esnasında gösterdiği sabırdan ve desteğinden dolayı sevgili eőime sonsuz Őukranlarımı sunarım.

Bu tez alıőması Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Baőkanlıėı tarafından 2007 50 02 27 numaralı proje kapsamında desteklenmiőtir.

Serap KAZAN

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| TEŞEKKÜR..... | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | vi |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | ix |
| TABLolar LİSTESİ..... | xiii |
| ÖZET..... | xiv |
| SUMMARY..... | xv |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| BÖLÜM 2. | |
| SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA..... | 8 |
| 2.1. Giriş..... | 8 |
| 2.2. Bir Damgalama Sisteminin Yapısı..... | 8 |
| 2.3. Damgalama Uzayları..... | 10 |
| 2.3.1. Piksel uzayı yöntemleri..... | 10 |
| 2.3.2. Frekans uzayları..... | 13 |
| 2.3.2.1 Ayrık fourier dönüşümü..... | 13 |
| 2.3.2.2. Ayrık kosinüs dönüşümü..... | 13 |
| 2.3.2.3. Ayrık dalgacık dönüşümü..... | 14 |
| 2.3.2.4. Karmaşık dalgacık dönüşümü..... | 15 |
| 2.4. Öteleme, Ölçekleme ve Döndürme | 16 |
| 2.4.1. Log polar mapping kullanarak görüntü damgalama..... | 16 |
| 2.4.2. Zernike moment kullanarak görüntü damgalama..... | 18 |
| 2.4.3. Moment tabanlı görüntü normalleştirme..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 2.5. Damganın Gömüleceği Yerin Belirlenmesi..... | 20 |
| 2.5.1. Piksel uzayında maskeleme..... | 21 |
| 2.5.2. Frekans uzayında maskeleme..... | 22 |
| 2.6. Damga Yüğü Kodlama..... | 22 |
| 2.7. Görsel Kalite..... | 24 |
| 2.8. Damgalama Saldırıları..... | 24 |
| 2.9. Benchmarking ve Damgalama Şemasının Performans Değerlendirmesi..... | 27 |

BÖLÜM 3.

| | |
|---|----|
| NORMALLEŞTİRME VE AYRIK DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA..... | 28 |
| 3.1. Giriş..... | 28 |
| 3.2. Altyapı..... | 29 |
| 3.2.1. Moment tabanlı görüntü normalleştirme..... | 30 |
| 3.2.1.1. İlgin dönüşümler için normalleştirilmiş moment değişmezleri..... | 32 |
| 3.2.2. Ayrık dalgacık dönüşümü..... | 38 |
| 3.2.3. DWT katsayılarının algısal ağırlığı..... | 40 |
| 3.3. Önerilen Yöntem..... | 42 |
| 3.3.1. Damga ekleme..... | 42 |
| 3.3.2. Damga tespit etme..... | 45 |
| 3.4. Simülasyon Sonuçları..... | 47 |
| 3.5. Sonuçlar..... | 52 |

BÖLÜM 4.

| | |
|--|----|
| NORMALLEŞTİRME VE ÇİFT AĞAÇLI KARMAŞIK DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA..... | 54 |
| 4.1. Giriş..... | 54 |
| 4.2. Çift Ağaçlı Karmaşık Dalgacık Dönüşümü ve Özellikleri | 54 |
| 4.3. Damgalama Algoritması..... | 61 |
| 4.3.1. Damgan ekleme..... | 61 |
| 4.3.2. Damganın tespit etme..... | 63 |

| | | |
|---|-----|----|
| 4.4. Simülasyon Sonuçları..... | 64 | |
| 4.5. Sonuçlar..... | 68 | |
| | | |
| BÖLÜM 5. | | |
| MOMENT TABANLI GÖRÜNTÜ NORMALLEŞTİRMENİN DCT VE DWT UZAYINDA YAPILAN DAMGALAMA YÖNTENLERİNİN KAPASİTESİNE ETKİSİ..... | | 71 |
| 5.1. Giriş..... | 71 | |
| 5.2. Kapasite Hesaplama Yöntemleri..... | 73 | |
| 5.2.1. Birinci yöntem..... | 73 | |
| 5.2.2. İkinci yöntem..... | 74 | |
| 5.2.2.1. Damga kanal modelleme..... | 75 | |
| 5.2.2.2. DCT katsayılarının modellenmesi..... | 76 | |
| 5.2.3. Üçüncü yöntem..... | 78 | |
| 5.2.3.1. Paralel Gauss kanalları..... | 80 | |
| 5.3. Damga Ekleme..... | 86 | |
| 5.4. Deneysel Sonuçlar..... | 87 | |
| 5.5. Sonuçlar..... | 91 | |
| | | |
| BÖLÜM 6. | | |
| SONUÇLAR..... | 93 | |
| EK A. TEOREM 1'İN İSPATI..... | 97 | |
| KAYNAKLAR..... | 103 | |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 110 | |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|---------------------|---|
| DCT | : Ayrık Kosinüs Dönüşümü |
| DFT | : Ayrık Fourier Dönüşümü |
| DWT | : Ayrık Dalgacık Dönüşümü |
| CWT | : Karmaşık Dalgacık Dönüşümü |
| DT-CWT | : Çift Ağaçlı Karmaşık Dalgacık Dönüşümü |
| PSNR | : Tepe İşaret Gürültü Oranı |
| MSE | : Ortalama karesel hata |
| İGS | : İnsan Görme Sistemi |
| İDS | : İnsan Duyma Sistemi |
| MTGN | : Moment Tabanlı Görüntü Normalleştirme |
| SNR | : İşaret Gürültü Oranı |
| AWGN | : Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü |
| RBA | : Rastgele Bükme Saldırısı |
| BER | : Bit Hata Oranı |
| $f(x,y)$ | : Orijinal Görüntü |
| M,N | : Görüntünün Yatay ve Dikey Yöndeki Boyutları |
| m_{pq} | : Mutlak Moment |
| μ_{pq} | : Merkezi Moment |
| β | : Germe Dönüşüm Parametresi |
| α, δ | : Ölçekleme Dönüşüm Parametreleri |
| ϕ | : Döndürme Dönüşüm Parametresi |
| $g[n]$ | : Yüksek Geçiren Filtre |
| $h[n]$ | : Alçak Geçiren Filtre |
| θ | : DWT'deki Altband |
| $w_l^\theta(i, j)$ | : DWT için l . seviyede θ yönündeki algısal ağırlık fonksiyonu |
| $\theta(l, \theta)$ | : Bantlara Göre Ağırlık Parametresi |

| | |
|----------------------------|---|
| $\Lambda(l, i, j)$ | : Parlaklık parametresi |
| $\mathcal{E}(l, i, j)$ | : Doku parametresi |
| $f_n(x_m, y_n)$ | : Normalleştirilmiş görüntü |
| P | : Damgalama kapasitesi |
| m_l | : Bir boyutlu damga işareti |
| $X_0^\theta(i, j)$ | : İki boyutlu damga işareti |
| α | : Damga işaretinin global enerjisi |
| $\tilde{I}_0^\theta(i, j)$ | : Damgalı görüntünün DWT parametreleri |
| $\tilde{f}_n(x_m, y_n)$ | : Normalleştirilmiş damgalı görüntü |
| $g(x, y)$ | : Damgalı görüntü |
| $\tilde{g}(x, y)$ | : Bozulmuş damgalı görüntü |
| ρ | : Korelasyon |
| \hat{m} | : Korelasyon sonucu elde edilen damga |
| k, γ | : CWT için algısal ağırlık katsayıları |
| $\Psi(t)$ | : Karmaşık değerli dalgacık fonksiyonu |
| $\Psi_{ha}(t)$ | : CWT'de üst kol için dalgacık fonksiyonu |
| $\Psi_{hb}(t)$ | : CWT'de alt kol için dalgacık fonksiyonu |
| $\mathcal{H}\{.\}$ | : Hilbert dönüşümü |
| C_W | : Damgalama kapasitesi |
| P_{wat} | : Damganın gücü |
| P_{host} | : Damganın ekleneceği işaretin gücü |
| σ^2 | : Varyans |
| X^N | : N-katsayıdan oluşan orijinal işaret vektörü |
| S^N | : N-katsayıdan oluşan damgalı işaret vektörü |
| Y^N | : N-katsayıda bozulmuş damgalı işaret vektörü |
| $d^N(x^N, x'^N)$ | : x^N ve x'^N arasındaki işaret başına bozulma |
| D_1 | : X^N ve S^N arasındaki ortalama bozunum |
| D_2 | : Y^N ve S^N arasındaki ortalama bozunum |
| τ^* | : Güçlü işaret bileşenlerinin oranı |
| pdf | : Olasılık yoğunluk fonksiyonu |
| $f_y(y m)$ | : y 'nin m altında koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu |
| $f_{GG}(x)$ | : Sıfır ortalamalı genelleştirilmiş Gauss pdf |

| | |
|---------------|---|
| K^N | : N-katsayıdan oluşan yan bilgi vektörü |
| M | : İletilecek bilgi işareti |
| i.i.d. | : Bağımsız ve eşit dağılımlı |
| \mathcal{M} | : Bilgi işaretinin üretildiği alfabe |
| T | : Çok algılayıcı dönüşüm |
| \mathcal{K} | : Yan bilginin üretildiği alfabe |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.1. | Damga ekleme işlemi..... | 9 |
| Şekil 2.2. | Damga çıkarma işlemi (damga doğrulama)..... | 10 |
| Şekil 2.3. | Piksel uzayında damga ekleme işlemi..... | 11 |
| Şekil 2.4. | Damgalama kapasitesinin görüntünün alt bölgelere ayrılmasıyla arttırılması..... | 11 |
| Şekil 2.5. | Kapasitenin 7 bit olması durumunda damganın CDMA yöntemiyle oluşturulması. İşaretlerin bir boyutlu olduğu varsayılmıştır..... | 12 |
| Şekil 2.6. | Bir damgadaki bitlerin korelasyon hesaplanarak belirlenmesi..... | 12 |
| Şekil 2.7. | Orta frekans DCT katsayıları (Gölgeli bölgeler DCT uzayında damganın eklendiği bölgelerdir)..... | 14 |
| Şekil 2.8. | Bir görüntünün dört seviyeli ayrık dalgacık dönüşümünün seviyeleri..... | 15 |
| Şekil 2.9. | Karmaşık Dalgacık Dönüşümü katsayılarının görüntüleri..... | 16 |
| Şekil 2.10. | RST Sabiti damgalama şemasının diyagramı. FFT ve IFFT hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform) ve tersi, LPM ve ILPM log-polar map ve tersidir..... | 17 |
| Şekil 2.11. | LPM'nin özellikleri. (a) Orijinal resim, (b) (a)'nın LPM'si, (c) (a)'nın ölçeklenmiş ve dönmüş hali, (d) (c)'nin LPM si..... | 17 |
| Şekil 2.12. | 256x256'lık Lena görüntüsünün ters log polar map'i alındıktan sonraki hali..... | 18 |
| Şekil 2.13. | A harfinin yeniden yapılandırılması. Soldan sağa: orijinal görüntü, 5, 15, 20, 30 sırasıyla yeniden yapılandırılan görüntü.... | 20 |
| Şekil 2.14. | Prewitt operatörü tabanlı maske kullanılarak yapılan damgalama (a) Maskeleye görüntüsü (b) fark $W(x,y)=I(x,y)-I_w(x,y)$ | 21 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.15 | Rastgele geometrik bozulma modeli (a) Orijinal görüntü (b) Rastgele uygulanmayan geometrik bozulma (c) Rastgele uygulanan geometrik bozulma..... | 26 |
| Şekil 3.1. | Moment tabanlı görüntü normalleştirme etkisi. (a) Orijinal Lena görüntüsü, (b) bozulmuş Lena görüntüsü, (c) (a) ve (b)'deki görüntülerin normalleştirilmesinden elde edilen görüntü | 37 |
| Şekil 3.2. | İki seviyeli 1-D Ayırık Dalgacık Dönüşümü..... | 39 |
| Şekil 3.3. | İki seviyeli 1-D Ters Ayırık Dalgacık Dönüşümü..... | 39 |
| Şekil 3.4. | Bir görüntünün dört seviyeli ayırık dalgacık dönüşümündeki altbandlar..... | 39 |
| Şekil 3.5. | Normalleştirme damgaya uyguladığı damgalama yönteminin blok diyagramı..... | 43 |
| Şekil 3.6. | Normalleştirme orijinal görüntüye uyguladığı damgalama yönteminin blok diyagramı (önerilen yöntem)..... | 44 |
| Şekil 3.7. | Damga görünmezliğinin gösterimi. (a) Orijinal görüntü, (b) damgalı görüntü, (c) orijinal ve damgalı görüntüler arasındaki fark görüntüsü..... | 45 |
| Şekil 3.8. | Damga kod çözücünün blok diyagramı..... | 46 |
| Şekil 3.9. | Deneysel olarak kullanılan on görüntü..... | 47 |
| Şekil 3.10. | Önerilen, dwt ve dct yöntemlerinin (a) ölçekleme, (b) döndürme saldırıları için BER eğrileri..... | 49 |
| Şekil 3.11. | Önerilen, dwt ve dct yöntemlerinin (a) JPEG, (b) JPEG2000 saldırıları için BER eğrileri..... | 50 |
| Şekil 4.1. | $x(n)$ işaretinin dalgacık katsayıları işaretin ötelenmesine karşı çok duyarlıdır. (b) ve (c)'de (a)'daki iki darbe işareti $x(n) = \delta(n - 60)$ ve $x(n) = \delta(n - 64)$ için sabit ölçek j 'de dalgacık katsayıları $d(j, n)$ çizilmiştir. (b) gerçek ayırık dalgacık dönüşümü kullanarak hesaplanmış olan gerçek bileşenleri gösterir. (c) DT-CWT kullanılarak hesaplanmış karmaşık bileşenlerin genliğini gösterir. j ölçeğinde DT-CWT için toplam enerji DWT'nin aksine yaklaşık olarak sabittir..... | 55 |
| Şekil 4.2. | Ayrıştırılabilir 2-D DWT durumundaki dalgacıkların uzamsal ve frekans gösterimleri (a) piksel uzayındaki (LH, HL, HH) | |

| | | |
|------------|--|----|
| | dalgacıları gösterir; (b) 2-D frekans uzayında her bir dalgacığın Fourier dönüşümünün tanımlı olduğu frekansları belirtir. Üçüncü dalgacığın ± 45 yönlerini karıştırdığı açıktır..... | 56 |
| Şekil 4.3. | Gerçek katsayılı 2-D DT-DWT'li tipik dalgacık bileşenleri. (a) piksel uzayında dalgacıkların gösterilmesi; (b) 2-D frekans uzayında her bir dalgacığın Fourier dalga boyunun desteklenmesinin gösterilmesi. Dama tahtası olgusunun yokluğu piksel ve frekans uzayının ikisinde de gözlemlenmiştir..... | 59 |
| Şekil 4.4. | Bir boyutlu işaretler için bir seviyeli DT-CWT ve ters DT-CWT. | 60 |
| Şekil 4.5. | Lena Görüntüsünün bir seviyeli DT-CWT ayrıştırması. Bir seviyeli ayrıştırmanın sadece genlikleri verilmiştir. Karşılık gelen filtrelerin yönleri de altbantların köşesinde verilmiştir. LP alçak geçiren CWT katsayılarını belirtmektedir..... | 62 |
| Şekil 4.6. | Damga ekleme yöntemi..... | 63 |
| Şekil 4.7. | Damga kod çözücünün blok diyagramı..... | 65 |
| Şekil 4.8. | (a) orijinal görüntü (b) damgalanmış görüntü (b) orijinal görüntü ve damgalanmış görüntü arasındaki fark..... | 66 |
| Şekil 4.9. | Önerilen, dwt ve dct yöntemleri için BER eğrileri. (a) döndürme (b) ölçekleme (c) JPEG saldırıları..... | 69 |
| Şekil 5.1. | Kodlayıcı, saldırı kanalı ve kod çözücüyü içeren damgalama modeli..... | 78 |
| Şekil 5.2. | Çok oranlı T dönüşümü kullanılarak orijinal işaret $f(x,y)$ 'nin K kanalına ayrıştırılması..... | 81 |
| Şekil 5.3. | Paralel Gauss kanalları için optimal veri saklama ve saldırı stratejileri..... | 82 |
| Şekil 5.4. | Sayısal görüntü damgalama yöntemi..... | 86 |
| Şekil 5.5. | Damgalama esnasında değiştirilen katsayılar (a) tam çerçeve DCT, (b) bir seviyeli DWT..... | 87 |
| Şekil 5.6. | Kapasite hesabında kullanılan Bridge, Cameraman ve Baboon görüntüleri..... | 88 |
| Şekil 5.7. | JPEG sıkıştırması saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları | 89 |
| Şekil 5.8. | Döndürme saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | normalleştirme varken kapasite sonuçları | 89 |
| Şekil 5.9. | Medyan filtreleme saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları..... | 90 |
| Şekil 5.10. | JPEG2000 sıkıştırması saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları..... | 90 |
| Şekil 5.11. | Germe saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları. | 91 |
| Şekil 5.12. | İlgin dönüşüm saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları..... | 91 |

TABLolar LİSTESİ

| | | |
|------------|--|----|
| Tablo 3.1. | Önerilen damgalama yönteminin performansını göstermek için deneylerde kullanılan saldırılar..... | 48 |
| Tablo 3.2. | Önerilen, DCT ve DWT yöntemlerinin, satır-sütun çıkarma, bakış açısı değiştirme, germe, ilgin dönüşümler, aynalama, medyan filtreleme ve filtreleme için BER cinsinden damga çözme performansları..... | 51 |
| Tablo 4.1. | İlk seviye ve her altbant için k ve γ değerleri..... | 64 |
| Tablo 4.2. | DT-CWT damgalama yönteminin performansını göstermek için simülasyonlarda kullanılan saldırılar..... | 67 |
| Tablo 4.3. | Çeşitli saldırılara karşı, DT-CWT, Bölüm 3, DCT, ve DWT yöntemlerinin BER değerleri | 69 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Sayısal görüntü damgalama, ayrık dalgacık dönüşümü, karmaşık dalgacık dönüşümü, moment tabanlı görüntü normalleştirme, damgalama kapasitesi.

Bu çalışmada Moment Tabanlı Görüntü Normalleştirme kullanılarak iki boyutlu ayrık dalgacık ve karmaşık dalgacık dönüşüm uzaylarında dayanıklı sayısal görüntü damgalama algoritmaları geliştirilmiştir. Önerilen damgalama algoritmalarında normalleştirme işlemi geometrik bozunumlara karşı dayanıklılığı sağlarken, damganın dalgacık uzayında eklenmesi gürültü, doğrusal ve doğrusal olmayan filtreleme, JPEG sıkıştırması gibi saldırılara karşı damganın dayanıklılığını arttırmıştır. İnsan görme sisteminin özellikleri göz önünde bulundurularak, eklenen damganın hem algısal saydamlık hem de dayanıklılık gereksinimlerini aynı anda sağlaması başarılmıştır. Sunulan yöntem literatürde sıklıkla kullanılan iki yöntemle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin, JPEG ve JPEG2000 sıkıştırması, çeşitli geometrik dönüşümler ve bazı görüntü işleme saldırılarına karşı her iki yöntemden de daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Daha sonra, normalleştirmenin damgalama kapasitesi üzerindeki etkisi Moulin ve Mihçak tarafından önerilen bilgi-teorisi tabanlı kapasite kestirim yöntemi kullanılarak ayrık kosinüs ve dalgacık uzaylarında araştırılmıştır. Kapasite analizi sonuçları, görüntünün dönüşümündeki sıfır değerli katsayıların sayısının kapasiteyi belirlediğini göstermiştir. Normalleştirme işlemi bir görüntünün dönüşümündeki sıfır değerli katsayı sayısını arttırdığından, damgalama algoritmalarında ön işlem olarak kullanıldığında daha iyi kapasite kestirim sonucu vermektedir. Bir görüntünün dalgacık dönüşümündeki sıfır değerli katsayı sayısı DCT dönüşümündekinden daha fazla olduğundan kapasite önemli olduğunda dalgacık dönüşümünün tercih edilmesi gereklidir.

DIGITAL IMAGE WATERMARKING METHODS USING MOMENT BASED NORMALIZATION

SUMMARY

Key Words: Digital image watermarking, discrete wavelet transform, complex wavelet transform, moment based image normalization, watermarking capacity

In this study, robust digital image watermarking algorithms in two dimensional discrete wavelet and complex wavelet domains were developed by using the moment based image normalization. In the proposed methods, while the normalization provides robustness against geometrical distortions, the fact that watermark is added in the wavelet domain achieves immunity for attacks such a noise, linear and non-linear filtering and JPEG compression. That the watermark meets transparency and robustness requirements simultaneously was obtained by taking the properties of the human visual system into account. The proposed method was compared to two commonly used digital image watermarking algorithms. Simulation results have shown that the proposed method gives better results than both of the commonly used algorithms in term of various geometrical distortions and several image processing attacks. Then, the effects of the normalization on watermarking capacity in discrete cosine and wavelet domains were investigated by using the information theory based capacity estimation method developed by Moulin and Mıhçak. The results of the capacity analysis have demonstrated that transform coefficients sparsity of an image determines the capacity. Since the normalization process increases transform coefficients sparsity of an image, it results in better capacity estimates when it is used as a preprocessing step watermarking algorithms. As the wavelet models capture sparsity better than the DCT models, wavelet transform must be preferred when capacity is the main concern.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda sayısal ses, görüntü ve video verilerinin kullanım ve dağıtımının yaygınlaşmasından dolayı sayısal verilerin korunması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Sayısal verilerin korunması için şifreleme ve sayısal damgalama yöntemleri geliştirilmiştir. Şifreleme yöntemlerinde, orijinal sayısal veri vericiden alıcıya olan iletimi boyunca özel yöntemler kullanılarak korunmaktadır. Alıcı, şifrelenmiş veriyi alıp çözdükten sonra orijinal veri için bir koruma artık söz konusu değildir. Sayısal damgalama yöntemlerinde ise genelde görülmeyen (görüntü, video ve metin için) veya duyulmayan (ses için) gizli bir işaret sayısal veriye eklenir. Damga adı verilen gizli işaret, verinin bütün kullanım ömrü boyunca mevcuttur. Bu nedenle, sayısal damgalama şifrelemeyi tamamlayıcı bir teknoloji olarak ele alınabilir [1,2,3].

Sayısal damgalama yöntemlerini farklı şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Örneğin, damganın piksel veya frekans uzayında eklenmesine göre piksel uzayı ve frekans uzayı yöntemleri olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Başka bir sınıflandırma ise damgalanacak verinin türüne göre yapılır. Bu sınıflandırmada ses damgalama, metin damgalama, görüntü damgalama ve video damgalama olmak üzere dört kategori vardır. Diğer bir sınıflandırma, damganın görünür ya da duyulur olup olmamasına göre yapılır. Örneğin, sayısal görüntü damgalama yöntemleri görünür damga, görünmez dayanıklı damga, görünmez dayanıksız damga ve yarı görünür damga sınıflarına ayrılabilir.

Görünür damga terimi, bir gözlemcinin damgalı bir veriye baktığında damgayı fark edebildiğini belirtmektedir. Görünmez dayanıklı damga terimi, orijinal veride yapılan değişimlerin algısal olarak fark edilemeyeceği şekilde eklenen ve aynı zamanda damgalı veriden çeşitli işaret işleme işlemlerinden sonra bile büyük bir doğrulukla tespit edilebilen damga anlamında kullanılmaktadır. Görünmez dayanıksız damga terimi, damgalı veride yapılan herhangi bir değişimin damganın tespit edilmesini

imkansızlaştırdığını vurgulamak amacıyla kullanılır. Son olarak yarı görünür damga, görünür ve görünmez damganın bir birleşimidir. Bu tip damgalarda, görünmez bir damga görünür damgayı desteklemek için kullanılır.

Dayanıklı bir damgalama yöntemi özel, yarı özel, genel ve simetrik olmayan olmak üzere dört ana gruba ayrılır. Özel damgalama yöntemleri, damga tespiti için orijinal veriye ihtiyaç duyup iki sınıfa ayrılırlar: (i) bozulmuş damgalı veriden damgayı çıkartmak ve damganın yerini tespit etmek için damgasız veriyi kullanan yöntemler, (ii) damga tespiti için damganın bir kopyasına gereksinim duyan ve sadece test edilen veride damganın mevcut olup olmadığını belirleyebilen yöntemler.

Özel damgalama yöntemlerinin ikisinde de eklenen damga ilgili özel bir anahtara ihtiyaç vardır. Burada özel anahtar, damgayı eklemeye kullanılan gizli bir veridir. Yarı-özel damgalama yöntemleri, damga tespiti için orijinal veriye ihtiyaç duymazlar, ancak eklenen damganın bilindiğini varsayarlar. Genel (ya da gözü kapalı) damgalama yöntemleri, damga tespitini ne orijinal veriye ne de eklenen damgaya ihtiyaç duymadan gerçekleştirir. Son olarak asimetrik damgalama yöntemlerinde, damga tespit etme işleminin ve tespit anahtarının (genel anahtar) herkes tarafından bilindiği varsayılır. Ancak genel anahtar özel anahtarın hesaplanması veya damganın kaldırılması için kullanılamaz.

Damgalama yöntemlerinin nasıl sınıflandırılabileceğini kısaca belirttikten sonra, şimdi de sayısal damgalamanın kullanım alanları açıklanacaktır. Damgalama yöntemleri oldukça geniş uygulama alanına sahip olup bu uygulamalarda en sık kullanılanlar aşağıda listelenmiştir [1]:

- Telif Hakkı Koruma: Orijinal verinin sahibi eserlerine kendisine ait olduğunu belirten bir damga ekleyebilir. Anlaşmazlık durumlarında eklenen damga mahkemede delil olarak kullanılabilir.
- Kimlik Tespiti: Bu uygulamada, orijinal verinin izin verilmeyen kopyasını yapanın kimliği tespit edilir. Orijinal veri sahibi damgalı veriyi farklı kişilere dağıtırken farklı damgalar kullanır. Damgalı verinin istenilmeyen

bir kopyası mevcut olduğunda kopyadaki damga tespit edilerek kopyalama ihlalini kimin yaptığı belirlenir.

- Kopyalama Engelleme: Bu durumda damga, kopya-engelleme veya kaç kez kopya yapmaya izin verildiğini belirten bit ya da bitleri temsil eder ve veri kaydedicideki damga algılayıcıları bu bitlerin aldığı değerlere göre gerekli kararları verir.
- Yayın Denetleme: Ticari amaçlı reklamlara damgalar eklenerek otomatik bir denetleme sistemi oluşturulabilir ve reklamın sözleşmedeki gibi yayınlanıp yayınlanmadığı belirlenebilir. Aynı zamanda değerli TV ürünleri de bu yöntemle korunabilir. Haber konularının değeri saat başına 100.000 Amerikan Doları'nın üzerinde olabilir. Bu kadar yüksek maliyet, anlaşıldığı gibi yayınlanmama olasılığını kuvvetlendirir. Bir yayın gözetim sistemi, bütün yayın kanallarını kontrol edebilir ve bulgularına dayanarak anlaşma ihmali yapan televizyon istasyonlarını tespit edebilir.
- Verinin Gerçekliğini Kanıtlama: Dayanıksız damgalar verinin gerçekliğini belirlemede kullanılabilir. Dayanıksız bir damga, verinin değiştirilip değiştirilmediğini belirtir ve verinin nerede değiştirildiğini gösteren konum bilgisini sağlar.

Damgalama teknikleri sadece koruma amacıyla kullanılmamaktadır. Diğer uygulamalar aşağıda özetlenmiştir:

- Kataloqlama: Video içeriğine yorumların eklenebileceği video iletisini kataloqlama; arama motorları tarafından kullanılacak yorumların eklenebileceği film ve haber bültenlerini kataloqlama.
- Tıbbi Güvenlik: Tarihi ve hasta ismini tıbbi görüntülere eklemek faydalı bir güvenlik önlemi olabilir.
- Veri Saklama: Damgalama teknikleri, gizli özel verilerin iletiminde kullanılabilir. Çeşitli hükümetler şifreleme yöntemlerinin kullanımını sınırlandırdığından insanlar önemli verilerini başka bir veri içinde saklayabilir.

Yukarıda özetlenen farklı damgalama uygulamaları farklı gereksinimlere sahiptir. Buna karşın bir damga için gerekli olan temel gereksinimler algısal saydamlık, kasıtlı veya kasıtlı olmayan saldırılara karşı dayanıklılık ve kapasite olarak belirtilebilir [4,5]. Algısal saydamlık, orijinal veri ile damgalı veri arasındaki algısal benzerlik olarak tanımlanır. Damga bu gereksinimi karşılayacak şekilde eklendiğinde orijinal verinin kalitesi etkilenmez. Damgalı veri kullanıcıları orijinal veriye sahip olmadıklarından, doğrudan bir karşılaştırma gerçekleştiremezler. Bir damganın algısal saydamlık gereksinimini sağlayıp sağlamadığı deneysel olarak tespit edilir. Dayanıklılık terimi, damgalı veri bazı işaret işleme uygulamalarından geçtikten sonra, damganın hangi doğrulukta tespit edilebileceğini belirtmek için kullanılır. Damgalama yönteminin dayanıklı olup olmaması verilen uygulamaya bağlıdır. Örneğin, bir görüntünün bir kanaldan iletilmesine karşı dayanıklılığı yayın denetleme uygulaması için gerekliyken, kopyalama engelleme uygulaması durumu için gerekli değildir. Kopyalama engelleme durumunda, bir kullanıcı damgayı yok etmek amacıyla çeşitli işaret işleme yöntemlerini damgalı veriye uygulayabilir. Dolayısıyla, kopyalama engelleme amacıyla geliştirilecek bir damgalama yönteminin olası işaret işleme algoritmalarına karşı dayanıklı olması gerekli değildir. Kapasite, orijinal bir veride saklanabilecek bilgi miktarı olarak tanımlanır. Kapasite dayanıklılıkta olduğu gibi uygulamaya bağlıdır. Örneğin, kopyalama engelleme amacıyla bir bitlik bir damga genellikle yeterlidir. Fakat, parmak izi gibi diğer uygulamalar için kapasitenin 60-70 bit civarında olması gereklidir.

Verilen bir sayısal damgalama uygulamasında, bu gereksinimlerin hepsini aynı anda sağlamak mümkün değildir. Örneğin, damganın değişik işaret işleme algoritmalarına (filtreleme, sıkıştırma, döndürme vs.) karşı dayanıklılığını arttırmak için enerjisi arttırılmalıdır. Ancak, damganın enerjisini arttırmak orijinal verinin kalitesini bozacağından algısal saydamlık gereksinimi ihlal edilecektir. Verilen uygulama, tasarımcının hangi gereksinime öncelik vermesi gerektiğini belirleyecektir.

Telif hakkı koruma ve veri izleme (denetleme) gibi bazı uygulamalarda damga çıkartma algoritmaları damgayı bulmak için orijinal damgalanmamış veriyi kullanabilir. Bu, gözü kapalı olmayan damgalama olarak adlandırılır. Kopyalama engelleme ve kataloglama gibi diğer çoğu uygulamalarda, damga çıkartma

algoritmaları orijinal damgalanmamış veriye erişemez. Orijinal verinin yokluğu damga çıkartmayı zorlaştırır. Bu tür damgalama algoritmaları kamusa veya gözü kapalı damgalama algoritmaları olarak nitelendirilir.

Sayısal bir damga, orijinal bir verinin kime ait olduğunu belirlemede kullanılacaksa geri elde edilemez olması gereklidir. Bir korsan kendi sahte damgasını oluşturabilir, oluşturduğu damgayı veriden çıkararak orijinal veriyi elde edebilir. Bir damganın geri elde edilemez yapılması için gözü kapalı olması yeterli değildir, çeşitli önlemler de kullanılmalıdır [6].

Damgalı bir veri kasıtlı veya kasıtlı olmayan saldırılarla değiştirilebilir. En çok bilinen damgalama saldırıları gürültü ekleme, filtreleme, gürültü yok etme, damga kaldırma ve engelleme, sıkıştırma, istatistiksel ortalama alma, çoklu damgalama, geometrik saldırılar, kırpma, şifreleme, protokol saldırıları, yazdırma-tarama gibi saldırılardır [7].

Sayısal bir damga sayısal bir veriye doğrudan eklenebildiği gibi uygun bir frekans uzayında da eklenebilir. Doğrudan damga eklemenin bir yolu verilerin değerlerine küçük değerler alan bir gürültü eklemektir. Örneğin sayısal görüntüler için $\{-1,0,1\}$ gibi tamsayı değerler alan gürültü seçilmekle birlikte, kesirli sayılar da kullanılabilir. Gürültünün üretilmesi bir anahtar kullanımına dayalı olarak yapılır ve görüntü bileşenlerine bağlı değildir. Bir damga frekans uzayında ise verinin, Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) [8-11], Ayırık Kosinüs Dönüşümü (DCT) [12-16], Ayırık Dalgacık Dönüşümü (DWT) [15-21] veya Karmaşık Dalgacık Dönüşümü (CWT) [22-30] katsayıları değiştirilerek eklenebilir. Frekans uzayı damgalama yöntemlerinin diğer yöneme göre daha başarılı olduğu literatürde çok sayıda çalışmada gösterilmiştir. Bu nedenle tezde sadece frekans uzayı yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Geometrik saldırılara karşı damganın dayanıklılığı önemli bir problemdir. Damgalı verideki küçük bir geometrik dönüşüm bile damgayı tespit etmemizi büyük oranda engelleyebilir. Damgayı tespit etmek için genelde korelasyona dayalı yöntemler kullanılır. Geometrik dönüşümler eşzamanlama problemine neden olup korelasyon değerlerinin yanlış elde edilmesine yol açar. O halde, geometrik bozunuma uğramış

damgalı bir veriden damga tespit edilirken dikkatli olmak gereklidir. Ya korelasyon hesaplanmadan önce geometrik bozunum etkisi giderilmeli ya da damga geometrik bozunumlara dayanıklı bir uzayda eklenmelidir.

Damganın dayanıklılığı, damganın enerjisini arttırmakla iyileştirilebilir. Ancak yukarıda da söz edildiği gibi algısal saydamlık ihlal edileceğinden bu çözüm pratik değildir. İnsan Görme Sisteminin (İGS) veya İnsan Duyma Sisteminin (İDS) özellikleri kullanılarak algısal saydamlığı ihlal etmeksizin damganın enerjisini arttırmak mümkündür. Enerji, insanın değişimleri fark etmeyeceği yerlerde yerel olarak arttırılabilir. Örneğin, insan gözü düşük frekans bölgelerindeki (grilik seviyelerinde değişimlerin az olduğu bölgeler) değişimleri daha kolay algıladığından, damga görüntüdeki yüksek frekans (örneğin kenarlar gibi grilik seviyesinde ani değişimlerin olduğu bölgeler) bölgelerine eklenebilir. Gözün yüksek frekans bölgelerindeki değişimlere duyarlılığı az olduğundan damganın şiddeti bu bölgelerde arttırılsa dahi belirli bir eşik değerine ulaşınca kadar insan gözü eklenen damgayı algılamayacaktır.

Bu çalışmada, sayısal görüntü damgalama ele alınmıştır. Özellikle geometrik bozulumlara karşı dayanıklılığı arttırmak için geliştirilen moment tabanlı görüntü normalleştirme (MTGN) DCT, DWT ve CWT uzaylarında çeşitli saldırılara karşı performansı detaylı simülasyonlar yapılarak tespit edilmiştir. Dayanıklılık hakkında çok sayıda çalışma olmasına karşın, bildiğimiz kadarıyla diğer önemli bir gereksinim olan kapasite hakkında sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. MTGN'nin DCT ve DWT uzaylarında kapasite üzerinde etkileri de Mihçak ve Moulin'in kapasite kestirim yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Özetle, çalışma moment tabanlı görüntü normalleştirme DCT, DWT ve CWT uzaylarında dayanıklılık ile DCT ve DWT uzaylarında kapasite gereksinimlerini ne ölçüde karşıladığını araştırmış ve aşağıdaki bölümlerden oluşmuştur.

Bölüm 2, literatür taramasına ayrılmıştır. Damga ekleme ve çıkarmanın nasıl yapıldığından, mevcut yöntemlerin üstünlükleri ve eksikliklerinden kısaca söz edilmiştir. Bütün yöntemlerin detaylı bir tartışması tezin kapsamı dışındadır. Meraklı okuyucu, belirtilen referanslardan daha detaylı bilgi edinebilir.

Bölüm 3’de moment tabanlı görüntü normalleştirme ve DWT bir arada kullanılarak yeni bir sayısal görüntü damgalama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin çeşitli saldırılar için sıklıkla kullanılan mevcut iki yöntemden daha iyi sonuç verdiği simülasyonlar aracılığı ile gösterilmiştir.

Yakın geçmişte, DWT’nin eksiklerini gidermek amacıyla CWT geliştirilmiştir. Damga ekleme işleminin DWT yerine CWT uzayında yapılmasının dayanıklılığı arttırıp arttırmayacağını belirlemek amacıyla normalleştirme ve CWT temelli yeni bir sayısal damgalama yöntemi Bölüm 4’de sunulmuş ve detaylı simülasyonlarla Bölüm 3’de geliştirilen yöntemden daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Bölüm 5’de, moment tabanlı görüntü normalleştirmenin damga kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, normalleştirme mevcutken ve yokken DCT ve DWT uzaylarında damga eklenmiş ve her bir durumda kapasite hesaplanarak normalleştirmenin kapasite değerlerini nasıl değiştirdiği belirlenmiştir.

