

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI



HILBERT – HUANG DÖNÜŞÜMÜ İLE ZAMAN
SERİLERİNDEKİ GÜRÜLTÜ BİLEŞENLERİNİN
AYRIŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET DOĞAN ELBİ

DENİZLİ, ARALIK - 2013

KABUL VE ONAY SAYFASI

MEHMET DOĞAN ELBİ tarafından hazırlanan “**HILBERT – HUANG DÖNÜŞÜMÜ İLE ZAMAN SERİLERİNDEKİ GÜRÜLTÜ BİLEŞENLERİNİN AYRIŞTIRILMASI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 18.12.2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

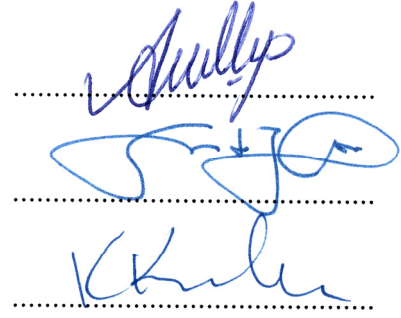
Jüri Üyeleri

İmza

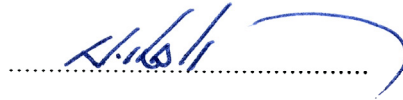
Danışman
Doç. Dr. Aydın KIZILKAYA

Üye
Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ

Üye
Doç. Dr. Kadir KAVAKLIOĞLU



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25/12/2013 tarih ve 41/22..... sayılı kararıyla onaylanmıştır..



Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.



MEHMET DOĞAN ELBİ

ÖZET

HILBERT – HUANG DÖNÜŞÜMÜ İLE ZAMAN SERİLERİNDEKİ GÜRÜLTÜ BİLEŞENLERİNİN AYRIŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEHMET DOĞAN ELBİ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. AYDIN KIZILKAYA)
DENİZLİ, ARALIK - 2013

Gürültü doğadaki canlıların sesleri, sismik dalgalar ve rüzgâr gibi doğal etmenlerden ötürü başlangıcı kestirilemeyen kavramlardan biridir ve teknolojik gelişmelerle elektriksel işaretlerin kullanılmaya başlanması sonucu bir problem haline gelmiştir. Bir yandan antenlerin, algılayıcıların ve elektronik cihazların geliştirilmesi ile gürültü problemi çözülmeye çalışılırken, bir yandan da harici algoritmalarla gürültülü gözlemlerden özgün işaret elde edilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda işaret işleme biliminde çağ açan Hilbert – Huang dönüşümü ise yıllardır üzerinde çalışılan anlık frekans bilgisinin kestirimi konusunda ciddi bir başarıya ulaşmasının yanı sıra durağanlık ve doğrusallık şartı aramaksızın tüm fiziksel işaretleri analiz edebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle Hilbert – Huang Dönüşümünün ayrıntılı algoritması incelenmiş ve dönüşümün gürültü süzme amacıyla kullanılabilmesi için sekiz farklı yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin farklı işaret ve gürültü tiplerindeki başarımları incelenmiş ve geleceğe yönelik ciddi çıkarımlarda bulunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELE: Gürültü, Süzgeç, Hilbert-Huang Dönüşümü, Görgül Kip Ayrıştırma, Öz Kip İşlevi

ABSTRACT

DECOMPOSITION OF NOISE COMPONENTS IN TIME SERIES BY USING HILBERT – HUANG TRANSFORM

MSC THESIS

MEHMET DOGAN ELBI

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. AYDIN KIZILKAYA)

DENİZLİ, DECEMBER 2013

Noise is the one of the unpredictable onset concepts because of the existence of natural factors such as the voice of living creatures, seismic waves and wind, and then it constitutes a problem as result of using electrical signals. On the one hand, while the noise problem has been tried to unravel with the development of antennas, sensors and electronic devices, in the meantime, the original signal has been tried to obtain from noisy observations by using external algorithms. In recent years, as well as the Hilbert-Huang transform opening an era in the realm of the signal processing reaches a serious achievement in the estimation of instantaneous frequency information of a signal, it is able to analyze all physical signal without requiring the conditions of stationarity and linearity.

In this project, principally, the detailed algorithm of the Hilbert-Huang transform has been analyzed, and then eight different methods have been proposed to be able to use it for the aim of noise filtering. Performances of the proposed methods for different types of signals and noises have been considered and prudential inferences have been made.

KEYWORDS: Noise, Filter, Hilbert-Huang Transform, Empirical Mode Decomposition, Intrinsic Mode Function

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| TABLO LİSTESİ | v |
| SEMBOLE ve KISALTMA LİSTESİ | vi |
| ÖNSÖZ | vii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Hilbert Dönüşümü ve Anlık Frekans Bilgisi..... | 1 |
| 1.2 Hilbert – Huang Dönüşümü | 2 |
| 1.3 Tezin Amacı | 3 |
| 2. HILBERT – HUANG DÖNÜŞÜMÜ | 4 |
| 2.1 Görgül Kip Ayırıştırma | 5 |
| 2.1.1 Yerel Ekstreum Noktalarının Bulunması..... | 7 |
| 2.1.1.1 Yalın Ekstreum Bulma Yöntemi | 8 |
| 2.1.1.2 Başlangıç ve Bitiş Noktalarının Ekstreumlara Eklenmesi | 9 |
| 2.1.1.3 Ayna Etkisi ile Ekstreum Ekstrapolasyonu..... | 11 |
| 2.1.2 Öz Kip İşlevi Eleme Süreci..... | 12 |
| 2.2 Hilbert İzgesel Analizi | 15 |
| 3. GÜRÜLTÜ SÜZME | 17 |
| 3.1 Olası Tüm Kombinasyonlar | 19 |
| 3.2 Klasik Eleme Yöntemi | 21 |
| 3.3 İstatistiksel Yöntemler | 22 |
| 3.3.1 Gürültüsüz İşaret ile Öz Kip İşlevlerinin İlişkisi | 23 |
| 3.3.2 Gürültülü İşaret ile Öz Kip İşlevlerinin İlişkisi | 24 |
| 3.3.3 İlk Öz Kip İşlevi ile Diğerlerinin İlişkisi | 25 |
| 3.3.4 Varyans | 25 |
| 3.4 Gürültü Gücündeki Değişim | 26 |
| 3.5 Frekans Önkoşulu..... | 28 |
| 3.6 Örnekleme Frekansının Etkisi..... | 30 |
| 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER | 33 |
| 5. KAYNAKLAR | 42 |
| 6. EKLER | 49 |
| 7. ÖZGEÇMİŞ | 53 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|--------------------|--|----|
| Şekil 2.1: | HHD genel algoritması. | 4 |
| Şekil 2.2: | GKA genel algoritması. | 5 |
| Şekil 2.3: | Örnek HD sonuçları. | 6 |
| Şekil 2.4: | Örnek HHD sonuçları. | 6 |
| Şekil 2.5: | Yalın ekstremum bulma yöntemi a) Gözlem işaretinin ekstremumları ve zarfları, b) GKA sonuçları, c) HHD sonuçları. | 9 |
| Şekil 2.6: | Başlangıç ve bitiş noktalarının yalın ekstremumlara eklenmesi a) Gözlem işaretinin ekstremumları ve zarfları, b) GKA sonuçları, c) HHD sonuçları. | 10 |
| Şekil 2.7: | Ayna ekstrapolasyonu ile yalın ekstremumların artırılması a) Gözlem işaretinin ekstremumları ve zarfları, b) GKA sonuçları, c) HHD sonuçları. | 12 |
| Şekil 2.8: | ÖKİ Eleme genel algoritması. | 13 |
| Şekil 2.9: | HİA genel algoritması. | 16 |
| Şekil 2.10: | HHD ayrıntılı algoritması. | 16 |
| Şekil 3.1: | Gürültü süzme algoritmaları için kullanılacak örnek işaret. | 18 |
| Şekil 3.2: | Örnek işaretin HHD sonuçları. | 18 |
| Şekil 3.3: | Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu. | 20 |
| Şekil 3.4: | Klasik eleme yöntemi ile gürültü süzme sonucu. | 21 |
| Şekil 3.5: | a) ÖKİ'lerle özgün işaret arasındaki çapraz ilişki değerleri, b) ÖKİ'lerle özgün işaret arasındaki çapraz ilişki değerleri ile gürültü süzme sonucu. | 23 |
| Şekil 3.6: | a) ÖKİ'lerle gözlem işareti arasındaki çapraz-ilişki değerleri, b) ÖKİ'lerle gözlem işareti arasındaki çapraz-ilişki değerleri üzerinden gürültü süzme sonucu. | 24 |
| Şekil 3.7: | a) İlk ÖKİ ile diğerleri arasındaki çapraz-ilişki değerleri, b) İlk ÖKİ ile diğerleri arasındaki çapraz-ilişki değerleri üzerinden gürültü süzme sonucu. | 25 |
| Şekil 3.8: | a) ÖKİ'lerin varyans değerleri, b) ÖKİ'lerin varyans değerleri üzerinden gürültü süzme sonucu. | 26 |
| Şekil 3.9: | a) ÖKİ'lerin güçleri, b) İlk ÖKİ baz alınarak oluşturulan gürültünün ÖKİ'lerinin güçleri, c) Güç değerlerindeki değişimler, d) Gürültü gücü üzerinden gürültü süzme sonucu. | 27 |
| Şekil 3.10: | Gürültü seviyelerini belirlenmesi ayrıntılı algoritması. | 27 |
| Şekil 3.11: | Frekans Ön Koşulu ile ÖKİ'lerin sınırlandırılması. | 29 |
| Şekil 3.12: | Frekans ön koşulu ile gürültü süzme sonucu. | 30 |
| Şekil 3.13: | Örnekleme frekansı 1 KHz olan işaretin ÖKİ'lerinin etkin frekans bantları. | 31 |
| Şekil 3.14: | Örnekleme frekansı 1 MHz olan işaretin ÖKİ'lerinin etkin frekans bantları. | 32 |
| Şekil 4.1: | Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu. | 35 |
| Şekil 4.2: | Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu. | 37 |
| Şekil 4.3: | Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu. | 38 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Yerel ekstremum bulma yöntemlerinin karşılaştırılması | 13 |
| Tablo 3.1: ÖKİ'lerin olası tüm kombinasyonları | 20 |
| Tablo 3.2: Örnekleme frekansının gürültü süzmeye etkisi | 32 |
| Tablo 4.1: Düşük frekanslı örnek işaretteki Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları..... | 33 |
| Tablo 4.2: Düşük frekanslı örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları..... | 34 |
| Tablo 4.3: Yüksek frekanslı örnek işaretteki Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları..... | 35 |
| Tablo 4.4: Yüksek frekanslı örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları..... | 36 |
| Tablo 4.5: Hem yüksek hemde alçak frekanslı örnek işaretteki Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları. | 37 |
| Tablo 4.6: Hem yüksek hemde alçak frekanslı örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları..... | 38 |
| Tablo 4.7: Durağan ve doğrusal olmayan örnek işarete Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları. | 39 |
| Tablo 4.8: Durağan ve doğrusal olmayan örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları. | 40 |

SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

| | | | |
|--------------|--------------------------|------------|-------------------------------------|
| HHD | Hilbert - Huang Dönüşümü | HHT | <i>Hilbert - Huang Transform</i> |
| HD | Hilbert Dönüşümü | HT | <i>Hilbert Transform</i> |
| GKA | Görgül Kip Ayırıştırma | EMD | <i>Empirical Mode Decomposition</i> |
| HİA | Hilbert İzgesel Analizi | HSA | <i>Hilbert Spectral Analysis</i> |
| ÖKİ | Öz Kip İşlev(ler)i | IMF | <i>Intrinsic Mode Function(s)</i> |
| KEU | Kübik Eğri Uyduma | CS | <i>Cubic Spline</i> |
| FD | Fourier Dönüşümü | FT | <i>Fourier Transform</i> |
| σ_x^2 | Varyans | | |

ÖNSÖZ

Öncelikle yalnızca bu tezin yazımında değil, hayatımın her anında bana maddi ve manevi sınırsız destek veren, her karşıma çıkan zorluğu aşmamı sağlayan, sonsuz güven ve minnetime sahip babama, anneme, kardeşime ve eşime tekrar tekrar teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimimdeki her başarımda yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Aydın Kızılkaya'ya benim için harcadığı tüm zamanı ve emeği için teşekkür ederim.

Yüksek lisans ve tez süresince bana karşı sabrını ve desteğini her daim koruyan hocalarım Arş. Gör. Adem Ükte, Yrd. Doç. Dr. Remzi Arslanalp, Yrd. Doç. Dr. Cumhuriyet Yılmaz Madran, Doç. Dr. Yusuf Öner, Yrd. Doç. Dr. Selami Kesler, Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu, Doç. Dr. Kadir Kavaklıoğlu, Yrd. Doç. Dr. A. Kadir Yıldır ve değerli bölüm başkanım Prof. Dr. Serdar İplikçi'ye ve bu süreçte bana destek veren çalışma arkadaşlarım, dostlarım ve arkadaşlarıma da ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

MEHMET DOĞAN ELBİ

1. GİRİŞ

Geleneksel veri analizi yöntemleri, işaretlerin doğrusal ve durağan oldukları varsayımlarına dayanır. Fakat doğadaki neredeyse hiçbir işaret doğrusal veya durağan değildir ve bu işaretler stokastik süreçler olarak kabul edilirler. Durağan olmayan işaretlerin analizi amacıyla dalgacık dönüşümü ve Wigner – Ville dağılımı geliştirilmiştir (Fladrin 1999, Gröchenig 2001). Doğrusal olmayan işaretlerin incelenmesi ise Fourier tabanlı yöntemlerle aşılamayacak bir problem teşkil etmektedir. 1990 yılında Tong, 1997 yılında Kantz ve Schrieber ve 1999 yılında Diks tarafından yapılan çalışmalar, doğrusal olmayan işaretlerde başarılı sonuçlar almış olmasına rağmen sadece durağan ve deterministik zaman serilerine uygulanabilmektedir. 1996 yılında Norden E. Huang tarafından önerilen ve hala geliştirilmekte olan Hilbert – Huang Dönüşümü (HHD) ise durağan ve doğrusal olmayan zaman serilerini inceleyebilmekte ve anlık frekans, genlik ve enerji bilgilerine ulaşabilmektedir [1-3].

1.1 Hilbert Dönüşümü ve Anlık Frekans Bilgisi

Alman matematikçi David Hilbert matematik, fizik ve felsefe alanlarındaki çalışmalarıyla 20. yüzyılın en etkili isimlerinden biri haline gelmiştir. Çeşitli alanlardaki geniş çalışmaları sayesinde birçok temel düşünceyi ortaya koymuştur. Hilbert uzayı formüllerini geliştirerek fonksiyonel analizin temel taşlarından birini oluşturmuştur. Değişmezlik teorisi (invariant theory) ve geometrinin aksiyomları (axiomatization of geometry) adlı çalışmalarıyla modern matematik ve matematiksel fizik konularına çok ciddi gelişmeler sağlamıştır. Aynı zamanda ispat teorisi (proof theory) ve matematiksel mantığın mucitlerinden biridir [4]. Hilbert Dönüşümü (HD) ise Riemann – Hilbert probleminin çalışmaları sırasında ortaya çıkmış ve 1948 yılında Titchmarsh tarafından Cauchy yaklaşımı ile integral formuna dönüştürülmüş ve konvolüsyon teoremine eklenerek işaret işleme biliminde önemli bir konuma gelmiştir. 1962 yılında Bedrossian teoremi ile HD, çarpım formuna getirilerek haberleşme biliminde kullanılmaya başlamıştır.

Hilbert Dönüşümü, yapısı gereği uygulandığı işarete 90^0 faz farkı ile karmaşık bir bileşen ekleyerek, işaretin faz bilgisinin kestirilmesini sağlamaktadır. Gabor ve Bedrossian tarafından 20. yüzyılın ortalarında yapılan çalışmalarda ise bu dönüşüm sayesinde üretilen faz bilgisi ile zamana bağlı frekans bilgisinin elde edilebildiği görülmüştür. Fakat çalışmalar sırasında birçok işaretin gerçek frekans bilgisine ulaşamamış ve uygulanan yöntemler çok sığ düzeylerde kalmıştır. Cohen ise 1995 yılında anlık frekans bilgisine ulaşabilen birçok teoriyi bir araya getirerek spektrumun en genel formunu tanımlamıştır. Hilbert dönüşümünün anlık frekans bilgisine ulaşabilme yeteneğinin yalnızca geniş banda sahip ve ekstremum noktaları sayısı ile sıfır geçiş noktaları sayısı eşit olan işaretlerle sınırlı olduğu gerçeği 1996 yılında Hahn tarafından ortaya çıkarılmıştır [2,5].