Bölüm 6’da, yapılan uygulamalar özetlenmiş ve karşılaştırma yapılarak tartışılmıştır. Ayrıca, ileride yapılabilecek çalışmalar kısaca anlatılmıştır.

BÖLÜM 2. SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

2.1. Giriş

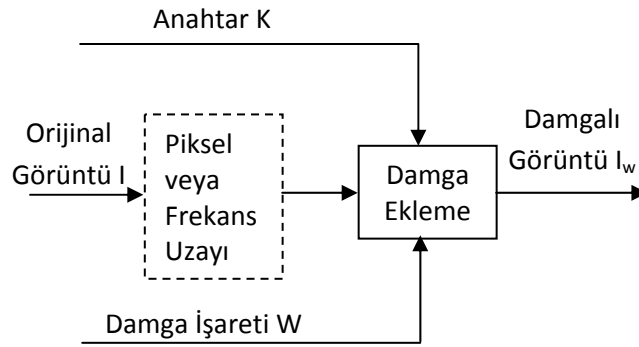
Önlem alınmadığında, sayısal verilerin kopyalaması ve dağıtılması oldukça kolaydır. Sayısal damgalama araştırmalarının bu kadar hızlı gelişmesinin nedeni sayısal verilerin yasal olmayan kullanımlarını engellemektir. Sayısal damgalama ses, görüntü ve videoya uygulanabilir ancak literatürdeki araştırmaların çoğu görüntü için geliştirilmiştir. Bu bölümde, bir damgalama sisteminin yapısı ve özellikle sayısal görüntüler için tasarlanmış yöntemler tanıtılacaktır. Tezin bundan sonraki bölümlerinde, damga eklenecek görüntünün her bir pikseli 8 bitle temsil edilen siyah-beyaz bir görüntü olduğu varsayılmıştır. Tanıtılan yöntemler, küçük değişikliklerle renkli görüntülere rahatlıkla uyarlanabilir.

2.2. Bir Damgalama Sisteminin Yapısı

Damgalama sistemleri, damga ekleme birimi ve damga çıkarma birimi olmak üzere iki birimden oluşur. Her iki birim de ayrı işlemler olarak ele alınır ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [7].

Damga ekleme: Sayısal bir damga, sayısal bir görüntüye değişik şekillerde eklenebilir. Bu işlemin nasıl yapılabileceği [1]'de oldukça kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Literatürdeki yöntemlerin çoğu korelasyona dayalı olduğundan, aşağıda sadece korelasyona dayalı sayısal görüntü damgalama işlemi piksel uzayında verilmiştir. $I(x,y)$ damga eklenecek görüntüyü, $W(x,y)$ eklenecek damga işaretini, α damga kazanç faktörünü ve $I_w(x,y)$ 'de damgalanmış görüntüyü belirtmek üzere, piksel uzayında damga ekleme işlemi matematiksel olarak

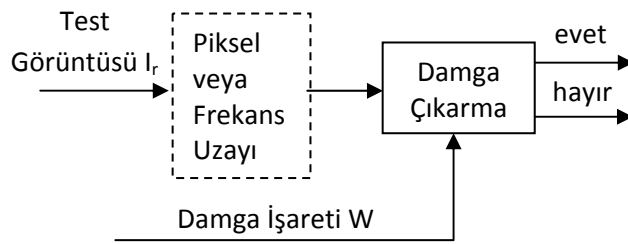
$$I_w(x,y) = I(x,y) + \alpha W(x,y) \quad (2.1)$$



Şekil 2.1. Damga ekleme işlemi

ifadesiyle verilir. Damga işareti $W(x,y)$, genelde rastgele sayılardan oluşan bir gürültüdür. Gürültü, bir şifre kullanılarak üretilir ve damga eklenecek görüntüden istatistiksel bağımsız olmalıdır. Şekil 2.1’de, damga ekleme işlemi gösterilmiştir. Yöntemler piksel veya frekans uzayında çalışmalarına ve damgayı nasıl eklediklerine göre farklı sınıflara ayrılır.

Damga çıkarma işlemi: Damga çıkarmada, damga doğrulama (damga var/yok) veya damga çözme (damgayı oluşturan bit değerlerinin belirlenmesi) olmak üzere iki durum vardır. Genelde, iki problem de damgalı görüntü ile damga arasındaki korelasyon (ilinti) hesaplanarak çözülür. Damga doğrulama durumunu göz önüne alalım. Damgalanmış bir $I'_w(x,y)$ görüntüsü ve $W(x,y)$ damgası arasındaki korelasyon hesaplanır ve bir eşik ile karşılaştırılır. Korelasyonun eşik değerinden büyük olması halinde damganın var olduğuna; aksi durumda görüntünün damga içermediğine karar verilir. Damga doğrulama esnasında iki tür hata yapılabilir. Gerçekte damga yokken “damga var” veya gerçekte damga varken “damga yok” kararları yapılabilecek hatalardır. Eşik değeri hata olasılığını belirler. Hatayı en küçük yapan eşik değeri hesaplamasından kurtulmak için damga, sıfır ortalamalı ve -1 ve 1 ’lerden oluşan bir gürültü olarak seçilir. Damganın bu şekilde oluşturulması durumunda damga doğrulama için korelasyonun pozitif veya negatif olmasına bakmak yeterli olur. Korelasyon hesaplamasında damgalanmış görüntü ve damganın ortak olasılık yoğunluk fonksiyonu gereklidir. Pratikte, bu bilgi genelde mevcut olmadığından korelasyon yaklaşık olarak hesaplanır. (M,N) damgalanmış görüntünün boyutunu ve



Şekil 2.2. Damga çıkarma işlemi (damga doğrulama)

$R_{I'W}$ damgalanmış görüntü ile damga arasındaki korelasyonu göstermek üzere

$$R_{I'W} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I'_w(x, y) W(x, y) \quad (2.2)$$

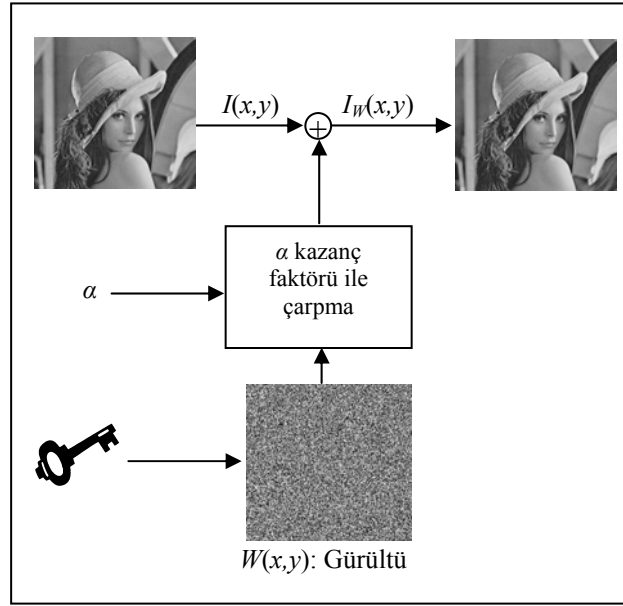
eşitliği kullanılarak korelasyon yaklaşık olarak hesaplanabilir.

2.3. Damgalama Uzayları

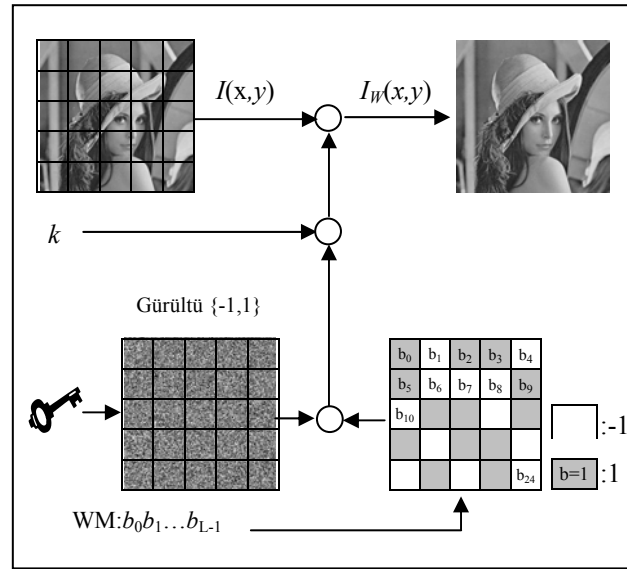
2.3.1. Piksel uzayı yöntemleri

Piksel uzayında damga ekleme, görüntü ile aynı boyuta sahip bir gürültünün bir kazanç faktörü ile çarpılıp görüntüye eklenmesi ile gerçekleştirilir. Kazanç faktörü, damgalı görüntüde damganın enerjisini belirler. Geliştirilmiş yöntemlerin çoğu bu prensibe dayanmaktadır [31-45]. Gürültü genelde tamsayı değeri (örneğin $\{-1,0,1\}$), içermekle birlikte, kesirli sayılar da içerebilir. Gürültü, damga ekleme ve doğrulama birimlerinin bildiği bir anahtar kullanılarak üretilir. Denklem (2.1)'de verildiği gibi damgalı görüntü $I_w(x,y)$ 'yi oluşturmak için gürültü $W(x,y)$ kazanç faktörü α ile çarpılır ve orijinal görüntü $I(x,y)$ 'ye eklenir [1]. Bu işlem, görsel olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Şekil 2.3'de damgalama kapasitesinin bir bit olduğu varsayılmıştır. Kapasite farklı yöntemler kullanılarak artırılabilir. Bir görüntüye, $b_0b_1\dots b_{l-1}$ ile belirtilen l adet damga biti eklemenin en basit yolu görüntüyü l adet alt görüntüye bölmek ve her bir



Şekil 2.3. Piksel uzayında damga ekleme işlemi (IEEE'nin izni ile [1]'den uyarlanmıştır)



Şekil 2.4. Damgalama kapasitesinin görüntünün alt bölgelere ayrılmasıyla artırılması (IEEE'nin izni ile [1]'den uyarlanmıştır)

alt görüntüye kendisi ile aynı boyutlarda bir damga eklemektir. Burada her bir alt damga bir biti temsil etmektedir. Bu işlemler, damgalama kapasitesinin 24 bit olduğu varsayılarak Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

Damgalama kapasitesini arttırmanın diğer bir yolu, haberleşmede sıklıkla kullanılan Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA) yöntemini kullanmaktır [46-48]. $l=7$ -bit

| | | | | | | |
|--------|--------------------------|-------|-----|---------------|---------|-----------------------------------|
| RP_0 | : -1 1 1-1-1 1-1-1 1 1-1 | b_0 | : 0 | \rightarrow | $+RP_0$ | : -1 1 1-1-1 1-1-1 1 1-1 |
| RP_1 | : 1 1-1-1 1-1-1 1 1-1 1 | b_1 | : 0 | \rightarrow | $+RP_1$ | : 1 1-1-1 1-1-1 1 1-1 1 |
| RP_2 | : 1-1-1 1-1-1 1 1-1 1-1 | b_2 | : 1 | \rightarrow | $-RP_2$ | : -1 1 1-1 1 1-1-1 1-1 1 |
| RP_3 | : -1-1 1-1-1 1 1-1 1-1-1 | b_3 | : 1 | \rightarrow | $-RP_3$ | : 1 1-1 1 1-1-1 1-1 1 1 |
| RP_4 | : -1 1-1-1 1 1-1 1-1-1 1 | b_4 | : 0 | \rightarrow | $+RP_4$ | : -1 1-1-1 1 1-1 1-1-1 1 |
| RP_5 | : 1-1-1 1 1-1 1-1-1 1 1 | b_5 | : 1 | \rightarrow | $-RP_5$ | : -1 1 1-1-1 1-1 1 1-1-1 |
| RP_6 | : -1-1 1 1-1 1-1-1 1 1 1 | b_6 | : 0 | \rightarrow | $+RP_6$ | : <u>-1-1 1 1-1 1-1-1 1 1 1</u> + |
| | | | | | W | : -3 5 1-3 1 3-7 1 3-1 3 |

Şekil 2.5. Kapasitenin 7 bit olması durumunda damganın CDMA yöntemiyle oluşturulması. İşaretlerin bir boyutlu olduğu varsayılmıştır (IEEE'nin izni ile [1]'den uyarlanmıştır)

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| W | : | -3 | 5 | 1 | -3 | 1 | 3 | -7 | 1 | 3 | -1 | 3 | |
| I | : | 98 | 98 | 97 | 98 | 97 | 96 | 97 | 96 | 95 | 94 | 94 | + |
| I_W | : | 95 | 103 | 98 | 95 | 98 | 99 | 90 | 97 | 98 | 93 | 97 | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

Şekil 2.6. Bir damgadaki bitlerin korelasyon hesaplanarak belirlenmesi (IEEE'nin izni ile [1]'den uyarlanmıştır)

durumunda, 11 elemanlı bir damganın CDMA yöntemi kullanılarak oluşturulması bir boyutlu işaretler için Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, damganın oluşturulabilmesi için damga eklenecek işaret ile aynı boyuta sahip $\{+1,1\}$ 'lerden oluşan l adet gürültü RP_i , $0 \leq i \leq l-1$ oluşturulur. RP_i 'ler birbirlerinden ve damga eklenecek işaretten istatistiksel bağımsız olmalıdır. Damgayı oluşturmada kullanılacak bir RP_i gürültüsünün işaretini kendisine karşılık gelen b_i bitinin değeri belirler. b_i biti 0 değerini alırsa $+RP_i$, aksi halde $-RP_i$, seçilip tüm gürültüler toplanarak damga oluşturulur. Şekil 2.5'de eklenen bitler 00111010'dır. Korelasyon yöntemi kullanılarak damganın çözülmesi (eşdeğer olarak bit değerlerinin tespit edilmesi) Şekil 2.6'da açıklanmıştır. İlk önce, Şekil 2.5'de CDMA yöntemi kullanılarak oluşturulan damga W bir görüntü parçası I 'ya eklenerek damgalı görüntü parçası I_W bulunmuştur. Damgadaki i . biti belirlemek için I_W ile RP_i arasındaki korelasyon hesaplanmış ve 0 değeri ile karşılaştırılmıştır. Korelasyonun 0'dan büyük

olması durumunda *i.* bitin “0”, aksi halde “1” olduğuna karar verilmiştir. Şekilden, tüm bitlerin doğru olarak tespit edildiği görülmektedir.

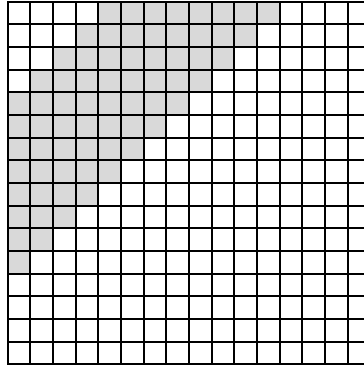
Literatürde, piksel uzayında geliştirilmiş yöntemler [31-45]’de bulunabilir. Piksel uzayında damgalama yapmanın eksikliklerinden biri kırpma işleminin damganın gücünü azaltmasıdır (damgayı kısmen yok etmesidir). Damgalama piksel uzayında yapılabileceği gibi frekans uzayında da yapılabilir. Sonraki kısımlarda sıklıkla kullanılan frekans uzayları tartışılmıştır.

2.3.2. Frekans uzayları

Frekans uzayında damgalama, uygun dönüşüm katsayıları değiştirilerek yapılır. Yüksek frekans bölgelerindeki katsayılar çeşitli işaret işleme yöntemleri uygulandıktan sonra kaybolacağından ve alçak frekans bölgelerindeki katsayılara yapılacak değişimler kolayca algılanacağından, damga işareti genelde orta frekans bölgelerindeki katsayılara eklenir. Daha sonra, damgalı görüntüye ters dönüşüm uygulanır. Frekans uzayında uygulanan damgalar, ters dönüşüm uygulandıktan sonra piksel uzayında görüntünün tamamına yayılacağından piksel uzayında uygulanan damgalardan daha dayanıklıdır. DFT, DCT, DWT ve CWT sıklıkla kullanılan frekans uzaylarıdır. Aşağıda, bu uzaylarda geliştirilmiş yöntemler özetlenmiştir. Daha detaylı bilgi ilgili referanslardan elde edilebilir.

2.3.2.1. Ayrık Fourier dönüşümü

DFT, insan görme duyarlılığına göre damga spektrumunu her frekans bandına şekillendirmeyi mümkün kılar. DFT kullanılarak yapılan damgalama özellikle ötelemeye karşı dayanıklılığı sağlar. Öncelikle, görüntüye DFT uygulanarak frekans uzayında temsil edilir ve damga görüntünün DFT katsayılarının genliğine veya gerçel kısmına eklenebilir [8-11]. DFT katsayılarının fazının damga ekleme amacıyla kullanılmamasının nedeni insan gözünün fazdaki değişimlere çok duyarlı olmasıdır. Daha sonra, DFT katsayıları değiştirilmiş görüntüye ters DFT uygulanarak damgalanmış görüntü elde edilmiş olur.



Şekil 2.7. Orta frekans DCT katsayıları (Koyu olarak gösterilen bölgeler DCT uzayında damganın eklendiği bölgelerdir)

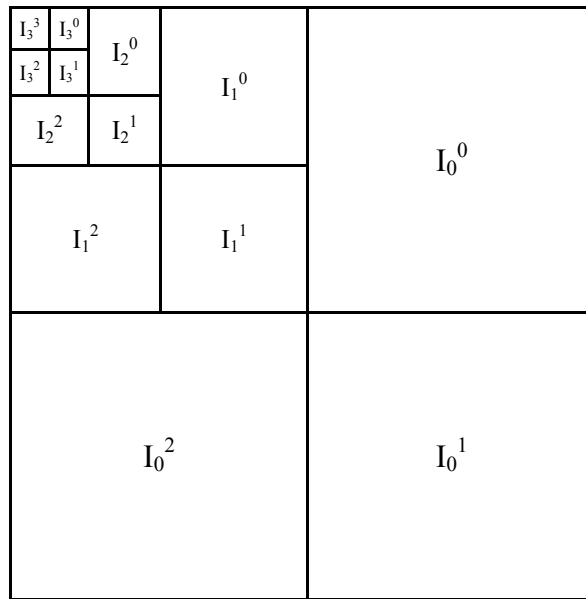
2.3.2.2. Ayrık kosinüs dönüşümü

DCT uzayı, damgalamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni, uluslararası görüntü ve video sıkıştırma standartları olan JPEG ve MPEG'in DCT'ye dayalı olmasıdır. Ayrıca, sıkıştırma yöntemlerinin özellikleri damga ekleyicide dikkate alınarak, sıkıştırma saldırısına karşı dayanıklılık sağlanabilir.

DCT uzayında damga ekleme, DFT uzayındakine benzer bir şekilde yapılır. DCT katsayılarına rastgele gürültü dizisi doğrudan eklenebileceği gibi bazı katsayılara kısıtlama da getirilebilir [12-16]. Şekil 2.7'de algısal saydamlık ve dayanıklılık gereksinimini birlikte sağlamak amacıyla değerleri değiştirilen DCT katsayıları koyu pikseller olarak gösterilmiştir.

Bir görüntüdeki bir piksel, komşularıyla genelde ilişkili olup grilik seviyesi komşu piksellerin grilik seviyelerine benzer bir değer alır. Görüntü işleme literatüründe bu özelliğe "piksellerarası fazlalık" denilmektedir. DCT yüksek korelasyona sahip bilgiyi, daha düşük bir korelasyona sahip bir bilgiye dönüştürerek piksellerarası fazlalığın giderilmesine imkan verir. Bu özelliğe enerji sıkıştırma denilmektedir.

DCT'nin diğer bir üstünlüğü de dönüşüm sonucunda çok sayıda küçük değerli katsayılar oluşturmasıdır. Küçük değerli katsayılar sıfıra yuvarlanıp değiştirilmiş katsayılardan görüntünün geri elde edilmesi sonucunda oluşan hatalar büyük olmaz. Gerçekli görüntü kalitesi, hangi katsayıların sıfıra yuvarlanacağını belirler.

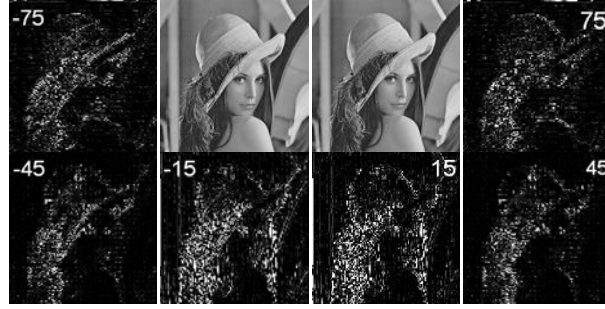


Şekil 2.8. Bir görüntünün dört seviyeli ayrık dalgacık dönüşümünün seviyeleri (IEEE'nin izni ile [17]'den uyarlanmıştır)

2.3.2.3. Ayrık dalgacık dönüşümü

Ayrık Dalgacık dönüşümünün (DWT) gerçekleştirilmesi için hızlı algoritmalar vardır. Ayrıca DWT, iyi enerji sıkıştırma özelliğine sahiptir. Bu iki özelliğinden dolayı DWT çok sayıda görüntü işleme probleminin çözümünde kullanılmıştır. Yeni görüntü sıkıştırma standardı olan JPEG2000 DWT'ye dayalıdır. Özet olarak, dalgacık dönüşümü bir görüntüyü özel frekanslarda çoklu parçalara böler. Literatürde [15-21]'deki çalışmalar dalgacık dönüşümü tabanlıdır.

Görüntü gibi iki boyutlu işaretlerin DWT'sinin hesaplanması için 1-D DWT yatay ve dikey yönlerde ayrı ayrı uygulanır. Sonuç olarak, 1-D DWT durumunda her seviyede iki bileşen elde edilmesine karşı 2-D DWT'de her seviyede dört bileşen elde edilir. İki boyutlu filtreleme ve alt örnekleme işleminin kaç kez yapıldığını belirtmek için bundan sonra seviye terimi kullanılacaktır. Yön terimi alçak geçiren ve yüksek geçiren filtrelerinin mümkün kombinasyonunu gösterir. Yön $\{0, 1, 2, 3\} = \{LH, HH, HL, LL\}$ olarak temsil edilir. Örneğin LH terimi yatay yönde alçak geçiren, dikey yönde de yüksek geçiren filtrelerin uygulandığını ifade etmektedir. l çözünürlük seviyesini, $\theta \in \{0, 1, 2, 3\}$ ise yönü belirtmek üzere I_l^θ altbandı gösterir.

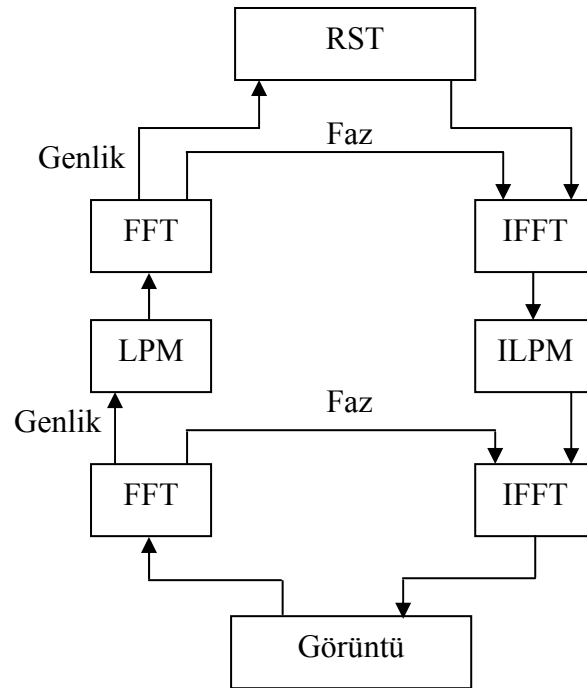


Şekil 2.9. Karmaşık Dalgacık Dönüşümü katsayılarının görüntüleri (IEEE'nin izni ile [26]'dan uyarlanmıştır)

Şekil 2.8, bir görüntünün dört seviyeli 2-D DWT'sini göstermektedir. Dalgacık dönüşümüne dayalı görüntü damgalama yöntemi Bölüm 3'de verilmiştir.

2.3.2.4. Karmaşık dalgacık dönüşümü

DWT'nin önemli iki eksikliği, ötelemeden bağımsız olmaması ve kötü yönsel seçiciliğidir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla CWT geliştirilmiştir. Bir boyutlu işaretler için CWT, geri-çatım işlemini mükemmel bir şekilde sağlayan karmaşık katsayılardan oluşan tek bir filtreleme ağacı kullanılarak gerçekleştirilir. Ancak, karmaşık katsayılı filtreler tasarlamak oldukça zordur. Ayrıca, hatasız geri-çatım sağlayan karmaşık filtreler geri-çatım esnasında gürültüyü artırır. Bir boyutlu işaretler için CWT'nin "Çift Ağaçlı Karmaşık Dalgacık Dönüşümü" (DT-CWT) olarak adlandırılan gerçekleştirilmesinde her biri gerçel katsayılı iki filtre bankası kullanır. Bu filtreler, üst ve alt kola ilişkin dalgacık katsayıları birbirinin Hilbert dönüşümü olacak şekilde tasarlanır. İki boyutlu işaretler için üst ve alt filtreleme ağaçları sırasıyla satır ve sütunlara uygulanır. Bu nedenle, 2D-DWT'de her frekans çözünürlüğünde alçak frekans bileşenleri hariç üç altbant varken, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi 2D DT-CWT'de her frekans çözünürlüğünde alçak frekans bileşenleri hariç ± 15 , ± 45 ve ± 75 'den oluşan altı altbant vardır. CWT'ye dayalı sayısal görüntü damgalama yöntemleri [22-30]'de bulunabilir. Bölüm 4'de, moment tabanlı görüntü Normalleştirme ve CWT'nin üstünlükleri birleştirilerek yeni bir görüntü damgalama algoritması geliştirilmiş ve Bölüm 3'de geliştirilen DWT tabanlı yöntemden daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

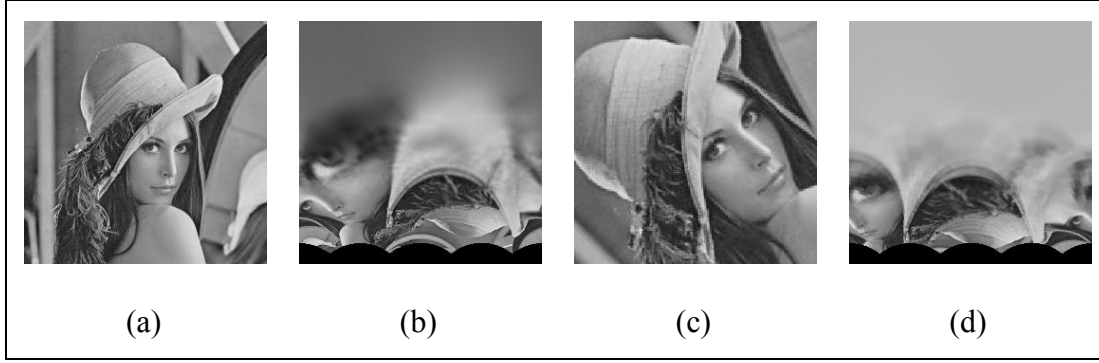


Şekil 2.10. Fourier-Mellin dönüşümüne dayalı damgalama yöntemi. Hızlı Fourier dönüşümü ile tersi FFT ve IFFT; logaritmik kutupsal dönüşüm ile tersi LPM ve ILPM ile belirtilmiştir.

2.4. Geometrik Bozunumlara Dayanıklılık

2.4.1. Logaritmik kutupsal dönüşüm kullanarak görüntü damgalama

Damgalı görüntü, geometrik bir dönüşüme uğradığında çoğu damgalama algoritması damgayı doğru olarak tespit edemez. Ruanaid ve diğerleri [49], bu problemin üstesinden gelebilmek için Fourier-Mellin dönüşümünü tanıtmışlardır. Buna göre DFT katsayılarının Logaritmik Kutupsal Dönüşümü (LPM) hesaplanır ve damga bu uzayda eklenir. Şekil 2.10 damganın dönme, ölçekleme ve öteleme (RST) uzayında nasıl eklendiğini göstermektedir. Bu oldukça ideal bir yöntemdir fakat pratikte uygulanması zordur. Birinci zorluk, LPM ve ters LPM (ILPM) işlemlerinin görüntü kalitesinde kayıplara neden olmasıdır. Koordinat sisteminin değişmesi ara değerlemenin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan iki çeşit ara değerlendirme, en yakın-komşuluk ve çift doğrusal aradeğerlemedir. Her iki yöntem de kayıplara neden olmaktadır. Eğer komşu pikseller aynı ölçekte değerlere sahipse aradeğerleme iyi performans gösterir. LPM'nin uygulanabilmesi için görüntü



Şekil 2.11. LPM'nin özellikleri. (a) Orijinal görüntü, (b) (a)'nın LPM'si, (c) (a)'nın ölçeklenmiş ve dönmüş hali, (d) (c)'nin LPM si (IEEE'nin izni ile [1]'den uyarlanmıştır)



Şekil 2.12. 256x256 boyutlarında Lena görüntüsünün ters LPM'si alındıktan sonraki hali

çözünürlüğü en az 256x256 olmalıdır. İkinci zorluk LPM'nin sayısal olarak hesaplanmasında FFT ve hızlı DWT gibi hızlı algoritmaların olmamasıdır. Bu nedenle, Fourier-Mellin dönüşümüne dayalı görüntü damgalama yöntemleri çok fazla gelişme imkanı bulmamıştır.

Şekil 2.11'de LPM'nin sahip olduğu özellikler belirtilmiştir. Şekil 2.11 (b), (a)'nın LPM'sini, (c) (a)'nın dönmüş ve ölçeklenmiş halini, (d) ise (c)'nin LPM'sini göstermektedir. Şekil 2.11 (b) ve (d) karşılaştırıldığında, piksel uzayında dönme ve ölçeklemenin LPM uzayında ötelemeye karşılık geldiği görülmektedir.

Şekil 2.12'de, en yakın komşuluk aradeğerlemesi kullanılması durumunda Şekil 2.11 (b)'daki 256x256 boyutlarındaki görüntünün ters LPM'si verilmiştir. Merkezden uzaklaştıkça görüntü kalitesinin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.

2.4.2. Zernike momentleri kullanarak görüntü damgalama

Bir görüntüden hesaplanabilecek değişik momentler vardır. Zernike momentleri görüntü gürültüsüne duyarlılıkları ve momentlerden görüntüyü mükemmel bir şekilde geri-çatılmasına imkan verme yetenekleri nedeniyle diğer momentlere tercih edilmiştir [50-52].

Bu yöntemde, görüntü halkalara bölünür ve damga işareti her bir halkanın Zernike momentine eklenir. Damgalı görüntü, alt görüntülerin değiştirilmiş Zernike momentlerinden görüntünün geri çatılmasıyla elde edilir. Bununla birlikte, Zernike momentlerinden görüntünün geri-çatılması işleminin hesap yükü oldukça fazladır ve işlem esnasında sayısal yaklaşıklıklardan dolayı bilgi kaybı olabilir.

Görüntü bir ön işlemde geçirilerek ölçekleme ve ötelemeye karşı dayanıklılık sağlanabilir. Görüntü normelleştirme yöntemi, görüntü tanıma problemlerinde geometrik bozunumlar durumunda görüntü tanıma performansını arttırmak için geliştirilmiştir. Ön işlem olarak normelleştirme kullanılabilir Normelleştirme işlemi Bölüm 3'de tartışılmıştır. Aşağıda Zernike momentler kısaca anlatılmıştır.

Birim dairenin dışında yok olan sürekli görüntü fonksiyonu $f(x,y)$ için n tekrarlı Zernike momentleri

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int \int_{x^2+y^2 \leq 1} f(x,y) V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (2.3)$$

eşitliği ile tanımlanır [51]. Burada, n negatif olmayan bir tamsayı ve m negatif olmayan bir çift tamsayıdır. Karmaşık değerli fonksiyon $V_{nm}(x,y)$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V_{nm}(x,y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(jm\theta) \quad (2.4)$$



Şekil 2.13. A harfinin Zernike momentlerinden geri çatılması. Soldan sağa: orijinal görüntü, $n_{max} = 5, 15, 20, 30$ için geri elde edilmiş görüntüler (IEEE'nin izni ile [51]'den uyarlanmıştır)

Denklem (2.4)'de ρ ve θ birim diskteki polar koordinatları temsil etmektedir ve R_{nm} bir polinom olup,

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{n-|m|/2} \frac{(-1)^s [(n-s)!] \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s \right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s \right)!} \quad (2.5)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır. Bu polinomlar birbirlerine dik olup $R_{n,-m}(\rho) = R_{nm}(\rho)$ eşitliğini sağlarlar.

Sayısal bir görüntünün Zernike momentlerini hesaplamak amacıyla integraller toplamalarla değiştirilir. Verilen görüntünün Zernike momentleri hesaplanırken, görüntünün merkezi başlangıç olarak alınır ve birim halkanın içine düşen pikseller hesaplamada kullanılır.

$f(x,y)$ görüntüsünün A_{nm} ile gösterilen Zernike momentlerinin $n=n_{max}$ 'a kadar bilindiğini varsayalım V fonksiyonlarının dikliğinden yararlanarak momentlerden görüntüyü geri elde etmek için

$$f'(x,y) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_m A_{nm} V_{nm}(\rho, \theta) \quad (2.6)$$

ifadesi kullanılabilir n_{max} sonsuza yaklaştıkça geri elde edilen görüntü $f'(x,y)$, orijinal görüntü $f(x,y)$ 'ye yaklaşacaktır.

Momentlerden görüntüyü geri elde etme işlemi 50x50 boyutundaki A harfinin iki seviyeli görüntüsü için Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Geri çatılmış iki seviyeli görüntüler [0, 255] değerlerine ölçeklenmiştir. n_{max} değeri arttırıldığında geri çatılan görüntünün orijinal görüntüye yakınsadığı görülmektedir.

2.4.3. Görüntü normalleştirmeye dayalı damgalama

Normalleştirilmiş görüntü, orijinal görüntünün momentleri kullanılarak bazı geometrik dönüşümler sonucunda bulunur. Bu işlem, görüntünün ilgin saldırılara karşı dayanıklılığını sağlar. [53-61]'de Normalleştirme yöntemi kullanılarak yapılan damgalama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Moment Tabanlı Görüntü Normalleştirme (MTGN) Bölüm 3'de ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

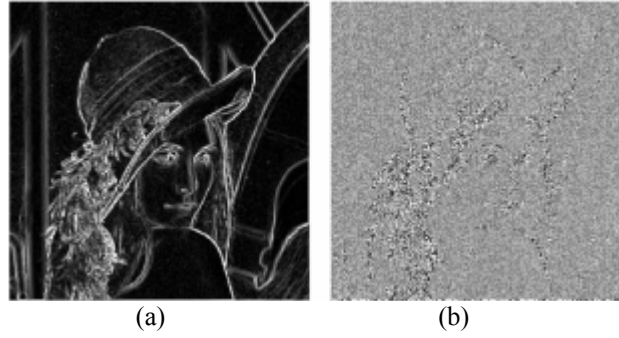
2.5. Damganın Ekleneceği Yerin Belirlenmesi

İnsan gözü, bir görüntüdeki düz bölgelerden ziyade karışık bölgelerdeki gürültülere daha az duyarlıdır. Ayrıca, sıkıştırma sistemleri düzgün değişimlerin olduğu bölgelere uygulanırken hızlı değişimlerin olduğu bölgeleri ve kenarları koruma eğilimlidir. Bu özelliklere dayalı İnsan Görme Sistemi (İGS) modellerinden yararlanılarak damga bir görüntünün belirli bölgelerine algılanmadan eklenebilir. İGS modelleri piksel uzayında oluşturulabileceği gibi frekans uzayında da oluşturulabilir. İki model de aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.5.1. Piksel uzayında maskeleme

İnsan gözü, bir görüntünün kenar gibi yüksek frekanslı bölgelerinde, değişimlerin yavaş olduğu bölgelere göre daha az duyarlıdır. Bu gözlemden yararlanılarak piksel uzayında $Msk(x,y)$ ile belirtilen bir maske hesaplanabilir. Maske, elemanlarının aldığı değerler insan gözünün duyarlı olmadığı konumlarda büyük, diğer konumlarda ise küçük olacak şekilde tasarlanır. Maske kullanılarak damga ekleme işlemi

$$I_w(x,y) = I(x,y) + Msk(x,y)kW(x,y) \quad (2.7)$$



Şekil 2.14. Prewitt kenar bulma operatörü kullanılarak maske üretilmesi (a) Maskeleme görüntüsü, (b) Orijinal ve damgalı görüntüler arasındaki ölçeklendirilmiş fark görüntüsü

olarak ifade edilebilir. Burada, $W(x,y)$ damga işaretini, k sabit kazanç faktörünü ve $Msk(x,y)$ maskeyi temsil etmektedir. Maske katsayıları 0'dan k_{max} 'a kadar değer alabilir. Bu şekilde, damganın enerjisi artırılmış, ancak algılanması engellenmiş olur. Şekil 2.14 (a)'da Lena görüntüsü için basit Prewitt kenar bulma algoritması ile üretilmiş bir maske gösterilmiştir. Şekil 2.14 (b), bu maske ile çarpılmış ve görsel amaçla ölçeklendirilmiş bir damga işaretini göstermektedir.

2.5.2. Frekans uzayında maskeleme

Maskeleme DFT, DCT, DWT veya CWT uzaylarında da gerçekleştirilebilir. [17]'de DWT uzayında kullanılan bir maskeleme yöntemi anlatılmıştır. Buna göre damgalama aşağıdaki kurala göre yapılır:

$$\tilde{I}_0^\theta(i,j) = I_0^\theta(i,j) + kw^\theta(i,j)x^\theta(i,j) \quad (2.8)$$

Burada $w^\theta(i,j)$ DWT uzayında oluşturulmuş θ yönündeki maskeyi, $I_0^\theta(i,j)$ orijinal görüntünün birinci seviye ayrıştırmasında θ yönündeki DWT katsayılarını, $x^\theta(i,j)$ θ yönündeki damga işaretini ve $\tilde{I}_0^\theta(i,j)$ ise damgalı görüntünün birinci seviye ayrıştırmasında θ yönündeki DWT katsayılarını göstermektedir.

Bölüm 3'de DWT için kullanılan maske $w^\theta(i,j)$ 'nin oluşturulması, ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

CWT uzayında da benzer bir yol kullanılır ve kullanılan maskeleme fonksiyonu ise [22]'de anlatılmıştır. Maskenin hesaplanmasında

$$w^\theta(i, j) = \sqrt{k^2 \cdot |I^\theta(i, j)|^2 + \gamma^2} \quad (2.9)$$

eşitliği kullanılır. Denklem (2.9)'da $|I_0^\theta(i, j)|^2$ terimi, (i, j) konumundaki, CWT katsayısı ve onun 3x3 komşuluğundaki katsayılarının genliklerinin karesinin ortalamasını ifade etmektedir. İlk seviye ve her altbant için k ve γ değerleri [22]'deki gibi hesaplanır ve Bölüm 4'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.6. Hata Düzelten Kodlar Kullanılarak Damganın Dayanıklılığının Arttırılması

Damga ekleme işlemine başlamadan önce damga olarak kullanılmak istenen bir işaret şifrelenebilir. Hata düzelten kodlar, modülasyon veya her ikisi de kullanılarak şifreleme gerçekleştirilebilir. Orijinal bit dizisinin hata tespiti ve düzeltimi amacıyla ek bitlerin kullanılarak daha uzun bir diziye dönüştürülmesi işlemi hata düzelten kod olarak adlandırılır. Modülasyon, her bitin sürekli bir dalga şekline dönüştürüldüğü bir işlemdir. Eğer bir damgalama algoritması yeterli bir şekilde dayanıklı değilse küçük işaret bozulmaları damganın doğru bir şekilde çözülememesine neden olur. Hata düzelten kodlar kullanılarak bu sorun çözülebilir. Hata düzelten kodun düzeltebileceğinden daha fazla hata oluşmamışsa bu hatalar tespit edilebilir ve düzeltilebilir. Bu tezde, hata düzelten kodlar konusu irdelenmemiştir. Bölüm 3 ve Bölüm 4'de tanıtılacak algoritmalara hata düzelten kodlar eklenerek performansta iyileşme sağlanıp sağlanamayacağı araştırılması gereken konulardan birisidir.

2.7. Damgalı Görüntü İle Orijinal Görüntü Arasındaki Görsel Kalite Ölçütü

Damgalama işleminden sonra orijinal görüntü bozulmaktadır. Algoritmaların dayanıklılık performansları karşılaştırılırken oluşturdukları bozunumların aynı olduğu varsayılmalıdır. Bu nedenle, damgalama sonucu oluşan bozunumu hesaplayabilmek amacıyla kullanılan algoritmadan bağımsız nesnel bir ölçüt gereklidir. Kullanılacak ölçüt ile bozunum arasında doğru orantılı bir ilişki olabileceği gibi (ölçüt yüksek değer aldığında bozunum küçüktür), ters orantılı bir ilişki de olabilir (ölçüt yüksek değer aldığında bozunum büyüktür). İnsan görme

sistemini tam olarak yansıtmamakla birlikte en sık kullanılan görsel kalite ölçütleri aşağıda verilmiştir [7].

- Tepe İşaret Gürültü Oranı (PSNR):

$$PSNR(dB) = 10 \log_{10} \left(N_1 N_2 \frac{\max(I(x,y))^2}{\sum_{x_1, x_2} (I(x,y) - I_w(x,y))^2} \right) \quad (2.12)$$

Burada, N_1 ve N_2 orijinal $I(x,y)$ ve damgalı $I_w(x,y)$ görüntüsünün boyutları, $\max(I)$ ise I 'daki en yüksek grilik seviyesidir. 8-bit siyah beyaz görüntüler için $\max(I)=255$ 'dir. PSNR desibel (dB) olarak ölçülür. PSNR'in 35 dB ve üstü olması durumunda damganın algılanamaz olduğu varsayılır.

- Ortalama Karesel Hata (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{x_1, x_2} (I(x,y) - I_w(x,y))^2 \quad (2.13)$$

PSNR durumundakinin tersine, MSE ne kadar küçük değer alırsa $I(x,y)$ ile $I_w(x,y)$ arasındaki fark o kadar küçük olacaktır. PSNR ölçütünün MSE ölçütüne göre daha sık kullanıldığını belirtmekte fayda vardır. Bu tezde, PSNR tercih edilmiştir.

2.8. Damgalama Saldırıları

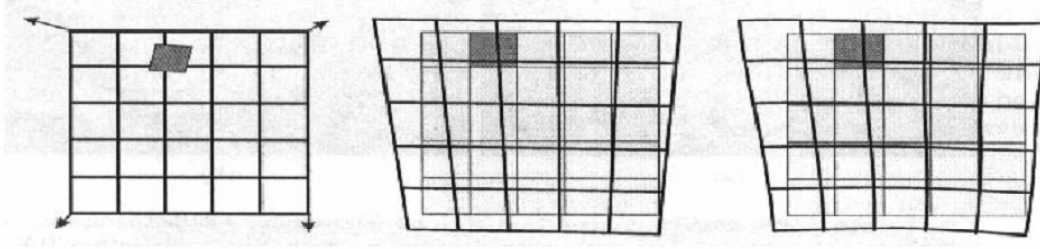
Pratikte damgalı bir görüntü kasıtlı veya kasıtsız olarak değiştirilebilir. Her iki durumda da damgalama sistemi damgayı saldırıdan sonra tespit edebilmeli ve çıkartabilmelidir. En çok bilinen damgalama saldırıları aşağıdaki listelenmiştir [4]:

- Gürültü ekleme: Bir rastlantı değişkeninden (Gaussian, düzgün, Poisson, Bernoulli v.b.) türetilen bir işaretin görüntüye eklenmesidir. Belirli uygulamalarda gürültü ekleme analog/sayısal ve sayısal/analog dönüştürücülerden kaynaklanabilir veya iletim hataları sonucu oluşabilir.

Bununla birlikte, bir saldırgan kasıtlı olarak gürültü ekleyebilir. Gürültü, korelasyon eşik değerini arttırır.

- Filtreleme: Filtreleme saldırıları doğrusal filtreleme, alçak veya yüksek geçiren filtreleme, Gauss ve keskinleştirme filtreleme olabilir. Yayılı Spektrum benzeri damgalar kayda değer bir şekilde yüksek frekans bileşeni içermediğinden alçak geçiren filtreleme damgalı görüntüde kayda değer bir bozulma meydana getirmez, fakat performansı oldukça etkileyebilir. Bilinen bir filtreleme türüne karşı dayanıklı bir damga oluşturmak için, damga işareti filtrelerin genlik yanıtının küçük değerler aldığı frekans bileşenlerine eklenecek şekilde tasarlanmalıdır.
- Gürültü yok etme saldırıları: Gürültü yok etme saldırıları damgayı gürültü olarak ele alır. Bu saldırılar medyan filtreleme, Wiener filtreleme, eşikleme v.b. olabilir.
- Damga kaldırma ve engelleme saldırıları: Bu saldırıların amacı damgayı kestirmek ve kestirilmiş damgayı kullanarak damga çözücü tarafında damganın teklğine zarar vermektir. Bazı bilinen etkili kaldırma ve engelleme atakları şunlardır: Damgayı çıkardıktan sonra medyan damga kestirimi, Wiener kestirimi ve çıkarımı, algısal düzenleme v.b.
- Sıkıştırma: Sıklıkla görülen kasti olmayan bir saldıdır. Pratikte internet aracılığı ile dağıtılan bütün ses, video ve görüntü verileri sıkıştırılarak dağıtılır. Eğer damganın farklı seviyelerdeki sıkıştırmalara karşı dayanıklı olması gerekirse damga ekleme işleminin sıkıştırmanın yapıldığı uzayda yapılması daha mantıklıdır. Örneğin DCT uzayında yapılan görüntü damgalama, JPEG sıkıştırmasına karşı piksel uzayında yapılan damgalamadan daha dayanıklı olacaktır. Ayrıca, DWT uzayında yapılan damgalamanın JPEG2000 sıkıştırmasına karşı dayanıklı olmasını beklemek mantıklıdır.
- İstatistiksel ortalama: Bu saldırıların amacı, veri setinin istatistiksel analizini kullanarak orijinal görüntüyü yeniden elde etmektir. Bir saldırgan damgayı kestirmeye çalışabilir ve daha sonra nesneyi damgasız hale getirebilir. Eğer damga yeteri kadar veriye bağlı değilse kestirimi kolaylaşır. Ortalama ve çarpışma saldırıları bu gruba girmektedir. Ortalama saldırısı, her seferinde farklı bir damga ile damgalanmış veri setinin ortalamasını içerir. Bu yolla orijinal verinin kestirimi elde edilir.

- Çoklu damgalama: Bir saldırgan daha önceden damgalanmış bir görüntüyü tekrar damgalayabilir ve sahiplik iddia edebilir. Bu durumun en basit örneği saklı belgeye bilirkişi belgesi kullanarak tarih bilgisi eklemektir.
- Geometrik saldırılar: Geometrik saldırılar damgayı yok etmez, fakat damgalı görüntünün piksel değerlerini değiştirerek damgayı bozar. Böyle saldırılar durumunda damga çözücü, damga işareti ile eş zamanlamayı kaybeder. Bu saldırılar, genel ilgin dönüşümler şeklinde modellenebilir. Yaygın olan geometrik saldırılar, döndürme, ölçekleme, görüntünün oranını değiştirme kaydırma ve germe v.b.'dir.
- Kırpma: Görüntünün belirli bir kısmının orijinal görüntüden çıkartılmasıdır. Bu saldırıya karşı önlem almak oldukça güçtür.
- Rastgele geometrik bozulmalar: Stirmark saldırısı, ticari olarak elde edilebilen programlarla eklenmiş damgayı kaldırmakta kayda değer bir başarı göstermiştir. Stirmark saldırısı ilk önce fark edilmez küçük bir geometrik bozulma oluşturur ve daha sonra görüntü fark edilmez bir biçimde rastgele olarak hafifçe gerdirilir, kaydırılır, eğrilir ve döndürülür. Son olarak, görüntünün merkezinde en büyük ve kenarlarında en az olan küçük bir sapma her piksele uygulanır. (Şekil 2.15) Bu saldırının amacı damga çözücünün damga ile eşzamanlamasını kaybetmesini sağlamaktadır.
- Şifreleme saldırıları: Şifreleme saldırıları iki kategoriye ayrılır: kapsamlı bir araştırma ile gizli bilgiyi bulmayı amaçlayan saldırı ve damga mevcut iken damgasız görüntüyü oluşturmak için kullanılan Oracle saldırısı.
- Protokol saldırıları: Kopyalama saldırısı bu gruba uyar. Bunun amacı, damgayı damgalı görüntüden kestirmek ve kestirilen damgayı hedef verisine kopyalamaktır. Algılanamama gereksinimini karşılamak için kestirilen damga orijinal verinin yerel özelliklerine bağlı olacak şekilde tasarlanır.
- Yazdırma-tarama: Belge doğrulama ve güvenilirlik gibi uygulamalar için belgenin yazılması ve taranması esnasında oluşabilecek bozunumlardır. Bu, yazma yapılırken sayısal-analog dönüştürmeyi ve ardından yazılan belge taranırken analog-sayısal dönüştürmeyi içerir. Bu işlem, bu iki dönüştürme arasında gürültüye ek olarak geometrik bozulma da oluşturur.



Şekil 2.15. Rastgele geometrik bozulma modeli (a) Orijinal görüntü (b) Rastgele uygulanmayan geometrik bozulma (c) Rastgele uygulanan geometrik bozulma

2.9. Damgalama Yöntemlerinin Performanslarının Değerlendirmesi

Çeşitli saldırılara karşı damganın dayanıklılığını belirlemek amacıyla damgalı görüntüye birtakım dönüşümler uygulanıp damga çözücünün saldırılar sonucunda damgayı hangi doğrulukta çözebildiği araştırılır. Bu amaçla ticari yazılımlar geliştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan ticari yazılımlar aşağıda sıralanmıştır [7]. Tezde, ticari yazılımlar kullanılmamıştır. Bir saldırıyı gerçekleştirmek için MATLAB™ ortamında kod yazılmıştır.

- Stirmark: Verilen damgalı bir giriş görüntüsü için, Stirmark dönüştürülmüş görüntüler üretir ve daha sonra bu görüntüler kullanılarak damganın tespiti yapılır. Stirmark'da şu dönüşümler uygulanır: Kırpma, aynalama, döndürme, döndürme-ölçeklendirme, keskinleştirme, Gauss filtreleme, rasgele bükme, doğrusal dönüşümler, görüntü oranını değiştirme, ölçeklendirme, satır-sütun çıkarma, renk azaltma ve JPEG sıkıştırması.
- Checkmark: UNIX ve Windows ortamlarında MATLAB™ kullanılarak geliştirilen sayısal damgalama sistemlerini karşılaştırmada etkili bir yazılım olarak bilinir. Checkmark, Stirmark'da bulunmayan bazı ek saldırıları da içerir. Bu dönüşümler şöyledir: Dalgacık tabanlı sıkıştırma (JPEG2000), projektif dönüşümler, eğriltme, kopyalama, Template çıkarma, gürültü yok etme, algısal düzenlemenin ardından gürültü yok etme, doğrusal olmayan satır-sütun çıkartma, Collage saldırısı.
- Certimark: Görsel bileşenlerin damgalanması ve damgalama algoritmalarının sertifikasyon işlemi için geliştirilmiş olan yazılımdır.

BÖLÜM 3. NORMALLEŞTİRME VE AYRIK DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

3.1 Giriş

Bu bölümde, Moment Tabanlı Görüntü Normalleştirme (MTGN) ve İki Boyutlu Ayrık Dalgacık Dönüşümünün (2D-DWT) üstünlükleri birleştirilerek yeni bir sayısal görüntü damgalama algoritması geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, damga eklemek için geometrik bozunumlardan etkilenmeyen bir alt uzay kullanan yöntemler kümesine girmektedir. Ancak, önceki yöntemlerin tersine geliştirilen yöntem geometrik ve geometrik olmayan bozunumları birlikte ele almaktadır. Görüntü normalleştirme dönme, ölçekleme ve öteleme gibi geometrik saldırılara karşı dayanıklılığı sağlarken, insan görme sisteminin özelliklerini dikkate alarak damga ekleme amacıyla 2D-DWT uzayının seçilmesi geometrik olmayan bozunumlara karşı dayanıklılığı vermektedir. İlk önce, damgalanacak görüntü normalleştirilir. Daha sonra, [17]'de açıklandığı gibi, damga normalleştirilmiş görüntünün bir seviyeli dalgacık dönüşümündeki üç detay altbant katsayılarına eklenir. Ancak, [17]'deki yöntemin damga yükünün (veya eşdeğer olarak kapasitesinin) bir bit olduğuna dikkat ediniz. Tez kapsamında bu yöntemin kapasitesini bir bitten daha fazla yapmak için gerekli değişiklikler yapılmıştır. Son olarak ters ayrık dalgacık dönüşümü ve ters normalleştirme işlemleri arka arkaya uygulanarak damgalı görüntü elde edilmiş olur. Kullanılan yöntemin birçok görüntü işleme uygulamalarına karşı dayanıklı ve literatürde karşılaştırma amacıyla sıklıkla kullanılan görüntü damgalama algoritmalarından üstünlüğü bilgisayar simülasyonları aracılığıyla gösterilmiştir. Ayrıca, yöntemin uygulanması kolaydır ve gerçek zaman uygulamalarına uygundur.

Bölüm aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Çalışmayı kendi kendine yeterli yapmak ve tezin geri kalan kısmına altyapı oluşturmak amacıyla MTGN ve 2-D DWT hakkında özet bilgi Kısım 3.2'de verilmiştir. Sunulan yöntemin detayları Kısım 3.3'de

anlatılmıştır. Kısım 3.4'de, yöntemin çeşitli saldırılara karşı dayanıklılığı araştırılmış ve performansı farklı iki yöntemle karşılaştırılmıştır. Son olarak, Kısım 3.5'de çalışmanın en önemli gözlemlerini vurgulayan özet yapılmış ve olası araştırma konuları listelenmiştir.

3.2. Altyapı

3.2.1. Moment tabanlı görüntü normalleştirme

Normalleştirme işlemine verilen nesneyi veya ilgili görüntüyü tanımlayan fonksiyon parametreleri olarak adlandırılan özel parametreler seçilerek başlanır. Fonksiyon parametreleri momentler, Fourier katsayıları, sıralı bir noktalar kümesinin koordinatları veya nesneyi tanımlayan diğer herhangi bir parametre olabilir. Değişmezler, bir dönüşüm sonucunda sabit kalan niceliklerdir. Bu nedenle, değişmezleri oluşturmada temel amaç, dönüşümün fonksiyon parametreleri üzerindeki etkilerini gidermektir. Çok faydalı ve mantıklı bir yol, diğer bütün fonksiyon parametrelerinde dönüşüm parametrelerini yok etmek amacıyla seçilen bazı fonksiyon parametrelerini normalleştirmektir [61].

Bir örnekle konuyu açıklamaya çalışalım. u ve v fonksiyonları ξ_1, \dots, ξ_n parametrelerine bağlı bir dönüşüm kümesi T 'yi belirtmek ve $x' = u(x, y, \xi_1, \dots, \xi_n), y' = v(x, y, \xi_1, \dots, \xi_n)$ olmak üzere, $(x, y) \rightarrow (x', y')$ ile verilen ilişki \mathbb{R}^2 'den \mathbb{R}^2 'ye bir dönüşüm olsun $(f(u'(x', y', \xi_1, \dots, \xi_n), v'(x', y', \xi_1, \dots, \xi_n))) = f(x, y)$ ile tanımlanan ters dönüşümler u' ve v' 'nin bulunabileceği varsayılmaktadır). Normalleştirme yönteminin uygulama aralığını iki boyutlu fonksiyonlar durumuna sınırlı olmadığını belirtmekte fayda vardır. Verilen örnek sadece açıklama amacıyla ele alınmıştır.

Örneğin, iki-boyutlu parçalı sürekli $f(x, y)$ fonksiyonları için bir değişmez, $I_k[f'] = I_k[f]$ eşitliğini sağlayan karmaşık değerli bir I fonksiyoneliidir. $k=0,1,\dots$, için bir değişmezler kümesi elde ederiz.

Aşağıda, değişmezleri oluşturmada normalleştirme yöntemini açıklayacağız. Normalleştirme yöntemi dört adımdan oluşmaktadır. Yöntemi göstermek ve her adımı açık yapmak amacıyla, $p, q = 0, 1, \dots, \infty$ için,

$$m_{p,q} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (3.1)$$

ile tanımlanan mutlak momentlerden başlayarak ötelemeden bağımsız merkezi momentlerin oluşturulmasını çok kolay ve iyi bilinen bir örnek olarak göstereceğiz.

1) Fonksiyon Tanımı. Değişmezlerin oluşturulmasına başlamak için fonksiyonu tanımlayan (bir Γ kümesi oluşturan) uygun olarak seçilmiş fonksiyon parametreleri $\gamma_{k,l}$ seçilir. Fonksiyon parametrelerinin sayısı dönüşüm parametrelerinin sayısından büyük olmalıdır.

Örnek. Mutlak momentler $m_{p,q}$, $f(x, y)$ fonksiyonunu tek olarak tanımlamak için kullanılacak parametrelerdir.

2) Dönüşüm. Uygun $G_{k,l}$ fonksiyonları tanımlanarak,

$$\gamma'_{k,l} = G_{k,l}(\Gamma, \xi_1, \dots, \xi_n); \quad k, l = -\infty, \dots, \infty \quad (3.2)$$

elde etmek için fonksiyon parametreleri dönüştürülür. Dönüşüm parametreleri ve dönüşmemiş fonksiyon parametreleri cinsinden dönüşüm fonksiyon parametreleri bulunabilirse, dördüncü adımda elde edilen değişmezler açık halde olacaktır. Böyle $G_{k,l}$ fonksiyonlarının bulunması değişmezlerin çıkartılmasında genellikle temel problemdir. Burada verilen tüm örneklerde böyle fonksiyonları belirlemek mümkündür. Bu mümkün olmadığında, Adım 3'deki dönüşüm parametrelerini belirlemek için sayısal yöntemler kullanılabilir.

Örnek. $x' = x + a$ ve $y' = y + b$ ile verilen öteleme dönüşümü durumunda, dönüşüm momentleri $m'_{p,q}$ ($p, q = 0, 1, \dots, \infty$ için), dönüşmemiş momentler $m_{i,j}$ ve dönüşüm parametreleri a, b cinsinden,

$$m'_{pq} = \sum_i \sum_j \binom{p}{i} \binom{q}{j} a^{p-1} b^{q-j} m_{i,j} \quad (3.3)$$

olarak verilir.

3) Dönüşüm Parametrelerinin Gösterimi. C , bir sabitler kümesi olmak üzere,

$$\xi_1 = \hat{\xi}_1(\Gamma, C), \dots, \xi_n = \hat{\xi}_n(\Gamma, C) \quad (3.4)$$

ile verilen dönüştürülmüş fonksiyon parametrelerinden bağımsız olarak dönüşüm parametrelerini belirlemek için, dönüştürülmüş bazı fonksiyon parametreleri $\gamma'_{k,l}^{(1)}, \dots, \gamma'_{k,l}^{(n)}$ uygun sabitler $c_i \in C$ ile normalleştirildikten sonra n denklemden oluşan bir sistem (n dönüşüm parametrelerinin sayısına eşittir) çözümlenmelidir,

$$\gamma'_{k,l}^{(1)} = G_{k,l}^{(1)}(\Gamma, \xi_1, \dots, \xi_n); k, l = c_1 \quad (3.5)$$

⋮

$$\gamma'_{k,l}^{(n)} = G_{k,l}^{(n)}(\Gamma, \xi_1, \dots, \xi_n); k, l = c_n \quad (3.6)$$

c_i katsayıları sayısal hesap yöntemine ve uygulamaya bağlı olarak seçilir.

Örnek. m'_{10} ve m'_{01} momentleri sıfıra normalleştirmeye uygun olup, a ve b parametreleri yok edilmiş olur.

$$m'_{10} = m_{10} + am_{00} = 0, \quad m'_{01} = m_{01} + bm_{00} = 0, \quad (3.7)$$

Denklem (3.7) a ve b için çözümlerse

$$a = -\frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad b = -\frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3.8)$$

elde edilir.

4) Değişmezlerin Hesaplanması. Adım 2’de elde edilen dönüşüm fonksiyonu parametreleri Adım 3’de bulunan dönüşüm parametreleriyle değiştirilir. Elde edilen değerler,

$$\gamma''_{k,l} = G_{k,l} \left(\Gamma, \hat{\xi}_1(\Gamma, C), \dots, \hat{\xi}_n(\Gamma, C) \right) \quad (3.9)$$

ile verilen dönüşümler kümesi için mutlak değişmezlerdir.

Örnek. $p, q = 0, \dots, \infty$ için

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(x - \frac{m_{10}}{m_{00}} \right)^p \left(y - \frac{m_{01}}{m_{00}} \right)^q f(x, y) dx dy \quad (3.10)$$

eşitliği ile tanımlanan merkezi momentler ötelemeden bağımsızdır.

Katsayılar $\gamma'^{(1)}_{k,l}, \dots, \gamma'^{(n)}_{k,l}$, in ve normalleştirme yönteminin keyfi seçilmesinden dolayı değişmezler kümesini oluşturmada çeşitli olasılıklar vardır. Ancak seçilen yöntem, hangi değişmez kümenin özellikle faydalı olduğu ve bu değişmezler kümesinin hangi özelliklere sahip olmasının istendiği (dayanıklılık, tamlık, standart konum v.b.) uygulamaya bağlıdır.

3.2.1.1. İlgin dönüşümler için normalleştirilmiş moment değişmezleri

Bu kısımda, ilgin dönüşümler için değişmezleri bulmak amacıyla momentler fonksiyon parametreleri olarak kullanılmıştır. Hesaplamaları kolaylaştırmada ilgin dönüşüm matrisinin ayrıştırılabilirliğinden faydalanılmıştır. Bir ilgin dönüşüm matrisini farklı şekillerde ayrıştırmak mümkündür. Kullanılan ayrıştırmaya bağlı olarak farklı değişmezler elde edilir. Örneğin, ilgin dönüşüm matrisinin [62] ve [63]’de önerilen

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

ile verilen ayrıştırması, bilinen bazı kararlılık problemleriyle nedeniyle tercih edilmemektedir. Tezde, [64]'de sunulan ve iyi kararlılık özelliklerine sahip

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

ayrıştırması kullanılmıştır. Normalleştirme yönteminin ard arda uygulanmasıyla ilgin dönüşüm grubunun alt kümeleri ve sonuç olarak genel ilgin dönüşümler için moment değişmezleri oluşturulur. Görüntü normalleştirme için gerekli olan görüntü momentleri ve geometrik ilgin dönüşümlerin altyapısı ile başlayalım.

A. Görüntü Momentleri ve İlgil Dönüşümler: $f(x, y)$, $M \times N$ boyutunda sayısal bir görüntü olsun. Görüntünün mutlak momentleri $m_{p,q}$ ve merkezi momentleri μ_{pq} , $p, q = 0, 1, 2, \dots$

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3.13)$$

olmak üzere, sırasıyla

$$m_{p,q} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} x^p y^q f(x, y) \quad (3.14)$$

ve

$$\mu_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (3.15)$$

eşitlikleriyle tanımlanır.

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - d \quad (3.16)$$

olmak üzere, $g(x, y) = f(x_a, y_a)$ olacak şekilde bir $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ matrisi ve bir $d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}$ vektörü varsa, $g(x, y)$ $f(x, y)$ 'nin ilgin olarak dönüştürülmüş halidir denir.

Dönme, öteleme ve ölçeklemenin ilgin dönüşümlerin özel durumları olduğu açıkça görülmektedir. İlgin dönüşümlerin diğer örnekleri: 1) $A = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \triangleq A_x$ ile gösterilen x yönünde germe, 2) $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix} \triangleq A_y$ ile gösterilen y yönünde germe ve 3) $A = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix} \triangleq A_s$ ile gösterilen x ve y yönlerinde ölçeklemedir. Ayrıca, $a_{11} \neq 0$ ve $\det(A) \neq 0$ koşulları sağlandığında herhangi bir ilgin dönüşüm A 'nın yukarıda verilen üç dönüşümün birleşimi olarak $A = A_s \cdot A_y \cdot A_x$ şeklinde ayrıştırılabileceği gösterilebilir.

Bir görüntünün mutlak ve merkezi momentleri ile ilgin olarak dönüştürülmüş halinin mutlak ve merkezi momentleri arasındaki ilişki aşağıdaki önermede verilmiştir.

Önerme : $g(x, y)$, $f(x, y)$ 'den ilgin matris $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ ve $d = 0$ kullanılarak türetilmiş olsun. dönüştürülmüş hali ise, $g(x, y)$ 'nin momentleri m'_{pq}, μ'_{pq} ve $f(x, y)$ 'nin momentleri m_{pq}, μ_{pq} arasında aşağıdaki verilen eşitlikler geçerlidir:

$$m'_{pq} = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q \binom{p}{i} \binom{q}{j} a_{11}^i a_{12}^{p-i} a_{21}^j a_{22}^{q-j} m_{i+j, p-i+q-j} \quad (3.17)$$

$$\mu'_{pq} = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q \binom{p}{i} \binom{q}{j} a_{11}^i a_{12}^{p-i} a_{21}^j a_{22}^{q-j} \mu_{i+j, p-i+q-j} \quad (3.18)$$

B. Görüntü Normalleştirme: Bu kısımda, ilgin dönüşüm ile modellenebilen geometrik bozunumlar için dayanıklılık sağlayan normalleştirme işlemi tanıtılacaktır. Momentler kullanarak görüntü normalleştirme kavramı görüntü tanıma problemlerinde iyi bilinmektedir. Aşağıda, önceden tanımlanmış moment ölçütlerini sağlayan bir görüntü oluşturmak amacıyla bir görüntüye normalleştirme işleminin nasıl uygulandığı tartışılmıştır. Normalleştirme işlemi verilen bir $f(x, y)$ görüntüsü için aşağıdaki adımlardan oluşur.

1) $f(x, y)$ görüntüsü merkezlenir; Bu işlem, m_{10} , m_{01} ve m_{00} $f(x, y)$ 'nin Denklem (3.14)'de tanımlanan momentleri ve

$$d_1 = -\frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad d_2 = -\frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3.19)$$

olmak üzere, Denklem (3.16)'deki A matrisinin $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ve d vektörünün $d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}$ olarak seçilmesiyle sağlanır. Bu adım sonucunda ötelemeden bağımsızlık elde edilir. Merkezlenmiş görüntü $f_1(x, y)$ ile belirtilsin.

2) $f_1(x, y)$ 'ye $A_x = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ matrisi kullanılarak x -yönünde germe dönüşümü uygulanır. β parametresi, $f_2(x, y) \triangleq A_x[f_1(x, y)]$ ile belirtilen sonuç görüntüsü $\mu_{30}^{(2)} = 0$ eşitliğini sağlayacak şekilde seçilir.

3) $f_2(x, y)$ 'ye $A_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix}$ matrisi kullanılarak y -yönünde germe dönüşümü uygulanır. γ parametresi, $f_3(x, y) \triangleq A_y[f_2(x, y)]$ ile belirtilen sonuç görüntüsü $\mu_{11}^{(3)} = 0$ eşitliğini sağlayacak şekilde seçilir.

4) $f_3(x, y)$ 'ye $A_s = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix}$ matrisi kullanılarak x ve y -yönlerinde ölçekleme dönüşümü uygulanır. α ve δ parametreleri, $f_4(x, y) \triangleq A_s[f_3(x, y)]$ ile gösterilen sonuç görüntüsü 1) önceden tanımlanmış bir boyuta sahip olacak, 2) $\mu_{50}^{(4)} > 0$ ve $\mu_{05}^{(4)} > 0$ eşitsizliklerini sağlayacak şekilde seçilir.

İşlemler sonucunda elde edilen $f_4(x, y)$ görüntüsü, damga ekleme ve çıkarmanın yapılacağı normalleştirilmiş görüntüdür. Normalleştirme işlemini sezgisel olarak şöyle açıklamak da mümkündür. Genel bir ilgin dönüşüm saldırısı öteleme, x ve y -yönlerinde germe ile x ve y -yönlerinde ölçeklemeye ayrıştırılabilir. Normalleştirme işlemindeki dört adım, bu bozunumları yok etmek için tasarlanır. Özetleyecek olursak, adım 1) öteleme etkisini, adım 2) ve 3) x ve y -yönlerinde germeyi, adım 4) de ölçekleme etkisini gidermektedir.. Normalleştirme işlemindeki her adımın tersinin alınabileceğine dikkat edilmelidir. Bu, damga ekleme işleminden sonra görüntünün orijinal boyutna geri getirilmesine imkan verir.

Yukarıdaki işlemleri gerçekleştirebilmek için A_x, A_y ve A_s dönüşümlerini belirleyen parametrelerin bilinmesi gereklidir. Parametrelerin hesaplanmasını göstermeden önce bir görüntü ile ilgin olarak dönüştürülmüş halinin aynı normalleştirilmiş görüntüye sahip olduğunu veren aşağıdaki teoremi belirtmekte fayda vardır.

Teorem 1: Bir $f(x, y)$ görüntüsü ve onun ilgin olarak dönüştürülmüş hali aynı normalleştirilmiş görüntüye sahiptir.

Teorem 1'in ispatı Ek A'da verilmiştir. Şekil 3.1, bu işlemlerin gerçekten de geometrik dönüşümlerden bağımsızlığı sağlamada kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 3.1 (a)'da gösterilen Lena görüntüsüne bazı geometrik bozunumlar uygulanarak Şekil 3.1 (b)'de gösterilen bozulmuş görüntü elde edilmiştir. Daha sonra, her iki görüntü de normalleştirilmiştir. Şekil 3.1 (c)'den de görüleceği gibi, bozulmuş ve orijinal görüntülerin normalleştirilmelerinden elde edilen görüntüler normalleştirildiklerinde aynı görüntüyü vermiştir. Burada sadece bir örnek verilmiştir. Benzer sonuç, değişik görüntüler ve değişik bozunumlar uygulandığında da elde edilmiştir.

C. Dönüşüm Parametrelerinin Belirlenmesi: Bu kısımda A_x, A_s ve A_y dönüşümleriyle ilgili olan parametrelerin nasıl belirlendiği gösterilecektir.

$$1) \quad x \text{ yönünde germe matrisi } A_x = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$\mu_{pq}^{(1)}$ $f_1(x, y)$ 'nin merkezi momentleri olmak üzere, Denklem (3.18)'den

$$\mu_{30}^{(2)} = \mu_{30}^{(1)} + 3\beta\mu_{21}^{(1)} + 3\beta^2\mu_{12}^{(1)} + \beta^3\mu_{03}^{(1)} \quad (3.20)$$

elde ederiz. β parametresi Denklem (3.20) sıfıra eşitlenerek belirlenir. $\mu_{03}^{(1)} \neq 0$ durumunda (çoğu görüntü için bu durum geçerlidir), Denklem (3.20)'nin üç kökü olabilir. Köklerle ilgili iki durum vardır: 1) köklerden biri gerçek ve diğer ikisi karmaşıktır ve 2) bütün kökler gerçeldir. İlk durumda β 'yı gerçek kök olarak, ikinci durumda β 'yı üç gerçekte kökün ortancası (medyanı) olarak seçeriz. Ek-A'da



Şekil 3.1. Moment tabanlı görüntü normalleştirilmesinin etkisi. (a) Orijinal Lena görüntüsü, (b) bozulmuş Lena görüntüsü, (c) (a) ve (b)'deki görüntülerin normalleştirilmesinden elde edilen görüntü

gösterildiği gibi, β 'yı bu şekilde seçmek normalleştirilmiş görüntünün tekliliğini sağlar.

Beklenmedik bazı koşullar altında Denklem (3.20)'in köklerinin sayısı değişebilir. Örneğin, Denklem (3.20)'deki bütün momentler sıfır olduğunda sonsuz sayıda çözüm olacaktır. Bu durum, disk veya halka gibi dairesel simetrik görüntü durumlarında gerçekleşebilir. Genel normalleştirme işleminin detayları için [60]'a bakılabilir.

$$2) \quad y \text{ yönünde germe matrisi } A_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix}.$$

Denklem (3.18)'den

$$\mu_{11}^{(3)} = \gamma \mu_{20}^{(2)} + \mu_{11}^{(2)} \quad (3.21)$$

eşitliği yazılabilir. γ parametresi, Denklem (3.21) sıfıra eşitlenerek belirlenir ve

$$\gamma = -\frac{\mu_{11}^{(2)}}{\mu_{20}^{(2)}} \quad (3.22)$$

olarak elde edilir. Böylece, γ için tek bir çözümü vardır.

$$3) \quad \text{Ölçekleme matrisi } A_s = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix}.$$

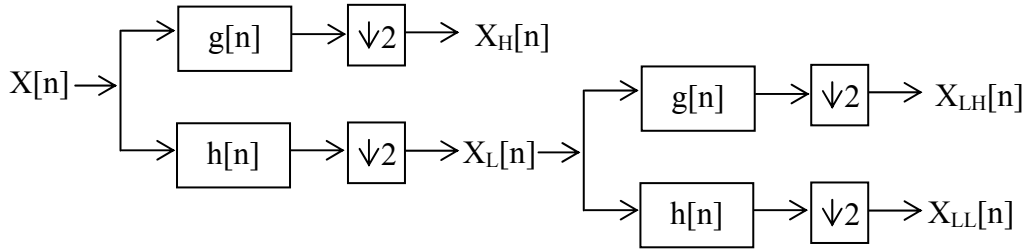
Ölçekleme parametreleri α ve δ 'nın değerleri, $f_3(x, y)$ görüntüsünün dikey ve yatay yönlerde önceden belirlenmiş standart bir boyuta ölçeklendirilmesiyle belirlenir. Değerlerin pozitif veya negatif oldukları, (yatay ve dikey yönlerde aynalanarak değiştirilebilen) $\mu_{50}^{(4)}$ ve $\mu_{05}^{(4)}$ pozitif olacak şekilde belirlenir.