Şu an National Central University Uyarlamalı Veri Analizi anabilim dalı başkanı olarak görev yapan Norden E Huang'ın, 1998 yılında temelini attığı HHD ile zaman serileri, Hahn'ın ortaya koyduğu şartları sağlayan sonlu sayıda bileşene ayrılabilir. Böylelikle doğrusallık ve durağanlık şartı aramaksızın tek boyutlu neredeyse tüm fiziksel ve stokastik süreçlerde zamana bağlı frekans ve genlik değerlerini kestirebilen bir dönüşüm yöntemi elde edilmiştir [1-3].

1.2 Hilbert – Huang Dönüşümü

Norden E. Huang'ın, 1998 yılında temellerini attığı yeni uyarlamalı veri analizi yöntemi *Dr. Huang's New Method* olarak adlandırılmış ve NASA tarihindeki önemli matematiksel buluşlardan biri olarak *Special Space Act* ödülünü almıştır. Bu yöntem ile Huang, 2006 yılına kadar birçok saygın ödüle layık görülmüş ve NASA tarafından yöntemin adı HHD olarak genelleştirilmiştir.

Görgül Kip Ayrıştırma ve Hilbert İzgesel Analizi olarak iki parçadan oluşan ve deneye dayalı (*empirical*) bir dönüşüm olan HHD matematiksel olarak kapalı formda ifade edilememektedir. Bununla birlikte işarete göre değişen ve kestirilemeyen işlem sayılarına sahiptir. Bu da dönüşümün gerçek zamanlı olarak uygulanamamasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda bu dönüşüm, yapısal problemlerinden ötürü üzerine uygulandığı işaretin başlangıç ve bitiş bölgelerinde hatalı değerler üretmektedir. Tüm bu yapısal sorunlara ek olarak HHD çok boyutlu gerçeklemlerde beklenen

başarımlara yaklaşmamaktadır. Bu temel problemlerin aşılması için son yıllarda etkin çalışmalar yapılmış ve dönüşümü gerçekleştirecek birden fazla algoritma geliştirilmiştir [6-15].

HHD stokastik süreçlerde durağanlık ve doğrusallık şartı aranmadan analiz yapabilme yeteneği sayesinde jeofiziksel ve coğrafi işaretlerin ve iklimsel süreçlerin analizinde kullanılmaktadır [2,6,16-18]. Bununla birlikte istatistik, ekonomi ve tıp bilimlerinden, mekanik ve haberleşme uygulamalarına kadar ciddi bir kullanım alanı bulan HHD, gürültü analizinde de ciddi başarımlar göstermiş ve uyarlamalı bir süzgeç yapısı olarak sıkça başvurulan bir yöntem haline gelmiştir [3,19-48]. Tüm bu çalışmalara ek olarak HHD ile görüntü ve ses işleme konularında da çok ciddi çalışmalar literatürde yerini almıştır [44-48].

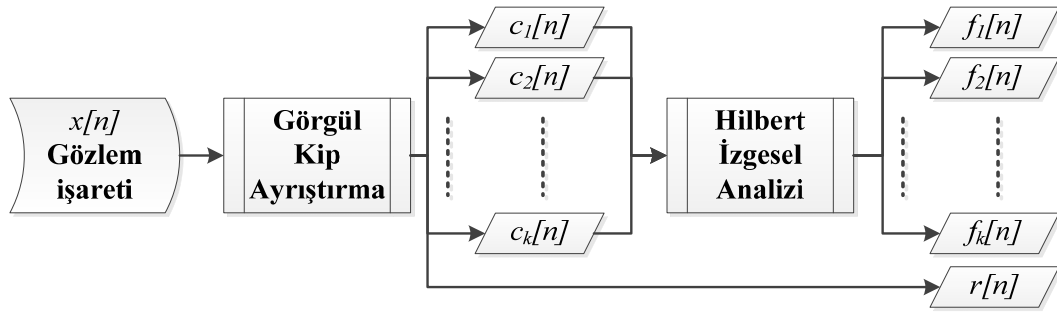
1.3 Tezin Amacı

Son yılların en güncel konularından olan HHD, işaret işleme biliminde önemini giderek arttırarak gelişmekte ve kullanım alanlarını yaygınlaştırmaktadır. Yapısı gereği işareti farklı frekanslarda bileşenlerine ayıran bu dönüşüm aynı zamanda gürültülü işaretlere uygulandığında uyarlamalı bir süzgeç davranışı göstermektedir [1-3,18-19,27,29-47].

Bu tezde; alçak frekanslı, yüksek frekanslı ve karma frekanslı sentetik ve fiziksel işaretlerde beyaz Gauss gürültüsünün etkilerini, yalnızca HHD kullanarak en aza indirmek amaçlanmıştır. Böylelikle hangi işaret türlerinin HHD tabanlı hangi süzme yönteminde en iyi sonuca yaklaştığı genelleştirilmeye çalışılmıştır.

2. HILBERT – HUANG DÖNÜŞÜMÜ

HHD, Görgül Kip Ayırıştırma (GKA) ve Hilbert İzgesel Analizi (HİA) olmak üzere iki temel yapıdan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Hilbert Dönüşümü ile anlık frekansın tespit edilebilmesi için ayrık zamanlı $x[n]$ verisi GKA ile sonlu sayıda bileşene ayrılır. Bu bileşenler HD için geniş bant şartını sağlayan ve ekstremum sayıları ile sıfır geçiş noktası sayıları eşit olan (Hahn, 1996) bileşenlerdir. Öz Kip İşlevi (ÖKİ) olarak adlandırılan bu bileşenler $c_i[n]$ ile temsil edilirler.

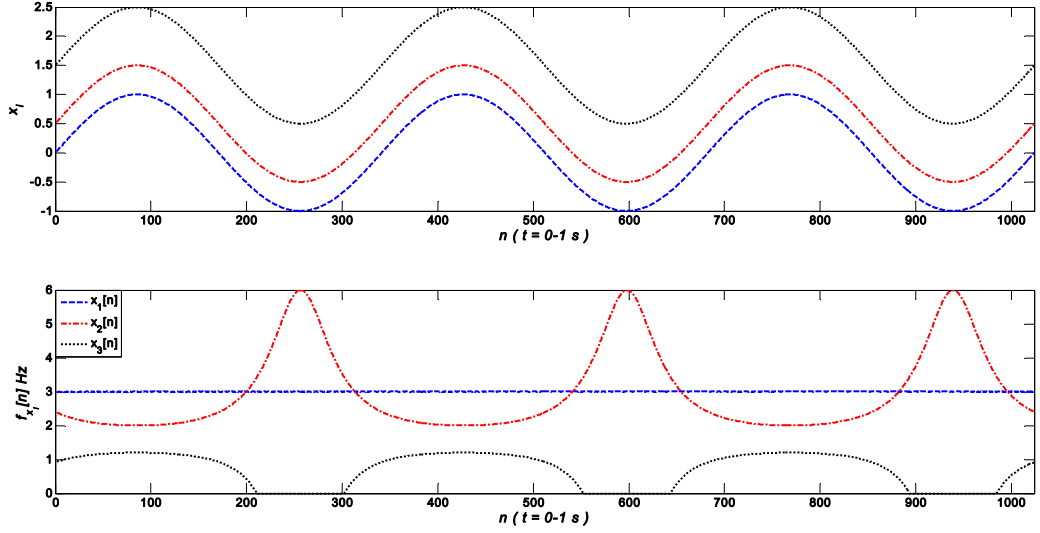


Şekil 2.1: HHD genel algoritması.

GKA ile ÖKİ'ler gözlem işaretinden ayırıştırılır. Geriye artık işaret adı verilen, monoton, $r[n]$ işareti kalana dek ayırıştırma işlemi devam eder. Elde edilen ÖKİ sayısının sonlu bir değere ulaşması da HHD'nin önemli bir özelliğidir. GKA'nın tamamlanması ile gözlem işareti k adet ÖKİ ve artık işarete ayırıştırılır. Elde edilen tüm ÖKİ'lere HİA uygulanarak anlık frekans bilgisine ulaşılır.

$$x[n] = r[n] + \sum_{i=1}^k c_i[n] \quad (2.1)$$

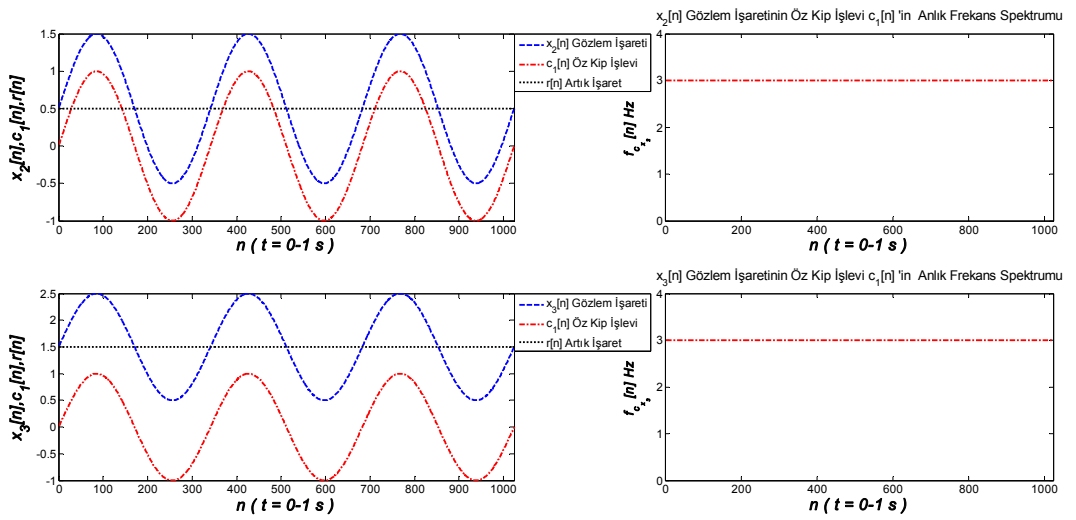
GKA'nın en önemli özelliklerinden biri ise gözlem işaretini eşitlik (2.1) ile kayıpsız olarak geri elde edebilmesidir. Bu sayede dönüşüm sırasında analiz edilen işarete dair hiçbir bilginin kaybolmadığı kanıtlanmış olur. Kayıpların istenmediği, toleransın kabul edilemeyeceği her alanda HHD rahatlıkla kullanılabilir.



Şekil 2.3: Örnek HD sonuçları.

Görüldüğü gibi $x_1[n]$ işareti 6 ekstremum ve 5 sıfır geçiş noktasına sahip monoton olmayan bir işarettir. Diğer örneklerin ise sabit değerlerle öteleme yapılarak sıfır geçişleri engellenmiş veya zarflarının ortalaması sıfırdan uzaklaştırılmıştır. HD sonucu da beklendiği gibi $x_1[n]$ işaretinde doğru sonuç vermiş, diğer işaretlerde gerçek frekans değerinden sapmıştır.

Şekil 2.4’de ise HD sonuçlarında gerçek frekans değerinden sapma görülen $x_2[n]$ ve $x_3[n]$ işaretlerine GKA uygulanarak ÖKİ’ler ve artık işaretler elde edilmiştir. Böylece HD ile anlık frekans değerlerine ulaşılmıştır [1,2].



Şekil 2.4: Örnek HHD sonuçları.

2.1.1 Yerel Ekstremum Noktalarının Bulunması

Ayrık ve sürekli zamanlı tek boyutlu zaman serilerinin maksimum ve minimum noktalarının bulunması için serinin birinci ve ikinci mertebe türevleri kullanılır. İncelenen işaretin t anında birinci mertebe türevi:

- Pozitif ise işaret artmakta,
- Negatif ise işaret azalmakta,
- Sıfır ise işaret sabit değerde devam etmekte veya yön değiştirmektedir.

İşaretin t anında birinci mertebe türevinin sıfır olduğu noktalar kritik noktalara karşı düşmektedir ki bu noktaların birer ekstremum mu yoksa eyer noktası mı olduğunu anlamak için ikinci mertebeden türeve başvurulur. Eğer birinci mertebeden türevin sıfır olduğu t anında işaretin ikinci türevi:

- Pozitif ise t noktası yerel minimum,
- Negatif ise t noktası yerel maksimum,
- Sıfır ise t noktası bir eyer noktasıdır.

Örnek olarak türevleri ve ekstremum noktaları bilinen birim frekansta sinüs işareti ve türevleri, eşitlik (2.3)'de verilmektedir.

$$x(t) = \sin(t) \rightarrow \frac{dx}{dt} = \cos(t) \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} = -\sin(t) \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'de birinci mertebe türevi sıfır yapan değerler, $t_1 = \pi/2$ s ve $t_2 = 3\pi/2$ s anlarıdır. Bu zaman değerlerinde $x(t)$ işaretinin ikinci mertebe türev değerleri ise (2.4) eşitliğinde hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{t=t_1} &= -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = -1 < 0 \\ \left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{t=t_2} &= -\sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) = 1 > 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Örnek olarak verilen sinüs işaretinde $\pi/2$ değerinin maksimum noktasına, $3\pi/2$ değerinin ise minimum noktasına karşı düştüğü bilinmektedir. Bu sayede

işaretin birinci ve ikinci türevleri ile yerel ekstremum noktalarının kestirilebileceği (2.4) eşitlikleri ile basitçe ispatlanmaktadır.

2.1.1.1 Yalın Ekstremum Bulma Yöntemi

HHD ile analiz edilecek ayrık zamanlı gözlem işaretinin n_0 noktasındaki birinci mertebe türevi (2.5) eşitliğindeki nümerik yöntem ile hesaplanabilir. Böylelikle işaretin her noktadaki birinci ve ikinci mertebe türevleri elde edilebilir. Birinci mertebe türevi sıfır olan tüm noktaların ikinci mertebe türevdeki karşılıklarına bakılır ve yerel maksimum ve minimum noktaları elde edilir.

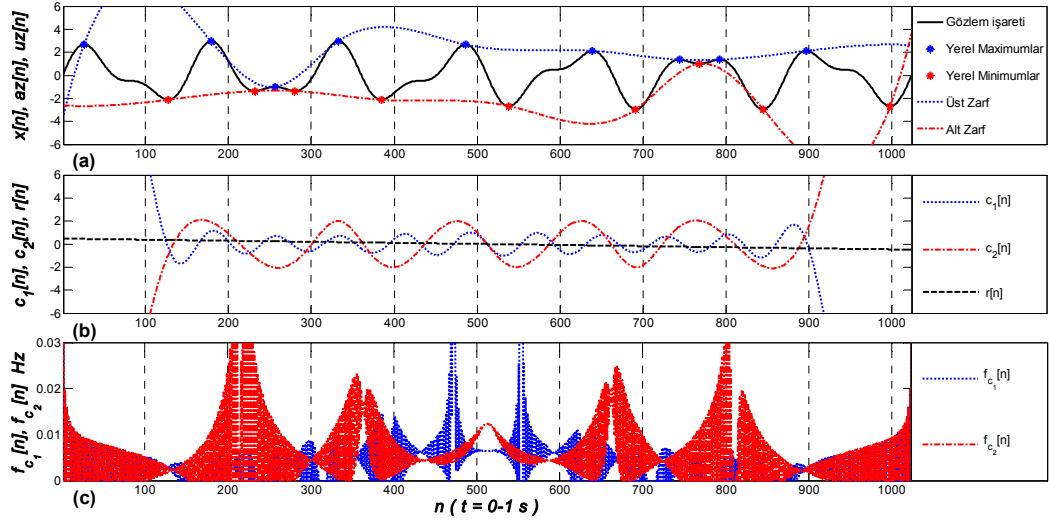
$$\left. \frac{dx[n]}{dn} \right|_{n=n_0} = x[n_0 + 1] - x[n_0] \quad (2.5)$$

Örnek olarak eşitlik (2.6)'da 7 Hz ve 13 Hz sabit frekanslarına sahip iki sinüs işaretinin birleşimi verilmektedir ve örnekleme frekansı 1024 Hz olarak seçilmiştir. Bu işaretin yalın ekstremum bulma yöntemiyle yerel maksimum ve minimum noktaları bulunarak Kübik Eğri Uydurma (KEU) yöntemiyle alt ve üst zarfları belirlenmiştir (bkz. Şekil 2.5.a).

$$x[n] = 2 * \sin\left(2\pi 7\left(\frac{n}{1024}\right)\right) + \sin\left(2\pi 13\left(\frac{n}{1024}\right)\right) \quad (2.6)$$

Şekil 2.5.b'de, yalın ekstremum bulma yöntemi kullanılarak uygulanan GKA sonuçları, Şekil 2.5.c'de ise tamamlanmış HHD ile elde edilen anlık frekans değerleri gösterilmektedir.