3.2.2. Ayrık dalgacık dönüşümü

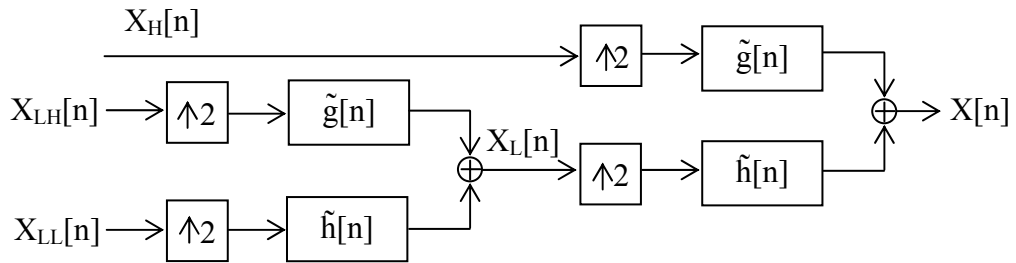
Şekil 3.2, bir boyutlu (1-D) bir ayrık-zaman işareti $x[n]$ 'nin iki seviyeli DWT'sinin nasıl elde edildiğini göstermektedir. Giriş işareti, yüksek geçiren ve alçak geçiren $g[n]$ ve $h[n]$ analiz filtrelerine uygulanır. Filtrelerin çıkışı iki ile alt-örnekleyerek $x_H[n]$ ve $x_L[n]$ ile verilen dönüştürülmüş işaretler elde edilir. İşlem bu aşamada durdurulursa $x[n]$ 'nin bir seviyeli DWT'si elde edilmiş olur. $x[n]$ 'e uygulanan ayrıştırma işlemi ikinci bir analiz filtre çifti kullanılarak $x_L[n]$ için tekrarlanırsa Şekil 3.2'de gösterildiği gibi $x_H[n]$, $x_{LH}[n]$ ve $x_{LL}[n]$ işaretlerinden oluşan iki seviyeli DWT elde edilir. Bu işlem gerektiği kadar tekrarlanabilir. Filtreleme ve alt örnekleme kaç kez yapıldığı dönüşümün seviyesini belirler.

Şekil 3.3 1-D ayrık-zaman $x[n]$ işaretinin iki seviyeli DWT'sinden nasıl geri elde edildiğini açıklamaktadır. $x_{LH}[n]$ ve $x_{LL}[n]$ işaretleri yüksek geçiren ve alçak geçiren sentez filtreleri $\tilde{g}[n]$ ve $\tilde{h}[n]$ 'den geçirilir ve filtrelerin çıkışları iki ile üst-örnekleme. Üst-örnekleme filtrelerinin çıkışındaki işaretler toplanarak $x_L[n]$ oluşturulur. Bu işlem $x[n]$ 'yi elde etmek için ikinci bir sentez filtre çifti kullanılarak $x_H[n]$ ve $x_L[n]$ işaretleri için tekrarlanır. Sayısal görüntüler gibi iki boyutlu işaretlerin DWT'sinin hesaplanması için 1-D DWT yatay ve dikey yönlerde arka arkaya uygulanır. Analiz ve sentez filtreleri iki boyutludur ve bir yerine iki üst indis yatay ve dikey yönleri göstermek için kullanılır. Ayrıca, alt-örnekleme ve üst-örnekleme her iki yönde de uygulanır. Sonuç olarak, her seviyede 1-D DWT durumunda iki altbant elde edilirken, 2-D DWT durumunda dört altbant elde edilir.

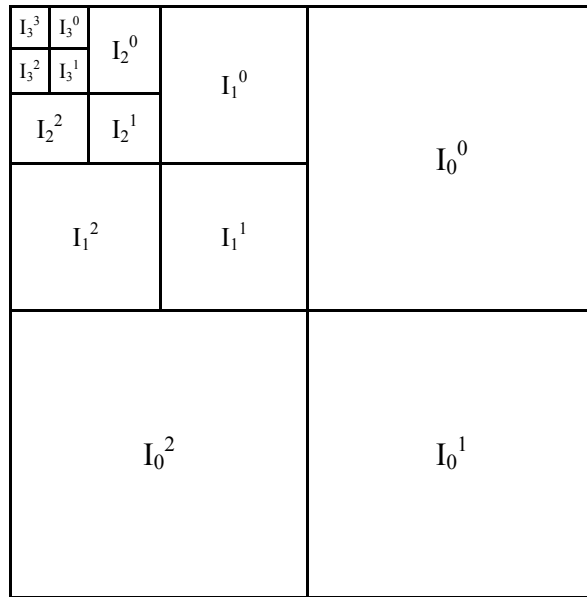
Bir görüntüye uygulanan 2-D filtreleme ve alt-örnekleme işlemlerinin sayısını belirtmek için *seviye* terimi kullanılacaktır. *Yön* terimi mümkün alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreleme kombinasyonunu belirtmektedir. Yön $\{0, 1, 2, 3\} = \{LH,$



Şekil 3.2. İki seviyeli 1-D Ayrık Dalgacık Dönüşümü



Şekil 3.3. İki seviyeli 1-D Ters Ayrık Dalgacık Dönüşümü



Şekil 3.4. Bir görüntünün dört seviyeli ayrık dalgacık dönüşümündeki altbantlar (IEEE'nin izni ile [61]'den uyarlanmıştır)

HH, HL, LL olarak belirtilir. İlk terim yatay yönde, ikinci terim ise dikey yönde uygulanan filtre türünü belirtir. I_l^θ çözünürlük seviyesi l 'de $\theta \in \{0,1,2,3\}$ yönünde altbandı belirtsin. Bu notasyon kullanıldığında, Şekil 3.4 bir görüntünün dört seviyeli 2-D DWT'sini göstermektedir.

3.2.3. DWT katsayılarının algısal ağırlığı

Damgayı, görüntüye algılanamayacak ve maksimum enerjiye sahip olacak şekilde eklemek için, DWT uzayında ağırlık fonksiyonu $w^\theta(i, j)$ insan görme sisteminin özellikleri göz önünde bulundurularak ayarlanır. Lewis ve Knowles sıkıştırma amacıyla DWT katsayılarını niceleme problemine bir çözüm geliştirmişler ve katsayıların niceleme adımını gözün yerel gürültü algılamasına göre ayarlamayı önermişlerdir [65]. Aşağıdaki gözlemler dikkate alınarak, Lewis ve Knowles tarafından önerilen modelde gerekli değişiklikler yapıp insan görme sisteminin davranışının damgalama problemine daha uyumlu olması amaçlanmıştır:

- Göz, yüksek çözünürlüklü ve 45° yöne sahip (Şekil 3.4'deki $\theta=1$ bantları) bantlarda gürültüye daha az duyarlıdır.
- Göz, parlaklığın yüksek veya düşük olduğu görüntü bölgelerinde gürültüye daha az duyarlıdır.
- Göz dokulu bölgelerde gürültüye daha az duyarlıdır, fakat dokulu bölgeler içinde kenarlara yakın yerlerde daha çok duyarlıdır.

Yukarıdaki gözlemlere dayalı olarak, her katsayının niceleme adımını üç terimin ağırlıklı çarpımı olarak

$$q_l^\theta(i, j) = \theta(l, \theta)A(l, i, j)E(l, i, j)^{0.2} \quad (3.23)$$

eşitliğini kullanarak hesaplarız. Denklem (3.23)'deki üç terimin anlamı aşağıda açıklanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, damgayı sadece ilk seviyeye eklemeye karar verdiğimizde dikkat ediniz. Bu karara karşın, $w_l^\theta(i, j)$ 'nin davranışı $l \neq 0$ için de incelenmiştir. Banda bağlı olarak, gürültüye duyarlılığın nasıl değiştiğini hesaba katmak için

$$\theta(l, \theta) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{2}, \\ 1, \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \theta = 1 \\ \text{aksi halde} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{ll} (1.00, & l = 0) \\ 0.32, & l = 1 \\ 0.16 & l = 2 \\ 0.10 & l = 3 \end{array} \right\} \quad (3.24)$$

yazarız. İkinci terim, görüntünün alçak geçiren filtreden geçirilmiş halinin grilik seviyesi değerlerine dayalı olarak parlaklığı dikkate alır. Lewis ve Knowles, yüksek parlaklı bölgelerde gözün daha az duyarlı olduğunu varsaydığından bu terimi

$$L(l, i, j) = \frac{1}{256} I_3^3 \left(1 + \left\lfloor \frac{i}{2^{3-l}} \right\rfloor, 1 + \left\lfloor \frac{j}{2^{3-l}} \right\rfloor \right) \quad (3.25)$$

olmak üzere,

$$A(l, i, j) = 1 + L(l, i, j) \quad (3.26)$$

eşitliğinden hesaplamayı önermişlerdir. İnsan gözünün çok koyu bölgelerde de daha az duyarlı olduğu gözlemine dayanarak bu terimi aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz:

$$L'(l, i, j) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 - L(l, i, j) & L(l, i, j) < 0.5 \\ L(l, i, j) & \text{aksi halde} \end{array} \right\} \quad (3.27)$$

Son olarak, üçüncü terim bir pikselin komşuluğundaki doku değişiminin bir ölçütünü verir ve

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(l, i, j) &= \sum_{k=0}^{3-l} \frac{1}{16^k} \sum_{\theta=0}^2 \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \left[I_{k+l}^{\theta} \left(y + \frac{i}{2^k}, x + \frac{j}{2^k} \right) \right]^2 \\ &\cdot \text{var} \left\{ I_3^3 \left(1 + y + \frac{i}{2^{3-l}}, 1 + x + \frac{j}{2^{3-l}} \right) \right\}_{\substack{x=0,1 \\ y=0,1}} \end{aligned} \quad (3.28)$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu terim, iki ifadenin çarpımından oluşur: ilk ifade tüm detay altbantlardaki DWT katsayılarının yerel ortalaması, ikinci ifade alçak geçiren altbandın yerel varyansıdır. Bu ifadelerin her ikisi de pikselin konumu (i, j) 'nin 2x2 boyutlarında küçük bir komşuluğunda hesaplanır. İlk ifade kenardan uzaklığı,

ikincisi ise dokuyu temsil edeceğinden, gözün dokulu bölgelere daha az duyarlı ve kenarlara yakın bölgelerde daha çok duyarlı olduğu gözlemine göre iki ifadenin çarpılmasına karar verilmiştir (Lewis ve Knowles iki ifadenin toplanmasını önermiştir).

(i,j) konumundaki bir DWT katsayısı için $q_l^\theta(i,j)$ 'nin nicemleme adımı olarak seçilmesi $q_l^\theta(i,j)/2$ 'den daha düşük değerli bozunumların algılanamaz olduğunun varsayılması anlamına gelir. O halde ağırlık fonksiyonunu, damganın ekleneceği katsayının nicemleme adımına eşit olan

$$w^\theta(i,j) = q_0^\theta(i,j)/2 \quad (3.29)$$

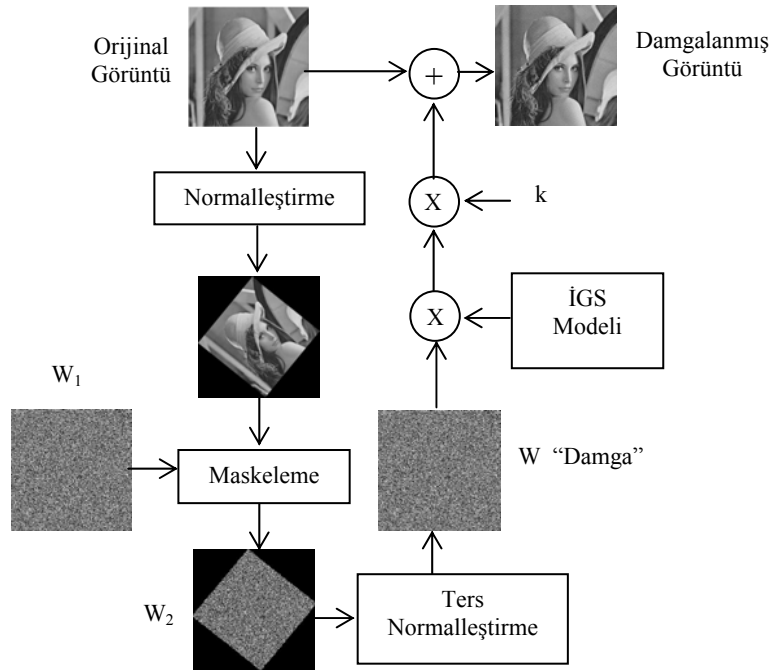
olarak seçeriz. Yukarıdaki analiz, damganın ± 1 değerlerinden oluştuğu varsayılarak yapılmıştır. Bu yaklaşım, DWT katsayılarına algılanmayan en büyük damga seviyesinin eklenmesine imkan verir.

3.3. Önerilen Yöntem

3.3.1. Damga ekleme

Kısım 3.2.1'de açıklanan moment tabanlı görüntü normalleştirme işlemi, damgaya uygulanabileceği gibi damga eklenecek görüntüye de uygulanabilir. Her bir duruma karşılık gelen damgalama algoritmalarının mekanizması sırasıyla Şekil 3.5 ve 3.6'da gösterilmiştir. Yapılan deneylerde, Şekil 3.6'da gösterilen ilk yöntem uygulandığında, yüksek İşaret-Gürültü Oranlarında (SNR) bile damganın görünür olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle Şekil 3.6'da blok diyagram gösterilimi verilen ikinci yöntem tercih edilmiştir. Damga eklenecek görüntünün boyutunun $2M \times 2N$ ve damgalama kapasitesinin P olduğu varsayılarak damga ekleme işlemindeki adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- $f_n(x_m, y_n)$ ile gösterilen normalleştirilmiş görüntüyü elde etmek için Kısım 3.2.1'de anlatılan işlem kullanılarak damga eklenecek $f(x,y)$ görüntüsü normalleştirilir.



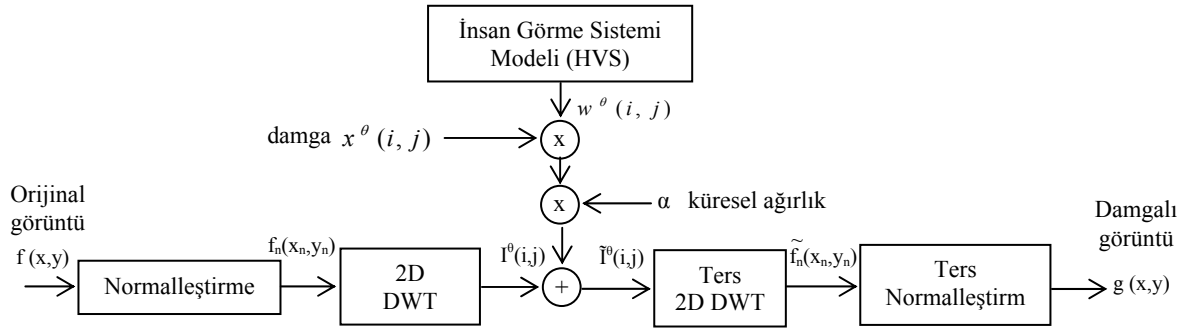
Şekil 3.5. Normalleştirmenin damgaya uyguladığı damgalama yönteminin blok diyagramı (IEEE'nin izni ile [54]'den uyarlanmıştır)

- $f_n(x_m, y_n)$ 'nin $I_0^\theta(i, j)$ ile gösterilen bir-seviyeli 2-D DWT'si hesaplanır.
- $K=1, \dots, P$ olmak üzere, $\theta=3$ için sıfır, $\theta=0, 1, 2$ için ± 1 değerlerinden oluşan $M \times N$ boyutlarında istatistiksel ilişkisiz $4P$ adet iki boyutlu sözde-rastgele $X_{0,k}^\theta(i, j)$ işaretleri üretilir.
- m_l damga işaretindeki l . bit (0 veya 1) olmak üzere,

$$X_0^\theta(i, j) = \sum_{k=0}^P (2m_k - 1) X_{0,k}^\theta(i, j) \quad (3.30)$$

eşitliği kullanılarak iki boyutlu damga işareti $X_0^\theta(i, j)$ oluşturulur.

- Damganın enerjisinin insan gözünün algılayamadığı konumlarda artırılmasına imkan veren maskeleye katsayıları $W_0^\theta(i, j)$ Kısım 3.2.3'de açıklandığı şekilde elde edilir.
- α damga işaretinin global enerjisini belirleyen bir katsayı olmak üzere, damga işareti $X_0^\theta(i, j)$ $\alpha W_0^\theta(i, j)$ ile çarpılır ve $\tilde{I}_0^\theta(i, j)$ ile belirtilen, normalleştirilmiş



Şekil 3.6. Normalleştirmenin orijinal görüntüye uygulandığı damgalama yönteminin blok diyagramı (önerilen yöntem)

damgalı görüntünün 2-D DWT katsayılarını oluşturmak için çarpım $I_0^\theta(i,j)$ 'ye eklenir.

- Normalleştirilmiş damgalı görüntü $\tilde{f}_n(x_n, y_n)$ elde etmek için $\tilde{I}^\theta(i,j)$ 'nin ters 2-D DWT'si hesaplanır.
- Damgalı görüntü $g(x,y)$ 'yi oluşturmak için $\tilde{f}_n(x_n, y_n)$ görüntüsüne ters normalleştirme uygulanır.

Yukarıdaki işlemin, damga eklenecek görüntünün birinci seviye detay altbant katsayılarının değiştirilmesine eşdeğer olduğuna dikkat ediniz. Dayanıklı ve algısal saydamlık gereksinimleri arasında en iyi dengeyi veren bu seçim detaylı simülasyon sonucunda belirlenmiştir. Şekil 3.7, önerilen yaklaşımla damga görünmezliğinin elde edildiğini göstermektedir. Orijinal görüntüsü ve damgalı kopyası arasındaki fark görüntüsünden orijinal görüntünün grilik seviyesinde ani değişimlerin olduğu bölgeler ve kenarlara damganın eklendiği açıkça görülmektedir. Diğer bir deyişle, maskeleme katsayılarının uygun seçilmesiyle, damganın enerjisi insan gözünün algılayamadığı yerlerde yüksek, diğer konumlarda ise düşük tutulmuştur. Damgalamada kullanılan normalleştirme işlemi için Kısım 3.2.1.1'de anlatılan ikinci ayrıştırma dayalı yöntem kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Damga görünmezliğinin gösterimi. (a) Orijinal görüntü, (b) damgalı görüntü, (c) orijinal ve damgalı görüntüler arasındaki farkın 8 ile çarpılmış hali.

3.3.2. Damga tespit etme

Damgalı görüntü $g(x,y)$ 'ye bir saldırı uygulandığını varsayalım. O halde damga çözücüyü $g(x,y)$ 'nin $\tilde{g}(x,y)$ ile belirtilen değişmiş bir hali uygulanacaktır. Başka seçenekler de mevcut olmasına karşın gerçekleştirilmesi kolay olduğundan bu tezde damga çözücü korelasyona dayalı bir çözücü olarak seçilmiştir. Damga, görüntüye normalleştirilmiş dalgacık uzayında eklendiğinden korelasyonlar aynı uzayda hesaplanmalıdır. Bu gözleme dayanarak, damga işaretinin k . biti aşağıda özetlenen adımlar uygulanarak tespit edilebilir:

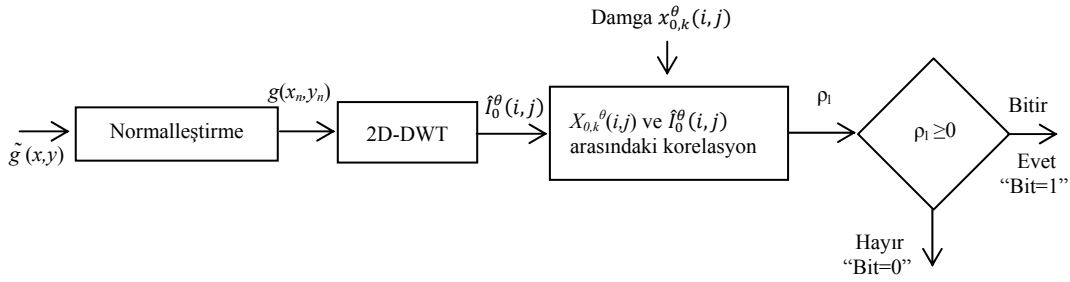
- $\tilde{g}(x,y)$ 'ye normalleştirme işlemi uygulanarak $\tilde{g}_n(x_n,y_n)$ elde edilir.
- $\tilde{g}_n(x_n,y_n)$ 'nin $\hat{I}_0^\theta(i,j)$ ile belirtilen bir seviyeli 2-D DWT'si hesaplanır.
- İki boyutlu sözde rastlantı k . damga işareti $x_{0,k}^\theta(i,j)$ ile $\hat{I}_0^\theta(i,j)$ arasındaki korelasyon ρ_k

$$\rho_k = \sum_{\theta=0}^2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{I}_0^\theta(i,j) x_{0,k}^\theta(i,j) \quad (3.31)$$

ilişkisinden hesaplanır. Daha sonra, damga

$$\hat{m}_k = \begin{cases} 1, & \rho_k > 0 \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.32)$$

eşitliğinden belirlenir.

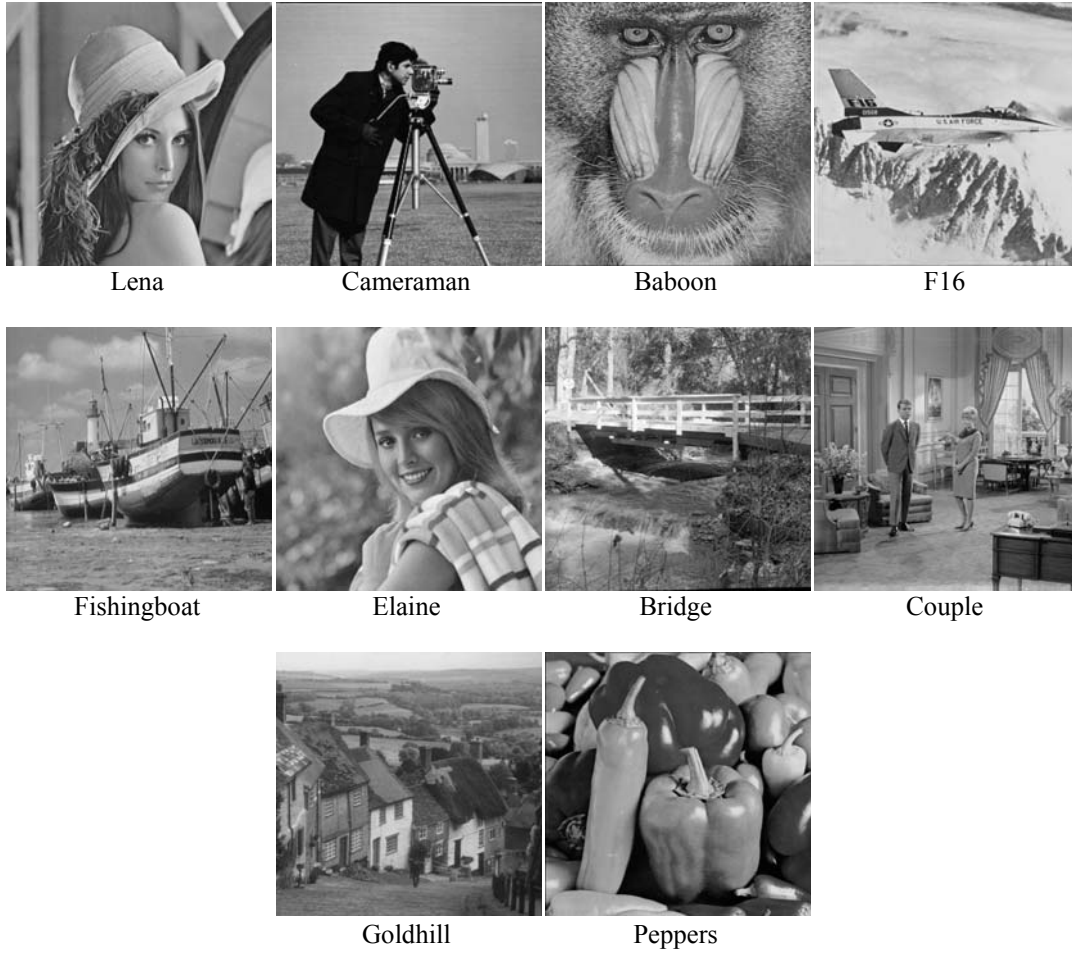


Şekil 3.8. Damga kod çözücünün blok diyagramı

Damga işaretindeki bütün bitler, Şekil 3.8’de gösterilen işlemler $k=1,2,\dots,P$ için tekrarlanarak tespit edilebilir. İstatistiksel olarak optimum bir damga çözücü elde etmek amacıyla her bit için hesaplanan korelasyon değeri sıfır yerine bir eşik değeri ile karşılaştırılabilir. Bir önceki kısımda açıklanan damga işaretinin oluşturulma kuralından dolayı önerilen yöntem için optimum eşik değerinin sıfıra eşit olduğu gösterilebilir. Damga çözme işleminin, sayısal haberleşme sistemlerindeki modülasyon için zıt kutuplu semboller kullanıldığında demodülasyon işlemine benzediğine dikkat ediniz. Zıt kutuplu semboller durumunda, minimum bit hata olasılığı için korelasyonun sıfır eşik değeri ile karşılaştırılması gerektiği haberleşme kitaplarında gösterilmiştir [66]. Benzer bir analiz damga çözme durumunda da yapılabilir. Adımlar benzer olduğundan analiz ihmal edilmiştir.

3.4. Simülasyon Sonuçları

Önerilen yöntemin dayanıklılığını değerlendirmek için damgalı görüntüler üzerinde birtakım saldırılar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Şekil 3.9’de gösterilen, Baboon, Boats, Bridge, Cameraman, Couple, Elaine, Airplane, Goldhill, Lena ve Peppers’den oluşan 512×512 boyutlarında on adet test görüntü kümesine 64 bitlik bir damga, önerilen yöntem, çalışmanın bundan sonraki kısmında DWT olarak gösterilecek [17]’de verilen algoritma ve kısaca DCT olarak belirtilecek [54]’de açıklanan metot kullanılarak 35 dB PSNR değerinde eklenmiştir. [17] ve [54]’de verilen algoritmaların karşılaştırma amacıyla tercih edilmesinin nedeni, yazarların bu algoritmaların çeşitli damgalama algoritmaları arasında en iyi performans verdiğini belirtmesidir. Ayrıca test görüntüleri sabit arka plan, karmaşık dokulu geniş alanlar,



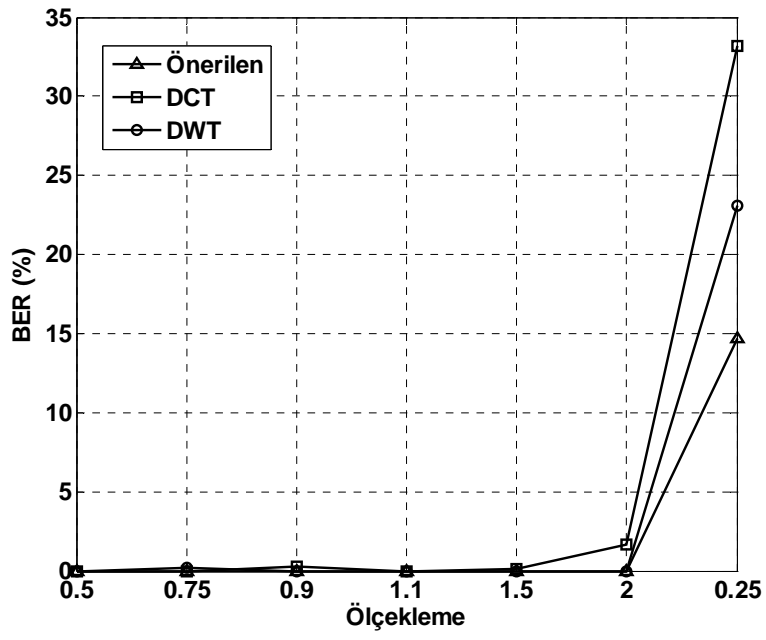
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan on görüntü

sabit ve yüksek kontrastlı bölgeler, parlaklık değişimleri ve sabit bölgeler gibi farklı karakteristiklere sahip çeşitli görüntüleri temsil edecek şekilde seçilmiştir. Daha sonra, Tablo 3.1’de sıralanan saldırılar damgalı görüntüyü bozmak için kullanılmıştır. Tablo 3.1’de, satır ve sütun çıkarma durumunda sayı çifti çıkarılan satır ve sütun sayısını; bakış açısı değiştirme ve germe durumundaki sayı çifti ise yatay ve dikey yöndeki sırasıyla ölçekleme ve germe miktarını belirtmektedir. JPEG sıkıştırması durumunda kalite faktörü büyüdükçe sıkıştırma oranı azalmaktadır. Son olarak, damga işaretindeki bitleri tespit etmek için önerilen yöntem, DCT yöntemi ve DWT algoritması gerçekleştirilmiştir. Üç yaklaşım için her bir saldırı durumunda yanlış olarak tespit edilen bit sayısının eklenen toplam bit sayısına oranı olarak

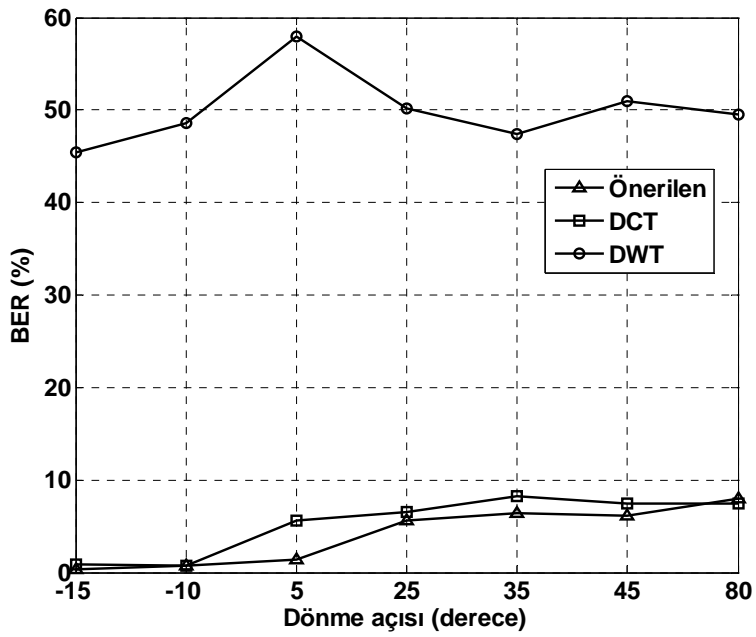
Tablo 3.1. Önerilen damgalama yönteminin performansını göstermek için simülasyonlarda kullanılan saldırılar

| Saldırı | Açıklama |
|------------------------|--|
| Satır-Sütun Çıkarma | (1,1), (1,5), (5,1), (5,17), (17,5) |
| Ölçekleme | 0.5, 0.75, 0.9, 1.1, 1.5, 2, 0.25 |
| Bakış Açısı Değiştirme | (.8,1), (.9,1), (1.1,1), (1.2,1), (1,.8), (1,.9), (1,1.1), (1,1.2) |
| Döndürme | -15°, -10°, 5°, 25°, 35°, 45°, 80° |
| Germe | (0, %1), (0,%5), (%1,0), (%5,0), (%1,%1), (%5,%5) |
| İlgin Dönüşümler | Maskeler: $\begin{bmatrix} 1.1 & 0.2 \\ -0.1 & 0.9 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 0.9 & -0.2 \\ 0.1 & 1.2 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} -1.01 & -0.2 \\ -0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$ |
| Aynalama | Yatay, Dikey |
| Medyan Filtreleme | Çekirdek boyutları: 2x2, 3x3, 4x4 |
| Filtreleme | Maskeler: $\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ |
| JPEG Sıkıştırma | Kalite Faktörü: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |
| JPEG2000 Sıkıştırma | Parametreler: [8,7], [8,7.2], [8,7.4], [8,7.6], [8,7.8], [8,8] |

Ölçekleme ve döndürme saldırıları için üç algoritmanın dayanıklılık sonuçları Şekil 3.10'da verilmiştir. Ölçekleme faktörü 2 oluncaya kadar bütün algoritmaların ölçeklemeye iyi direndiğini bu değerden sonra ise bütün yöntemlerin performansının hızla azaldığına dikkat ediniz. Ancak, önerilen yöntem diğer iki yöntemden daha başarılı sonuçlar vermiştir. DWT metodu geometrik dönüşümler dikkate alınarak tasarlanmadığından beklenildiği gibi döndürme saldırısı durumunda en kötü sonucu vermiştir. Önerilen yöntem döndürme saldırısına karşı DCT metoduna karşı biraz daha iyi sonuç vermiştir.

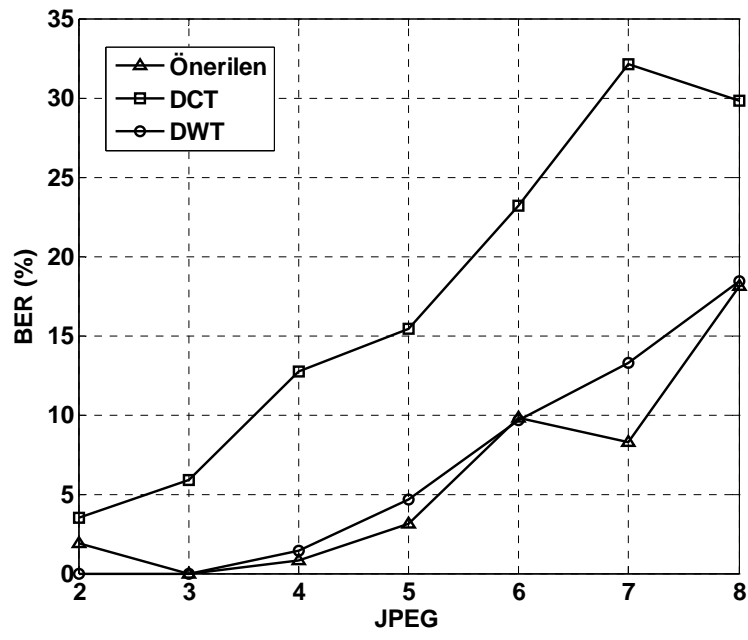


(a)

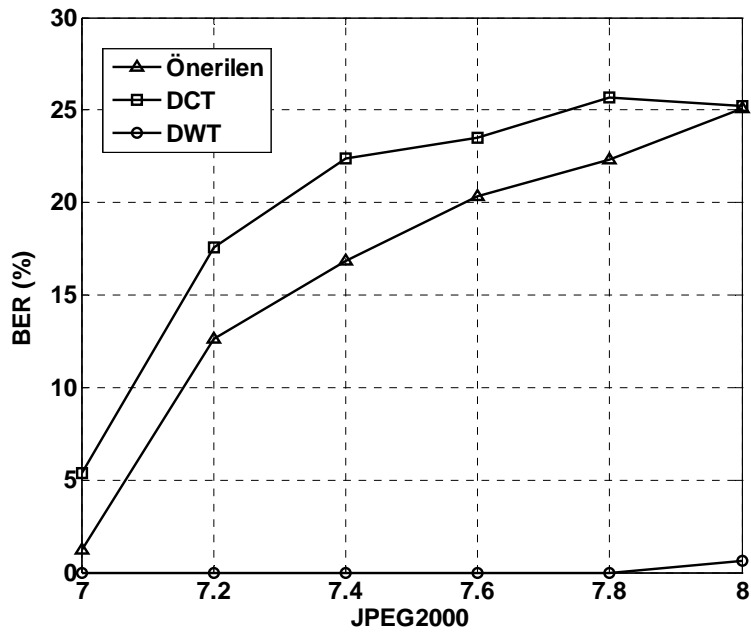


(b)

Şekil 3.10. Önerilen, DWT ve DCT yöntemlerinin (a) ölçekleme, (b) döndürme saldırıları için BER eğrileri



(a)



(b)

Şekil 3.11. Önerilen, DWT ve DCT yöntemlerinin (a) JPEG, (b) JPEG2000 saldırıları için BER eğrileri

Tablo 3.2. Önerilen, DCT ve DWT yöntemlerinin, satır-sütun çıkarma, bakış açısı değiştirme, germe, ilgin dönüşümler, aynalama, medyan filtreleme ve filtreleme için BER cinsinden damga çözme performansları

| Saldırıları | Yöntem | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) |
|------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.Satır Sütun Çıkarma | Önerilen | 0.156 | 0 | 2.031 | 2.812 | 2.031 | | |
| | DCT | 2.437 | 2.046 | 10.445 | 4.390 | 7.906 | | |
| | DWT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 2.Ölçekleme | Önerilen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.687 |
| | DCT | 0 | 0 | 0.250 | 0 | 0 | 1.656 | 33.218 |
| | DWT | 0 | 0.1563 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23.125 |
| 3.Germe | Önerilen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | DCT | 0.250 | 0 | 1.3438 | 0.718 | 0.406 | 0.406 | |
| | DWT | 0 | 19.531 | 0 | 20.937 | 26.093 | 35.625 | |
| 4.Doğrusal Dönüşüm | Önerilen | 0.937 | 0.156 | 0.781 | | | | |
| | DCT | 1.968 | 1.031 | 1.031 | | | | |
| | DWT | 45.937 | 53.437 | 52.968 | | | | |
| 5.Aynalama | Önerilen | 0 | 0 | | | | | |
| | DCT | 0 | 0 | | | | | |
| | DWT | 54.218 | 50.625 | | | | | |
| 6.Medyan ve Diğer Filtreleme | Önerilen | 0 | 0.937 | 4.531 | 0 | 0 | | |
| | DCT | 2.125 | 7.906 | 20.875 | 0 | 0.562 | | |
| | DWT | 0 | 7.343 | 40.312 | 0 | 0.321 | | |

tanımlanan Bit Hata Oranı (BER) hesaplanmış ve tüm test görüntüleri üzerinden BER değerlerinin ortalama değeri alınmıştır.