Şekil 2.5.a'da görüldüğü gibi yalın yöntemle bulunan yerel ekstremum noktalarından geçen zarflarda, başlangıç ve bitiş bölgeleri kararsız davranışlar göstermekte olup işaret genliğinin çok üstüne veya çok altına gidebilmektedir. ÖKİ eleme işlemleri içerisinde her bir iterasyonda yerel ekstremumların tespiti ve zarf bulma süreçleri olduğu için GKA tamamlanana kadar başlangıç ve bitiş hatalarının giderek arttığı Şekil 2.5.b'de ispatlanmaktadır. Bu sürecin tamamlanmasıyla elde edilen iki adet ÖKİ'nin HİA ile elde edilen normalize anlık frekans sonuçları ise Şekil 2.5.c'de gözlemlenmektedir.



Şekil 2.5: Yalın ekstremum bulma yöntemi a) Gözlem işaretinin ekstremumları ve zarfları, b) GKA sonuçları, c) HHD sonuçları.

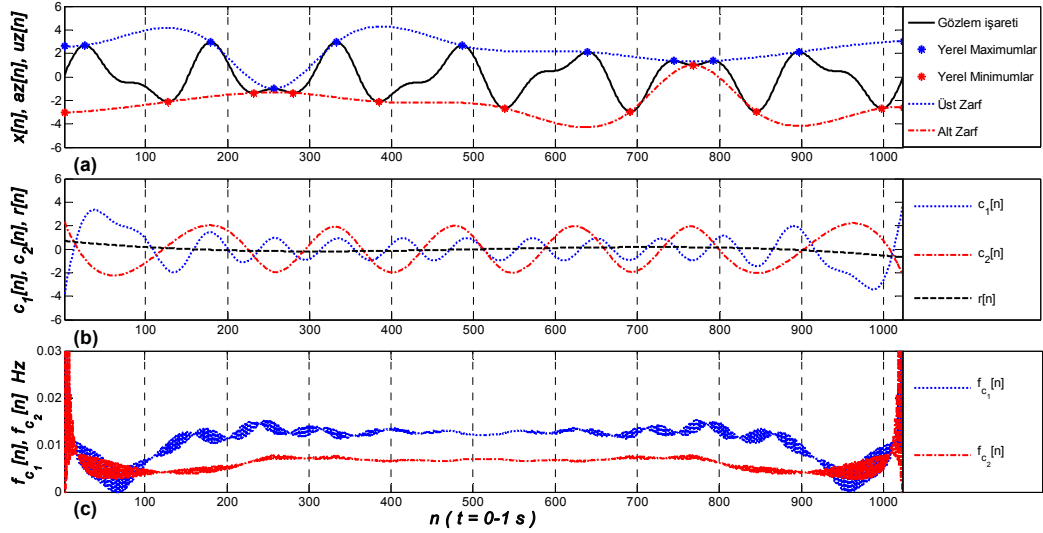
Örnek çalışma ile ilgili bilinmesi gereken önemli bir sonuç da HHD'nin toplam 336 iterasyonda ve 0.021645 saniyede tamamlanmış olmasıdır. Tezde verilen tüm gerçeklemeler özellikleri aşağıda listelenen ASUS N56VZ dizüstü bilgisayar ile tam başarımlı durumda gerçekleştirilmiştir.

- İşlemci: Intel® Core™ i7 3630QM Processor, 4 Cores, 8 Threads, Clock Speed 2.4 GHz, Max Turbo Frequency 3.4 GHz, Intel Smart Cache 6 MB, DMI 5 GT/s, Instruction Set 64 bit.
- Bellek: 16 GB DDR3 1600 MHz SDRAM.
- Ekran Kartı: Nvidia GeForce GT 650M, 384 CUDA Cores, Clock Frequency 900 MHz, Memory 128 bit 4 GB GDDR5.
- Depolama Birimi: Seagate Momentus ST1000LM024, 1 TB, 8 MB Cache, SATA 3.0 Gb/s.

2.1.1.2 Başlangıç ve Bitiş Noktalarının Ekstremlara Eklenmesi

Başlangıç koşullarının düzeltilmesi amacıyla 1998 yılında Huang, gözlem işaretinin başlangıç ve bitiş zamanlarında birer maksimum ve minimum noktası eklemiş ve bu yapay ekstremum noktalarını yalnızca zarfların belirlenmesinde kullanmıştır.

Genel olarak yapay ekstremumların değerleri, sınıra en yakın iki ekstremumdan geçen doğru denklemlerinin bulunmasıyla üretilir. Örneğin başlangıç bölgesindeki yapay maksimum noktası, birinci ve ikinci yerel maksimumlardan geçen doğrunun $n = 1$ anında üreteceği değerdir. Fakat burada zarfların, gözlem işaretinin tamamını kapsaması gerektiğine dikkat edilmelidir. Eğer $n = 1$ anında gözlem işaretinin değeri $x[1]$, yapay maksimumdan büyükse üretilecek üst zarf gözlem işaretinin altında kalacaktır. Bu durumun engellenmesi için $x[1]$ değeri yapay maksimum olarak kabul edilir. Aynı işlemler bitiş bölgesindeki bozulmayı engellemek amacıyla üretilecek diğer yapay maksimum için de uygulanır. Yapay minimumlarda ise alt zarfın gözlem işaretini kapsaması için gereken koşul, yapay minimumun işaret değerinden küçük olmasıdır [1].



Şekil 2.6: Başlangıç ve bitiş noktalarının yalın ekstremumlara eklenmesi a) Gözlem işaretinin ekstremumları ve zarfları, b) GKA sonuçları, c) HHD sonuçları.

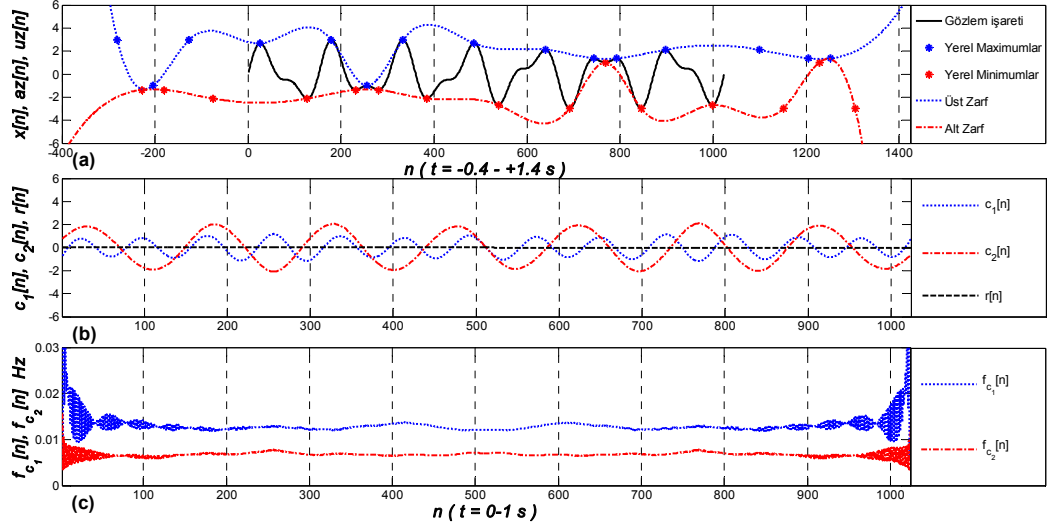
Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir unsur, yapay maksimum ve minimum noktalarının ekstremum sayılarına eklenmemesi gerektiğidir. Çünkü zarfları düzeltmek için kullanılan bu yöntem, işaretin monotonluk testini ve Hahn tarafından belirlenen sıfır geçiş noktalarıyla ekstremum sayıları arasındaki ilişkiyi bozmamalıdır. Eşitlik (2.6) ile verilen gözlem işaretinin başlangıç ve bitiş noktalarının ekstremumlara eklenmesiyle elde edilen yerel ekstremum noktaları ve zarflar Şekil 2.6.a'da verilmektedir. Yalın ekstremumlarla yapılan çalışmaya nazaran başlangıç ve bitiş bölgelerinde kayda değer bir düzelme olduğu açıkça görülmektedir (bkz. Şekil 2.5.a).

Sınır bölgelerde zarfların iyileşmesinden ötürü GKA sonucu ÖKİ'de kararsızlığın ortadan kalktığı ve HİA sonucu anlık frekanslarda gerçek değerlere ciddi bir yaklaşım meydana geldiği Şekil 2.6.b ve c'de gözlemlenmektedir. Bu yöntem sayesinde HHD'de yapılan iterasyon sayısı 146'ya düşmüştür. Fakat işlem süresi 0.023505 saniyeye yükselmiştir. Bunun sebebi yapay ekstremum üretiminde uygulanan işlemlerdir. Gözlem işaretinin karmaşıklaşması ile bu yöntemin, süreden de ciddi kazançlar sağladığı görülmüştür.

2.1.1.3 Ayna Etkisi ile Ekstremum Ekstrapolasyonu

Yapay ekstremumlar ile zarflarda sağlanan iyileşme, yalın ekstremum kullanımına nazaran çok iyi gözükmektedir. Lakin HHD sonuçlarına bakıldığında, sınır bölgelerde halen ciddi bir bozulmanın söz konusu olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 2.6.c). Bu sebeple Flandrin tarafından 2003 yılında sınırların dışına ayna etkisiyle üçer adet yapay ekstremum eklenmesi önerilmiştir. Böylelikle zarflar sınır bölgelerinde doğrusal olarak dizilen ekstremum noktalarına gitmek yerine, gözlem işaretinin karakteristiğine uygun ekstremum noktalarından sınır değerlerinin dışına çıkarlar. Böylelikle yalın ekstremum kullanımında zarflarda görünen kararsızlık (bkz. Şekil 2.5), sınırların dışında kalacaktır [8].

Eşitlik (2.6) ile verilen gözlem işaretinin yalın ekstremumlarına ayna yöntemi ile ekstremum ekstrapolasyonu uygulanması sonucu elde edilen zarflar Şekil 2.7.a'da gösterilmektedir. Şekil 2.7.b'de ise bu yöntemin kullanıldığı GKA sonuçlarının diğer ekstremum bulma yöntemlerine göre başarımının çok yüksek olduğu ve elde edilen ÖKİ'nin (2.6) eşitliğindeki bileşenlerle neredeyse aynı olduğu grafikten açıkça görülebilmektedir. Bu sebepten anlık frekans bilgisinde de büyük ölçüde bir iyileştirme sağlanmıştır (bkz. Şekil 2.7.c).



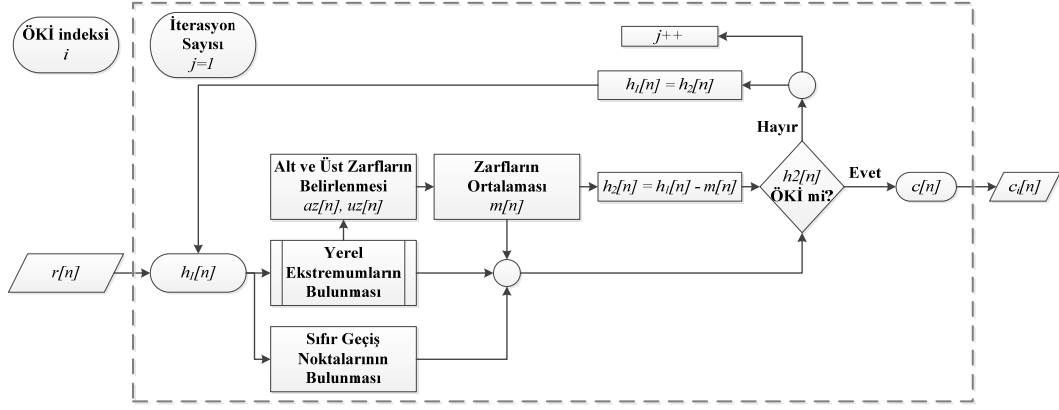
Şekil 2.7: Ayna ekstrapolasyonu ile yalın ekstremumların artırılması a) Gözlem işaretinin ekstremumları ve zarfları, b) GKA sonuçları, c) HHD sonuçları.

Ayna ekstrapolasyonunun ekstremum bulma sürecinde kullanılmasıyla birlikte HHD tamamlanma süresi 0.018958 saniyeye, iterasyon sayısı da 64'e düşmüştür.

2.1.2 Öz Kip İşlevi Eleme Süreci

Uyarlamalı ve yinelemeli bir yöntem olan HHD'nin en önemli özelliği, doğadan örneklenen neredeyse tüm işaretleri, durağanlık ve doğrusallık şartı aramaksızın HD ile anlık frekans bilgilerinin elde edilebileceği, sonlu sayıda bileşene ayırmasıdır. Bu ayırma işlemi GKA ile gerçekleştirilir ve bu anlık frekans bilgisine ulaşılabilen her bir bileşene, gözlem işaretinin ÖKİ'leri adı verilir.

Şekil 2.2'deki genel GKA algoritması içerisinde, monoton olmayan her işaret ÖKİ Eleme alt sürecine alınır. Yinelemeli bir süreç olan ÖKİ Eleme işleminde ilk olarak gelen işaret $h_1[n]$ serisi olarak atanır ve yerel ekstremum noktaları ile sıfır geçiş noktaları bulunur (bkz. Şekil 2.8).



Şekil 2.8: ÖKİ Eleme genel algoritması.

Eleme sürecindeki $h_1[n]$ işaretinin *signum* fonksiyonu ile pozitif ve negatif bölgeleri tespit edilerek, (2.7) eşitliğinde görüldüğü gibi türevi alınırsa, işaretin pozitif ve negatif bölgeler arasında geçiş yaptığı noktalar bulunur.

$$\left| \frac{d}{dn} (\text{sgn}(h_1[n])) \right| = \begin{cases} 2, & \text{sıfır geçiş noktalarında} \\ 0, & \text{diğer noktalarda} \end{cases} \quad (2.7)$$

Yerel ekstremum noktalarının bulunması için, Bölüm 2.1.1’de verilen yöntemlerin sonuçları Tablo 2.1’de karşılaştırılmış ve en başarılı durumda gözükene ayna yöntemiyle ekstrapolasyon kullanılmıştır. Fakat Eleme sürecinde yapay ve yalın tüm ekstremum noktaları alt ve üst zarfların belirlenmesinde kullanılırken, sonuçların ÖKİ olup olmadıklarını kontrol eden yapıya sadece yalın ekstremumlar gidecektir.

Tablo 2.1: Yerel ekstremum bulma yöntemlerinin karşılaştırılması

| Yöntem | Süre | İterasyon Sayısı | Başarım |
|---|----------|------------------|---------|
| Yalın ekstremumlar | 0.02165s | 336 | %13.8 |
| Başlangıç ve bitiş noktalarının eklenmesi | 0.02350s | 146 | %68.4 |
| Ayna Ekstrapolasyonu | 0.01896s | 64 | %91.2 |

Ayna ekstrapolasyonu ile ekstremum noktalarının bulunmasının ardından yerel maksimum noktaları birleştirilerek $uz[n]$ (üst zarf), yerel minimum noktaları birleştirilerek $az[n]$ (alt zarf) bulunur. Zarfların çizilmesinde doğrusal yöntemler, Euler yöntemi, polinomlar, Kübik veya B tipi eğriler kullanılmaktadır. Fakat genel

kullanım Kübik Eğri Uydurma (KEU) yöntemidir. Bunun sebebi yapılan birçok çalışmada en iyi HHD sonuçlarına ulaşmasıdır [1,2,8].

Zarfların elde edilmesiyle her noktada zarfların ortalama değerlerinden oluşan, ortalama işareti $m[n]$ oluşturulur. Ardından (2.8) eşitliğinden faydalanarak $h_2[n]$ işareti elde edilir.

$$h_2[n] = h_1[n] - m[n] \quad (2.8)$$

Eleme sürecinde $h_2[n]$ işareti elde edildiğinde, bu işaretin ÖKİ olup olmadığı incelenecektir. Eğer girişteki $h_1[n]$ işaretinin:

- Yalın ekstremum sayısı ile sıfır geçiş sayısı eşit veya bir farklıysa
- Ortalama işareti $m[n]$ her noktada sıfırsa,

süreç sonlandırılır ve $h_2[n]$ işareti HHD içerisinde bir ÖKİ olarak $c_i[n]$ serisine atanır ve eleme alt işleminden çıkarılır. Aksi takdirde $h_2[n]$ işareti, $h_1[n]$ olarak kaydedilir ve iterasyon indeksi artırılarak tüm işlem basamakları tekrarlanır.

HHD, bilinen tüm işaretleri sonlu sayıda ÖKİ'ye ayırır ve ÖKİ Eleme sürecinin kararsız davrandığı bir zaman serisine henüz rastlanmamıştır. Yani eleme süreci her durumda bir ÖKİ'ye yakınsar. Fakat ekstremum bulma algoritması, eğri uydurma yöntemi veya incelenen işaretin çözünürlüğünün düşük olması gibi sebeplerle $h_1[n]$, ÖKİ'ye çok yakın bir bölgede osilasyon yapabilir veya ÖKİ'ye yaklaşma hızı sıfıra gidebilir. Bu tip durumlarda Eleme işleminin sonsuz döngüye girmesini engellemek için maksimum iterasyon şartı kullanılmalıdır. Yaklaşma hızının sıfırlanması durumlarında her bir iterasyonda aynı sonuçların tekrar tekrar hesaplanmasını engellemek için ise (2.9) eşitliği kullanılarak yaklaşım hızı hesaplanır ve yaklaşım durduğunda elde edilen $h_2[n]$ serisi, ÖKİ olarak kabul edilir [1-3,6-46].

$$SD = \frac{\sum |h_1[n] - h_2[n]|^2}{\sum |h_2[n]|^2} \quad (2.9)$$

Tezde yapılan tüm gerçeklemlerde maksimum iterasyon şartı 10^3 , yakınsama hızı alt sınırı ise 10^{-9} olarak HHD algoritmasına eklenmiştir. Böylelikle incelenen her örnekte gerçek ÖKİ'ye ulaşılmasına dikkat edilmiştir.

2.2 Hilbert İzgesel Analizi

Herhangi bir $x(t)$ sürekli zamanlı işaretinin $1/\pi t$ ile konvolüsyonuna, işaretin HD'si adı verilir ve (2.10) eşitliği ile tanımlanır. HD doğrusal, zamanla değişmeyen (LTI) bir dönüşümdür.

$$\mathcal{H}(x(t)) = x(t) * \left(\frac{1}{\pi t}\right) = \frac{1}{\pi} \left(p.v. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \right) \quad (2.10)$$

Konvolüsyon hesaplanırken (2.10) eşitliğinde görüldüğü gibi integralin paydasında sıfır noktası oluşarak integral tanımsız hale gelir. Bu durumun engellenmesi için Titchmarsh tarafından, integrale Cauchy temel değeri (*Cauchy Principal Value* (p.v)) eklenir. Bu eklenti ile eşitlik (2.11)'de gösterildiği gibi integrali tanımsız yapan $t = \tau$ noktasına sağdan ve soldan yaklaşarak, integral tanımlı hale getirilir [49,50].

$$\mathcal{H}(x(t)) = \frac{1}{\pi} \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_{t-1/\epsilon}^{t-\epsilon} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau + \int_{t+\epsilon}^{t+1/\epsilon} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \right) \quad (2.11)$$

Ayrık veya sürekli zamanlı işaretin HD sonucu, işaretin faz bilgisinin -90^0 kaydırılmışına karşı düşer. Bu sebeple ikinci kez HD uygulama işlemi, faz kaymasını -180^0 'ye tamamlar. Yani özgün işaretin negatifine ulaşılır [49-51].

Sürekli zamanlı gerçek değerli bir zaman serisinin HD, işarete karmaşık bir bileşen olarak eklendiğinde, (2.12) eşitliğindeki $y(t)$ analitik serisi elde edilir ve Euler yapısı kullanılarak eşitlik (2.13) ile verilen karmaşık düzlemde açı ve genlik bilgisi elde edilebilir.

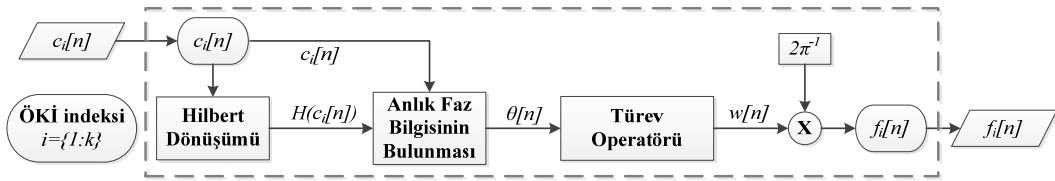
$$y(t) = x(t) + j \mathcal{H}(x(t)) = g(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} g(t) &= \sqrt{x(t)^2 + \mathcal{H}(x(t))^2} \\ \theta(t) &= \tan^{-1} \left(\frac{x(t)}{\mathcal{H}(x(t))} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Frekans ile açısal frekans arasındaki ilişki ise (2.14) eşitliğinde verilmektedir.

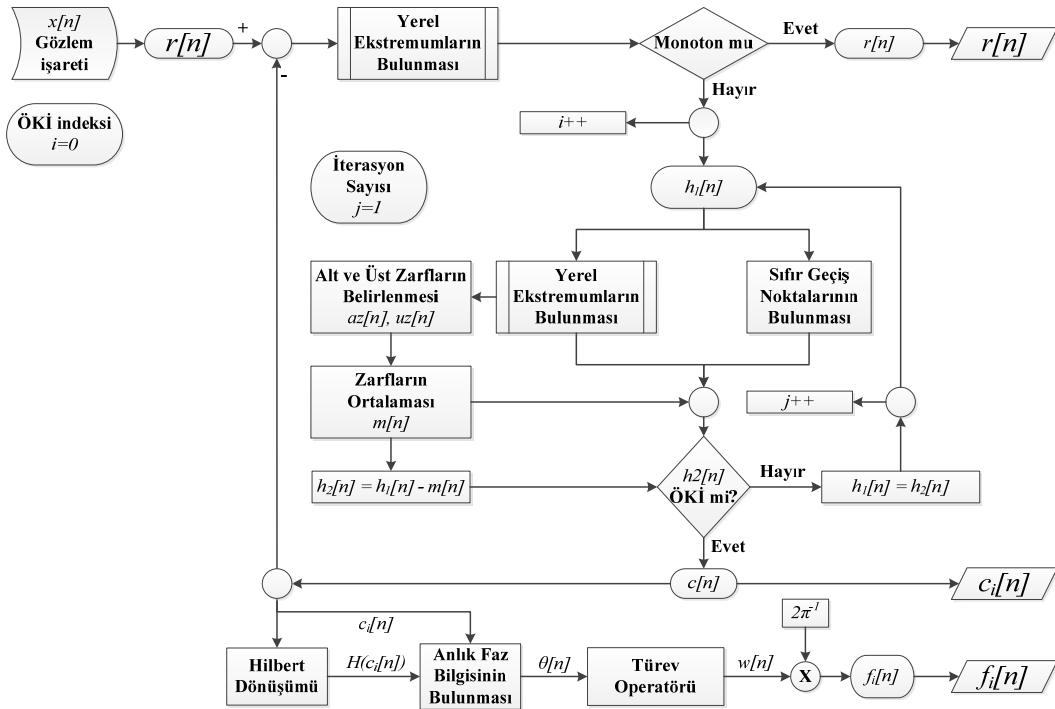
$$f[n] = \frac{\omega[n]}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta[n]}{dn} \quad (2.14)$$

Eşitlik (2.13) ile elde edilen anlık faz bilgisinin türevi açısal olarak anlık türev bilgisini vermektedir. Genel algoritması Şekil 2.9’da verilen HİA, GKA sonucu ortaya çıkan k adet ÖKİ’yi HD’ye sokarak eşitlik (2.12) ile işarete karmaşık bileşen olarak ekler ve (2.13) eşitliği ile anlık faz bilgisini hesaplayarak (2.5) eşitliği ile ayrık türevini alır.



Şekil 2.9: HİA genel algoritması.

Bölüm 2’de tamamlanan HHD’nin ayrıntılı algoritması ise Şekil 2.10’da sentezlenmektedir.



Şekil 2.10: HHD ayrıntılı algoritması.

3. GÜRÜLTÜ SÜZME

Genel olarak doğrusal ve durağan olmayan fiziksel zaman serilerinin anlık frekans bilgilerinin elde edilmesi amacıyla ortaya çıkan HHD, incelediği işareti yüksek frekanslı bileşenlerinden düşük frekanslı bileşenlerine doğru sonlu sayıda ÖKİ'ye ayırır. Bu özelliği sebebiyle HHD'nin belkemiği olan GKA, gürültü süzme ve eğilim belirleme amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır [3,19,23-47].

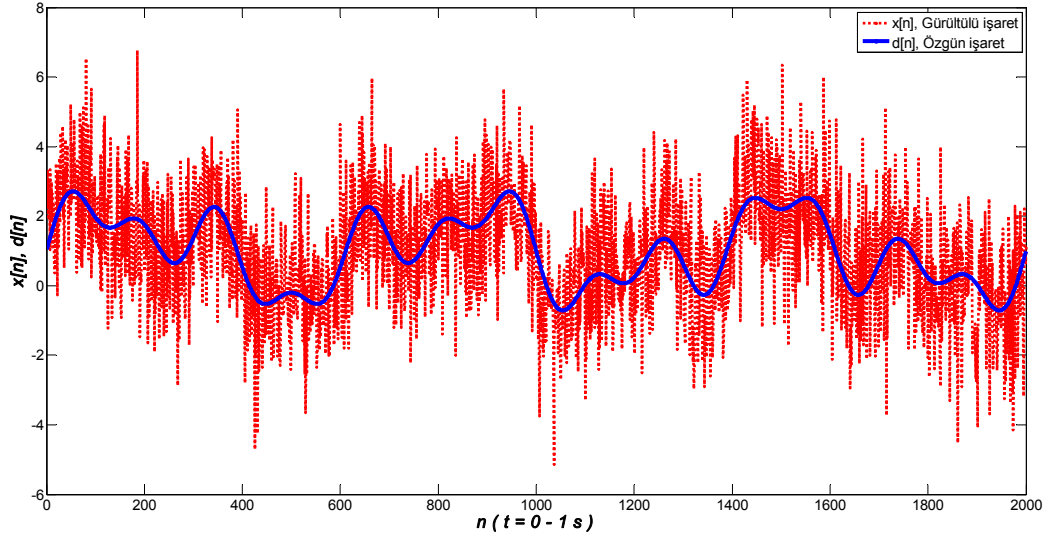
Tezde yüksek frekanslı, düşük frekanslı ve karma frekanslı sentetik ve fiziksel işaretlere eklenen gürültülerin, sadece HHD ile elde edilen belirli bileşenlerinin elenmesi ile sağlanan süzme başarımları incelenmiştir. Burada elenecek olan ÖKİ'lerinin seçimi konusunda sekiz adet yöntem önerilmiştir. Fakat süzme işlemi sırasında ÖKİ'lerine herhangi bir süzgeçleme işlemi uygulanmamıştır ve işaretlere sıfır ortalamalı birim varyanslı beyaz Gauss gürültüsünün yanı sıra alçak frekanslı ve yüksek frekanslı gürültüler de eklenmiştir.

Eşitlik (3.2) ile verilen örnek $d[n]$ işaretine, SNR değeri 0 dB olan sıfır ortalamalı birim varyanslı $\omega[n]$ beyaz Gauss gürültüsü eklenerek örnekleme frekansı 2 kHz olan $d[n]$ gözlem işareti (3.1) eşitliği ile elde edilmiştir. Çalışma [0,1] saniye kapalı aralığında yapıldığından örnek sayısı $T = 2001$ 'dir.

$$x[n] = d[n] + \omega[n] \quad (3.1)$$

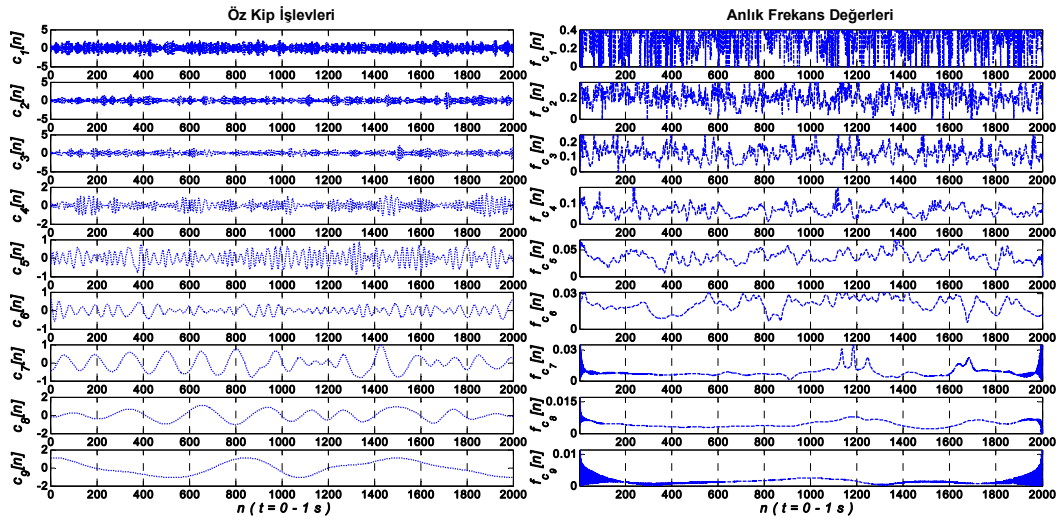
$$d[n] = \left(\sin \left(2\pi \cdot 3 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) + \left(0.8 \cdot \sin \left(2\pi \cdot 7 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) \\ + \left(0.6 \cdot \sin \left(2\pi \cdot 13 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) + 1 \quad (3.2)$$

Önerilen yöntemlerde incelenecek olan, (3.1) eşitliğinde verilen gürültülü örnek işaret ve (3.2) eşitliği ile verilen gürültüsüz hali Şekil 3.1'de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 3.1: Gürültü süzme algoritmaları için kullanılacak örnek işaret.

Örnek işaretin GKA ile elde edilen ÖKİ'leri ve HİA sonucunda bulunan anlık normalize frekansları ise Şekil 3.2'de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Örnek işaretin HHD sonuçları

Tezde yapılan tüm çalışmalarda HHD'de aynı parametreler kullanılarak tutarlılık sağlanmaktadır. Bu parametrelerden ilki, $m[n]$ ortalama işaretinin sıfıra yaklaşması için gereken eşik değeridir. Ayrık zamanlı işaretlerde tam olarak sıfır ortalama değeri elde edilemediği için 10^{-2} değeri ve altı işaretler sıfır kabul edilmiştir. ÖKİ Eleme sürecinin kısır döngüye girmesini engellemek için kullanılan maksimum iterasyon sayısı 10^5 , eşitlik (2.9)'da tanımlanan yaklaşım hızı sınırı ise 10^{-5} olarak

seçilmiştir. Fakat tezdeki tüm iterasyonlarda ÖKİ için gerekli şartların sağlandığından emin olunarak süreçler tamamlanmıştır.

3.1 Olası Tüm Kombinasyonlar

Hatırlanacağı üzere HHD, gözlem işaretinin sınırlı k adet ÖKİ'ye ayrıştırılması ile tamamlanır ve (2.1) eşitliği ile gözlem işareti kayıpsız olarak geri çatılabilir. Eşitlik (3.1) ile özgün $d[n]$ serisine eklenen $\omega[n]$ gürültüsü beyaz Gauss gürültüsü olduğu için tüm frekans bileşenlerini etkilemektedir. Bu sebeple tüm ÖKİ'ler az veya çok gürültü etkisi taşımaktadır. Genel olarak gürültünün enerjisi yüksek frekanslarda toplandığı için, ilk ÖKİ'leri büyük oranda gürültü ihtiva etmektedir.