Şekil 3.11’de JPEG ve JPEG2000 sıkıştırılmaları durumunda BER eğrileri gösterilmiştir. JPEG sıkıştırması için de önerilen yöntem en iyi sonucu vermiştir. Şekil 3.11’den görülebileceği gibi DWT yöntemi JPEG2000 sıkıştırması için en iyi seçimdir. Sadece JPEG2000 sıkıştırması durumunda diğer yöntemlerden biri önerilen

yöntemden daha başarılı sonuç vermiştir. Bunun sebebi, damga eklenecek görüntüye uygulanan moment tabanlı görüntü normalleştirme işleminin görüntüyü bozmasıdır. Diğer bir deyişle, normalleştirme işlemi damga çözümü için bir gürültü oluşturur. Diğer saldırıların sonuçları Tablo 3.2’de özetlenmiştir. Satır-sütun çıkarma hariç önerilen yöntemin bütün saldırılar için en düşük BER sonuçlarını verdiği Tablo 3.2’de açıkça görülmektedir.

3.5. Sonuçlar

Literatürde önerilen çoğu sayısal görüntü damgalama algoritmaları geometrik ve geometrik olmayan saldırıları ayrı ayrı ele almaktadır. Diğer bir deyişle, hem geometrik hem de geometrik olmayan saldırılara karşı dayanıklı olan sayısal görüntü damgalama algoritmaları yoktur. Bu çalışmada, her iki saldırı için de yeterli dayanıklılık sonuçları veren yeni bir görüntü damgalama metodu önerilmiştir. Yöntem, moment tabanlı görüntü normalleştirme ve 2D-DWT’ye dayalıdır. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin, çeşitli görüntü işleme saldırılarına karşı umut verici dayanıklılık sonuçları verdiğini göstermiştir.

Çalışma birkaç yönden genişletilebilir. İlk olarak, sonuçların nasıl etkilendiğini görmek amacıyla normalleştirilmiş görüntü elde edilirken moment tabanlı görüntü normalleştirme yerine [54], değişmez damga yaklaşımı kullanılabilir [57]. İkinci olarak, önerilen algoritmanın renkli görüntüler ve videoya uygulanabilmesi için gerekli değişiklikler araştırılabilir. Üçüncü olarak, istatistiksel olarak optimum bir damga çözümü tasarlanabilir. İstatistiksel optimum damga çözümü aracılığıyla teorik ve simülasyonlar sonucu elde edilen BER eğrilerinin hangi ölçüde örtüştüğü belirlenebilir. DCT ve DWT uzaylarında istatistiksel optimum damga çözümü tasarımı için yöntemler [15] ve [17]’de tartışılmıştır. Son olarak, daha önce de belirtildiği gibi, damgalama sistemlerinde görünmezlik ve dayanıklılık yanında kapasite de çok önemli bir parametredir. Bu nedenle, önerilen yöntem için kapasite analizi yapılmalıdır. Literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış kapasite problemi Bölüm 5’de tartışılmıştır.

BÖLÜM 4. NORMALLEŞTİRME VE ÇİFT AĞAÇLI KARMAŞIK DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SAYISAL GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

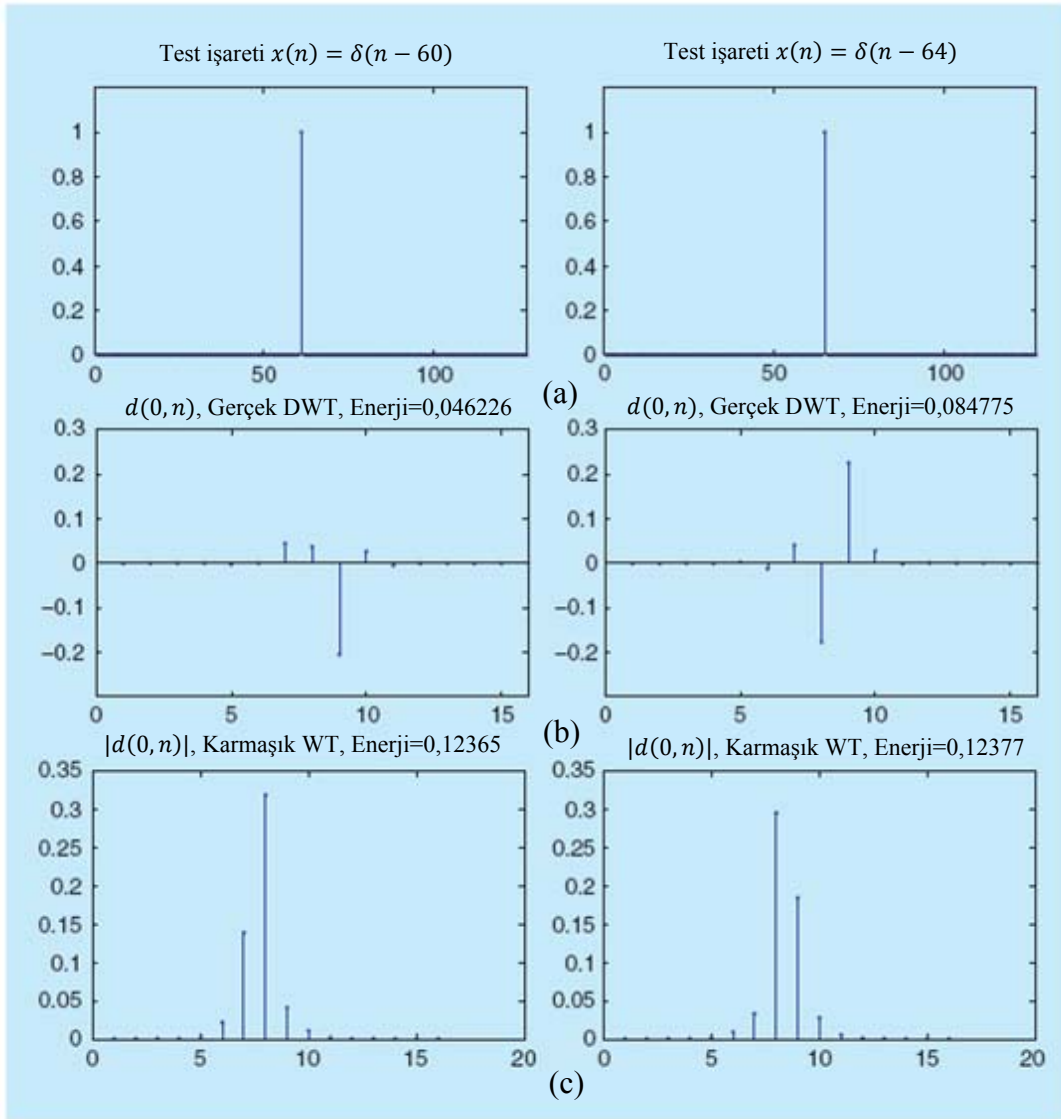
4.1. Giriş

Bölüm 3’de moment tabanlı görüntü normalleştirme (MTGN) ve iki boyutlu (2-D) ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) kullanılarak yeni bir sayısal görüntü damgalama algoritması geliştirilmiş ve literatürde sıklıkla kullanılan iki yonteme göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu bölümde, 2-D DWT’nin görüntü işleme uygulamalarındaki eksikliklerini gidermek amacıyla geliştirilmiş karmaşık dalgacık dönüşümü (CWT) ve MTGN birlikte kullanılarak, Bölüm 3’deki yonteme göre daha iyi sonuçlar veren bir yöntem geliştirilecektir.

Bölüm aşağıdaki kısımlardan oluşmuştur. Sunulan yöntemin anlaşılabilmesi için Kısım 4.2’de 2-D CWT tanıtılmıştır. Yöntem Kısım 4.3’de geliştirilmiş, önceki yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği simülasyonlar aracılığıyla Kısım 4.4’de gösterilmiştir. Son olarak, bölümden çıkartılabilecek ana sonuçlar Kısım 4.5’de verilmiştir.

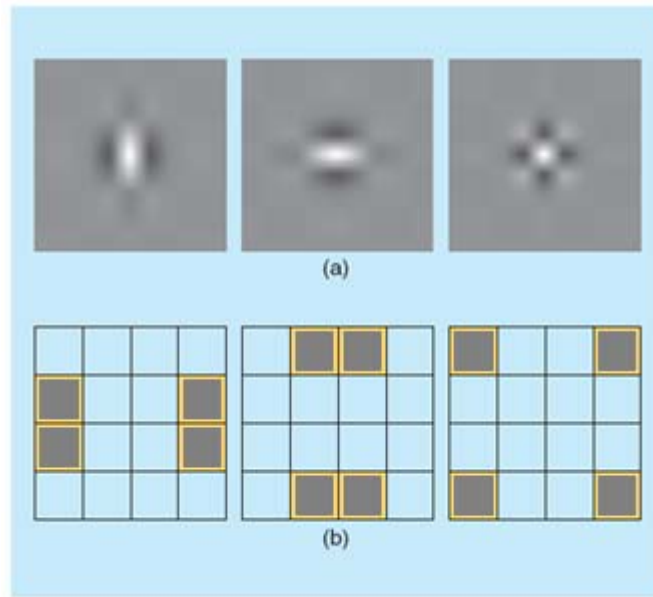
4.2. Çift Ağaçlı Karmaşık Dalgacık Dönüşümü ve Özellikleri

Dalgacık dönüşümü tabanlı yöntemler, işaret ve görüntü işlemedeki çeşitli problemlerin çözümü için başarıyla uygulanmıştır. Ancak, yaygın olarak kullanılan DWT’nin temel eksikliği ötelemeden bağımsız olmamasıdır. Diğer bir deyişle, dalgacık dönüşümü hesaplanacak işarettaki küçük ötelemeler, farklı ölçeklerdeki dalgacık dönüşüm katsayıları arasındaki enerji dağılımında ciddi değişimlere sebep olabilir. Bu durum Şekil 4.1’de açıklanmıştır. Şekilden giriş işaretindeki dört birimlik



Şekil 4.1. $x(n)$ işaretinin dalgacık katsayıları işaretin ötelenmesine karşı çok duyarlıdır. (b) ve (c)'de (a)'daki iki darbe işareti $x(n) = \delta(n - 60)$ ve $x(n) = \delta(n - 64)$ için sabit ölçek j 'de dalgacık katsayıları $d(j, n)$ çizilmiştir. (b) gerçekteğerli ayrık dalgacık dönüşümü kullanarak hesaplanmış olan gerçekteğerli bileşenleri gösterir. (c) DT-CWT kullanılarak hesaplanmış karmaşık bileşenlerin genliğini gösterir. j ölçeğinde DT-CWT için toplam enerji DWT'nin aksine yaklaşık olarak sabittir. (IEEE'nin izni ile [67]'den uyarlanmıştır)

bir ötelemenin DWT katsayılarında önemli ölçüde değişikliğe sebep olurken karmaşık dalgacık katsayılarını çok fazla değiştirmedeği görülmektedir. DWT'nin ikinci bir eksikliği, yönsel seçiciliğinin zayıf olmasıdır. 2-D DWT bir görüntüyü yatay (0°), dikey (90°) ve çapraz ($\pm 45^\circ$) yönlerde ayırır. Dolayısıyla, DWT zıt çapraz yönleri ($\pm 45^\circ$) ayırt edemez. 2-D DWT'nin yönsel seçicilikteki zayıflığı şöyle



Şekil 4.2. Ayırıştırılabilir 2-D DWT durumundaki dalgacıkların uzamsal ve frekans gösterimleri (a) piksel uzayındaki (LH, HL, HH) dalgacıkları gösterir; (b) 2-D frekans uzayında her bir dalgacığın Fourier dönüşümünün tanımlı olduğu frekansları belirtir. Üçüncü dalgacığın ± 45 yönlerini karıştırdığı açıktır. (IEEE'nin izni ile [67]'den uyarlanmıştır)

açıklanabilir. 2-D DWT'nin ayırıştırılabilir gerçekleştirilmesi Şekil 4.2'de gösterilen ve matematiksel olarak

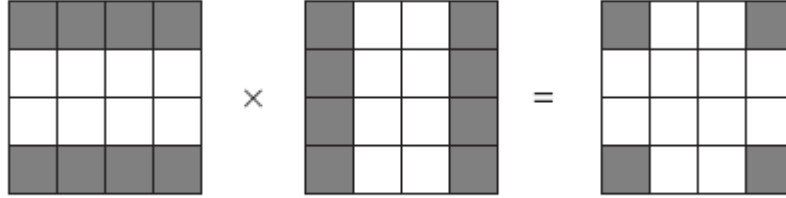
$$\psi_1(x, y) = \phi(x)\psi(y) \quad (\text{LH dalgacığı}) \quad (4.1)$$

$$\psi_2(x, y) = \psi(x)\phi(y) \quad (\text{HL dalgacığı}) \quad (4.2)$$

$$\psi_3(x, y) = \psi(x)\psi(y) \quad (\text{HH dalgacığı}) \quad (4.3)$$

ile verilen üç dalgacık kullanılarak elde edilir. LH dalgacığı birinci boyuttaki alçak geçiren $\phi(\cdot)$ fonksiyonu ile ikinci boyuttaki yüksek geçiren $\psi(\cdot)$ fonksiyonunun çarpımıdır. HL ve HH dalgacıkları benzer şekilde isimlendirilir. Şekil 4.2'den görüldüğü gibi, LH ve HL dalgacıkları dikey ve yatay yöndeki frekans bileşenlerini seçerken, HH dalgacığı çapraz yönlerdeki frekans bileşenlerini vurgulamaktadır ve $+45^\circ$ ile -45° yönlerini karıştırmaktadır. Bu nedenle, ayırıştırılabilir DWT bu yönleri ayırt edemez. Bu gözlemi anlamamanın bir yolu, dalgacığın frekans uzayında tanımlı olduğu bölgeye bakmaktır. $\psi(x)$ gerçek değerli yüksek geçiren bir dalgacık ve $\psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ 2-D ayırıştırılabilir dalgacık olmak üzere, $\psi(x, y)$ 'nin Fourier

dönüşümü $\psi(\cdot)$ fonksiyonunun ideal bir yüksek geçiren filtre olduğu varsayılırsa aşağıdaki diyagramdaki gibi olacaktır



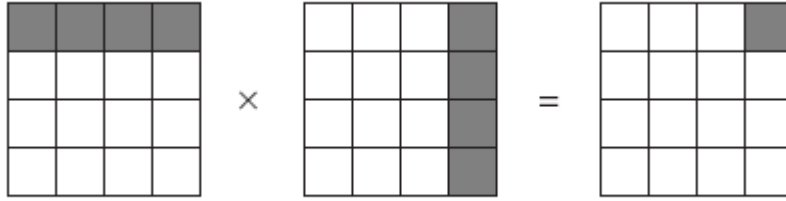
Yukarıdaki şeklin nasıl elde edildiğini açıklayalım. HH yönündeki dalgacık katsayılarını hesaplamak için ilk önce görüntünün satırlarına yüksek geçiren filtre $\psi(x)$ uygulanır ve sonuçlanan görüntü 2 ile alt-örneklenir. Daha sonra, ilk adımdaki görüntünün sütunlarına yüksek geçiren filtre $\psi(y)$ uygulanır ve sonuçlanan görüntü 2 ile alt-örneklenerek HH yönündeki dalgacık katsayıları hesaplanmış olur. Bir görüntüye piksel uzayında ard arda iki kez filtreleme yapmak, frekans uzayında görüntünün Fourier dönüşümünü filtrelerin Fourier dönüşümlerinin çarpımıyla çarpmaya karşılık gelir (Fourier dönüşümünün konvolüsyon teoremi). Yukarıdaki şekilde sol taraftaki spektrum $\psi(x)$ 'in, ortadaki spektrum $\psi(y)$ 'nin, en sağdaki spektrum da bu iki spektrumun çarpımından elde edilen spektrumu göstermektedir. $\psi(x, y)$ spektrumunun 2-D frekans düzleminde tüm köşelerde geçirme bandına sahip olduğu görülmektedir. Bu gözlem, teoriyle uyumludur. $\psi(x, y)$ gerçek bir fonksiyon olduğundan, spektrumu iki taraflı olmalıdır” O halde. Bu dalgacık, $+45^\circ$ ve -45° arasındaki frekans özelliklerini ayırt edemeyecektir..

Yukarıda tartışmadan, gerçel değerli bir dalgacık fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilen ayrık dalgacık dönüşümünün yönsel seçici olamayacağı sonucu çıkartılabilir. Şimdi, karmaşık değerli dalgacıklar kullanılarak sadece $+45^\circ$ veya sadece -45° yönlerine duyarlı dalgacıkların nasıl oluşturulabileceğini açıklayalım. $\psi(x) = \psi_h(x) + j\psi_g(x)$ ile verilen karmaşık değerli analitik dalgacık olmak üzere, karmaşık değerli dalgacık dönüşümünün ayrıştırılabilir gerçekleştirilmesinde kullanılacak $\psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ 2-D dalgacığını ele alalım. $\psi(x, y)$ için

$$\psi(x, y) = [\psi_h(x) + j\psi_g(x)][\psi_h(y) + j\psi_g(y)] \quad (4.4)$$

$$= \psi_h(x)\psi_h(y) - \psi_g(x)\psi_g(y) + j[\psi_g(x)\psi_h(y) + \psi_h(x)\psi_g(y)] \quad (4.5)$$

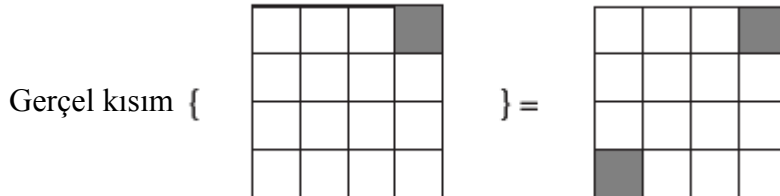
denklemini elde ederiz. Bu karmaşık dalgacığın Fourier dönüşümünün tanımlı olduğu bölge, aşağıdaki ideal diyagramda verilmiştir:



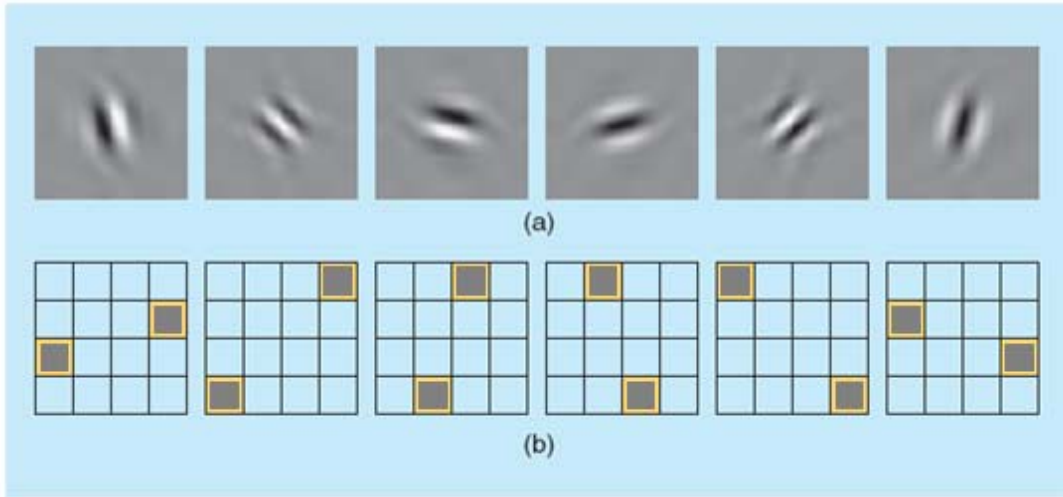
Analitik bir fonksiyonun Fourier dönüşümü, frekans uzayında sadece pozitif frekans bileşenlerine sahiptir. Şekilden, beklenildiği gibi yaklaşık olarak analitik 1-D dalgacığının spektrumu tek taraflı olduğundan 2-D karmaşık $\psi(x, y)$ dalgacığının spektrumu 2-D frekans düzleminin sadece bir çeyreğinde tanımlıdır. Bu nedenle, karmaşık 2-D dalgacık yön geçicidir. Bu karmaşık dalgacığın gerçel kısmını alırsak, ayrıştırılabilir iki dalgacığın toplamını elde ederiz.

$$\text{Gerçel kısım}\{\psi(x, y)\} = \psi_h(x)\psi_h(y) - \psi_g(x)\psi_g(y) \quad (4.6)$$

Gerçel bir fonksiyonun spektrumu, orijine göre simetrik olmak zorunda olduğundan Denklem (4.6) da verilen gerçel dalgacığın spektrumu, aşağıdaki ideal diyagramda gösterildiği gibi 2-D frekans düzleminin iki çeyreğinde tanımlıdır.



Gerçel ayrıştırılabilir dalgacığın tersine, bu gerçel dalgacığın spektrumu 2-D frekans düzleminin dört çeyreğinde tanımlı değildir ve bu nedenle bu dalgacık -45° yönündeki frekans bileşemlerine duyarlıdır. Yukarıda anlatılan işlem $\phi(x)\psi(y)$,

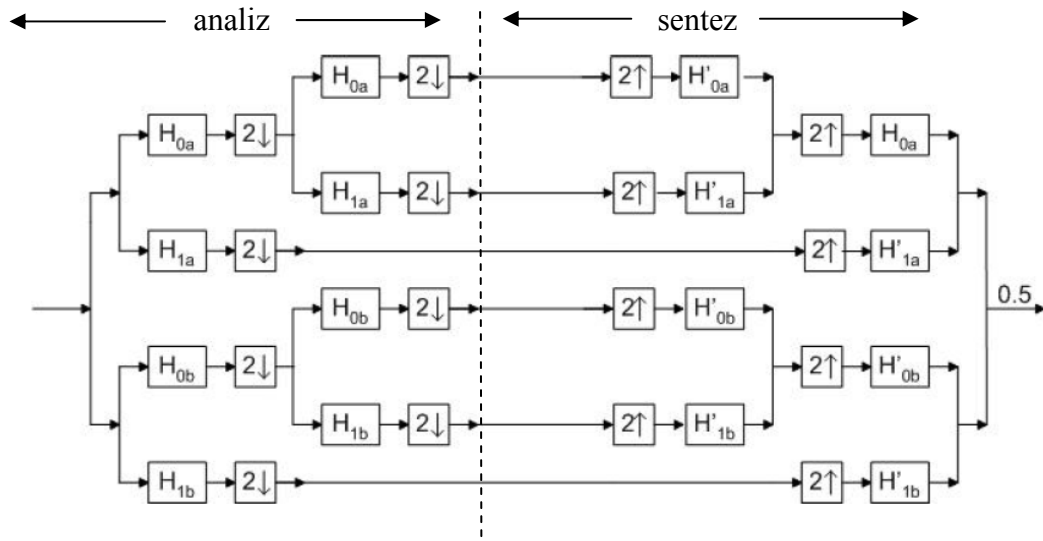


Şekil 4.3. Gerçek katsayılı 2-D CWT’de tipik dalgacık bileşenleri. (a) piksel uzayında dalgacıkların gösterilmesi; (b) 2-D frekans uzayında her bir dalgacığın Fourier dönüşümünün tanımlı olduğu bölge. 2-D CWT’nin yönsel seçiciliği piksel ve frekans uzayının ikisinde de gözlemlenmektedir. (IEEE’nin izni ile [67]’den uyarlanmıştır)

$\psi(x)\phi(y)$, $\phi(x)\psi^*(y)$, $\psi(x)\phi^*(y)$ ve $\psi(x)\psi^*(y)$ için tekrarlanarak $+45^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 75^\circ$ yönlerine duyarlı beş gerçel dalgacık daha elde edilebilir. Bu altı dalgacığın uzamsal gösterimleri ve 2-D frekans düzleminde Fourier dönüşümlerinin tanımlı olduğu bölgeler Şekil 4.3’de verilmiştir.

CWT’nin gerçekleştirilmesi karmaşık değerli filtreler kullanılarak yapılabilir. Ancak, bir işareti CWT katsayılarından sıfır hatayla geri elde etmeye imkan veren karmaşık değerli filtre tasarımı oldukça zordur. Ayrıca, karmaşık değerli filtreler işaretin geri elde edilmesi esnasında gürültüyü artırır. Bu nedenle CWT görüntü işlemede yaygın olarak kullanılmamıştır. CWT’nin gerçekleştirilmesinde karmaşık değerli filtre tasarımından kurtulmak için [67]’de çift ağaçlı karmaşık dalgacık dönüşümü (DT-CWT) olarak adlandırılan bir gerçekleştirme sunulmuştur. DT-CWT aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Ötelemeden hemen hemen bağımsızdır,
- İki ve daha yüksek boyutlarda yönsel seçiciliğe sahiptir,



Şekil 4.4. Bir boyutlu işaretler için bir seviyeli DT-CWT ve ters DT-CWT

- Doğrusal-fazlı kısa uzunluklu filtreler kullanılarak mükemmel geri çatıma imkan vermektedir,
- Sonlu sayıda katsayıdan oluşan 1-D işaretler için 2:1, 2-D işaretler için 4:1 oranında dönüşüm katsayılarına sahiptir (Boyuttan bağımsız olarak gerçek DWT'nin 1:1 oranında dönüşüm katsayısı vardır),
- Ötelemeden bağımsız diğer dönüşümlere göre daha az hesap yükü gerektirmektedir.

DT-CWT, karmaşık bir filtrenin gerçel ve sanal kısımlarını oluşturmak için gerçel-katsayılı filtrelerden oluşan iki ağaç kullanır. Ötelemeden yaklaşık olarak bağımsızlık özelliği, ağacın her seviyesindeki örnekleme oranı iki katına çıkarılarak sağlanır. Şekil 4.4'de bir boyutlu işaretler için, bir seviyeli DT-CWT'nin hesaplanması (analiz) ve bir seviyeli DT-CWT katsayılarından işaretin geri elde edilmesi (sentez) işlemlerinin nasıl yapılabileceği gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, DT-CWT gerçekleştirilmesinde gerçel değerli iki dalgacık dönüşümü, kullanılmaktadır ve her bir dalgacık dönüşümünde mükemmel geri çatım koşullarını sağlayan farklı filtre setleri kullanılmaktadır.

Analiz kısmında H_{0a} , H_{1a} üst koldaki filtreler için alçak geçiren/yüksek geçiren filtre çiftini ve H_{0b} , H_{1b} alt koldaki filtreler için alçak geçiren/yüksek geçiren filtre çiftini

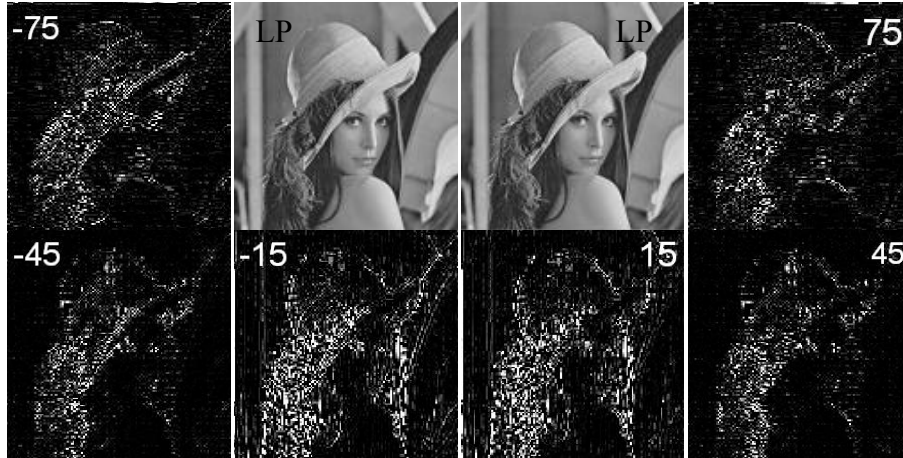
belirtsin. Sentez kısmında karşılık gelen filtreler üst kol için H'_{0a} , H'_{1a} , alt kol için H'_{0b} , H'_{1b} 'dir. İki dalgacık ağacı a ve b'ye karşılık gelen iki gerçel dalgacık sırasıyla $\psi_{ha}(t)$ ve $\psi_{hb}(t)$ ile gösterilsin. Mükemmel geri çatım koşulunu sağlamak için $\psi(t) = \psi_{ha}(t) + j\psi_{hb}(t)$ ile verilen karmaşık dalgacık $\psi_{ha}(t)$ ve $\psi_{hb}(t)$ dalgacıkları Hilbert dönüşüm çifti oluşturacak şekilde tasarlanır. Yani, \mathcal{H} hilbert dönüşümünü göstermek üzere,

$$\psi_{hb}(t) = \mathcal{H}\{\psi_{ha}(t)\} \quad (4.7)$$

eşitliği mükemmel geri çatım için sağlanmalıdır. DT-CWT'nin hesaplanabilmesi için yeni filtrelerin tasarlanması gereklidir. Tasarıma karşılık gelen dalgacık, yaklaşık olarak Hilbert dönüşüm çifti oluşturacak şekilde filtre kümeleri çifti gerektirir. Hilbert dönüşüm çifti oluşturma özelliğini sağlamayan dalgacık filtreleri kullanılırsa DT-CWT ötelemeden bağımsız olmaz. Dalgacık tasarım problemi, filtre tasarım problemine dönüştürülürse, her iki gerçel DWT ağacındaki alçak geçiren filtrelerin yaklaşık olarak Hilbert dönüşüm çifti oluşturacak şekilde tasarlanması gereklidir. $H_{0b}(n) = H_{0a}(n-0.5)$ eşitliğinin sağlanması durumunda $\psi_{hb}(t) = \mathcal{H}\{\psi_{ha}(t)\}$ olacağı gösterilebilir. Yani, filtreler birbirinin yarım örnek ötelenmiş olmalıdır. DT-CWT'nin pratik gerçekleştirilmesinde bu koşul yaklaşık olarak sağlanır. Görüntülerin 2-D DT-CWT'sini hesaplamak için Şekil 4.4'de verilen iki ağaç, gerçek DWT'de olduğu gibi önce görüntünün satırlarına, daha sonra da sütunlarına uygulanır. Her seviyede, DWT ayrışımında elde edilen üç altbantın yerine, DT-CWT durumunda altı altbant vardır. Daha önce açıklandığı gibi altbantlar $\pm 45^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 75^\circ$ yönündedir. Şekil 4.5'de Lena görüntüsünün bir seviyeli DT-CWT ayrıştırması bir örnek olarak verilmiştir.

4.3. Damgalama Algoritması

Kısım 4.2'de belirtildiği gibi bir görüntünün DT-CWT'si hesaplandığında her seviyede altı altbant vardır. O halde damgalama amacıyla kaç seviyeli 2D DT-CWT hesaplanacağı ve damganın her bir seviyede hangi altbantlara eklenmesi gerektiği



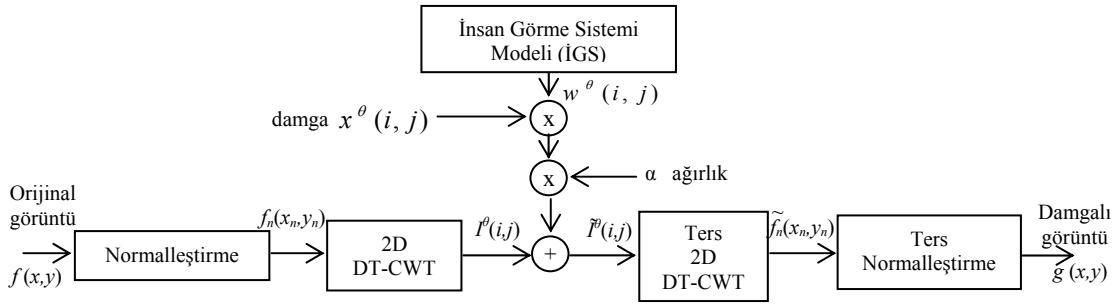
Şekil 4.5. Lena Görüntüsünün bir seviyeli DT-CWT ayrıştırması. Bir seviyeli ayrıştırmanın sadece genlikleri verilmiştir. Karşılık gelen filtrelerin yönleri de altbantların köşesinde verilmiştir. LP alçak geçiren CWT katsayılarını belirtmektedir.

sorusu karşımıza çıkmaktadır. Yapılan simülasyonlardan sonra ilk seviyedeki altı altbandın damgalama için kullanılmasının algısal saydamlık ve dayanıklılık gereksinimleri için en iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Sayısal bir görüntüye damganın moment-tabanlı normalleştirme ve 2D DT-CWT kullanılarak eklenmesi ve çıkartılması (çözülmesi) aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

4.3.1. Damga ekleme

Damganın nasıl eklendiği Şekil 4.6'da verilmiştir ve yapılan işlemler aşağıda sıralanmıştır. Burada görüntünün boyutunun $2M \times 2N$ olduğu ve eklenen bit sayısının (veya eşdeğer olarak damga yükünün) P olduğu varsayılmıştır.

- $f_n(x_n, y_n)$ ile gösterilen normalleştirilmiş görüntüyü elde etmek için Kısım 3.2.1'de anlatılan işlem kullanılarak damga eklenecek $f(x, y)$ görüntüsü normalleştirilir.
- $f_n(x_n, y_n)$ 'nin $I_0^\theta(i, j)$ ile gösterilen bir-seviyeli 2-D DT-CWT'si hesaplanır.
- $k=1, \dots, P$ olmak üzere, $\theta=0, 1, \dots, 5$ için ± 1 , aksi halde sıfır değerlerinden oluşan $M \times N$ boyutlarında istatistiksel ilişkisiz $6P$ adet iki boyutlu sözde-rastgele $X_{0,k}^\theta(i, j)$ işaretleri üretilir (θ değerinin $f_n(x_n, y_n)$ 'nin 2D DT-CWT'sindeki altbantları gösterdiğine dikkat ediniz).



Şekil 4.6. Damga ekleme yöntemi

- m_l damga işaretindeki l . bit (0 veya 1) olmak üzere,

$$X_0^\theta(i, j) = \sum_{k=0}^P (2m_k - 1) X_{0,k}^\theta(i, j)$$

eşitliği kullanılarak iki boyutlu damga işareti $X_0^\theta(i, j)$ oluşturulur.

- Damganın enerjisinin insan gözünün algılayamadığı konumlarda artırılmasına imkan veren $W_0^\theta(i, j)$ maskeleye katsayıları ileride açıklandığı gibi Denklem (4.8) kullanılarak belirlenir.
- α damga işaretinin global enerjisini belirleyen bir katsayı olmak üzere, damga işareti $X_0^\theta(i, j)$ $\alpha W_0^\theta(i, j)$ ile çarpılır ve normalleştirilmiş damgalı görüntünün $\tilde{I}_0^\theta(i, j)$ ile belirtilen 2-D DT-CWT katsayılarını oluşturmak için çarpım $I_0^\theta(i, j)$ 'ye eklenir.
- Normalleştirilmiş damgalı görüntü $\tilde{f}_n(x_n, y_n)$ 'yi elde etmek için $\tilde{I}_0^\theta(i, j)$ 'nin ters 2-D DT-CWT'si hesaplanır.
- Damgalı görüntü $g(x, y)$ 'yi oluşturmak için $\tilde{f}_n(x_n, y_n)$ görüntüsüne ters normalleştirme uygulanır.

DT-CWT yönteminde kullanılan algısal ağırlık katsayıları $W^\theta(i, j)$, [22]'de verilen insan görme sistemi modelinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Modele göre ağırlık katsayıları

Tablo 4.1. İlk seviye ve her altbant için k ve γ değerleri

| Altbant | $\pm 15^0$ | $\pm 75^0$ | $\pm 45^0$ |
|----------|------------|------------|------------|
| K | 1.8 | 1.8 | 1.35 |
| Γ | 2.4 | 2.4 | 4 |

$$w^\theta(i, j) = \sqrt{k^2 \cdot |I^\theta(i, j)|^2 + \gamma^2} \quad (4.8)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Denklem (4.8)'de, $|I^\theta(i, j)|^2$ görüntünün bir seviyeli DT-CWT dönüşümünde (i, j) konumundaki katsayının 3×3 'lük komşuluğundaki katsayılarının ortalamasının genliğinin karesini göstermektedir, k ve γ altbanta göre değer alan katsayıları belirtmektedir. İlk seviye ve her altbant için k ve γ değerleri [22]'deki gibi tanımlanır ve Tablo 4.1'de verilmiştir.