Gürültüden en az etkilenen ÖKİ'lerin indeksleri belirlenip S kümesine kaydedilir ve yalnızca bu kümedeki ÖKİ'ler eşitlik (3.3)'de verildiği gibi artık işaretle toplanarak özgün işaretin yaklaşığı $y[n]$ elde edilir. Çalışmada kullanılan beyaz Gauss gürültüsü sıfır ortalamalı ve birim varyanslı olduğu için, işaretin eğilimini belirleyen $r[n]$, gürültüden etkilenmez.

$$y[n] = r[n] + \sum_{i \in S} c_i[n] \quad (3.3)$$

Buradaki asıl hedef, optimum S kümesinin belirlenmesidir. Olası tüm S kümeleri k elemanlı ÖKİ kümesinin tüm alt kümelerinin sayısı olan 2^k ile hesaplanır. Eşitlik (3.1) ile verilen örnek işaretin HHD sonucunda, Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi 9 adet ÖKİ elde edilmiştir. Bu durumda 512 adet olası S kümesi mevcuttur. Tüm S kümelerinin (3.3) eşitliği ile elde edilen $y[n]$ yaklaşımlarının (3.4) eşitliği ile $RMSE$ değerleri bulunur ve en düşük $RMSE$ değerini sağlayan S kümesi, optimum S kümesi olacaktır.

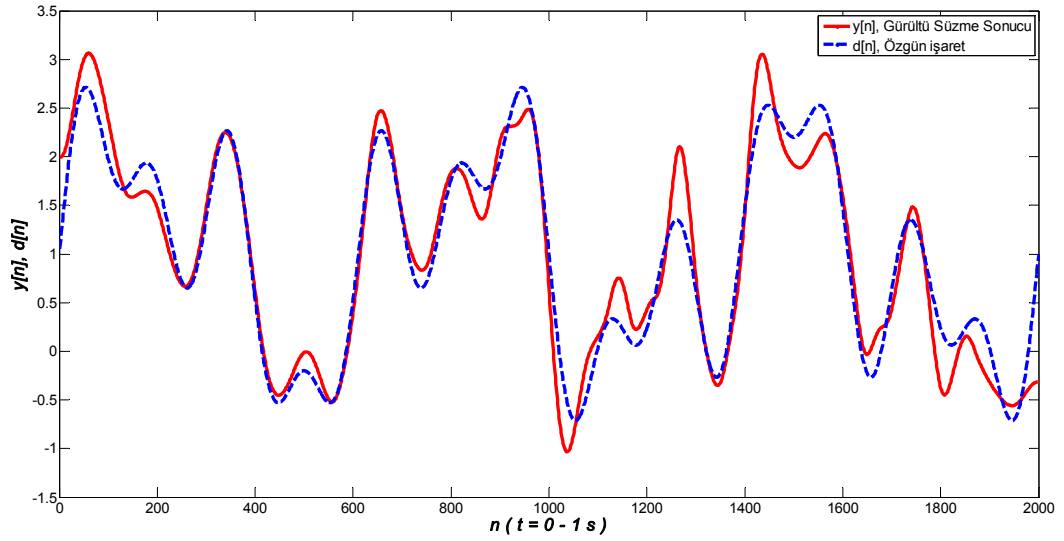
$$RMSE = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T (y[n] - d[n])^2 \quad (3.4)$$

Tablo 3.1’den görüleceği gibi olası tüm S kümesi kombinasyonlarının sırasıyla (3.4) eşitliğinde kullanılması ve $RMSE$ değerlerinin elde edilebilmesi için $[0, 2^{k-1}]$ kapalı aralığında ikili sayı sistemi kullanılabilir.

Tablo 3.1: Öki’lerin olası tüm kombinasyonları

| | $c_1[n]$ | $c_2[n]$ | $c_3[n]$ | $c_4[n]$ | $c_5[n]$ | $c_6[n]$ | $c_7[n]$ | $c_8[n]$ | $c_9[n]$ |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| S_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| S_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| S_4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| S_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| S_{512} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Bu yöntemle elde edilen en düşük $RMSE$ ile gürültü süzme başarımı ise Şekil 3.3’de verilmektedir.



Şekil 3.3: Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu.

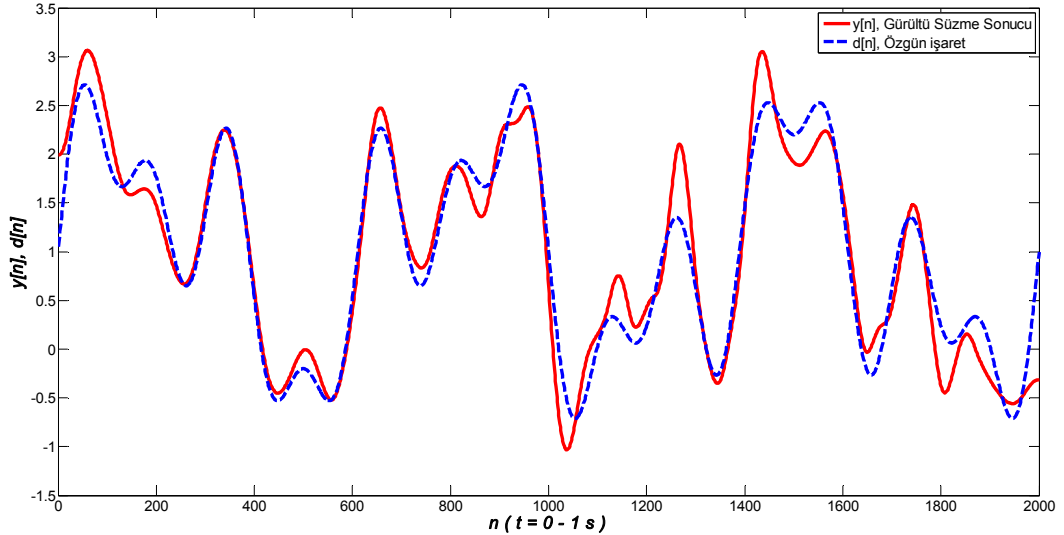
Tezde önerilen diğer tüm yöntemlerde, bu yöntemle bulunacak optimum S kümesine yaklaşılmaya çalışacaktır ve örnek gözlem işaretinde optimum S kümesi $S = \{c_i[n] | i = 7,8,9\}$ elde edilmiş ve buna karşılık $RMSE$ değeri 0.2723 olarak hesaplanmıştır. Fakat özgün işaretin bilinmediği sistemlerde bu yöntemin kullanılması mümkün değildir.

3.2 Klasik Eleme Yöntemi

Sayısal haberleşme sistemlerinde, doyum durumlarında ve aykırı değer üreten sistemlerde gürültü genellikle bilgi işaretinden çok daha yüksek frekanslıdır. Bu sebeple GKA ile elde edilen ilk ÖKİ'nin hiçbir bilgi içermediği kabul edilir ve (3.3) eşitliğinde $S = \{c_i[n] | i = 2:k\}$ olarak seçilir. Bu yöntem klasik eleme yöntemi olarak adlandırılır ve sıklıkla tali bir süzme yöntemi ile birlikte kullanılır. Yani (3.3) ile elde edilen yaklaşım ikincil bir süzme yöntemine daha tâbi tutulur [29,42].

Klasik eleme yöntemi gürültü etkisinin minimum olduğu bir ortamda demodülasyon yöntemi olarak da kullanılabilmekte ve taşıyıcı işaret ile bilgi işaretini birbirinden rahatlıkla ayırabilmektedir.

Fakat analog haberleşme sistemlerinin ve kablosuz taşıma sistemlerinin modellenmesinde kullanılan beyaz Gauss gürültüsünün alçak frekanslı bilgi işaretlerine eklenmesiyle, ilk p adet ÖKİ büyük ölçüde gürültü etkisinde kalacaktır. Bu sebeple $S = \{c_i[n] | i = p + 1:k\}$ olarak belirlenir. Örnek işaretin Klasik eleme yöntemi ile gürültü süzme çalışmasında $p = 6$ olarak deneysel bir kestirimde bulunulmuş ve optimum S kümesi sağlanarak elde edilen sonuçlar Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4: Klasik eleme yöntemi ile gürültü süzme sonucu.

Klasik eleme yöntemi ile optimum p parametresinin kestirilmesi genellikle özgün işaret hakkında bilgi sahibi olma ön koşulunu gerektirmektedir. Fakat özgün işaret ve gürültü hakkında bir bilgi yoksa $p = 6$ alınarak ikincil bir süzgeç öncesi

gürültünün büyük bir kısmı yok edilebilmektedir. Bu sebeple oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

3.3 İstatistiksel Yöntemler

İki adet ayrık zamanlı işaretin çapraz ilişkisi (3.5) eşitliği ile tanımlanır. İstatistiksel yöntemlerle GKA ile gürültü süzme işlemi genel olarak ÖKİ'lerin birbirleri arasındaki ilişki değerlerini baz alarak yapılmaktadır [3,19,28,34,36-37,47]. Beyaz Gauss gürültüsüne sahip işaretlerin ilk ÖKİ yüksek yoğunluklu gürültü ihtiva ettiği için, ilk ÖKİ ile ilişkisi sıfıra yakın olan ÖKİ S kümesi'nin belirlenmesi amacıyla (3.3) eşitliğinde kullanılabilir.

$$r_{xy}(l) = \frac{1}{T-l} \sum_{n=1}^{T-l} x[n] \cdot y^*(l+n) \quad (3.5)$$

$$r_{xx}(l) = \frac{1}{T-l} \sum_{n=1}^{T-l} x[n] \cdot x^*(l+n) \quad (3.6)$$

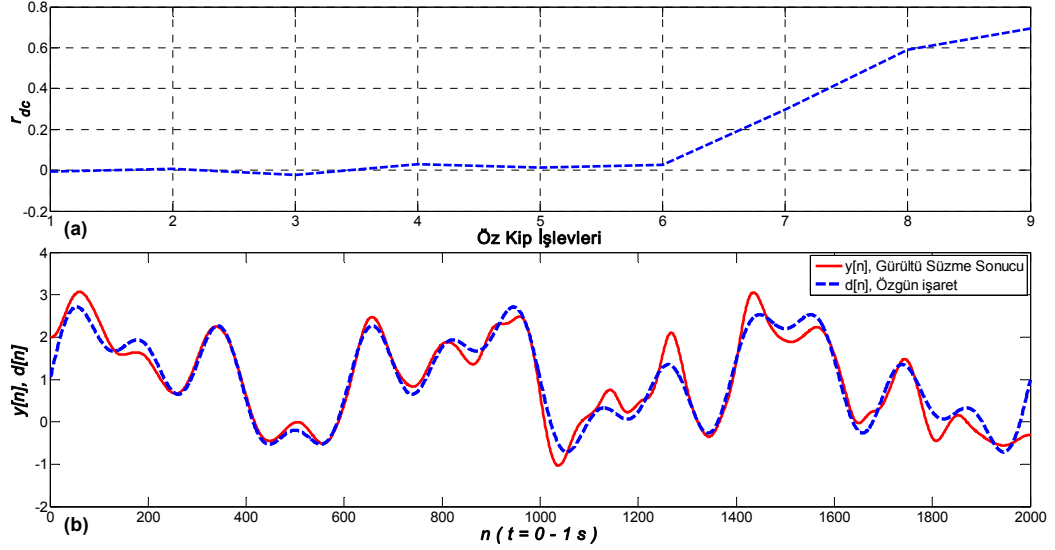
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T |x[n] - \mu_x|^2 \quad (3.7)$$

Bununla birlikte ÖKİ'lerinin kendi aralarında (3.6) eşitliği ile tanımlanan özilişki değerleri de bilgi işaretleri ile rastlantısal süreçler olan gürültü işaretlerini birbirlerinden ayırmak amacı ile kullanılabilir. Fakat bilgi işaretinin yüksek frekanslı ve stokastik olması durumunda ÖKİ'lerinin tümünün özilişkileri birbirlerine yakın değerli çıkacağı için yöntem kullanılabilir olmaktan çıkacaktır.

Gözlem işaretinin elde edilmesinde kullanılan beyaz Gauss gürültüsü sıfır ortalamalı ve birim varyanslı olduğu için, gürültünün etkin olduğu ÖKİ'lerinin varyansları, bilgi işaretinin etkin olduğu ÖKİ'lerinden daha büyük olacaktır. Bu sebeple (3.3) eşitliği ile bulunan varyans değerleri de S kümesinin seçiminde kullanılabilir istatistiksel yöntemler arasında yerini almaktadır.

3.3.1 Gürültüsüz İşaret ile Öz Kip İşlevlerinin İlişkisi

Eşitlik (3.2) ile verilen alçak frekanslı $d[n]$ işareti ile GKA sonucu elde edilen ÖKİ'leri arasındaki çapraz ilişki değerleri Şekil 3.5.a'da verilmektedir. Buradan görüleceği gibi ÖKİ'leri ile özgün işaret arasındaki ilişki 6. ÖKİ'ne kadar sıfır dolaylarında seyretmekte, 7. ÖKİ'nde ve sonrasında artmaktadır.



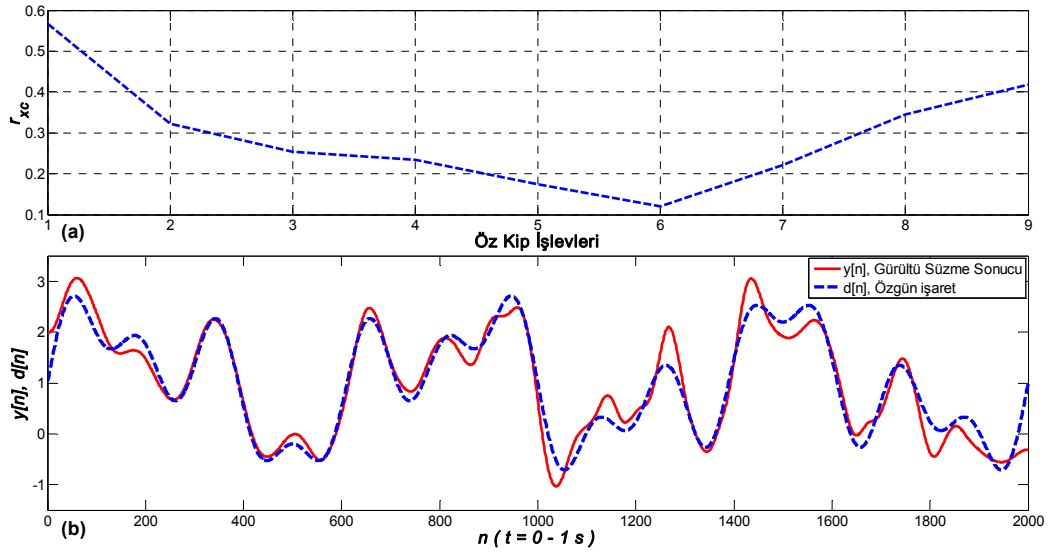
Şekil 3.5: a) ÖKİ'lerle özgün işaret arasındaki çapraz ilişki değerleri, b) ÖKİ'lerle özgün işaret arasındaki çapraz ilişki değerleri ile gürültü süzme sonucu.

Farklı işaret tiplerinde bu grafik yüksek frekanslı ÖKİ'lerinde sıfırdan bir miktar uzaklaşabilmektedir. Fakat 7. ÖKİ'indeki yüksek artış bir çok çalışmada belirgin biçimde gözlemlenmektedir. Bu sebeple çapraz-ilişki değerlerinin türevi incelenerek belirli bir eşik değerin üzerindeki ilk artış miktarı sonrasındaki ÖKİ'leri S kümesinin elemanı kabul edilir ve nihayetinde (3.3) eşitliği ile gürültü süzme işlemi tamamlanır. Tezde önerilen bu yöntemde türev sınırı maksimum ilişki değerinin $1/10$ 'u olarak kabul edilmiş ve optimum S kümesi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 3.5.b'dedir.

Özgün işaret ile ÖKİ'leri arasındaki çapraz-ilişki mantıksal olarak çok iyi bir yaklaşım olmasına rağmen uygulanabilirliği oldukça zordur. Çünkü herhangi bir sensör veya kanaldan alınan bir işaretin gürültü süzme ihtiyacına karşılık vermesi beklenen bir çalışmada, özgün işaretin varlığını gerektirmektedir. Lakin bu yöntem, sentetik bir işaret ve gürültü ile yapılan çalışmalarda, istatistiksel yöntemlerin başarımlarını belirlemek için kullanılabilir.

3.3.2 Gürültülü İşaret ile Öz Kip İşlevlerinin İlişkisi

Gürültülü gözlem vektörünün GKA sonucu elde edilen ÖKİ'leri ile gözlem vektörünün kendisi arasındaki çapraz-ilişki değerleri optimum S kümesinin belirlenmesinde kullanılabilir bir diğer istatistiksel yöntemdir. Yalnızca gözlem vektörünün sağlanabildiği ve gürültü süzme yöntemleri ile bilgi işaretinin arandığı uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Fakat stokastik süreçlerde ve yüksek frekanslı işaretlerde güvenilir sonuçlar üretememektedir.



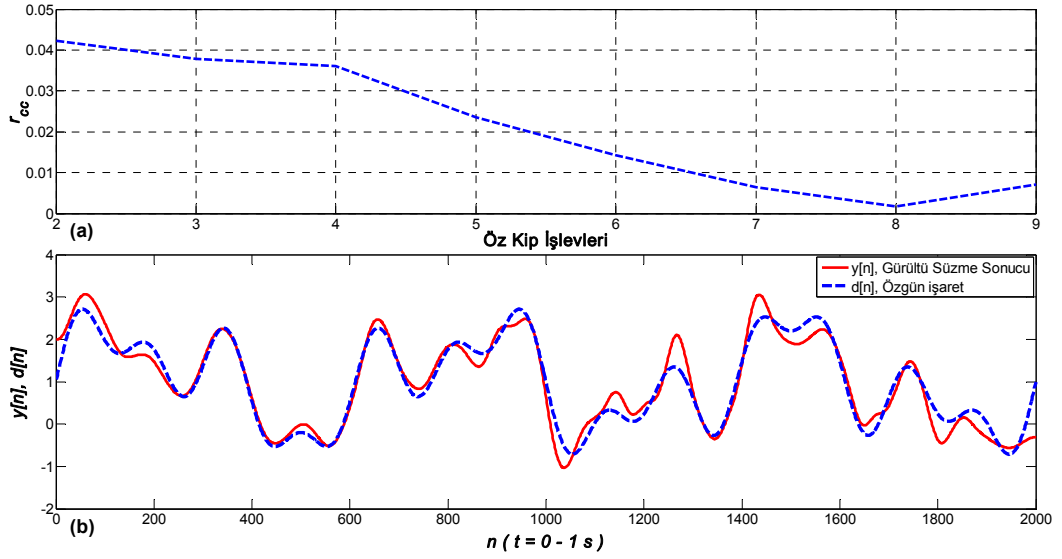
Şekil 3.6: a) ÖKİ'lerle gözlem işareti arasındaki çapraz-ilişki değerleri, b) ÖKİ'lerle gözlem işareti arasındaki çapraz-ilişki değerleri üzerinden gürültü süzme sonucu.

Eşitlik (3.1) ile verilen gözlem işareti $x[n]$ ile GKA sonucu elde edilen ÖKİ'leri arasındaki çapraz-ilişki değerleri Şekil 3.6.a'da verilmektedir. Buradan görüleceği gibi ÖKİ'leri ile gürültülü işaret arasındaki çapraz-ilişki 6. ÖKİ'ne kadar azalmakta, 7. ÖKİ'nde ve sonrasında artmaktadır.

Farklı işaret tiplerinde bu grafik birden fazla minimum noktası ile oluşmaktadır. Bu tip durumlar da göz önüne alınarak ilişki değerlerinin ilk yerel minimumu, gürültü ile ilişkinin kesildiği değer olarak kabul edilmiş ve ilk yerel minimumdan sonraki tüm ÖKİ'lerini kapsayan S kümesi ile (3.3) eşitliğinde yerine konarak optimum gürültü süzme sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 3.6.b'de gösterilmiştir.

3.3.3 İlk Öz Kip İşlevi ile Diğerlerinin İlişkisi

Beyaz Gauss gürültüsü veya yüksek frekanslı herhangi bir gürültü ile bozulan tüm gözlem işaretlerinde ilk ÖKİ, gürültü enerjisinin büyük çoğunluğuna sahiptir. Bu sebeple ikinci ve sonrasındaki tüm ÖKİ'lerinin ilki ile çapraz-ilişkisi, ÖKİ'lerinin aslında gürültü ile ilişkisini verecektir. Bu sebeple Şekil 3.2'de verilen $c_1[n]$ işaretinin $c_2[n]$ 'den $c_k[n]$ 'e kadar tüm ÖKİ'leri ile çapraz-ilişki değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.7.a'da verilmektedir.



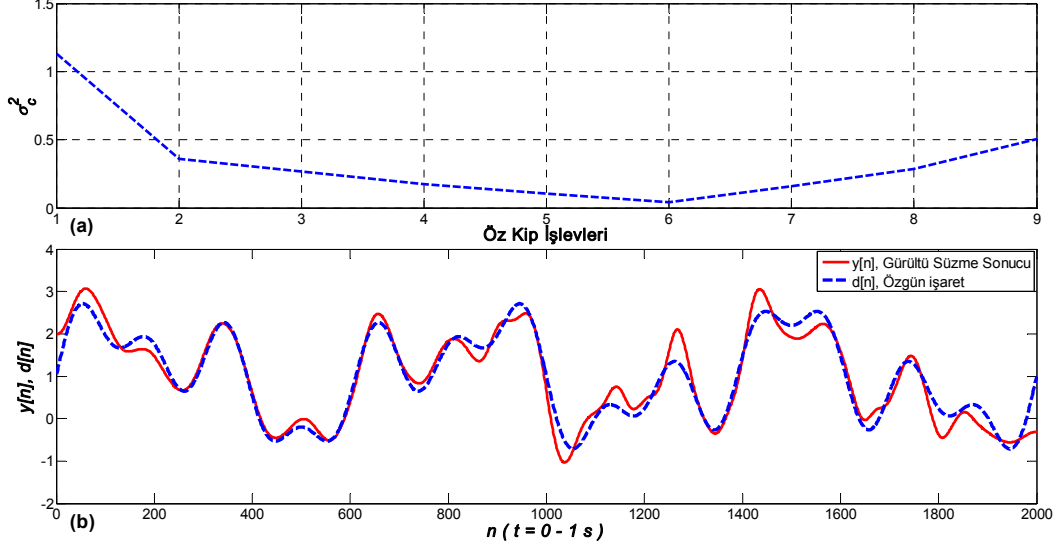
Şekil 3.7: a) İlk ÖKİ ile diğerleri arasındaki çapraz-ilişki değerleri, b) İlk ÖKİ ile diğerleri arasındaki çapraz-ilişki değerleri üzerinden gürültü süzme sonucu.

Gürültü enerjisinin en az olduğu son ÖKİ'nin ilki ile çapraz-ilişkisi, S kümesinin seçilmesinde eşik değeri oluşturacaktır. Eşik değerinin altında ilişki değerine sahip olan tüm ÖKİ'leri ile optimum S kümesine yaklaşılr. Bu sayede elde edilen gürültü süzme başarımı Şekil 3.7.b'de verilmiştir.

3.3.4 Varyans

Rasgele süreçlerde ikinci mertbe istatistiksel değerlerden biri olan varyans, ortalama değerden olan sapmanın bir ölçüsü olan standart sapmanın karesi olarak tanımlanır. İncelenen gözlem işaretine eklenen beyaz Gauss gürültüsü birim varyanslıdır. Bu sebeple ÖKİ'lerinin varyans değeri ile beyaz gürültünün etkisi kestirilebilir. Bu varsayımdan yola çıkarak Şekil 3.2'de gösterilen ÖKİ'lerinin Şekil

3.8.a ile elde edilen varyans değerleri (3.7) eşitliği ile hesaplanmıştır. Gözlenen varyans değerleri Bölüm 3.3.2’de verilen gürültü işaret ile ÖKİ’leri arasındaki çapraz-ilişki değerlerine benzerlik göstermektedir. Bu sebeple optimum S kümesini belirlemek amacıyla aynı eşik kestirim algoritması kullanılmış, yani ilk yerel minimum sınır kabul edilmiştir.



Şekil 3.8: a) ÖKİ’lerin varyans değerleri, b) ÖKİ’lerin varyans değerleri üzerinden gürültü süzme sonucu.

Varyans değerlerindeki azalışın durduğu 6. ÖKİ sonrası tüm ÖKİ’lerini kapsayan S kümesi, Bölüm 3.1’de elde edilen optimum S kümesine ulaşılmasını sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.8.b’de gösterilmektedir.

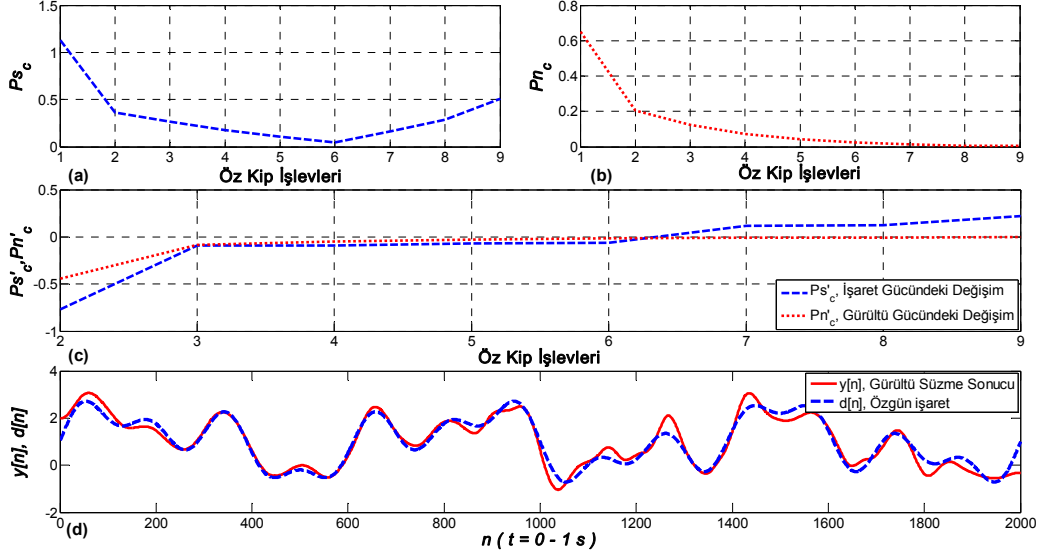
3.4 Gürültü Gücündeki Değişim

Tezde önerilen bir diğer yöntem, ÖKİ’lerinin güç değerlerinden faydalanmaktır [30]. Her bir ÖKİ’nin gücü (3.8) eşitliği ile hesaplanmaktadır ve hesaplanan değerler Şekil 3.9.a’da verilmektedir.

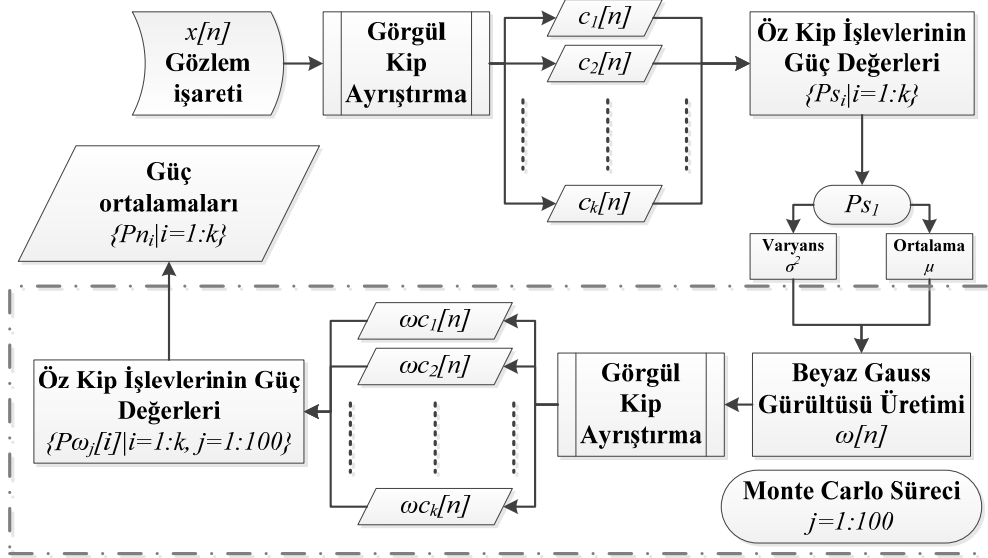
$$P_{c_j} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T |c_j[n]|^2 \quad (3.8)$$

Örnek gözlem verisinden elde edilen ilk ÖKİ’nin gürültü enerjisinin büyük bir kısmına sahip olduğu varsayımı ile diğer ÖKİ’lerinde bu enerjinin nasıl düşeceğini

kestirmek için Şekil 3.10’da ayrıntılı olarak verilen algoritma kullanılır. Bu algoritma ile ilk ÖKİ’nin varyans ve ortalama değeri hesaplanarak, aynı ortalama ve varyansa sahip 100 adet beyaz Gauss gürültüsü oluşturulur. Bunun sebebi Monte Carlo süreci yaklaşımıyla en genel ortalamaların elde edilmesidir.



Şekil 3.9: a) ÖKİ’lerin güçleri, b) ilk ÖKİ baz alınarak oluşturulan gürültünün ÖKİ’lerinin güçleri, c) Güç değerlerindeki değişimler, d) Gürültü gücü üzerinden gürültü süzme sonucu.



Şekil 3.10: Gürültü seviyelerini belirlenmesi ayrıntılı algoritması.

Şekil 3.10’daki algoritma ile oluşturulan 100 adet yapay gürültünün her biri ayrı ayrı GKA ile bileşenlerine ayrılır ve ilk k adet ÖKİ’lerinin (3.8) eşitliği ile güçleri

hesaplanarak ortalamaları alınır. Sonrasında her bir ÖKİ'nde gürültü enerjisinin düşüşü gözlenir. Elde edilen güç seviyeleri Şekil 3.9.b'de verilmektedir.

Monte Carlo ortalamaları ile elde edilen genel gürültü gücü azalışını gözlemlemek için türevden faydalanılır. Benzer biçimde gözlem vektörünün GKA sonucunda elde edilen k adet ÖKİ'nin güç seviyelerinin türevi de alınarak değişim değerleri, gürültü güçlerinin değişimleri ile karşılaştırılır (bkz. Şekil 3.9.c). Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde 7. ÖKİ ve sonrasındaki işaret gücü değişimlerinin, gürültü gücündeki değişimlerden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple optimum S kümesi seçimindeki eşik değeri, işaret gücü değişiminin, gürültü gücü değişiminin üstüne çıktığı ilk ÖKİ olarak kabul edilir. Bu yaklaşımla optimum S kümesine ulaşılmıştır. Elde edilen gürültü süzme sonuçları Şekil 3.9.d'de verilmektedir.

Gürültü gücüne dayalı olarak önerilen gürültü süzme algoritmasının başarımı, özgün işareti bozan gürültünün istatistiklerinin elde edilmesiyle doğru orantılıdır. İstatistiklere bağlı Monte Carlo süreci, gürültü süzmedeki iterasyon sayısını ve harcanan süreyi epeyce arttırmaktadır. Fakat aynı kanaldan geçen veya aynı algılayıcılardan örneklenen işaretlere etki eden gürültünün istatistiklerinin aynı olacağı varsayımı ile Monte Carlo süreci tek bir sefer uygulanarak birden fazla işaretle seri biçimde gürültü süzme işlemi yapılabilir. Bu yöntemin bir diğer üstünlüğü ise, varyans ve diğer (özgün işaretle ilişkinin kullanıldığı yöntem dışındaki) istatistiksel yöntemler gibi, özgün işarete ihtiyaç duymaksızın başarılı sonuçlar elde edebilmesidir.