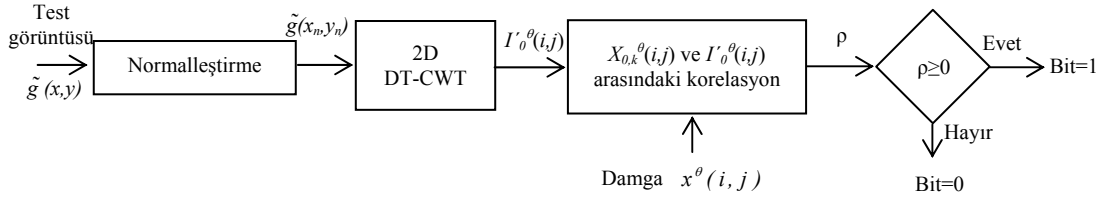
4.3.2. Damga tespit etme

Damgalı $g(x, y)$ görüntüsüne bir saldırı uygulandığını varsayalım. Saldırı sonucunda, damga çözücüyeye $g(x, y)$ 'nin yerine $\tilde{g}(x, y)$ gelecektir. Damga çözücü korelasyona dayalı bir çözücüdür. Damgayı normalleştirilmiş dalgacık uzayında eklediğimizden korelasyonlar aynı uzayda hesaplanmalıdır. Bu gözleme dayanarak, damga işaretinin k . biti aşağıdaki adımlar uygulanarak tespit edilebilir.

- $\tilde{g}(x, y)$ ile verilen bozulmuş damgalı görüntüsüne normalleştirme işlemi uygulanarak $\tilde{g}_n(x_n, y_n)$ elde edilir.
- $\tilde{g}_n(x_n, y_n)$ 'nin $\hat{I}_0^\theta(i, j)$ ile gösterilen bir seviyeli 2D DT-CWT'si hesaplanır.
- k . 2-D rastgele damga işareti $X_{0,k}^\theta(i, j)$ ve $\hat{I}_0^\theta(i, j)$ arasındaki korelasyon ρ_k

$$\rho_k = \sum_{\theta=0}^5 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{I}_0^\theta(i, j) X_{0,k}^\theta(i, j) \quad (4.9)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır. Damga işaretinin k . biti aşağıdaki gibi çözülür.



Şekil 4.7. Damga çözücünün blok diyagramı

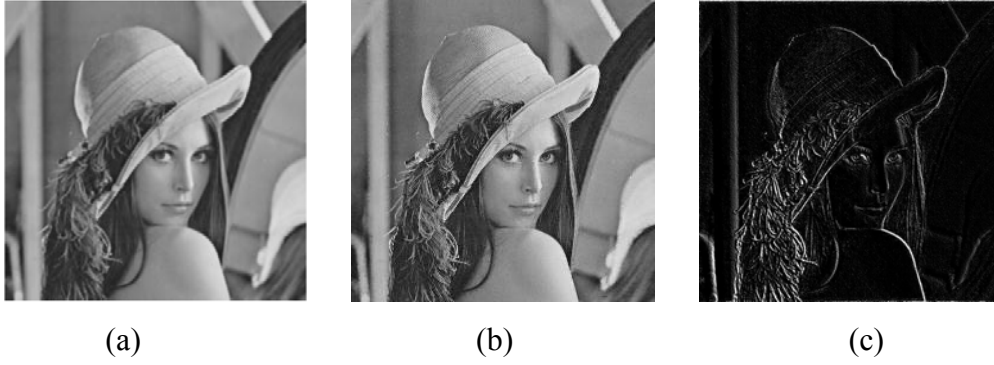
$$\hat{m}_k = \begin{cases} 1, & \rho_k > 0 \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.10)$$

Damga işaretindeki bütün bitler Şekil 4.7’de gösterilen işlemler $k=1,2,\dots,P$ için tekrarlanarak tespit edilebilir. İstatistiksel olarak optimum damga çözücü elde etmek için her bit için hesaplanan korelasyon değeri sıfır yerine bir eşik değeri ile karşılaştırılabilir. Bölüm 2’de anlatılan damga işaretinin oluşturulma kuralı sonucunda önerilen yöntem için optimum eşik değerinin sıfıra eşit olduğu gösterilebilir.

4.4. Simülasyon Sonuçları

Simülasyonlarda, grilik seviyesinde çok, az, orta seviyede ve hızlı değişimler olan on adet görüntü kullanılmıştır. Damgalı bir görüntü ile orijinal görüntü arasındaki farkı ölçmek için PSNR kullanılmıştır. PSNR’nin 35 dB’den büyük olduğu durumlarda görüntü kalitesi kabul edilebilir seviyededir. Bu nedenle görüntülere damga eklenirken PSNR değerlerinin 35 dB’in üzerinde olmasına dikkat edilmiştir. Eklenen damganın algısal saydamlık gereksinimini sağladığını göstermek için Şekil 4.8 (a)’da orijinal görüntü, Şekil 4.8 (b)’de damgalanmış görüntü, Şekil 4.8 (c)’de ise orijinal görüntü ve damgalanmış görüntü arasındaki fark verilmiştir. Şekil 4.8 (c)’den de görüldüğü gibi damga insan görme sistemine uygun olarak görüntünün genelde yüksek frekans bileşenlerine eklenmiştir.

Kısım 4.3’de tanımlanan yöntemin başarısını test etmek için Tablo 4.2’de verilen saldırılar uygulanmıştır. Dönme, ölçekleme ve JPEG sıkıştırmasına karşı dayanıklılık



Şekil 4.8. Yöntemin algısal saydamlık gereksinimini sağladığına ilişkin örnek (a) orijinal görüntü, (b) damgalanmış görüntü, (c) (a) ve (b) görüntüleri arasındaki farkın 8 ile çarpılmış hali

sonuçları Şekil 4.9’da, diğer saldırılara karşı dayanıklılık ise Tablo 4.3’de “yanlış olarak tespit edilen bit sayısı / eklenen toplam bit sayısı” olarak tanımlanan Bit Hata Oranı (BER) cinsinden verilmiştir. BER değerleri hesaplanırken on adet görüntü için bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Karşılaştırma amacıyla literatürde mevcut [17]’deki çalışma (bundan sonra DWT ile gösterilecek) ve [54]’deki çalışmanın (bundan sonra DCT ile gösterilecek) ve Bölüm 3’de gösterilen yöntemin sonuçları da belirtilmiştir. Bütün yöntemler için orijinal görüntü ile damgalı görüntü arasındaki PSNR değeri 35 dB olacak şekilde damga eklenmiştir.

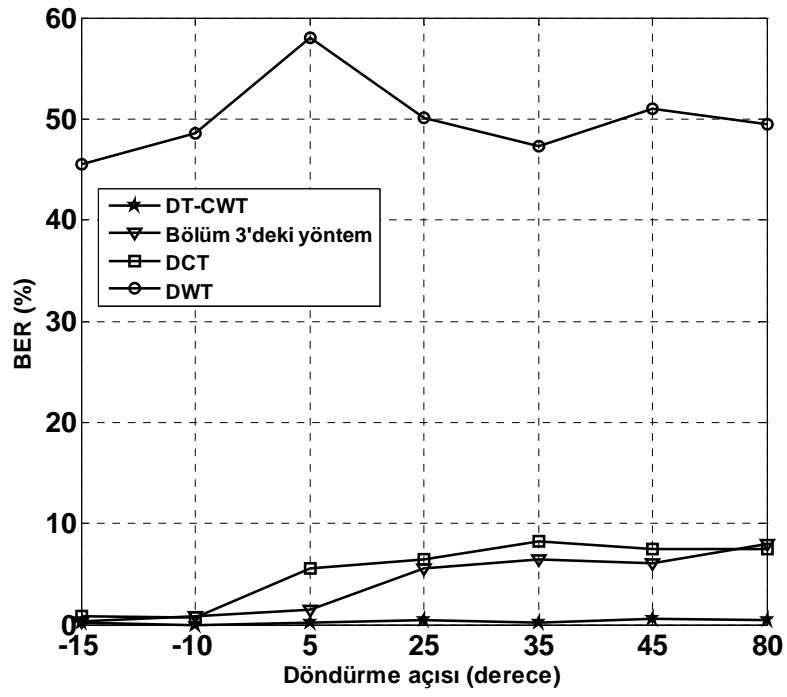
Şekil 4.9 (a)’da görülebileceği gibi DWT yöntemi döndürme saldırısına karşı çok kötü sonuçlar vermiştir. DCT yöntemi küçük döndürme açılarında başarılı sonuçlar verirken büyük döndürme açılarında performansı kötüleşmiştir. DT-CWT tabanlı yöntem ise büyük döndürme açılarında bile başarılı olmuştur. Şekil 4.9 (b) küçük ölçekleme oranlarında bütün yöntemlerin iyi sonuç verdiğini, ancak ölçekleme oranı arttırıldığında tüm yöntemlerin performansının azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, DT-CWT yöntemi tüm yöntemlerden daha üstündür. Benzer gözlemler JPEG sıkıştırması durumunda da geçerlidir. Düşük sıkıştırma oranlarında tüm yöntemler başarılyken, yüksek sıkıştırma oranlarında başarımları düşmektedir. DT-CWT yöntemi daima daha iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 4.3’deki sonuçlar DT-CWT yönteminin satır-sütun çıkarma hariç, bakış açısı değiştirme, doğrusal dönüşümler, aynalama, medyan filtreleme saldırıları durumlarında da diğer yöntemlerden üstün olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2. DT-CWT damgalama yönteminin performansını göstermek için simülasyonlarda kullanılan saldırılar

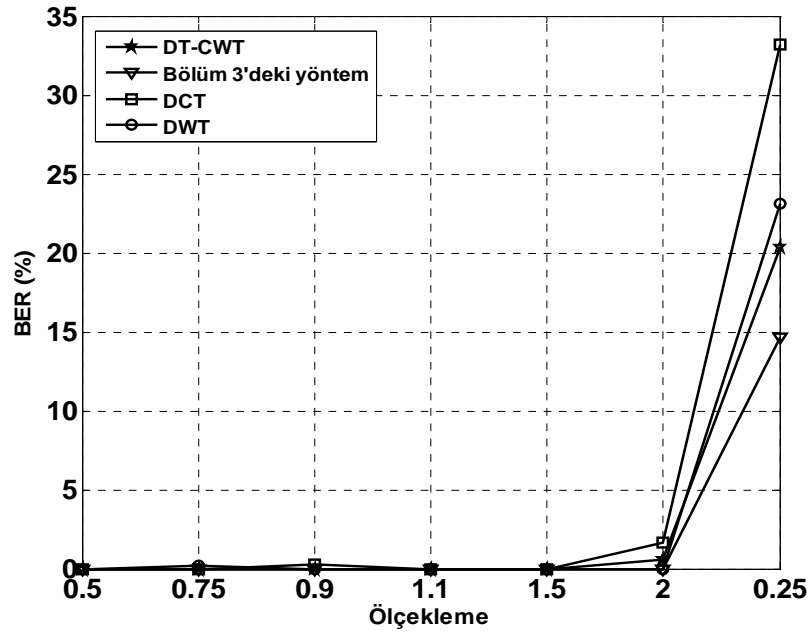
| Saldırılar | Açıklama |
|------------------------|---|
| Satır-Sütun Silme | (1,1), (1,5), (5,1), (5,17), (17,5) |
| Ölçeklendirme | 0.5, 0.75, 0.9, 1.1, 1.5, 2, 0.25 |
| Bakış Açısı Değiştirme | (.8,1), (.9,1), (1.1,1), (1.2,1), (1.,8), (1.,9), (1,1.1), (1,1.2) |
| Döndürme | -15°, -10°, 5°, 25°, 35°, 45°, 80° |
| Germe | (0, %1), (0,%5), (%1,0), (%5,0), (%1,%1), (%5,%5) |
| İlgin Dönüşümler | Çekirdekler: $\begin{bmatrix} 1.1 & 0.2 \\ -0.1 & 0.9 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 0.9 & -0.2 \\ 0.1 & 1.2 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} -1.01 & -0.2 \\ -0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$ |
| Aynalama | Yatay, Dikey |
| Medyan Filtreleme | Çekirdek boyutları: 2x2, 3x3, 4x4 |
| Filtreleme | Çekirdekler: $\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ |
| JPEG Sıkıştırma | Kalite Faktörü: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |

4.5. Sonuçlar

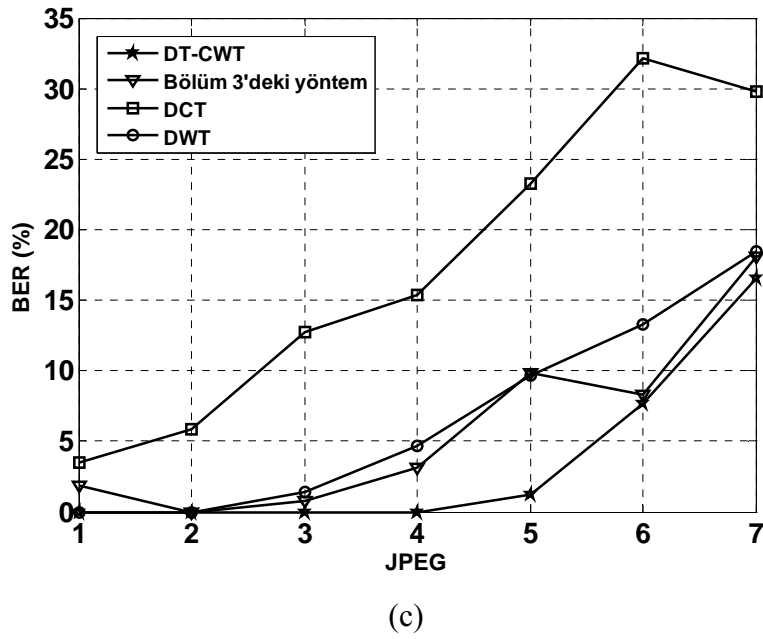
Bu bölümde, moment tabanlı görüntü normalleştirme ve 2D DT-CWT'nin üstünlükleri birleştirilerek yeni bir sayısal görüntü damgalama yöntemi geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, kullanılan yöntemle eklenen damganın JPEG sıkıştırması ile birlikte dönme ölçekleme ve ötelemeye karşı da dayanıklı olduğunu göstermiştir. Ayırık dalgacık dönüşümünün ötelemeye bağımlılık ve yönsel seçiciliğinin olmaması gibi eksiklikleri karmaşık dalgacık dönüşümü kullanılarak giderilmiştir. Karmaşık dalgacık dönüşümünün [67]'de tanıtılan gerçekleştirilmesi kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda yapılabilecek çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:



(a)



(b)



Şekil 4.9. DT-CWT tabanlı, Bölüm 3'deki yöntem, DWT ve DCT yöntemleri için BER eğrileri. (a) döndürme (b) ölçekleme (c) JPEG saldırıları.

- Karmaşık dalgacık dönüşümünün karmaşık değerli katsayılı filtrelerden oluşan tek ağaçlı gerçekleştirilmesi kullanıldığında sonuçların nasıl değişeceği analiz edilebilir.
- Damga işareti oluşturulurken yayılı spektrum teknikleri yerine başka yöntemler kullanılabilir.
- CWT uzayında [22]'de verilen İGS modeli yerine diğer İGS modelleri denenebilir.
- Damga, birinci seviyedeki altı altbant yerine daha yüksek seviyelerdeki altbant kombinasyonlarına eklenebilir.
- Damga çözme esnasında korelasyona dayalı damga çözücü yerine istatistiksel olarak optimum damga çözücü kullanılabilir.
- Önerilen yöntemin renkli görüntüler ve videoya uyarlanması için gerekli değişiklikler araştırılabilir.
- Yöntemin dayanıklılığına ek olarak diğer önemli bir damgalama gereksinimi olan kapasite problemi bakımından üstünlüğü araştırılabilir.
- Görüntüye normalleştirme amacıyla moment tabanlı görüntü normalleştirme yerine moment değişmezleri yaklaşımı kullanılabilir [57].

Tablo 4.3. Çeşitli saldırılara karşı, DT-CWT, Bölüm 3'deki yöntem, DCT, ve DWT yöntemlerinin BER değerleri

| Saldırıları | Yöntem | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) |
|------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|
| 1.Satır-sütun silme | DT-CWT | 0 | 0 | 0.625 | 0.781 | 0.468 | | | |
| | Bölüm 3 | 0.156 | 0 | 2.031 | 2.812 | 2.031 | | | |
| | DCT | 2.437 | 2.046 | 10.445 | 4.390 | 7.906 | | | |
| | DWT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 2.Bakış açısı değiştirme | DT-CWT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Bölüm 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | DCT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | DWT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.Germe | DT-CWT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | Bölüm 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | DCT | 0.250 | 0 | 1.3438 | 0.718 | 0.406 | 0.406 | | |
| | DWT | 0 | 19.531 | 0 | 20.937 | 26.093 | 35.625 | | |
| 4.Doğrusal dönüşümler | DT-CWT | 0.311 | 0.155 | 0.155 | | | | | |
| | Bölüm 3 | 0.937 | 0.156 | 0.781 | | | | | |
| | DCT | 1.968 | 1.031 | 1.031 | | | | | |
| | DWT | 45.937 | 53.437 | 52.968 | | | | | |
| 5.Aynalama | DT-CWT | 0 | 0 | | | | | | |
| | Bölüm 3 | 0 | 0 | | | | | | |
| | DCT | 0 | 0 | | | | | | |
| | DWT | 54.218 | 50.625 | | | | | | |
| 6.Medyan ve Diğer Filtreleme | DT-CWT | 0 | 0.937 | 3.125 | 0 | 0 | | | |
| | Bölüm 3 | 0 | 0.937 | 4.531 | 0 | 0 | | | |
| | DCT | 2.125 | 7.906 | 20.875 | 0 | 0.562 | | | |
| | DWT | 0 | 7.343 | 40.312 | 0 | 0.321 | | | |

BÖLÜM 5. MOMENT TABANLI GÖRÜNTÜ NORMALLEŞTİRMENİN DCT VE DWT UZAYINDA YAPILAN DAMGALAMA YÖNTEMLERİNİN KAPASİTESİNE ETKİSİ

5.1. Giriş

Bu bölümde, sayısal bir görüntü damgasının geometrik saldırılara karşı dayanıklılığını arttırmada kullanılan moment tabanlı görüntü normalleştirme (MTGN) işleminin sayısal bir görüntü damgalama algoritmasının kapasitesini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla, normalleştirme adımı uygulanmadan damga DCT ve DWT uzaylarında eklenmiştir. Normalleştirme işlemi dahil edilerek iki uzayda da damga yeniden eklenmiştir. Daha sonra, damgalı görüntüye değişik saldırılar uygulanmış ve Moulin ve Mihçak tarafından önerilen istatistiksel yaklaşım [70] kullanılarak bozulmuş görüntünün kapasitesi normalleştirme varken ve yokken kestirilmiştir. Böylece, normalleştirmenin DCT ve DWT uzaylarında kapasiteyi nasıl etkilediği tespit edilmiştir.

Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi, etkili bir sayısal görüntü damgalama yöntemi karşılıklı olarak çelişen görünmezlik ve dayanıklılık gereksinimlerini mümkün olduğu kadar birlikte sağlamalıdır. Diğer bir deyişle, görüntü damgalama yöntemlerinde görünmezlik ve dayanıklılık arasında tercih yapılır. Dayanıklılık gereksinimini sağlamak amacıyla yapılmış çok sayıda çalışma vardır. Bununla birlikte, diğer önemli bir gereksinim olan kapasite konusu sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır [68-70]. Sayısal bir görüntü damgalama algoritmasının kapasitesi, bir görüntü parçasında saklanabilen ve keyfi hata olasılığı ile çözülebilen en büyük bilgi biti sayısı olarak tanımlanabilir. Kapasite analizi, görüntüde saklanabilecek bilgi miktarının üst sınırını verdiği için önemlidir. Shannon, haberleşme kanallarının kapasitesi hakkındaki makalesinde, haberleşme kanallarının kapasitesinin iletilecek

bilgi işaretinin gücüne ve kanal gürültüsüne bağlı olduğunu göstermiştir [66]. Bölümün geri kalanında gösterileceği gibi, damgayı iletilecek bilgi işareti, damga eklenecek görüntüyü de haberleşme kanalı gibi düşünürsek, bir sayısal görüntü damgalama yönteminin kapasitesi damganın gücüne ve damga eklenecek görüntünün karakteristiğine bağlı olacaktır.

Sayısal görüntü damgalama için kapasite problemi ilk olarak Servetto ve diğerleri tarafından ele alınmıştır [68]. Bu araştırmacılar, çalışmalarında sayısal bir görüntüye damga ekleme işleminin belirli bir aygıtta bit depolama işlemine eşdeğer olduğunu belirterek görüntüleri hafıza aygıtı dizisi olarak modellemişler ve güç sınırlamalı Gauss kanalı için kapasite formülünü kullanarak depolama kapasitesini hesaplamışlardır. Bu çalışmanın en önemli eksikliği, sadece toplamsal damgalar için geçerli olmasıdır. Ayrıca, damga eklenecek görüntü özelliklerinin (DCT ve DWT katsayıları gibi) Gauss dağılımı ile modellendiği varsayılmıştır. Bir görüntünün DCT ve DWT katsayılarının Gauss dağılımı ile doğru bir şekilde modellenemeyeceği iyi bilinmektedir. Bu iki eksiklik, damganın ekleneceği görüntü özellikleri için Gauss dağılımı varsaymayan ve toplamsal olmayan damgalar için de doğru sonuçlar veren bir çalışma ile giderilmiştir [69]. Yöntem, DCT uzayında damgalama için geliştirilmesine karşın DWT ve DT-CWT gibi diğer uzaylara kolayca uyarlanabilir. Son olarak, görüntü kaynaklarının bilgi saklama kapasitesini kestirmek amacıyla bilgi-teorisine dayanan bir yöntem Moulin ve Mıhçak tarafından önerilmiştir [70]. Bilgi-teorisine dayanan yaklaşım, önceki yöntemlerin aksine saldırı tiplerinin yanı sıra damga ekleme ve çözme fonksiyonları üzerinde herhangi kısıt varsaymadığından en iyi kapasite kestirimini vermektedir. Bunun nedeni, damga ekleme için yapılmış varsayımların çözme yöntemlerinin performansını ciddi şekilde etkileyebilmesidir.

Ancak, bilgi-teorisi tabanlı damgalama kapasitesi kestirim yönteminde dönüşüm katsayılarının toplam sayısının damga eklenecek görüntünün piksel sayısına eşit olduğu varsayılmaktadır. Damgalama için DT-CWT uzayı kullanıldığında dönüşüm katsayılarının toplam sayısı damga eklenecek görüntünün piksel sayısının iki katı olduğundan bilgi-teorisi tabanlı kapasite kestirimi DT-CWT uzayında gerçekleştirilen damgalama yöntemleri için uygulanamaz. Gelecek araştırmalarda

DT-CWT uzayı için [68,69]'da verilen diğer iki kapasite kestirim algoritması kullanıldığında sonuçların nasıl değişeceğini görmek ilginç olacaktır.

Bölüm aşağıdaki kısımlardan oluşmuştur. Kısım 5.2'de, kapasite kestirim yöntemleri kısaca tanıtılmıştır. Kısım 5.3'de, DCT ve DWT uzaylarında damga eklemenin nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Kısım 5.4'de 2D-DCT ve DWT uzaylarında normalleştirme varken ve normalleştirme olmadan gerçekleştirilen damgalama yöntemleri aracılığıyla elde edilebilecek kapasite değerleri bilgi-teorisi tabanlı yöntem kullanılarak çeşitli saldırılar durumunda tespit edilmiştir. Son olarak, Kısım 5.5'de çalışmadan çıkartılabilecek sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.2. Kapasite Hesaplama Yöntemleri

5.2.1. Birinci Yöntem

Damgalama kapasitesini hesaplamada basit bir yaklaşım, damga kanalını Shannon kanal kapasitesi teoremi kullanılabilecek şekilde toplamsal bir beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) kanalı olarak modellemeden ibarettir [68]. AWGN modeline göre, damga eklenecek görüntüden çıkartılan bir özellikler kümesine eklenir. Görüntü damgalama durumunda bu özellikler piksel grilik seviyeleri, uygun bir dönüşüm uzayı katsayıları, blok-DCT katsayıları v.b. olabilir. AWGN modeli benimsenirse, kanalın her seferinde kullanımı, yani damgalanan her özellik için damgalama kapasitesi C_W , P_{wat} damga gücü ve P_{host} damganın ekleneceği işaretin gücü olmak üzere,

$$C_W = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{wat}}{P_{host}} \right) \quad (5.1)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (5.1)'in temel eksikliği sadece toplamsal damga durumunda geçerli olmasıdır. Ayrıca, damganın ekleneceği özellikler için Gauss dağılımı varsayımı sağlanmalıdır. Aslında, damga ekleme kuralı çoğu pratik durumda toplamsal değildir ve özellikler için Gauss gürültüsü yaklaşıklığı geçerli değildir.

5.2.2. İkinci Yöntem

Birinci yöntemin eksiklikleri, toplamsal olmayan ve dama eklenecek katsayılar için Gauss dağılımı varsaymayan bir yöntem kullanılarak giderilmiştir [69]. Yöntem tam-çerçeve ayrık kosinüs dönüşümü ile damgalama için geliştirilmiş olmasına karşın diğer damgalama yöntemlerine kolayca uyarlanabilir.

Aşağıda frekans uzayında çalışan, toplamsal olmayan bir damgalama algoritması kullanılarak bir görüntüde saklanabilecek bit sayısını hesaplamada [69]'da geliştirilen algoritma tanıtılacaktır. Özellikle, damga eklemenin bir görüntünün tam çerçeve DCT katsayılarının değiştirilmesi ile gerçekleştirildiği yayılı spektrum teknikleri göz önünde bulundurulmuştur. Damgayı orijinal verinin tam çerçeve dönüşümüne ekleyen damgalama teknikleri holografik olarak adlandırılır. Bu adlandırmanın nedeni, tam-çerçeve dönüşümün saklı her bilgi parçasını görüntünün bütününe yayma ve böylece kırpmaya saldırısına karşı gerçek bir dayanıklılık sağlama üstünlüğüne sahip olmasıdır. Ekleme kuralı, her bir dönüşüm katsayısına yapılacak değişim miktarının katsayının genliği ile orantılı olduğu

$$y_i = x_i + \gamma m_i |x_i| \quad (5.2)$$

ifadesiyle verilir. Denklem (5.2)'de x_i orijinal DCT katsayılarını, y_i damgalı katsayıları, m_i damganın i . bileşenini, γ damga gücünü belirleyen katsayıyı ifade etmektedir. Aşağıda verilecek analiz tam çerçeve DCT damgalaması için geçerli olmakla birlikte, damga kapasitesini hesaplamada kullanılan yöntem çok daha geneldir. Aslında, analiz damga ekleme kuralının Denklem (5.2)'deki gibi toplamsal/çarpımsal olduğu bütün yöntemlere uygulanabilir. Denklem (5.2)'deki gibi bir kural damganın daha iyi saklanması amacıyla insan görme sisteminin karakteristiklerinin kullanılmasına izin verdiği için çoğu damgalama algoritması için geçerlidir.

Analizi basitleştirmek için m_i 'lerin $[-1,1]$ gibi sonlu bir aralıkta değer aldığını varsayacağız. Pratik uygulamalarda damga katsayıları daima sınırlı olduğundan, bu

varsayım sonuçların genelliğini etkilemez. Damgalama kapasitesi hesaplamasının haberleşme kanalı kapasitesi hesaplamasına olan benzerliğinden yararlanarak damganın i . bileşeni m_i 'yi iletilecek işaret, damgalı i . bileşen y_i 'yi kanal çıkışı ve damgalanmamış i . DCT bileşen x_i 'yi kanal gürültüsü olarak düşünebiliriz. AWGN varsayımının geçerli olmadığı açıktır. DCT katsayıları Gauss rastlantı değişkenleri olarak modellenemez. Denklem (5.2)'de verilen damgalama kuralı toplamsal-çarpımsaldır.

Bir sonraki kısımda Denklem (5.2)'de tanımlanan damga ekleme kuralı için damgalama kapasitesi C_W 'nin hesaplanmasına imkan veren bir yöntem tanıtılacaktır.

5.2.2.1. Damga kanalı modelleme

m_i ve x_i rastlantı değişkenlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları sırasıyla $f_{m_i}(m)$ ve $f_{x_i}(x)$ olsun (m_i ve x_i 'lerin bağımsız ve eşit dağılımlı değişkenler olduğunu varsaydıgımızdan bundan sonraki tartışmalarda i alt indisi ihmal edilecektir.) Denklem (5.2)'den damga değeri m altında damgalı katsayı y 'nin koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf) $f_y(y|m)$, $sign(\cdot)$ işaret fonksiyonunu göstermek üzere

$$f_y(y|m) = \frac{1}{1 + \gamma m \text{sign}(y)} f_x\left(\frac{y}{1 + \gamma m \text{sign}(y)}\right) \quad (5.3)$$

olarak yazılabilir. Burada önerilen yaklaşıma göre, kanalın her kullanımı yani bir DCT katsayısının kapasitesini hesaplamak için kanalın hem girişi m hem çıkışı y nicemlenerek ayrık-giriş ayrık-çıkış bir model elde edilir. DCT katsayılarının birbirinden bağımsız olduğu varsayılarak ve m 'lerin bağımsız ve eşit dağılımlı rastlantı değişkenleri olduğu göz önünde bulundurularak, damga kanalının hafızasız olduğu sonucuna varılabilir.

Nicemeleme aralıkları ve adımları seçildikten sonra, \hat{m}_i ve \hat{y}_i sırasıyla giriş ve çıkış nicemlenmiş değerlerini göstermek üzere ayrık hafızasız damga-kanalı, giriş alfabeti $\mathcal{M} = \{\hat{m}_0, \hat{m}_1, \dots, \hat{m}_{K-1}\}$, çıkış alfabeti $\mathcal{Y} = \{\hat{y}_0, \hat{y}_1, \dots, \hat{y}_{J-1}\}$, ve geçiş olasılıkları

kümesi $p(\hat{y}_j|\hat{m}_j)$, $j = 0,1, \dots, J-1$, $k = 0,1, \dots, K-1$ ile tanımlanır. Geçiş olasılıkları Denklem (5.3)'deki koşullu pdf'nin integrali alınarak hesaplanabilir.

$$p(\hat{y}_j|\hat{m}_k) = \int_{\hat{y}_j}^{\hat{y}_{j+1}} f_y(y|\hat{m}_k) d_y \quad (5.4)$$

Kanal geçiş matrisi $\mathbf{P} = \{p(\hat{y}_j|\hat{m}_j)\}$ ve önsel olasılıklar $p(\hat{m}_i)$ verildiğinde, kanalın karşılıklı bilgisi $I(M; Y)$

$$I(M; Y) = \sum_{i,k} p(\hat{m}_k) p(\hat{y}_j|\hat{m}_k) \log_2 \left[\frac{p(\hat{y}_j|\hat{m}_k)}{\sum_i p(\hat{m}_i) p(\hat{y}_j|\hat{m}_i)} \right] \quad (5.5)$$

denklemleriyle tanımlanır. $I(M; Y)$ 'nin mümkün tüm giriş olasılıkları üzerinden en büyüklenmesi kanalın her kullanımı, yani bir DCT katsayısı için kapasitesini verir. $I(M; Y)$ 'nin en büyük değeri hesaplanırken ayrık hafızasız bir kanalın karşılıklı bilgisininin $p(M) = \{p(\hat{m}_0), p(\hat{m}_1), \dots, p(\hat{m}_{K-1})\}$ 'in dış bükey bir fonksiyonu olduğu hatırlanırsa,

$$\sum_{k=0}^{K-1} p(\hat{m}_k) = 1, \quad p(\hat{m}_k) \geq 0 \quad \forall k \quad (5.6)$$

ile verilen kısıtlamalar altında k adet değişken $\{p(\hat{m}_k)\}$ üzerinden $I(M; Y)$ 'nin en büyüklenmesiyle C_w elde edilebilir. C_w 'yi hesaplamada gerekli olan DCT katsayılarının pdf'sinin kestirimi bir sonraki kısımda ele alınmıştır.

5.2.2.2. DCT katsayılarının modellenmesi

Tam-çerçeve DCT katsayılarının $\alpha(\nu)$,

$$\alpha(\nu) = \sqrt{\frac{\Gamma(3/\nu)}{\Gamma(1/\nu)}}$$

ile verilen bir katsayı ve $\Gamma(\cdot)$ iyi bilinen gamma fonksiyonu olmak üzere,

$$f_{GG}(x) = \frac{\nu\alpha(\nu)}{2\sigma\Gamma(1/\nu)} e^{\left[-\left(\frac{\alpha(\nu)}{\sigma}|x|\right)^\nu\right]} \quad (5.7)$$

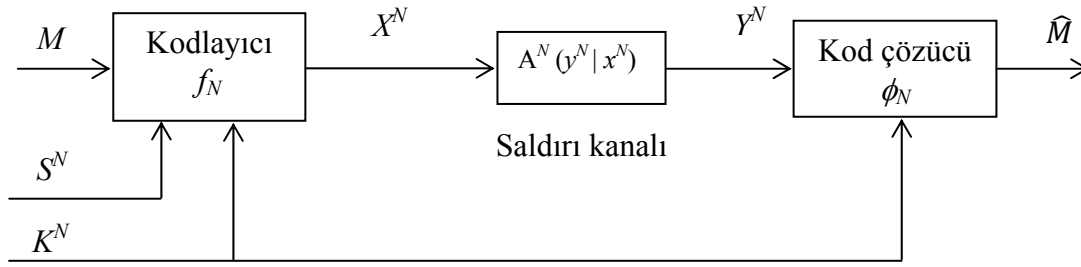
olarak tanımlanan sıfır ortalamalı bir genelleştirilmiş Gauss pdf'sine sahip olduğunu varsayalım. ν ve σ parametreleri, pdf'nin sırasıyla şeklini ve varyansını belirleyen gerçek değerli pozitif sabitlerdir. $\nu = 2$ için bir Gauss dağılımı elde edilirken, $\nu = 1$ olduğunda Genelleştirilmiş Gauss dağılımı Laplace dağılımına indirgenir. Denklem (5.3)'de $f_x(x)$ 'in yerine $f_{GG}(x)$ yazılarak $f_y(y|m)$ için

$$f_y(y|m) = \frac{1}{1 + \gamma m \text{sign}(y)} \frac{\nu\alpha(\nu)}{2\sigma\Gamma(1/\nu)} e^{\left[-\left(\frac{\alpha(\nu)}{\sigma}\left|\frac{y}{1 + \gamma m \text{sign}(y)}\right|\right)^\nu\right]} \quad (5.8)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (5.8)'in kanal geçiş matrisi ifadesi olan Denklem (5.4)'de yerine konulmasıyla,

$$\begin{aligned} p(\hat{y}_j | \hat{m}_k) &= \int_{\hat{y}_j}^{\hat{y}_{j+1}} f_y(y | \hat{m}_k) d_y \\ &= \int_{\hat{y}_j}^{\hat{y}_{j+1}} \frac{1}{1 + \gamma \hat{m}_k \text{sign}(y)} \frac{\nu\alpha(\nu)}{2\sigma\Gamma(1/\nu)} e^{\left[-\left(\frac{\alpha(\nu)}{\sigma}\left|\frac{y}{1 + \gamma \hat{m}_k \text{sign}(y)}\right|\right)^\nu\right]} d_y \end{aligned} \quad (5.9)$$

bulunur. Damga kapasitesi kestirilirken, yukarıdaki integraller sayısal olarak hesaplanmalı ve sonuçlar Denklem (5.6)'da verilen kısıtlar altında Denklem (5.5)'in en büyüklenmesi işlemine aktarılmalıdır. Açıklanan analizin kapasite hesabında kullanılabilmesi için çıkış rastlantı değişkeni y 'nin değer aralığı, giriş (çıkış) niceleme adımı, $\Delta m(\Delta y)$ değerleri seçilmelidir. Yapılan analizlerde y 'nin değer aralığının $[-4,4]$ olduğu ve $\Delta m = 0.1$ ($\Delta y = 0.02$), $\gamma = 0.1$ seçildiğinde iyi sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. ν ve σ parametreleri en büyük olabilirlik kestirimi gibi bir kestirim yöntemi kullanılarak belirlenebilir.



Şekil 5.1 Kodlayıcı, saldırı kanalı ve kod çözücüyü içeren damgalama modeli (IEEE'nin izni ile [70]'den uyarlanmıştır)

5.2.3. Üçüncü yöntem

Son olarak, görüntü kaynaklarının bilgi saklama kapasitesini hesaplamak için bilgi-teorisine dayanan bir yöntem Moulin ve Mihçak tarafından önerilmiştir [70]. Yönteme esas teşkil edecek matematiksel model Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Kod çözücüye bir M bilgisi iletilecektir. Bilgi, damga eklenecek veri kümesi olarak adlandırılan N -uzunluklu bir $S^N = (S_1, \dots, S_N)$ dizisine eklenir. Ekleme, kod çözücüde de bulunan, yan bilgi (kriptografik bir anahtar v.b.) $K^N = (K_1, \dots, K_N)$ kullanılarak yapılır. Sonuçlanan damgalı veya bileşik veri $X^N = (X_1, \dots, X_N)$, X^N 'den M 'i yok etmek amacıyla yapılan saldırılara maruz kalır. Damga ekleme işlemi saydam olmalıdır. Diğer bir deyişle, uygun bir bozulma ölçütüne göre X^N , S^N 'ye benzer olmalıdır. Sistem aynı zamanda dayanıklı olmalıdır. Yani, saklı bilgi X^N 'ye uygulanacak herhangi bir saldırı sonucunda yok olmamalıdır. Saldırganın yapmak istediği bozulma miktarı için bir sınır vardır.