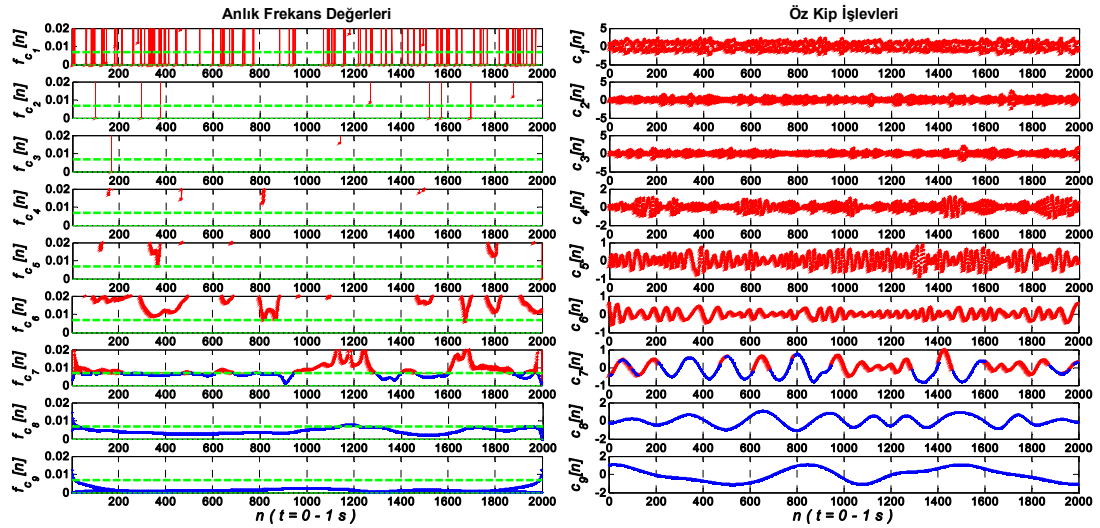
3.5 Frekans Önkoşulu

Bilindiği gibi HHD ile gözlem işaretinin anlık frekans bilgisi elde edilmektedir. Örnek gözlem işaretinin ÖKİ'lerine ait anlık frekans değerleri Şekil 3.2'de verilmektedir.

Özel durumlarda fiziksel işaretlerin frekans bilgileri mevcuttur. Örneğin EKG işaretleri yaşa göre değişiklik gösterse de 60 Hz ile 140 Hz aralığında değişim gösterir. Gürültülü EKG işaretlerinin süzülmesinde frekans ön koşulu kullanılabilir. Bununla birlikte gürültülü şebeke gözlemlerinin özgün işaretleri de 50-60 Hz sınıflarında

değerlendirilir [33]. Benzer biçimde motor sürücülerinin, termal görüntülerin, otomotiv sektörlerinde gözlemlenen işaretlerin, hareketli düzeneklerin ve bazı biyolojik moleküler aktivitelerin özgün işaretlerine dair çalışma frekansları bilinmektedir. Bu çalışmalarda GKA sonucu gürültü süzme çalışmaları frekans ön koşulu ile rahatlıkla gerçekleştirilebilir.

Eşitlik (3.1) ile verilen örnek işarete özgün işaret bileşenlerinin frekans değerleri 13 Hz ile 0 Hz (DC bileşen) arasında değişmektedir. Örnekleme frekansı 2 kHz olduğu için, normalize frekans üst limiti $FuL = 0.0065$, alt limiti $FaL = 0$ olmaktadır. İncelenen örnek işaret üzerinden frekans ön koşulu kullanarak ÖKİ'lerinin sınırlandırılması ile ilgili sonuçlar Şekil 3.11'de verilmiştir. Burada tüm ÖKİ'leri (3.9) eşitliği ile eşiklenmektedir.

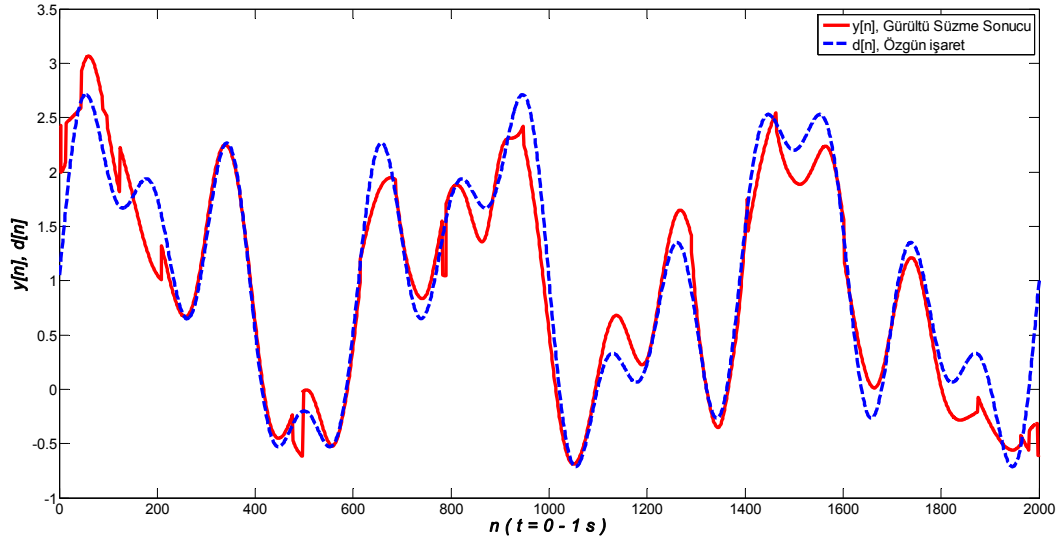


Şekil 3.11: Frekans Ön Koşulu ile ÖKİ'lerin sınırlandırılması.

Şekil 3.11'de anlık frekans değerleri, belirlenen frekans sınır değerleri arasındaki bölgede kalan ÖKİ'leri ve n indeksleri mavi ile temsil edilirken; frekans ön koşulunu sağlamayan değerler kırmızı ile gösterilmiştir.

$$\hat{c}_i[n] = \begin{cases} c_i[n] , & FaL \leq f_{c_i}[n] \leq FuL \\ 0 , & \text{diğer} \end{cases}, \{i = 1:k\} \quad (3.9)$$

ÖKİ'lerinin eşiklenmesinden sonra (2.1) eşitliği uygulanarak elde edilen gürültü süzme sonuçları Şekil 3.12'de verilmektedir. Sonuçlar, ikincil bir alçak geçiren süzgecin kullanımına ihtiyaç duymaktadır.



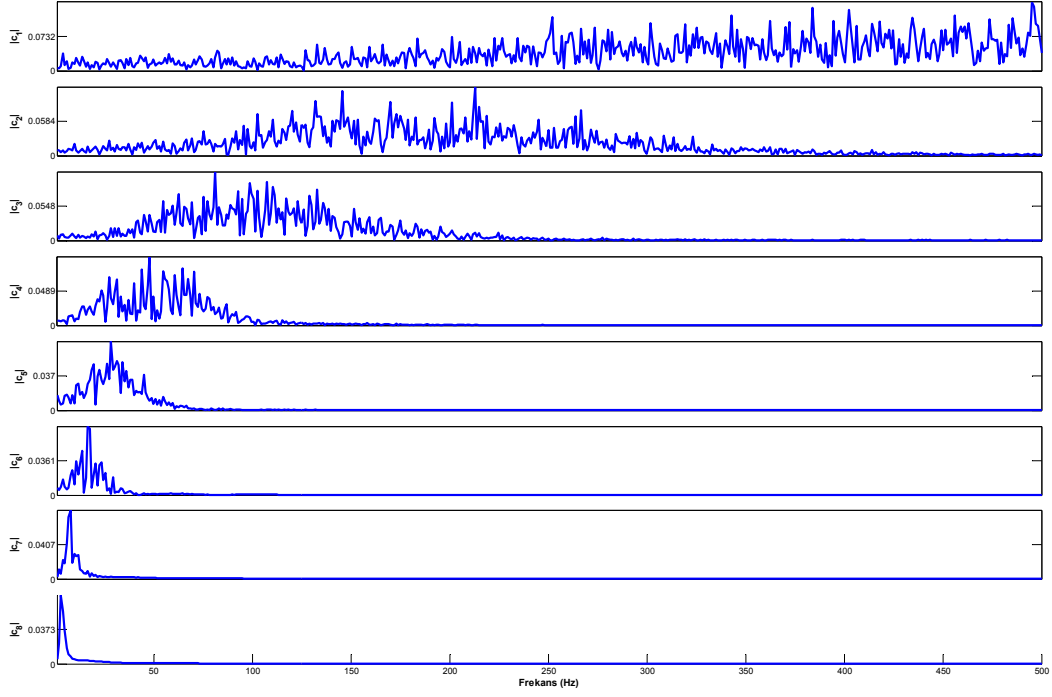
Şekil 3.12: Frekans ön koşulu ile gürültü süzme sonucu.

Optimum S kümesi ile elde edilen sonuçların $RMSE$ değeri 0.2723 iken, frekans ön koşulu ile elde edilen sonuçların $RMSE$ değeri 0.2882 olarak hesaplanmıştır.

3.6 Örnekleme Frekansının Etkisi

GKA yöntemi ile incelenen işaret, yüksek frekanslı bileşenlerinden alçak frekanslı bileşenlerine doğru sonlu sayıda ÖKİ'ye ayrılmaktadır. Genel olarak ÖKİ'lerin etkin olduğu frekans bantlarının incelenmesi için, tüm frekansları ihtiva eden beyaz Gauss gürültüsüne GKA uygulanarak elde edilen bileşenlerin Fourier dönüşümü (FD) ile bant genişlikleri bulunabilir [23-27]. Örnekleme frekansı 1KHz olan beyaz Gauss gürültüsünün bu yöntemle elde edilen ÖKİ'lerinin etkin frekans bölgeleri Şekil 3.13'de verilmektedir.

Şekil 3.13'in incelenmesiyle ÖKİ'lerinin frekans bantlarının doğrusal olarak dağılmadığı gözlenmektedir. İlk ÖKİ yüksek geçiren süzgeç, son ÖKİ alçak geçiren süzgeç, aradaki tüm ÖKİ'ler ise bant geçiren süzgeç karakteristiği göstermektedir. Bununla birlikte ilk iki ÖKİ'nin tüm frekans bölgelerinde az ya da çok etkin olurken, diğer ÖKİ'ler sınırlı ve azalan bant genişliklerine sahiptir.

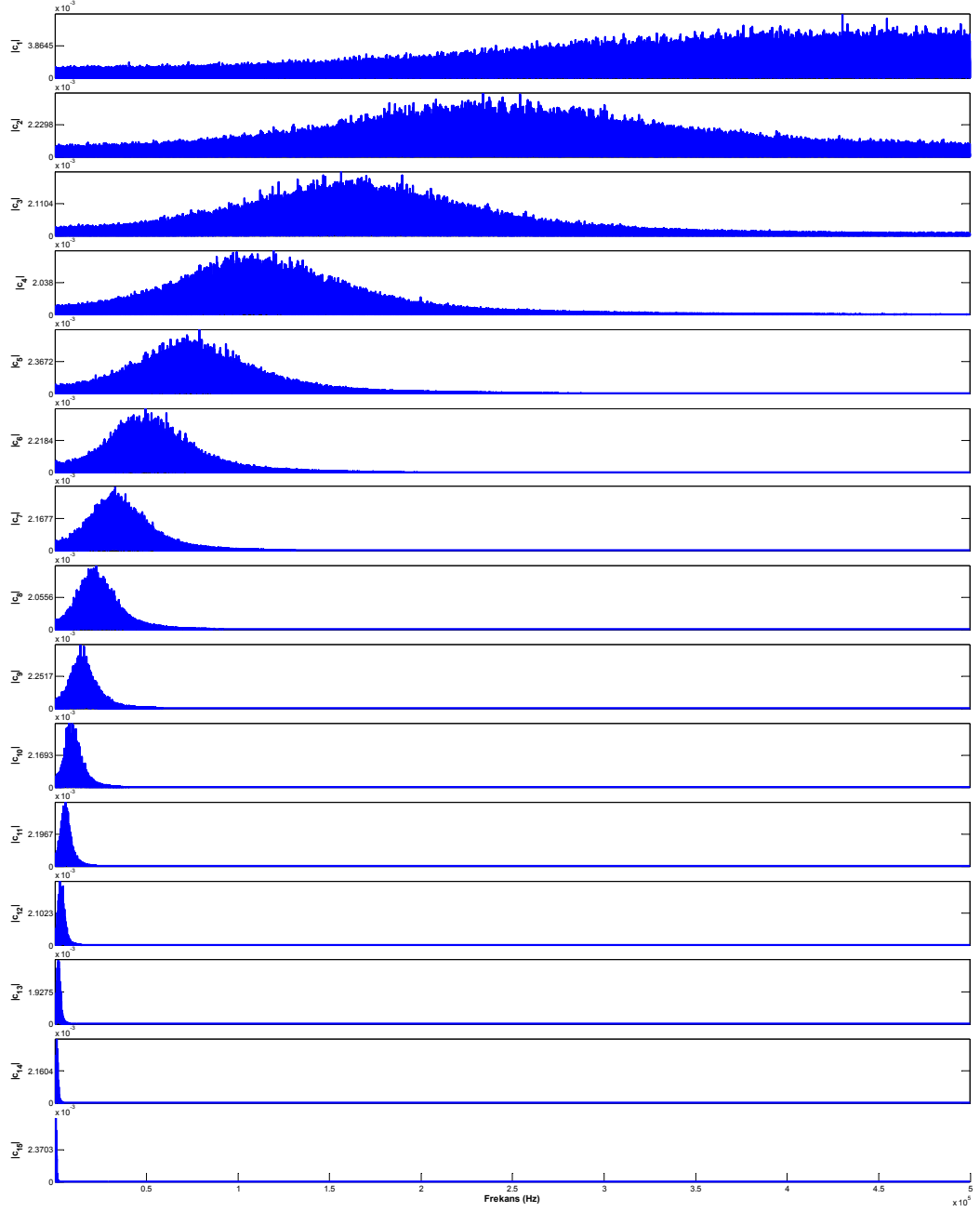


Şekil 3.13: Örnekleme frekansı 1 KHz olan işaretin ÖKİ'lerinin etkin frekans bantları.

Çözünürlüğün etkisini incelemek için aynı yöntem örnekleme frekansı 1MHz olan beyaz Gauss gürültüsüne uygulanmıştır ve sonuçlar Şekil 3.14'dedir. Şekilde görüleceği gibi örnekleme frekansı arttıkça ÖKİ sayısı ve frekans çözünürlüğü artmaktadır. Yani alçak geçiren ve band geçiren karakteristiğe sahip ÖKİ'lerinin etkin olduğu frekans bölgesi genişlemekte ve o bölgedeki süzülme başarımları artmaktadır. Ek olarak çözünürlüğün artmasının GKA'nın başarımlarını arttıracacağı da bilinmektedir [1-3,10-21,23-27].

GKA alçak frekanslı bilgi işaretlerinin yüksek frekanslı gürültünün süzülmesi durumlarında maksimum başarıya ulaşmaktadır. Yüksek frekanslı bilgi işaretlerinde ise çok daha yüksek frekanslı bir örnekleme sağlanırsa, bilgi işaretinin bant genişliği, alçak geçiren ve bant geçiren karakteristiğe sahip ÖKİ'lerinin etkin olduğu frekans bölgelerine kaydırılabilir. Bu sayede önerilen gürültü süzme yöntemlerinin başarımları artacaktır.

Aksi bir durum olarak, alçak frekanslı bilgi işarete eklenen yüksek frekanslı gürültünün örnekleme hızı düşerse, bant genişliği, tüm frekans bölgelerinde etkin olan ÖKİ'lerine kayar ve gürültü süzme başarımları minimum'a düşer.



Şekil 3.14: Örnekleme frekansı 1 MHz olan işaretin ÖKİ'lerinin etkin frekans bantları.

Eşitlik (3.1) ile verilen örnek gözlem işaretinin farklı örnekleme frekanslarında GKA ile olası tüm ÖKİ kombinasyonları yöntemi kullanılarak elde edilen gürültü süzme başarımları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Örnekleme frekansının gürültü süzme etkisi.

| Örnekleme Frekansı (Hz) | 100 | 500 | 1000 | 5000 | 10000 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Başarım (RMSE) | 0.78060 | 0.42981 | 0.42010 | 0.18197 | 0.12146 |
| Süre (s) | 0.01446 | 0.02429 | 0.05490 | 0.67693 | 0.93451 |

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bölüm 3’de (3.1) eşitliği ile tanımlanan işaret için, önerilen yöntemlerin başarımları ’de verilmektedir.