Bu sistem M , S^N ve K^N için istatistiksel bir model ve bir bozunum fonksiyonu tanımlanarak, veri saklayıcı ve saldırı için kabul edilebilir bozunum seviyeleri üzerinde kısıtlamalar ve tüm birimlere mevcut olan bilgiler belirtilerek analiz edilebilir. Daha sonra, herhangi bir veri saklama stratejisi ve belirli kısıtlamaları sağlayan herhangi bir saldırı üzerinden, M için güvenli iletim hızı veya eşdeğer olarak kapasite araştırılır.

(M, S^N, K^N) için istatistiksel model aşağıdaki gibidir.

– Damgalama problemlerinde S_i bir görüntüden elde edilen bir veri bloğu veya dönüşüm verisidir. Örneğin, S_i bir piksel değeri, 8x8 blok DCT katsayıları veya dalgacık katsayılarının bir alt ağacı olabilir. Bu katsayılar ayrık-değerli (nicelemeden sonra) veya gerçek-değerli olabilir. Damga eklenecek veri $S^N = (S_1, \dots, S_N)$, $p(s), s \in \mathcal{X}$ pdf'sine sahip bağımsız ve eşit dağılımlı (i.i.d.) bir örnekler kümesidir. Örneğin, S 'in 8x8 blok DCT katsayıları olduğu, 512x512 boyutlarındaki bir görüntü damgalama probleminde $N=4096$ olur.

– Yan bilgi K^N 'in bileşenleri K_i 'ler i.i.d. olup $p(k), k \in \mathcal{K}$ pdf'sine sahiptir. Yan bilgi K^N potansiyel olarak iki rol oynar. Birincisi, kod çözücü tarafından bilinen bir rastgelelik (kriptografik anahtar) kaynağı sağlar. İkincisi, kod çözücüye S ile ilgili yan bilgi sağlar. S ve K arasındaki bağımlılıklar bir ortak dağılım $p(s, k)$ kullanarak modellenir. Örneğin, S, K 'nın bir fonksiyonu olabilir. Bu S 'nin kod çözücüde mevcut olduğu anlamına gelir ve *özel* damgalama olarak adlandırılır. Gözü-kapalı (kamusal damgalama) damgalama uygulamalarında, K^N, S^N ile ilgili herhangi bir bilgi taşımayıp, kod çözücü damga eklenecek işarete sahip değildir. Bazı sistemlerde, hiçbir yan bilgi kullanılmaz.

– İlgili bilgi M , bilgi kümesi \mathcal{M} üzerinde düzgün dağılıma sahiptir ve kod çözücüye güvenli bir biçimde iletilecektir. $M, (S, K)$ 'dan bağımsızdır.

Damga ekleme ve saldırının bozunum kısıtlamaları vardır. \mathcal{X} 'in elemanları arasında negatif olmayan sınırlı bir bozunum fonksiyonu $d(.,.)$ 'yi ele alalım. İki katsayı arasında tanımlanan $d(.,.)$ bozunum fonksiyonu, N -uzunluklu iki vektör X^N, Y^N arasındaki bozunuma

$$d^N(X^N, Y^N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d(X_k, Y_k) \quad (5.10)$$

eşitliğiyle genişletilir. D_1 bozunumuna sahip N -uzunluklu veri damga ekleme yöntemi $(\mathcal{M}, f_N, \phi_N)$ üçlüsüyle tanımlanır. Bilgi kümesi \mathcal{M} yukarıda tanımlandığı gibidir ve

– f_N , bir s^N dizisini, bir m bilgisini ve bir k^N anahtarını $x^N = f_N(s^N, m, k^N) \in X^N$ dizisine dönüştüren kodlayıcıdır. Bu dönüşümün

$$E[d^N(S^N, X^N)] \leq D_1; \quad (5.11)$$

ile verilen bozunum kısıtlaması vardır.

– ϕ_N , alınan Y^N dizisini ve K^N anahtarını kullanarak çözülen bilgi $\hat{M} = \phi_N(Y^N, K^N) \in \mathcal{M}$ 'ye dönüştüren kod çözücüdür.

D_2 bozunumuna sahip hafızalı bir saldırı kanalı

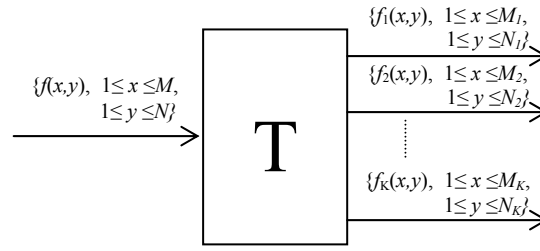
$$E[d^N(S^N, X^N)] \leq D_2, \quad N \geq 1 \quad (5.12)$$

ile verilen bozunum kısıtlamasına sahiptir ve X^N 'den Y^N 'e tanımlı koşullu olasılık kütle fonksiyonları dizisi $A^N(Y^N|X^N)$ aracılığıyla tanımlanır. Bu, saldırganın damga eklenecek işarete yapmayı planladığı beklenen bozunum üzerindeki bir kısıtlamadır.

D_2 bozunumuna sahip herhangi bir saldırı için $N \rightarrow \infty$ iken hata olasılığı $P_{e,N} = P_r[\hat{M} \neq M]$ sifıra gidecek şekilde, D_1 bozunumuna sahip $R_N > R$ bit hızlı bir $(\mathcal{M}, f_N, \phi_N)$ kod dizisi varsa, bir $R = (1/N) \log |\mathcal{M}|$ bit hızının (D_1, D_2) bozunumları için mümkün olduğu söylenir. O halde, veri saklama kapasitesi $C(D_1, D_2)$, (D_1, D_2) bozunumları için mümkün bit hızlarının en büyüğü olarak tanımlanır.

5.2.3.1. Paralel Gauss kanalları

Bu kısımda, bir görüntünün dönüşüm katsayılarının paralel Gauss kanalları oluşturduğu varsayıp Karesel Ortalama Hata (MSE) bozunum ölçütü için damgalama kapasitesi kestirilecektir. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, gerçek değerli işaret (görüntü) $f(x, y)$ 'nin, $1 \leq x \leq M$, $1 \leq y \leq N$ bir T dönüşümü kullanılarak K



Şekil 5.2. Bir T dönüşümü kullanılarak bir görüntünün K alt kanala ayrıştırılması (IEEE'nin izni ile [70]'den uyarlanmıştır)

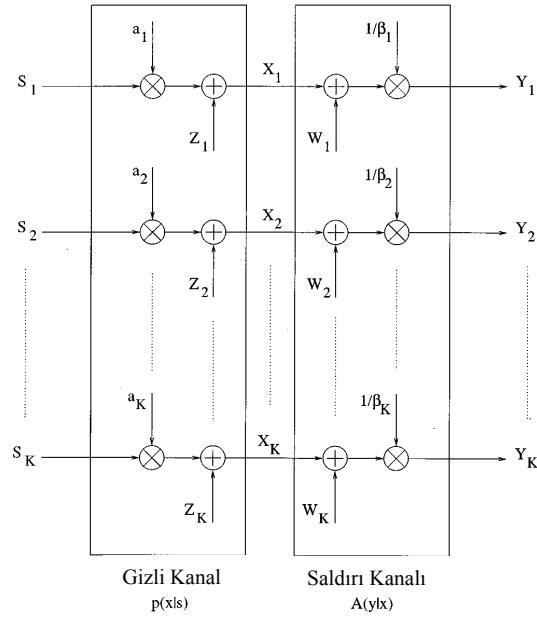
kanala ayrıştırılmasını göz önüne alalım. Kanal k 'daki işaret $f_k(x, y), 1 \leq x \leq M_k, 1 \leq y \leq N_k$ alt işaret olarak adlandırılır ve toplam M_k örneğe sahiptir. $f(x, y)$ 'den alt işaretler $\{f_k(x, y)\}$ 'ye dönüşüm T , tersi mevcut olan bir dönüşümdür ancak doğrusal olmak zorunda değildir. Bu nedenle T dönüşümünün altbant dönüşüm veya blok-DCT dönüşümü gibi genellikle bir doğrusal dönüşüm olması gerekmez.

Paralel Gauss modelinde, $\{f_k(x, y)\}$ 'ler bağımsızdır, ve $f_k(x, y)$ örnekleri $N(0, \sigma_k^2)$ dağılımına sahip i.i.d. rastlantı değişkenleridir. k . kanaldaki ters alt örnekleme katsayısı $r_k = M_k N_k / MN$ olmak üzere, $\sum_{k=1}^K r_k = 1$ olduğu varsayılmıştır.

$f(x, y)$ ve $f'(x, y) \in R^N$ işaretleri arasındaki örnek başına bozunum,

$$d^N(f(x, y), f'(x, y)) = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^K \sum_{x=1}^{M_k} \sum_{y=1}^{N_k} |f_k(x, y) - f'_k(x, y)|^2 \quad (5.13)$$

olarak tanımlanır. Eğer T transpozesi tersine eşit olan bir dönüşüm ise, d^N R^N 'de normalleştirilmiş Euclid uzaklığıdır. Aşağıdaki bozunum kısıtlamalarını göz önüne alalım. Damga ekleyici damga eklenecek görüntü ile damgalı görüntü arasındaki bozunum $E[d(S, X)] \leq D_1$ olacak şekilde damga ekleme yöntemini, saldırgan $E[d(S, X)] \leq D_2$ olacak şekilde saldırısını tasarlar. Bu kısıtlamalar altında damgalama kapasitesi nedir?



Şekil 5.3. Paralel Gauss kanalları için optimal veri saklama ve saldırı stratejileri (IEEE'nin izni ile [70]'den uyarlanmıştır)

A. Paralel Gauss kaynakları için kapasite: d_{1k} ve d_{2k} sırasıyla damga ekleyici ve saldırgan tarafından k . kanalında yapılan bozunumlar olsun. Optimal damga ekleme ve saldırı stratejileri tek kanal durumunda olduğu gibi hafızasızdır ve kanallar da bağımsızdır. Çözüm Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Her bir kanaldaki en iyi damga ekleme ve saldırı stratejileri, damga eklenecek işaretin varyansının σ_k^2 ve damga ekleyici ve saldırgan için karesel hata bozunumlarının sırasıyla d_{1k} ve d_{2k} olduğu tek Gauss kanalı için verilen sonuçtur. Kanallar arasındaki $d_1 = \{d_{1k}\}$ ve $d_2 = \{d_{2k}\}$ güçlerinin dağılımı

$$\sum_{k=1}^K r_k d_{1k} \leq D_1 \quad (5.14)$$

$$\sum_{k=1}^K r_k d_{2k} \leq D_2 \quad (5.15)$$

eşitsizlikleriyle verilen toplam bozunum kısıtlamalarını ve $1 \leq k \leq K$ için de

$$0 \leq d_{1k} \quad (5.16)$$

$$d_{1k} \leq d_{2k} \quad (5.17)$$

$$d_{2k} \leq \sigma_k^2 \quad (5.18)$$

eşitsizlikleriyle verilen $3K$ sınırlamayı sağlar. Damga ekleme probleminin denge noktası, damga ekleyici ve saldırgan tarafından kaynakların işaret ve gürültü gücünü paralel kanallara optimal dağıtımını ilgilendiren sınırlamalı bir optimizasyon probleminin çözümüdür. Bu, sınırlamalı optimizasyon problemi, bit hızı-bozunum teorisindeki ve kanal kodlamadaki paralel Gauss kanalları için optimal güç dağıtım problemlerinin benzeridir. Ancak, (daha önce bahsedilen problemlerdeki en büyültme veya en küçültme problemlerinin aksine) en büyültme ve en küçültme işlemlerinin birlikte kullanılmasındaki problemlerinden dolayı damga ekleme problemi daha karmaşıktır. Ana sonuç, Teorem 1’de verilmiştir. $f(x, y)$ damga eklenecek görüntüyü, $f_w(x, y)$ damgalanmış görüntüyü ve $f_{wa}(x, y)$ ’de bozulmuş damgalı görüntüyü belirtsin. $E[|f_k(x, y) - f_{wk}(x, y)|^2] = d_{1k}$ ve $E[|f_{wak}(x, y) - f_k(x, y)|^2] = d_{2k}$ iken $\Gamma(\sigma_k^2, d_{1k}, d_{2k})$, $D = \sigma_k^2((d_{2k} - d_{1k}) / (\sigma_k^2 - d_{2k}))$ olmak üzere

$$C_k = \Gamma(\sigma_k^2, d_{1k}, d_{2k}) \triangleq \begin{cases} \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{d_{1k}}{D}\right), & d_{1k} < d_{2k} < \sigma_k^2 \\ 0, & d_{2k} \geq \sigma_k^2 \end{cases} \quad (5.19)$$

k . kanalının kapasitesi olsun.

Teorem 1: Paralel Gauss kanalları için damgalama kapasitesi,

$$C = \max_{d_1} \min_{d_2} \sum_{k=1}^K r_k \Gamma(\sigma_k^2, d_{1k}, d_{2k}) \quad (5.20)$$

ifadesine eşittir. Burada en büyültme ve en küçültme Denklem (5.14)-(5.18)’de verilen $3K+2$ sınırlamalar sağlanacak şekilde yapılır. $\sum_{k=1}^K r_k \sigma_k^2 \leq D_2$ ise, optimal saldırı tüm k ’lar için $d_{2k} = \sigma_k^2$ olup d_{1k} keyfidir ve $C=0$ ’dır. $\sum_{k=1}^K r_k \sigma_k^2 > D_2$ ise

veri kapasite probleminin tek bir çözümü vardır. Her $1 \leq k \leq K$ için, $\sigma_k^2 = 0$ ise optimal d_{1k} ve d_{2k} sıfır olur; aksi halde d_{1k} , $(0, (2\lambda_2\sigma_k^4/(1 + 2\lambda_2\sigma_k^2)))$ açık aralığında,

$$\begin{aligned}
p_k(d_{1k}) = & \frac{1}{\sigma_k^4} d_{1k}^3 + d_{1k}^2 \left(\frac{1}{\sigma_k^4} \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{2}{\sigma_k^2} \right) \\
& + d_{1k} \left(\frac{1}{\sigma_k^4} \frac{1}{4\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{1}{\sigma_k^2} \frac{\lambda_2 + 2\lambda_1}{2\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)} + 1 \right) \\
& - \frac{\lambda_2}{2\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)}
\end{aligned} \tag{5.21}$$

polinomunun tek çözümüdür. Optimal d_{2k}

$$d_{2k} = \frac{d_{1k}}{2} + \sqrt{\frac{d_{1k}^2}{4} + \frac{d_{1k}}{2\lambda_2}} \tag{5.22}$$

ile verilir. $\lambda_1 < 0$ ve $\lambda_2 > 0$, Lagrange çarpanları $C = \max_{\lambda_2 > 0} \min_{\lambda_1 < 0} r(\lambda_1, \lambda_2)$ 'yi sağlar. Denklem (5.14) ve (5.15)'deki kısıtlamalar eşitlikle sağlanır.

Yukarıdaki en büyütmeye en küçültme optimizasyon problemi dışbükey bir Lagrange optimizasyon problemine dönüştürülerek çözülebilir. Çözümün detayları [70]'de verilmiştir.

Çözümün özellikleri: 1) Zayıf kanallara düşük güç tahsisi. k kanalı için $C_k \triangleq \Gamma(\sigma_k^2, d_{1k}, d_{2k})$ kapasitesi $\sigma_k^2 \rightarrow 0$ iken sıfıra gitmektedir. d_{1k} ve d_{2k} güç tahsisleri de sıfıra gitmektedir ve $d_{1k} \sim 2\lambda_2\sigma_k^4$ ve $d_{2k} \sim \sigma_k^2 + 2\lambda_2\sigma_k^4$ asimptotik ifadeleri sağlarlar. Ayrıca, $C_k \sim 2\lambda_1\lambda_2\sigma_k^4$. Beklenildiği gibi damga ekleyici zayıf kanallara daha az kaynak ayırmalıdır. 2) Güçlü kanallara düzgün güç tahsisi. $\sigma_k^2 \rightarrow \infty$ iken Denklem (5.21), optimal d_{1k} 'nin sadece λ_1 ve λ_2 'ye bağlı olduğunu göstermektedir. Denklem (5.22) ve (5.19), d_{2k} ve C_k için de aynı şeylerin geçerli olduğunu belirtmektedir. Bu asimptotik ifadeler $\sigma_k^2 \rightarrow \infty$ iken, bütün k 'lar için aynıdır.

B. Yaklaşık Model: Dalgacık görüntü temsilinde çoğu katsayının sıfır olduğunu ortaya çıkartan yaklaşık model olarak adlandırılan bir model altında Weidmann ve Vetterli görüntü sıkıştırma için bit hızı-bozunum sınırlarını geliştirmiştir. Bu modelin damga eklemeye de faydalı olduğu görülmüştür. Yaklaşık modelde, varyansı büyük ($\sigma_k^2 \gg D_1, D_2$) ve varyansı küçük olan ($\sigma_k^2 \ll D_1, D_2$) olmak üzere iki kanal tipi vardır. İşaret bileşenleri bağımsızdır. $1 \leq k \leq K^*$ için $\sigma_k^2 \gg D_1, D_2$ ve $K^* < k \leq K$ için $\sigma_k^2 \ll D_1, D_2$ olduğunu varsayalım. Çözümün birinci ve ikinci özelliğinden güçlü işaret bileşenlerinin oranı $\tau^* = \sum_{k=1}^{K^*} \tau_k \in [0,1]$ olmak üzere, kapasitenin

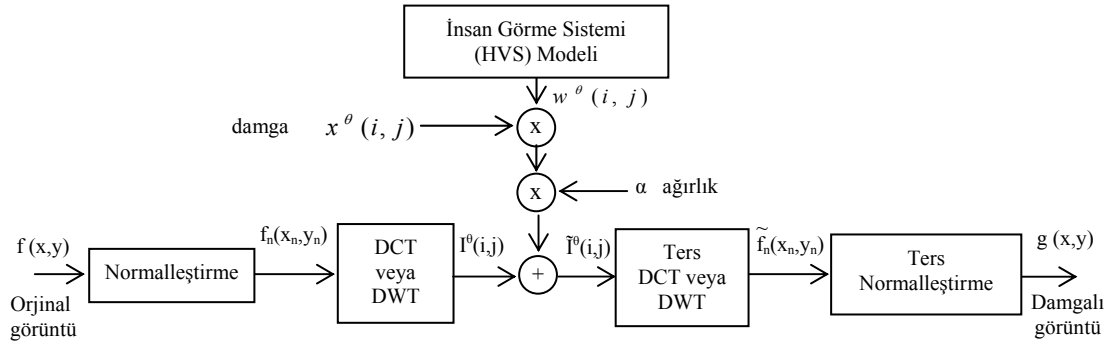
$$C = \frac{1}{2} \tau^* \log \left(1 + \frac{D_1}{D_2 - D_1} \right) \quad (5.23)$$

ile verildiği sonucu çıkar. Eğer bir alt kanalın bileşenleri değiştirilmezse, ters alt örnekleme faktörü bu alt kanal için sıfır olarak alınır. Sonuç olarak, yaklaşık model için aşağıdaki tespitleri yapmak mümkündür.

1) İşaret varyanslarının D_1 ve D_2 'ye göre büyük olması koşuluyla, güçlü kanallarda damga ekleyici ve saldırganın yaptığı güç bölüşürmesi işaret varyansları $\{\sigma_k^2\}$ 'den bağımsızdır.

2) En iyi damga ekleme stratejisi güçlü kanallar arasındaki gücü eşitler ve benzer şekilde en iyi saldırı stratejisi güçlü kanallar arasındaki gürültü gücünü eşitler. Zayıf kanallara ihmal edilebilecek kadar güç tahsis edilir.

3) Örnek başına C_k , bütün güçlü tüm kanallar için aynı ve zayıf kanallarda ihmal edilebilir. Güçlü kanallardaki $\{C_k\}$ kapasiteleri ve $C = \sum_k r_k C_k$ sadece bozunum seviyeleri D_1 ve D_2 'ye bağlıdır ve σ_k^2 varyanslarına bağlı değildir.



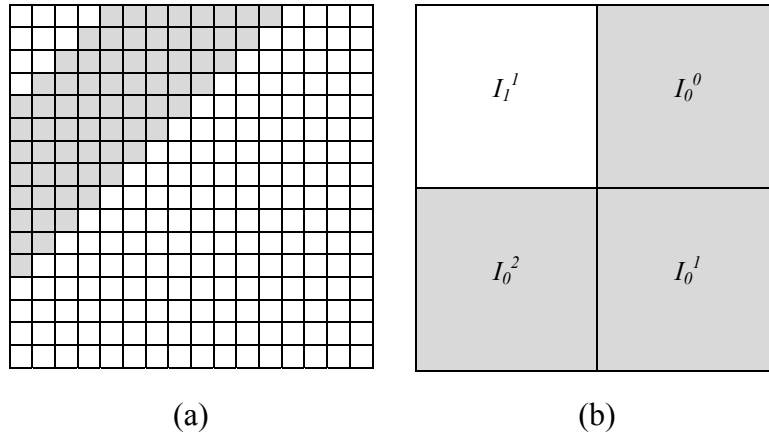
Şekil 5.4. Sayısal görüntü damgalama yöntemi

C. Kapasitenin üst sınırları: Paralel Gauss modelleri, hesaplamalarının nispeten kolay olması ve gerçekçi işaret modelleri için kapasite ifadeleri sağlamaları bakımından kullanışlıdır. İlginç bir şekilde, $f(x,y)$ 'nin gerçek dağılımı modeldekinden farklı ise paralel Gauss kanalları kapasite için üst sınırlar verir. Örneğin, $f_k(x,y)$ alt işaretleri arasındaki herhangi bir ilinti ve Gauss dağılımından sapma kapasiteyi düşürecektir. Gauss olmayan $f(x,y)$ için kapasitenin Denklem (5.20)'de verilen Gauss üst sınırı, D_1 ve D_2 sifıra giderken asimptotik olarak sağlanır ve bu durumda kapasiteyi sağlayan dağılımlar paralel Gaussian durumundakinin aynısıdır. Bu sonuç, damga eklenecek görüntünün gerçek dağılımının küçük bozunum durumunda ikincil bir etkiye sahip olması anlamına gelir.

Bilgi-teorisine dayanan kapasite kestirim yaklaşımı, saldırı tiplerinin yanı sıra damga ekleme ve çözme fonksiyonları üzerinde kısıtlama etkisi yapmadığından birinci ve ikinci yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verir. Bu nedenle, çalışmanın bundan sonraki kısımlarında kapasiteyi hesaplamak için Denklem (5.20) kullanılmıştır.

5.3. Damga Ekleme

Bölüm 3 ve Bölüm 4'de damga ekleme işleminin nasıl yapıldığı detaylı olarak anlatılmıştır. Yöntemler Şekil 5.4'de tekrar gösterilmiştir. Normalleştirmenin ihmal edilmesi durumunda normalleştirme ve ters normalleştirme bloklarının



Şekil 5.5. Damgalama esnasında değiştirilen katsayılar . (a) tam çerçeve DCT, (b) bir seviyeli DWT

kullanılmayacağına dikkat ediniz. Şekil 5.5 DCT ve DWT durumlarında damga eklenecek görüntünün hangi dönüşüm katsayılarının değiştirildiğini göstermektedir. Şekil 5.5 (a)'da görüntünün tam çerçeve DCT katsayılarının temsil edildiğine dikkat edilmelidir. Böylece, damga orta frekans bölgelerine eklenmiş olur. Benzer bir şekilde, Şekil 5.5 (b) görüntünün bir-seviyeli DWT katsayılarını temsil etmektedir. Bir-seviyeli yüksek frekans DWT katsayılarını değiştirmek dayanıklılık ve görünmezlik gereksinimleri arasında en iyi dengeyi verdiği için tercih edilmiştir.

5.4. Deneysel Sonuçlar

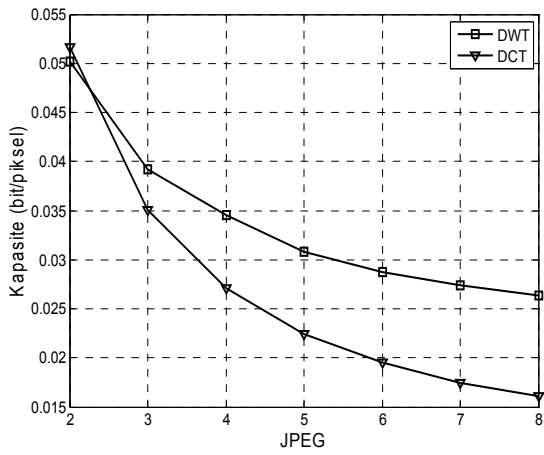
Bu kısımda, damgalı görüntüye farklı saldırılar uygulandığında normalleştirme kapasiteye etkisi simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Bu amaçla 64 bitlik bir damga 512x512 boyutlarındaki Şekil 5.5'de gösterilen Bridge, Baboon ve Camerman görüntülerine Kısım 5.3'de açıklandığı gibi DCT ve DWT uzaylarında normalleştirme varken ve normalleştirme kullanılmadan eklenmiştir. Daha sonra bozulmuş görüntüyü elde etmek için Tablo 3.1'de listelenen saldırılar uygulanmıştır. Saldırıların açıklamaları için Kısım 3.4'e bakılabilir. Ancak kapasite kestirim sonuçları D_1 ve D_2 cinsinden elde edildiğinden Tablo 3.1'de yapılan saldırıların D_2 cinsinden karşılığı belirlenmelidir. Denklem (5.13) kullanılarak damgalı bir görüntü ile bunun bozulmuş şekli arasındaki bozunum miktarı D_2 belirlenebilir. Tüm



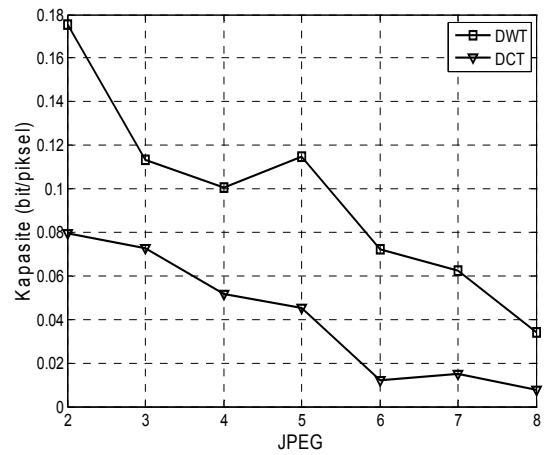
Şekil 5.6 Kapasite hesabında kullanılan Bridge, Cameraman, Baboon görüntüleri

görüntüler için $D_1 = 10$ alınmıştır. Kapasite eğrilerinin D_2 yerine saldırı parametreleri cinsinden verilmesinin nedeni, tüm bileşenler sabit tutulduğunda normalleştirmenin saldırı üzerindeki etkisini görebilmektir.

Kapasite kestirim değerleri kullanılan üç görüntü için de benzer olduğundan sadece Bridge görüntüsü için sonuçlar verilmiştir. JPEG saldırısı durumunda sonuçlar Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekilden, normalleştirmeden bağımsız olarak DWT tabanlı damgalama yönteminin DCT tabanlı yöntemle göre saldırı sabit tutulduğunda daha iyi kapasite sonuçları verdiği görülmektedir. Ayrıca, normalleştirme kullanılmadığında DCT ve DWT kullanılarak yapılan damgalamaların kapasite sonuçları birbirine çok yakınken, normalleştirme kullanıldığında DWT ile DCT arasındaki fark DWT lehine açılmaktadır. Bu gözlem, dönüşüm katsayılarının ne kadarının sıfır olduğunun kapasiteyi etkileyeceği gerçeğini desteklemektedir. Bir görüntünün dalgacık modelindeki sıfır değerli katsayı sayısı tam çerçeve DCT dönüşümündeki sıfır değerli katsayı sayısından fazladır. Ayrıca bir görüntüye normalleştirme uygulandıktan sonra dönüşümü (DCT, DWT) alınırsa sıfır değerli katsayı sayısı artar. Bu iki gözlem, DWT tabanlı yöntemin DCT tabanlı yöntemden neden daha iyi sonuçlar verdiğini açıklamaktadır. Benzer sonuçlar sırasıyla Şekil 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, ve 5.12’de verilen dönme, medyan filtreleme, JPEG2000 sıkıştırması, germe ve ilgin dönüşümler saldırıları durumunda da elde edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa; (i) Damgalama işleminde normalleştirme

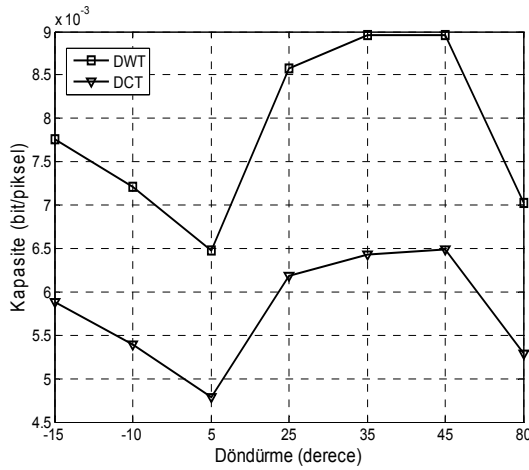


(a)

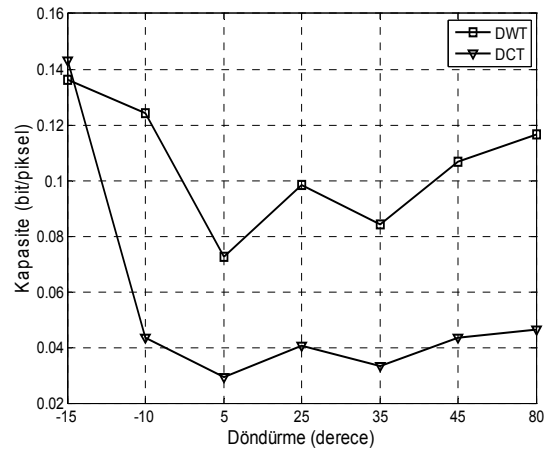


(b)

Şekil 5.7. JPEG sıkıştırması uygulandığında (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları.



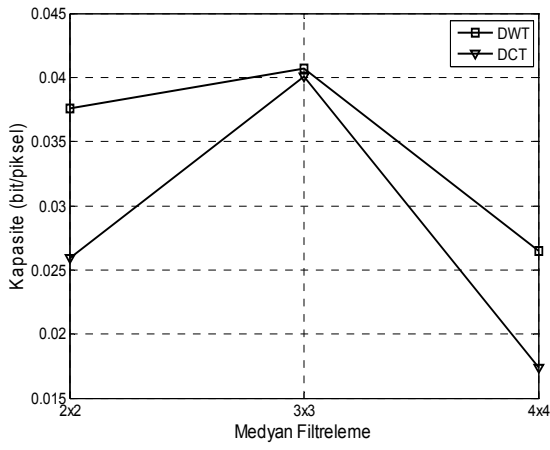
(a)



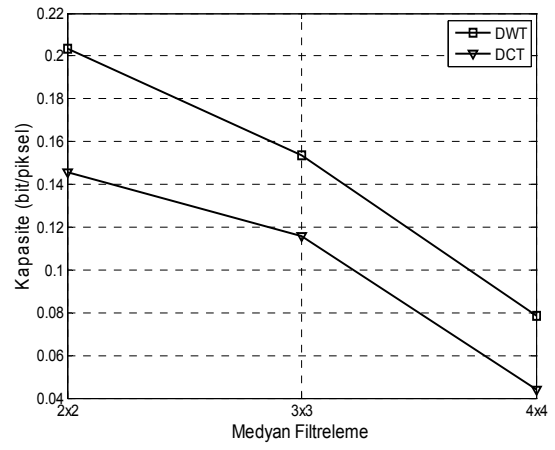
(b)

Şekil 5.8. Döndürme saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları.

adımının kullanılması dönüşümden bağımsız olarak piksel başına kapasiteyi daima artırır. Toplam kapasitenin artıp artmayacağını kontrol edilmesi gerekir. (ii) Kapasite bakımından DWT uzayı DCT uzayına göre daha iyi sonuç verir.



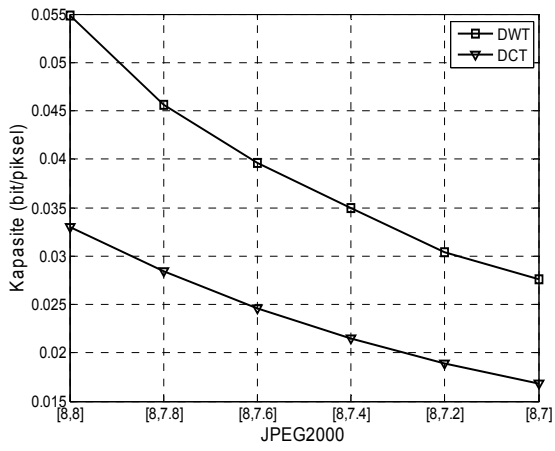
(a)



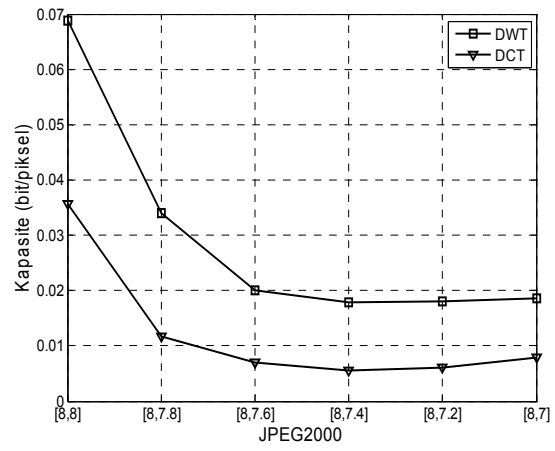
(b)

Şekil 5.9. Medyan filtreleme saldırısı durumunda varken kapasite sonuçları.

(a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları.

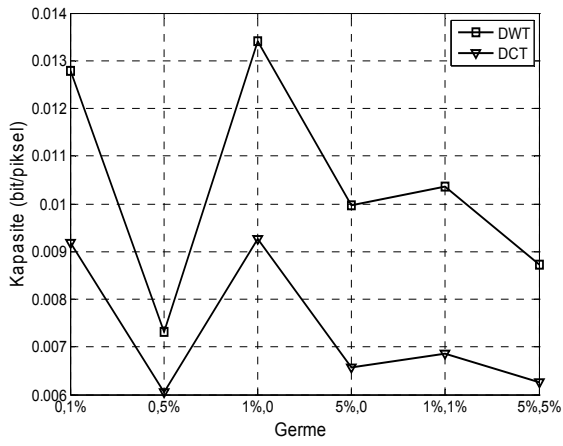


(a)

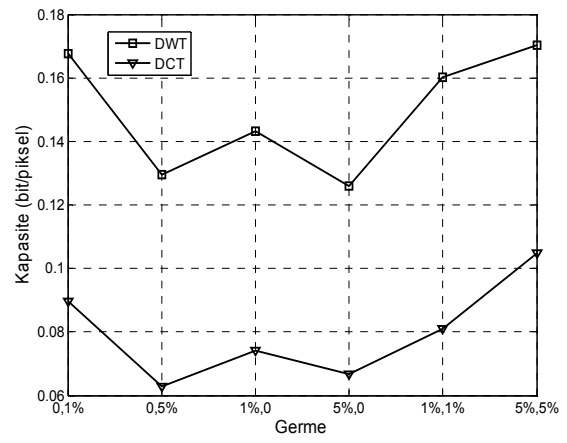


(b)

Şekil 5.10. JPEG2000 sıkıştırması saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları.

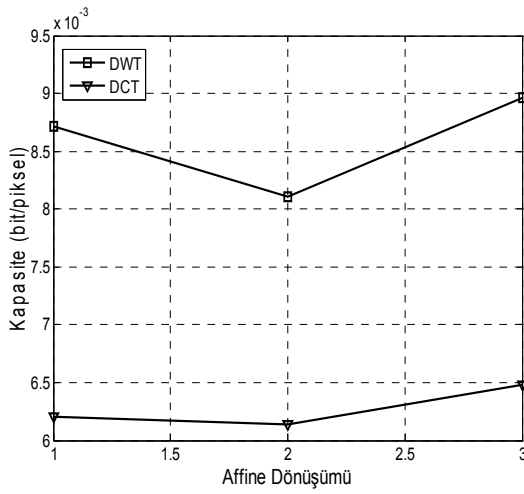


(a)

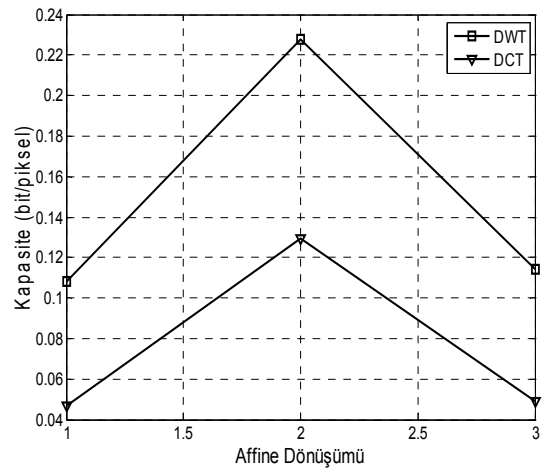


(b)

Şekil 5.11. Germe saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları.



(a)



(b)

Şekil 5.12. İlgin dönüşüm saldırısı durumunda (a) normalleştirme yokken, (b) normalleştirme varken kapasite sonuçları.

5.5. Sonuçlar

Bu b6l6mde moment tabanlı g6r6nt6 normalleştirme işleminin sayısal g6r6nt6 damgalama algoritmasının kapasitesini nasıl etkilediğini belirlemek için Moulin ve Miħak tarafından veri saklama kapasitesini hesaplamak amacıyla geliştirilen bilgi-teorisi tabanlı kapasite kestirme y6ntemi kullanılmıştır.

Sim6lasyon sonuçları, bir g6r6nt6n6n d6n6ř6m6ndeki katsayıların ne kadarının sıfır olduğunun kapasiteyi belirlemede birincil rol oynadığını g6stermiştir. Normalleştirme işlemi bir g6r6nt6n6n d6n6ř6m6ndeki sıfır değerli katsayı sayısını arttırdığından damgalama algoritmalarında bir 6n işlem olarak kullanıldığında g6r6nt6ye piksel başına daha fazla miktarda bilgi eklenmesine imkan vermektedir. Bir g6r6nt6n6n dalgacık d6n6ř6m6ndeki sıfır değerli katsayı sayısının DCT d6n6ř6m6ndeki sıfır değerli katsayı sayısından daha fazla olduğu bilinmektedir. Bu iki husus birlikte değerlendirildiğinde DCT uzayında yapılan bir damgalama algoritmasına g6re DWT uzayında yapılan bir damgalama algoritmasının daha iyi sonuç vermesi şaşırtıcı değerdir.

Bilgi teorisi tabanlı kapasite kestirim y6nteminde, çıkış kanallarındaki işaret 6rneklerinin toplamının giriş işaretindeki toplam 6rnek sayısına eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle y6ntem, B6l6m 4’de geliştirilen DT-CWT uzayındaki damgalama algoritmasının kapasitesini hesaplamada kullanılamaz (Bir g6r6nt6n6n DT-CWT d6n6ř6m6ndeki toplam 6rnek sayısı g6r6nt6deki 6rnek sayısının iki katına eşittir). Y6ntem DT-CWT durumuna uyarlanarak kapasite hesaplanabilir. Bu başka bir çalışma olup tezin kapsamına girmediğinden DT-CWT durumundaki kapasite sonuçları verilmemiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

Bu tezde, Moment Tabanlı Görüntü Normalleştirme ve DWT ile 2D DT-CWT kullanılarak yeni dayanıklı sayısal damgalama algoritmaları geliştirilmiş ve normalleştirmenin DCT ve DWT kullanılarak yapılan sayısal görüntü damgalama algoritmalarına etkisi araştırılmıştır. Tezin bilime yaptığı katkı üç ana başlık altında toplanabilir: (i) normalleştirme ve DWT'nin üstünlüklerinin birleştirilmesiyle oluşturulan yeni bir sayısal görüntü damgalama algoritması geliştirilmiştir, (ii) DWT'ye göre daha iyi sonuçlar veren DT-CWT tabanlı yeni bir algoritma geliştirilmiştir, (iii) literatürde çok az sayıda çalışmada ele alınan görüntü damgalama kapasitesi problemi detaylı olarak tartışılmış ve normalleştirmenin kapasite üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 3'de, normalleştirme ve 2D-DWT kullanılarak hem geometrik hem de geometrik olmayan saldırılar için iyi sonuçlar veren yeni bir sayısal görüntü damgalama yöntemi geliştirilmiştir. İnsan gözü bir görüntüdeki az değişim olan bölgelerdeki gürültülere hızlı değişim olan bölgelerdeki gürültülere göre daha az duyarlıdır. Ayrıca, sıkıştırma yöntemleri yavaş değişimli bölgelere uygulanırken hızlı değişimin olduğu bölgeleri ve kenarları koruyacak şekilde tanımlanır. Bu nedenden ötürü HVS kullanılarak damgayı gözün az duyarlı olduğu bölgeye ekleyerek dayanıklılığı artırılabilir. Çalışma, Şekil 3.9'da verilen 512x512 boyutlarında on tane görüntü kullanılarak yapılmış ve bit hata oranı eğrileri bu on görüntüden çıkan sonuçların ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin, literatürdeki [17] ve [54] yöntemleri ile kıyaslandığında JPEG ve JPEG2000 sıkıştırması, çeşitli geometrik dönüşümler ve bazı görüntü işleme saldırıları da dahil olmak üzere Tablo 3.1'de verilen toplam onbir saldırıya karşı daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Geleneksel ayrık dalgacık dönüşümüne dayalı bir görüntü damgalama algoritması DCT, DFT gibi diğer dönüşümlere dayanan yöntemlere kıyasla üstünlük gösterse de ötelemeden bağımsız olmaması ve sadece üç yönü ayırt edebilmesi bakımından önemli iki eksikliği vardır. Bu eksiklikler DT-CWT'nin kullanılması ile ortadan kaldırılabilir. Bölüm 4'de, normalleştirme ve 2D DT-CWT'nin bir arada kullanılarak gerçekleştirildiği yeni bir dayanıklı sayısal görüntü damgalama yöntemi sunulmuştur. Bu çalışmada da damga, DT-CWT uzayı için geliştirilmiş İGS modelleri göz önünde bulundurularak eklenmiş ve yapılan simülasyonlarda Bölüm 3'de kullanılan görüntüler karşılaştırma yapabilmek amacıyla seçilmiştir. Simülasyon sonuçları, kullanılan yöntemle eklenen damganın çeşitli görüntü işleme saldırılarına karşı literatürdeki iki yöntem ve ilk yöntemimize göre daha da iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Son olarak Bölüm 5'de, moment tabanlı görüntü normalleştirme işleminin sayısal görüntü damgalama algoritmasının kapasitesini nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla veri saklama kapasitesini hesaplamak için geliştirilen bilgi-teorisi tabanlı kapasite kestirim yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışma, kullanılan on görüntü arasında grilik seviyesinde çok az değişim olan Cameraman, orta seviyede değişim içeren Bridge ve çok değişim olan Baboon seçilerek yapılmıştır. Simülasyonlardan (i) damgalama işleminde normalleştirme adımının kullanılmasının piksel başına kapasiteyi daima arttırdığı ve (ii) kapasite önemli olduğunda DCT uzayının damga ekleme için iyi bir seçim olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, simülasyon sonuçları görüntünün dönüşümündeki sıfır değerli katsayı sayısının kapasiteyi belirlediği tespit edilmiştir. Normalleştirme işlemi bir görüntünün dönüşümündeki sıfır değerli katsayı sayısını arttırdığından, ön işlem olarak kullanıldığında daha iyi kapasite sonucu vermektedir. Dalgacık modelindeki sıfır değerli katsayı sayısı DCT modelinkinden daha fazladır. Bu nedenle, DCT uzayı ile karşılaştırıldığında DWT uzayının daha iyi sonuç vermesi sürpriz olarak yorumlanmamıştır.

Çıkıştaki kanallardaki toplam örnek sayısının giriş işaretindeki toplam örnek sayısına eşit olduğunu varsayan bilgi teorisine dayanan yöntemin DT-CWT durumunda kullanılabilmesi için yöntemde gerekli değişiklikler yapılmalıdır.

Sayısal görüntü damgalama nispeten yeni ve geliştirilmekte olan bir araştırma alanı olduğundan teorik ve pratik bakımdan yanıtlanması gereken birçok problem henüz çözülmemiştir. Bu tezde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak ileriki çalışmalarda, aşağıdaki alanlarda araştırmalar yapılabilir;

- Doğrusal olmayan geometrik saldırılara karşı damgalama yöntemleri geliştirmek. Projektif dönüşüm, rastgele bükme saldırısı (RBA), eğme gibi doğrusal olmayan geometrik saldırılardan sonra görüntünün piksel değerlerinde ciddi oranda değişiklikler oluşur ve değişiklikler genellikle bölgeseldir. Bu değişikliklerin damgayı ekleyen kişi tarafından tespit edilmesi ve dolayısıyla bunlara karşı dayanıklı bir damgalama algoritması geliştirilmesi oldukça güçtür.
- Geometrik saldırılara karşı en iyi ön işlem geliştirmek. Geometrik bozunumlara dayanıklılık için tasarlanan ön işlemler görüntünün bozulmasına neden olmaktadır. En az bozunum sağlayan moment tabanlı görüntü normalleştirme yönteminde bile görüntü, normalleştirme ve ters normalleştirme işlemlerinin uygulanmasından sonra bozunuma uğrar. Bu nedenle geometrik saldırılara karşı, bozunuma neden olmayan etkili ön işleme yöntemlerinin geliştirilmesi gereklidir.
- Görüntünün aslını bozmadan damga ekleme ve çıkarma sağlamak. Bütün sayısal görüntü damgalama yöntemlerinde, damga ekleme ve damga çıkarma işlemleri, damga eklenecek görüntünün bozulmasına neden olmaktadır. Damga eklenecek görüntü en az bozunuma uğrayacak şekilde damga ekleme ve çıkarma yapabilecek yöntemler bulunmalıdır.
- Çalışmaları renkli görüntülere uyarlamak. Renkli görüntüler için damgalama algoritmaları geliştirilirken renk kanalları arasındaki ilintinin dikkate alınması gereklidir. Renk kanalları bağımsız olarak değerlendirildiğinde optimum çözüm elde edilemez.
- Yapılan çalışmaları videoya uyarlamak. Bu alanda yapılmış sınırlı sayıda çalışma vardır [71-73]. Video durumunda dayanıklılık ve kapasitenin yanında

hesap yükü çok önemli olmaktadır. Hareket bilgisinin dikkate alınıp alınmayacağı çok önemlidir. Algoritmalar buna göre farklılık göstermektedir.

- Bilgi –teorisi tabanlı kapasite kestirim yöntemini DT-CWT için uyarlamak. Bilgi teorisine dayalı kapasite kestirim yöntemi sınırlamalı bir optimizasyon probleminin çözümüdür. DT-CWT durumunda optimizasyon probleminde yapılan varsayımlar geçerli değildir. O halde DT-CWT için optimizasyon problemi sınırlamalarıyla birlikte yeniden ifade edilmeli ve sonuçlanan yeni optimizasyon problemi çözümlenmelidir.
- Değişmez damga yaklaşımını ön işlem olarak kullanmak. Ön işlem olarak moment tabanlı görüntü normalleştirme yerine değişmez damga yaklaşımı [57] kullanmanın dayanıklılık ve kapasite sonuçlarını nasıl etkilediği araştırılabilir.

EK A. TEOREM 1'İN İSPATI

Kısım 3.2.1'de anlatıldığı gibi bir ilgin dönüşüm, 1) öteleme, 2) x -yönünde germe, 3) y - yönünde germe, 4) x ve y -yönlerinde ölçekleme gibi temel bazı dönüşümler cinsinden ayrıştırılabilir. Böylece, normalleştirme işleminin bu temel dönüşümlere dayanıklı olduğunu göstermek yeterlidir. Diğer bir deyişle, bu dönüşümlere uğrayan bir $f(x,y)$ görüntüsü için normalleştirme işlemi aynı görüntüyü verecektir.

Normalleştirme işleminin öteleme dönüşümüne dayanıklı olduğu rahatlıkla görülmektedir. Bunun nedeni, $f(x,y)$ 'deki herhangi bir ötelemenin normalleştirme işlemindeki merkezleme adımıyla yok edilmesidir.

Şimdi, $f(x,y)$ 'nin normalleştirilmiş görüntüsünün diğer üç temel dönüşümden bağımsız olduğu gösterilecektir. Genelleştirmeyi bozmadan, $f(x,y)$ 'nin önceden merkezlendiği varsayılacaktır. $f(x,y)$ 'nin ilgin dönüşümden sonra bozulmuş görüntüsü için $g(x,y)$ kullanılacaktır. Ayrıca, $g(x,y)$ ve $f(x,y)$ 'nin momentlerini göstermek için sırasıyla $\mu_{pq}^{(a)}$ ve μ_{pq} kullanılacaktır.

Kısım 3.2.1'de anlatılan normalleştirme işleminden, normalleştirilmiş $g(x,y)$ görüntüsünün koordinatları

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = A_s A_y A_x \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} \quad (A1)$$

olarak yazılabilir. Denklem (A1)'de A_x matrisindeki β parametresi Denklem (3.20)'deki normalleştirme koşulu, yani

$$\mu_{30}^{(a)} + 3\beta\mu_{21}^{(a)} + 3\beta^2\mu_{12}^{(a)} + \beta^3\mu_{03}^{(a)} = 0 \quad (A2)$$

eşitliğinden hesaplanır. Ayrıca, Denklem (A1)'de A_y matrisindeki γ parametresi de Denklem (3.21) deki normalleştirme koşulundan

$$\gamma = -\frac{\mu_{11}^{(2)}}{\mu_{20}^{(2)}} = -\frac{\mu_{11}^{(1)} + \beta\mu_{02}^{(1)}}{\mu_{20}^{(1)} + 2\beta\mu_{11}^{(1)} + \beta^2\mu_{02}^{(1)}} \quad (A3)$$

olarak belirlenir..

A. x-Yönünde Germe:

Bu durumda,

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \beta_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (A4)$$

olmak üzere $g(x, y) = f(x_a, y_a)$ 'dır. Bu ilişkiye dayanarak Denklem (A2)'deki $\mu_{pq}^{(a)}$ momentlerini Denklem (3.18)'i kullanarak μ_{pq} cinsinden yazabilir ve bazı cebirsel işlemlerden sonra Denklem (A2)'yi

$$\mu_{30} + 3(\beta + \beta_0)\mu_{21} + 3(\beta + \beta_0)^2\mu_{12} + (\beta + \beta_0)^3\mu_{03} = 0 \quad (A5)$$

şeklinde yazabiliriz. $\beta' \triangleq \beta + \beta_0$ olarak tanımlansın β' parametresinin, orijinal $f(x, y)$ görüntüsünü normalleştirmek için gerekli germe parametresi β' 'nin denklemini sağladığı görülebilir. A'_x karşılık gelen germe dönüşümü, yani $A'_x = \begin{pmatrix} 1 & \beta' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ olsun.

$$A_x A = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \beta + \beta_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = A'_x \quad (A6)$$

olduğuna dikkat ediniz. Böylece, $g(x, y)$ üzerindeki germe normalleştirmesi $f(x, y)$ üzerindeki germe normalleştirmesi ile aynı sonuç görüntüsünü verecektir.

B. y -Yönünde Germe:

Bu durumda,

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (A7)$$

olmak üzere $g(x, y) = f(x_a, y_a)$ olur. Yukarıdaki gibi, Denklem (A2)'deki $\mu_{pq}^{(a)}$ momentleri μ_{pq} cinsinden yazılabilir ve normalleştirme koşulu

$$\mu_{30} + 3 \left(\frac{\beta}{1 + \beta\gamma_0} \right) \mu_{21} + 3 \left(\frac{\beta}{1 + \beta\gamma_0} \right)^2 \mu_{12} + \left(\frac{\beta}{1 + \beta\gamma_0} \right)^3 \mu_{03} = 0 \quad (A8)$$

olarak yeniden yazılabilir. $\beta' \triangleq (\beta/1 + \beta\gamma_0)$ olarak tanımlansın. β' parametresinin, orijinal $f(x, y)$ görüntüsünü normalleştirmek için gerekli germe parametresi β' 'nin denklemini sağladığı görülebilir.

Daha sonra, Denklem (A3)'deki $\mu_{pq}^{(a)}$ momentleri μ_{pq} cinsinden yazılabilir ve

$$\gamma = - \frac{\gamma_0(1 + \beta\gamma_0)\mu_{20} + (1 + 2\beta\gamma_0)\mu_{11} + \beta\mu_{02}}{(1 + \beta\gamma_0)^2\mu_{20} + 2\beta(1 + \beta\gamma_0)\mu_{11} + \beta^2\mu_{02}} \quad (A9)$$

elde edilir. O halde,

$$A_y A_x A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma_0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \beta\gamma_0 & 0 \\ \gamma + \gamma_0(1 + \beta\gamma) & 1 + \beta\gamma \end{pmatrix} \quad (A10)$$

Bazı cebirsel işlemlerden sonra Denklem (A10) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$A_y A_x A = \begin{pmatrix} 1 + \beta\gamma_0 & 0 \\ 0 & \frac{1 + \beta\gamma_0}{(1 + \beta\gamma_0)^2\mu_{20} + 2\beta(1 + \beta\gamma_0)\mu_{11} + \beta^2\mu_{02}} \end{pmatrix}$$

$$\times \begin{pmatrix} 1 & \beta' \\ -\mu_{11} - \beta' \mu_{02} & \mu_{20} + \beta' \mu_{11} \end{pmatrix} \quad (A11)$$

Aşağıdaki gözlemlere dikkat ediniz. 1) Denklem (A11)'deki ikinci matris terimi, γ_0 parametresinden bağımsız bir ilgin dönüşüme karşılık gelir, 2) Denklem (A11)'deki ilk matris terimi, boyut sağlamak amacıyla daha sonra (A1)'deki A_s ölçekleme matrisinde yok edilecek ölçekleme dönüşümüne karşılık gelir. Böylece, $g(x, y)$ 'nin normalleştirilmiş görüntüsü γ_0 parametresi ile tanımlanan A ilgin dönüşümünden bağımsızdır.

C. x ve y-Yönlerinde Ölçekleme:

Bu durumda,

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_0 & 0 \\ 0 & \delta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (A12)$$

olmak üzere $g(x, y) = f(x_a, y_a)$ olur. Önceki iki durumda olduğu gibi, $\mu_{pq}^{(a)}$ momentleri μ_{pq} cinsinden yazılabilir ve Denklem (A2)'deki normalleştirme koşulu

$$\mu_{30} + 3 \left(\frac{\delta_0}{\alpha_0} \beta \right) \mu_{21} + 3 \left(\frac{\delta_0}{\alpha_0} \beta \right)^2 \mu_{12} + \left(\frac{\delta_0}{\alpha_0} \beta \right)^3 \mu_{03} = 0 \quad (A13)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. $\beta' \triangleq (\delta_0/\alpha_0)\beta$ olarak tanımlansın. β' parametresinin, orijinal $f(x, y)$ görüntüsünü normalleştirmek için gerekli germe parametresi β' 'nin denklemini sağladığı görülebilir.

Daha sonra, Denklem (A3)'deki $\mu_{pq}^{(a)}$ momentleri μ_{pq} cinsinden yazılır ve

$$\gamma = - \frac{\alpha_0 \delta_0 \mu_{11} + \beta \delta_0^2 \mu_{02}}{\alpha_0^2 \mu_{20} + 2\beta \alpha_0 \delta_0 \mu_{11} + \beta^2 \delta_0^2 \mu_{02}} \quad (A14)$$

eşitliğini elde edilir. O halde,

$$A_y A_x A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 & 0 \\ 0 & \delta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \beta \delta_0 \\ \alpha_0 \gamma & \delta_0 (1 + \beta \gamma) \end{pmatrix} \quad (A15)$$

Bazı cebirsel işlemlerden sonra Denklem (A15) aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$A_y A_x A = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_0^2 \delta}{\alpha_0^2 \mu_{20} + 2\beta \alpha_0 \delta_0 \mu_{11} + \beta^2 \delta_0^2 \mu_{02}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & \beta' \\ -\mu_{11} - \beta' \mu_{02} & \mu_{20} + \beta' \mu_{11} \end{pmatrix} \quad (A16)$$

Denklem (A16)'daki ikinci matris terimi, α_0, δ_0 parametrelerinden bağımsız olan bir ilgin dönüşüme ve Denklem (A16)'deki ilk matris terimi bir ölçekleme dönüşümüne karşılık gelir. Böylece, $g(x, y)$ 'nin normalleştirilmiş görüntüsü α_0, δ_0 parametreleri tarafından belirlenen A ilgin dönüşümünden bağımsız olur.

D. Genel İlgın Dönüşümler Altında Teklik:

Son olarak, genel bir ilgin dönüşüme uğrayan $f(x, y)$ görüntüsünü göz önüne alalım. Dönüşüm matrisi A 'yı

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_0 & 0 \\ 0 & \delta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (A17)$$

olarak ayrıştırırız. Denklem (A5), (A8) ve (A13)'e benzer bir şekilde $\beta' = (1/\alpha_0/\delta_0\beta) + \gamma_0) + \beta_0$ parametresi tanımlayabiliriz. β' ve β parametreleri, Denklem (A2)'deki normalleştirme koşulunun sırasıyla $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ görüntülerine karşılık gelen kökleridir. O halde,

$$\beta = \frac{\frac{\alpha_0}{\delta_0}}{\frac{1}{\beta' - \beta_0} - \gamma_0} \quad (A18)$$

Denklem (A18)'den sadece β' gerçel ise, β' 'nin gerçel olduğu görülmektedir. Böylece, Denklem (A2)'nin orijinal $f(x, y)$ görüntüsü için tek bir reel kökü (veya üç reel kökü), varsa, $f(x, y)$ 'nin ilgin olarak dönüşmüş herhangi bir hali için de sadece tek bir reel kökü (veya üç reel kökü) vardır.

Ayrıca, $|\beta'| < |(1/\gamma_0) + \beta_0|$ için β, β' 'nin düzgün olarak artan bir fonksiyonudur. Böyle bir durumda, β' 'nin üç gerçel kökü varsa, β' 'nin ortancası β' 'nin ortancasına karşılık gelecektir.

$|\beta'| < |(1/\gamma_0) + \beta_0|$ koşulunun pratikte sınırlayıcı olmadığına dikkat edilmelidir. Örneğin, anlamlı bozunumlar için büyük bir olasılıkla $|\beta_0| < 0.2$ ve $|\gamma_0| < 0.2$ (x ve y -yönlerinde %20'den daha az germe) olacaktır. Böyle bir durumda $|(1/\gamma_0) + \beta_0| > 4.8$. Bu, germe parametresi β' için yeterli bir pay bırakacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] LANGELAAR, G. C., SETYAVAN, I., LAGENDIJK, R. L., Watermarking Digital Image and Video Data. A State-of-the-art Overview, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 17, pp. 20-46, September 2000.
- [2] PODILCHUK, C. I., Digital Watermarking: Algorithms and Applications, IEEE Signal Processing Magazine, pp. 33-46, July 2001.
- [3] MOULIN, P., KOETTER, R., Data Hiding Codes, Proceedings of the IEEE, vol. 93, No. 12, December 2005.
- [4] DONG, P., Robust Digital Image Watermarking, PhD thesis, Electrical Engineering in the Graduate College of the Illinois Institute of Technology, May 2004.
- [5] KOZ, A., Watermarking For 3D Representations, PhD thesis, Electrical and Electronics Engineering, Middle East Technical University, August 2007.
- [6] LOO, P., Digital Watermarking Using Complex Wavelets, PhD thesis, Signal Processing and Communications Laboratory Department of Engineering University of Cambridge, March 2002.
- [7] TERZIJA, N., Robust Digital Image Watermarking Algorithms for Copyright Protection, PhD thesis, Faculty of Engineering, Duisburg Essen University, October 2006.
- [8] SOLACHIDIS, V., PITAS, L., Circularly Symmetric Watermark Embedding in 2-D DFT Domain IEEE Transactions On Image Processing, vol. 10, No. 11, November 2001.
- [9] PUN, C. M., A Novel DFT-based Digital Watermarking System for Images, The 8th International Conference on Signal Processing, vol. 2, pp. November 2006.
- [10] YUAN, W.G., LING, H.F., LU, Z.D., ZOU, F.H., YU, Y.W., Image Content-Based Watermarking Resistant Against Geometrical Distortions, 8th International Conference on Signal Processing, vol. 4, pp. 16-20, November 2006.

- [11] FAN, A., SUN, Q., Simultaneous Calculation of DFT and IDFT of Real Two-Dimensional Sequences and Its Application in Digital Image Watermark, Congress on Image and Signal Processing, 2008, CISP '08, vol. 5, pp. 730-733, 27-30 May 2008.
- [12] MILLER, M. L., DOËRR, G. J. COX, I. J., Applying Informed Coding and Embedding to Design a Robust High-Capacity Watermark, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, No. 6, June 2004.
- [13] HUANG, Y. L., TAO, C. C., Blind Adaptive Shift Length Watermarking For Digital Images, SMC '06, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 2, pp. 1592-1597, 8-11 October 2006.
- [14] LI, Y., ZHU, H., YU, R., YANG, G., XU, J., An Adaptive Blind Watermarking Algorithm Based on DCT and Modified Watson's Visual Model, International Symposium on Electronic Commerce and Security 2008, pp. 904 – 907, August 2008.
- [15] NIKOLAIDIS, A., PITAS, I., Asymptotically Optimal Detection For Additive Watermarking in The DCT And DWT Domains, IEEE Trans. Image Process., vol. 12, pp. 563–571, May 2003.
- [16] TAHERINIA, A. H., JAMZAD, M., A Robust Image Watermarking Using Two Level DCT and Wavelet Packets Denoising Availability, ARES '09, International Conference on Reliability and Security, pp. 150-157, 16-19 March 2009.
- [17] BARNI, M., BARTOLINI, F. ve PIVA, A., Improved Wavelet-Based Watermarking Through Pixel-Wise Masking, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 10, No. 5, pp. 783-791, May 2001.
- [18] BI, N., SUN, Q., HUANG, D., YANG, Z., HUANG, J., Robust Image Watermarking Based on Multiband Wavelets and Empirical Mode Decomposition, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 16. No. 8, August 2007.
- [19] JIN, C., JIN, S. W., Wavelet Packets-Based Robust Blind Digital Watermark Scheme, ICWAPR '08, International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 724-728, 30-31 August 2008.
- [20] TSAI, M. J., LIN, C. T., LIU, J., A Wavelet-Based Watermarking Scheme Using Double Wavelet Tree Energy Modulation, ICIP 2008, 15th IEEE International Conference on Image Processing, pp. 417-420, 12-15 October 2008.
- [21] LIN, W. H., WANG, Y. R., HORNG, S. J., A Wavelet-Tree-Based Watermarking Method Using Distance Vector of Binary Cluster, Expert Systems with Applications, vol. 36, Issue 6, pp. 9869-9878 August 2009.

- [22] LOO, P., KINGSBURY, N., Digital Watermarking Using Complex Wavelets, Proc. IEEE International Conf. on Image Processing, Vol.3, pp. 29-32, September 2000.
- [23] BOURIDANE, A., KURUGOLLU, F., BEGGS, R., BOUSSAKTA, S., Colour Image Watermarking in The Complex Wavelet Domain, Electronics, Circuits and Systems, 2003. ICECS 2003. Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on vol. 3, pp.1196-1199, December 2003.
- [24] KURUGOLLU, F., BOURIDANE, A., ROULA, M., BOUSSAKTA, S., Comparison of Different Wavelet Transforms for Fusion Based Watermarking Applications, Electronics, Circuits and Systems, 2003. ICECS 2003. Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on vol. 3, pp. 1188-1191, December 2003.
- [25] LEE, J. J, KIM, W., LEE, N. Y., KIM, G.Y., A New Incremental Watermarking Based on Dual-Tree Complex Wavelet Transform, The Journal of Supercomputing, Vol. 33, No. 1, pp. 133-140, July 2005.
- [26] ZHUANG, L., JIANG, M., Multipurpose Digital Watermarking Algorithm Based on Dual-Tree CWT Intelligent Systems Design and Applications, 2006. ISDA '06. Sixth International Conference on vol. 2, pp. 316-320, October 2006.
- [27] THOMPSON, A. I., BOURIDANE, A., KURUGOLLU, F., Spread Transform Watermarking for Digital Multimedia Using the Complex Wavelet Domain, 2007 ECSIS Symposium on Bio-inspired, Learning and Intelligent Systems for Security, pp. 123-132, August 2007.
- [28] AWAN, F., MARSHALL, S., SORAGHAN, J.J., ARBAB, M.N., Performance of a Hybrid DCT - DT CWT Digital Watermarking Against Geometric and Signal Processing Attacks, 2007 IEEE, International Symposium on Signal Processing and Information Technology, pp. 202-207, December 2007.
- [29] KAZAN, S., VURAL, C., Robust Digital Image Watermarking Based on Normalization and the Two Dimensional Complex Wavelet Transform, Signal Processing, Communication and Applications Conference, 2008. SIU 2008. IEEE 16th, pp. 1-4, April 2008.
- [30] CORIA, L.E., PICKERING, M.R., NASIOPOULOS, P., WARD, R.K., A Video Watermarking Scheme Based on the Dual-Tree Complex Wavelet Transform, IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 3, pp. 466 - 474, September 2008.

- [31] BENDER, W., GRUHL, D., MORIMOTO, N., Techniques For Data Hiding, in Proc. SPIE, Storage and Retrieval for Image and Video Databases III, vol. 2420, pp. 165-73 February 1995.
- [32] PITAS, I., KASKALIS, T.H., Applying Signatures on Digital Images, in Proc. IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, pp. 460-463, June 1995.
- [33] CARONNI, G., Assuring Ownership Rights for Digital Images, in Proc. Reliable IT Systems, VIS'95, pp. 251-263, Germany, 1995.
- [34] HARTUNG, F., GIROD, B., Digital Watermarking of Raw and Compressed Video, in Proc. SPIE 2952: Digital Compression Technologies and Systems for Video Communication, pp. 205-213, October 1996.
- [35] PITAS, I., A Method for Signature Casting on Digital Images, in Proc. ICIP-96, IEEE Int. Conf. Image Processing, vol. III, pp. 215-218., September 1996.
- [36] SMITH, J.R., COMISKEY, B.O., Modulation And Information Hiding in Images, in Preproc. Information Hiding, University of Cambridge, U.K., May 1996.
- [37] WOLFGANG, R.B., AND DELP, E.J., A Watermark For Digital Images, in Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing, vol. III, pp. 219-222, September 1996.
- [38] WOLFGANG, R.B., DELP, E.J., A Watermarking Technique for Digital Imagery: Further studies, in Proc. Int. Conf. Imaging Science, Systems, and Technology, June 30-July 3, 1997.
- [39] ZENG, W., LIU, B., On Resolving Rightful Ownerships of Digital Images by Invisible Watermarks, in Proc. ICIP 97, IEEE Int. Conf. Image Processing, pp. 552-555, October 1997.
- [40] FRIDRICH, J., Robust Bit Extraction From Images, in Proc. IEEE ICMCS'99 Conf., 7-11 June 1999.
- [41] KALKER, T., DEPOVERE, G., J. MAES, M., A Video Watermarking System for Broadcast Monitoring, in Proc. SPIE Electronic Imaging '99, Security and Watermarking of Multimedia Contents, pp. 103-112, January 1999.
- [42] WOLFGANG, R.B., DELP, E.J., Overview of Image Security Techniques with Applications in Multimedia Systems, in Proc. SPIE Conf. Multimedia Networks: Security, Displays, Terminals, and Gateways, vol. 3228, pp. 297-308, November 1997.

- [43] WOLFGANG, R.B., DELP, E.J., Fragile Watermarking Using the VW2D Watermark, in Proc. Electronic Imaging '99, vol. 3657, pp. 204-213, January 1999.
- [44] TEFAS, A., PITAS, I., Robust Spatial Image Watermarking Using Progressive Detection, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 3, pp. 1973-1976, May 2001.
- [45] NIKOLAIDIS, N. AND PITAS, I., Robust Image Watermarking in the Spatial Domain, Signal Processing, Vol. 66, pp. 385-403, 1998.
- [46] SMITH, J.R., COMISKEY, B.O., Modulation And Information Hiding in Images, in Preproc. Information Hiding, University of Cambridge, May 1996.
- [47] LANGELAAR, G.C., LUBBE, J.C.A., LAGENDIJK, R.L., "Robust Labeling Methods For Copy Protection of Images," in Proc. SPIE Electronic Imaging '97, Storage and Retrieval for Image and Video Databases V, pp. 298-309, February 1997.
- [48] HANJALIC, A., LANGELAAR, G.C., ROOSMALEN, P.M.B. BIEMOND, J., LAGENDIJK, R.L., Image and Video Databases: Restoration, Watermarking and Retrieval (Advances in Image Communications, vol. 8). New York: Elsevier Science, 2000.
- [49] RUANAIDH, J. J. K. O., PUN, T., Rotation, Scale and Translation Invariant Spread Spectrum Digital Image Watermarking, Signal Processing, Vol. 66, No. 3, pp. 303-317, May 1998.
- [50] WANG, X.Y., XU, Z.H., YANG, H.Y., A Robust Image Watermarking Algorithm Using SVR Detection, Expert Systems with Applications, vol. 36, pp. 9056-9064, July 2009.
- [51] KIM, H. S., LEE, H. K., Invariant Image Watermark Using Zernike Moments, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 13, No. 8, August 2003.
- [52] SHIRANI, S., FARZAM, M., A Robust Multimedia Watermarking Technique Using Zernike Transform, 2001 IEEE Fourth Workshop on Multimedia Signal Processing, pp. 529-534, October 2001.
- [53] DONG, P., GALATSANOS, N. P., Affine Transformation Resistant Watermarking Based on Image Normalization, IEEE International Conference on Image Processing, Vol. 3, pp. 489-492, New York, June 2002.
- [54] DONG, P., BRANKOV, J. G., GALATSANOS, N. P., YANG, Y. ve DAVOINE, F., Digital Watermarking Robust to Geometric Distortions, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 14, No. 12, December 2005.

- [55] KIM, B. S., CHOI, J. G., PARK, C. H., WON, J. U., KWAK, D. M., OH, S. K., KOH, C. R., PARK, K. H., Robust Digital Image Watermarking Method Against Geometrical Attacks, Science Direct, No. 2, Vol. 9, pp. 139-149, April 2003.
- [56] WOO, C. S., DU, J., PHAM, B., Geometric Invariant Domain for Image Watermarking, Proceedings International Workshop on Digital Watermarking, Vol. 4283/2006 pp. 294-307, South Korea, 2006.
- [57] ALGHONIEMY, M., TEWFIK, A. H., Geometric Invariance in Image Watermarking, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 13, No. 2, February 2004.
- [58] ALGHONIEMY, M., TEWFIK, A. H., Geometric Distortion Correction Through Image Normalization, Multimedia and Expo, 2000. ICME 2000. 2000 IEEE International Conference on Vol. 3, pp. 1291-1294 August 2000.
- [59] LIN, C. Y., WU, M., BLOOM, J. A., COX, I. J., MILLER, M. L., LUI, Y.M., Rotation, Scale, and Translation Resilient Watermarking for Images, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 10, No. 5, May 2001.
- [60] SHEN, D., IP, H.H.S., Generalized Affine Invariant Image Normalization, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , Vol. 19, No. 5, May 1997.
- [61] ROTHE, I., SUSSE, H., VOSS, K., The Method of Normalization to determine Invariants, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 18, No. 4, April 1996.
- [62] WANG, K., Affine-Invariant Moment Method of Three-Dimensional Object Identification, PhD thesis, Syracuse University, 1977.
- [63] REISS T.H., Recognition of Planar Objects Using Invariant Image Features, Springer-Verlag, 1993.
- [64] VOSS, K., SUSSE, H., ROTHE, I., Affine Normalization of Planar Regions by Moments Using a New Separation Method, Proc. Europe-China Workshop, Geometrical Modeling and Invariants for Computer Vision, Roger Mohr and Wu Chengke, eds., pp. 356-359. XIDAN: University Press, 1995.
- [65] LEWIS, A. S., KNOWLES, G., Image compression using the 2-D wavelet transform, IEEE Trans. Image Processing, vol. 1, pp. 244-250, April 1992.
- [66] PROOKIS, J. G., SOLEHI, M., Digital Communication, Mc Graw Hill, 5. Edition, 2008.

- [67] SELESNICK, I. W., BARANIUK, R. G., KINGSBURY, N. G., The Dual-Tree Complex Wavelet Transform, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, No. 6, pp. 123-151, November 2005.
- [68] SERVETTO, S. D., PODILCHUK, C. I., RAMCHANDRAN, K., Capacity Issues in Digital Image Watermarking, in *Proc. ICIP 1998*, vol. 1, pp. 445 - 449, October 1998.
- [69] BARNI, M., BARTOLINI, F., ROSA, A. D., PIVA, A., Capacity of Full Frame DCT Image Watermarks, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 9, pp. 1450-1455, August 2000.
- [70] MOULIN, P., MIHCAK, M. K., A Framework for Evaluating the Data-Hiding Capacity of Image Sources, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, pp. 1029-1042, September 2002.
- [71] ZHI, L., WEI, C. X., Self-Adaptive Video Watermarking Based on the Motion Characteristic Detection and the Model of Entropy, *IHMSP '08, International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pp. 845-848, 15-17 August 2008.
- [72] LIANG, H., Research on the MPEG-2 Video Watermarking Scheme Based on Spread Spectrum Technology, *ICCET '08, International Conference on Computer Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 408-411, 22-24 January 2009.
- [73] STEGHRARZADEH, K., GHENEH, V., Secure Video Watermarking Using Random Statistics and Combinatorial Optimization, *Information and Communication Technologies, 2006, ICTTA '06*, vol. 1, pp. 1841-1841, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Serap KAZAN, 1978 yılında Sapanca'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sapanca'da tamamladı. 1996 yılında Arifiye Anadolu Öğretmen Lisesini bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2000 yılında mezun oldu. 2000 yılı Aralık ayında Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2000-2003 yılları arasında Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde "Video Görüntüsü Üzerinde Cisim Hareketlerini Saptama, İzleme ve Hedef Belirleme" üzerine Yüksek Lisans yaptı. 2003 yılında doktora eğitimine başladı.