Tablo 4.1: Düşük frekanslı örnek işaretteki Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları.

| | SNR = -5dB | | SNR = 0dB | | SNR = 5dB | |
|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 0.42295 | 0.31041 | 0.27232 | 0.06969 | 0.14935 | 0.16247 |
| Klasik Eleme Yöntemi | 0.50913 | 0.00010 | 0.27232 | 0.00004 | 0.14935 | 0.00008 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 0.42295 | 0.14474 | 0.27232 | 0.02479 | 0.16058 | 0.05182 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 0.42295 | 0.00544 | 0.27232 | 0.00247 | 0.14935 | 0.00958 |
| İlk ÖKI ile İlişki | 0.74385 | 0.00442 | 0.27232 | 0.00185 | 0.43996 | 0.00386 |
| Varyans | 0.42295 | 0.01248 | 0.27232 | 0.00566 | 0.14935 | 0.00471 |
| Gürültü Gücü | 0.71172 | 0.00577 | 0.27232 | 0.00272 | 0.14935 | 0.01024 |
| Frekans Ön Koşulu | 0.43277 | 0.04136 | 0.28821 | 0.00926 | 0.16058 | 0.01504 |

Tablo 4.1’den gözlemleneceği gibi alçak frekanslı bileşenlere sahip özgün işarete eklenen beyaz Gauss gürültüsünün SNR değeri düştükçe, yani gürültü gücü arttıkça, gürültü süzme başarımları da düşmektedir. Varyans değerleri ile optimum S kümesi yaklaşımı ise her durumda olası tüm kombinasyonlarla aynı sonuca ulaşmıştır. En iyi işlem süreleri kıyaslandığında ise klasik eleme yönteminin en hızlı sonuç verdiği görülmektedir.

Eşitlik (3.2) ile tanımlanan özgün işarete beyaz Gauss gürültüsü yerine alçak frekanslı ve yüksek frekanslı olarak üretilen gürültülerin ayrı ayrı eklenmesi sonrasında önerilen yöntemler kullanılarak ulaşılan gürültü süzme başarımları Tablo 4.2’de listelenmiştir. (Alçak ve yüksek frekanslı gürültüler, beyaz Gauss gürültüsünün sırasıyla alçak ve yüksek frekanslı gürültülerden geçirilmesi sonucu üretilmiştir.)

Tablo 4.2: Düşük frekanslı örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları.

| | Alçak Frekanslı Gürültü | | Yüksek Frekanslı Gürültü | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 0.39220 | 0.06109 | 0.01692 | 0.09232 |
| Klasik Eleme Yöntemi | 0.43151 | 0.00008 | 0.01692 | 0.00008 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 0.49107 | 0.05579 | 0.17554 | 0.04572 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 0.41162 | 0.00410 | 0.01692 | 0.00444 |
| İlk ÖKİ ile İlişki | 0.89906 | 0.00292 | 0.65280 | 0.00340 |
| Varyans | 0.41162 | 0.00465 | 0.01692 | 0.00875 |
| Gürültü Gücü | 0.43151 | 0.00497 | 0.02606 | 0.00442 |
| Frekans Ön Koşulu | 0.42493 | 0.01243 | 0.17554 | 0.01308 |

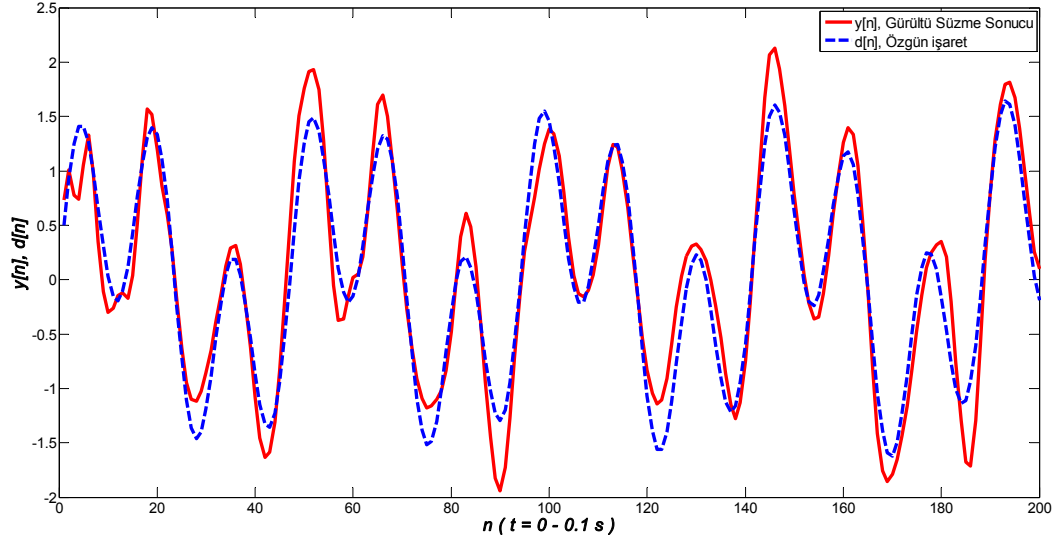
Tablo 4.2 incelendiğinde alçak frekanslı özgün işarete yüksek frekanslı gürültü eklendiğinde GKA temelli gürültü süzme yöntemlerinin oldukça başarılı olduğu gözlenmektedir. Bundan dolayıdır ki GKA, demodülasyon amacı için rahatlıkla kullanılabilir.

Eşitlik (4.1) ile verilen yüksek frekanslı işarete sıfır ortalamalı birim varyanslı beyaz Gauss gürültüsünün eklenmesi sonrasında üretilen gözlem işareti ve bu gözlem işaretinin GKA sonucu ÖKİ'lerinin tüm olası kombinasyonlarının denenmesi sonucunda ulaşılan gürültü süzme başarımları Şekil 4.1'de verilmektedir.

$$x[n] = d[n] + \omega[n]$$

$$d[n] = \left(\sin \left(2\pi \cdot 127 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) + \left(0.8 \cdot \sin \left(2\pi \cdot 43 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) \quad (4.1)$$

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere tezde önerilen HHD temelli gürültü süzme yöntemleri yüksek frekanslı işaretlerde de kullanılabilir. Fakat sonuçları alçak frekanslı işaretlerdeki kadar iyi olmamakla birlikte, kesin değerleri Tablo 4.3'de verilmektedir.



Şekil 4.1: Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu.

Tablo 4.3’de görüldüğü üzere yüksek frekanslı işaretlerdeki gürültü süzme başarımı düşük frekanslı işaretlere göre oldukça düşüktür. Fakat varyans değerlerini ve gözlem işareti ile çapraz-ilişki değerlerini kullanan yöntemler düşük frekanslı işaretlerdeki gibi optimum S kümesine yaklaşmaktadır.

Tablo 4.3: Yüksek frekanslı örnek işaretteki Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları.

| | SNR = -5dB | | SNR = 0dB | | SNR = 5dB | |
|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 0.72818 | 0.32970 | 0.46686 | 0.07207 | 0.27997 | 0.17214 |
| Klasik Eleme Yöntemi | 1.15458 | 0.00013 | 0.62627 | 0.00007 | 0.36097 | 0.00009 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 0.87832 | 0.06018 | 0.51012 | 0.02475 | 0.31773 | 0.05756 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 0.74792 | 0.00529 | 0.46747 | 0.00241 | 0.28083 | 0.00498 |
| İlk ÖKI ile İlişki | 0.78934 | 0.00434 | 0.91286 | 0.00188 | 0.36097 | 0.00447 |
| Varyans | 0.74792 | 0.00457 | 0.46747 | 0.00235 | 0.28083 | 0.00440 |
| Gürültü Gücü | 0.90965 | 0.00471 | 0.77971 | 0.00270 | 0.90628 | 0.00594 |
| Frekans Ön Koşulu | 0.74102 | 0.01567 | 0.54420 | 0.00805 | 0.51186 | 0.01509 |

Yüksek frekanslı özgün işarete alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin eklenmesi ile elde edilen gürültü süzme sonuçları ise Tablo 4.4’de verilmektedir.

Tablo 4.4: Yüksek frekanslı örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları.

| | Alçak Frekanslı Gürültü | | Yüksek Frekanslı Gürültü | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 0.46461 | 0.04255 | 0.02159 | 0.04379 |
| Klasik Eleme Metodu | 0.84688 | 0.00009 | 0.02159 | 0.00009 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 0.46461 | 0.04768 | 0.10570 | 0.05147 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 0.91167 | 0.00415 | 0.90491 | 0.00365 |
| İlk ÖKİ ile İlişki | 0.91846 | 0.00246 | 0.02159 | 0.00274 |
| Varyans | 0.91167 | 0.00841 | 0.90491 | 0.00895 |
| Gürültü Gücü | 0.91167 | 0.00890 | 0.90402 | 0.00691 |
| Frekans Ön Koşulu | 0.49912 | 0.01082 | 0.10570 | 0.01074 |

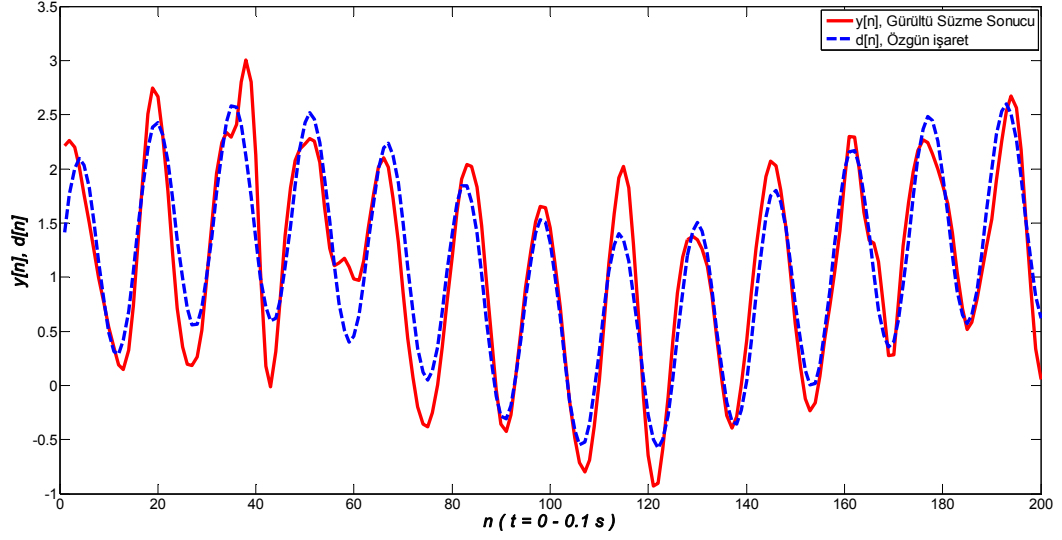
Tablo 4.4'den görüleceği üzere tezde önerilen yöntemler, gürültünün bilgi işaretinden yüksek frekanslı olacağı varsayımında düzgün sonuçlar üretmektedir. Bu sebeple bilgi işaretinin gürültüden çok daha hızlı değişim göstermesi durumunda yalnızca frekans önkoşullu yöntem özgün işarete gerek duymaksızın düzgün sonuçlar üretebilmektedir. Gürültünün de yüksek frekanslı olduğu durumlarda ise en hızlı yöntem olan klasik eleme yöntemi optimum S kümesine ulaşabilmektedir.

Önerilen yöntemlerin hem alçak hem de yüksek frekanslı bileşenlere sahip özgün işaret üzerine eklenen beyaz Gauss gürültüsünü süzme başarımlarını test etmek için ise (4.2) eşitliği ile verilen gözlem işareti kullanılmıştır.

$$x[n] = d[n] + \omega[n]$$

$$d[n] = \left(\sin \left(2\pi \cdot 127 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) + \left(0.6 \cdot \sin \left(2\pi \cdot 13 \left(\frac{n}{T} \right) \right) \right) + 1 \quad (4.2)$$

Olası tüm ÖKİ kombinasyonları ile elde edilen optimum gürültü süzme sonuçları Şekil 4.2 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu.

Tablo 4.5’de, önerilen HHD temelli gürültü süzme yöntemlerinin (4.2) eşitliği ile verilen gözlem işaretine uygulanması durumunda ulaşılan gürültü süzme başarımları verilmektedir. Düşük güçteki gürültülerde bir çok yöntem optimum sonuçları üretirken, yüksek güçteki gürültülerden yalnızca ilk ÖKİ ile diğerlerinin çapraz-ilişkilerinden faydalanan yöntem optimum S kümesini elde edebilmektedir.

Tablo 4.5: Hem yüksek hemde alçak frekanslı örnek işaretteki Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları.

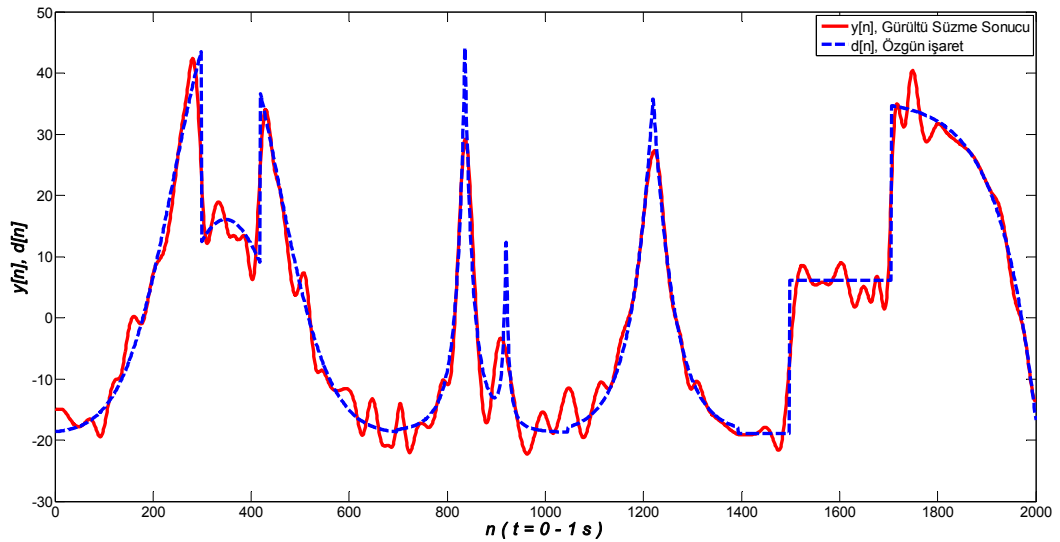
| | SNR = -5dB | | SNR = 0dB | | SNR = 5dB | |
|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 0.76587 | 0.31908 | 0.62608 | 0.30352 | 0.37579 | 0.14217 |
| Klasik Eleme Yöntemi | 1.30948 | 0.00012 | 0.68352 | 0.00009 | 0.38178 | 0.00011 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 0.87466 | 0.05489 | 0.63249 | 0.05172 | 0.38754 | 0.04786 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 1.03882 | 0.00566 | 0.69094 | 0.00585 | 0.38178 | 0.00487 |
| İlk ÖKİ ile İlişki | 0.83728 | 0.00413 | 0.63127 | 0.00408 | 0.63094 | 0.00377 |
| Varyans | 1.03882 | 0.00458 | 0.68352 | 0.00453 | 0.38178 | 0.00447 |
| Gürültü Gücü | 1.22219 | 0.00558 | 0.72070 | 0.01007 | 0.82451 | 0.00541 |
| Frekans Ön Koşulu | 0.98866 | 0.01987 | 0.69094 | 0.01892 | 0.38608 | 0.01819 |

Karma frekanslı işaretlerde Tablo 4.6’dan görüleceği gibi frekans ön koşullu yöntem gürültü süzme başarımı açısından diğer yöntemlere göre öne çıkmaktadır.

Tablo 4.6: Hem yüksek hemde alçak frekanslı örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları.

| | Alçak Frekanslı Gürültü | | Yüksek Frekanslı Gürültü | |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 0.34574 | 0.05803 | 0.03256 | 0.06410 |
| Klasik Eleme Metodu | 0.82330 | 0.00021 | 0.70316 | 0.00008 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 0.38840 | 0.04850 | 0.33011 | 0.04883 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 0.75696 | 0.00385 | 0.73428 | 0.00410 |
| İlk ÖKİ ile İlişki | 0.83591 | 0.00330 | 0.10363 | 0.00302 |
| Varyans | 0.75696 | 0.00474 | 0.73428 | 0.00451 |
| Gürültü Gücü | 0.82921 | 0.00633 | 0.80710 | 0.00906 |
| Frekans Ön Koşulu | 0.69224 | 0.01455 | 0.03256 | 0.01581 |

Son olarak, sadece ve sadece HHD ile analiz edilebilen durağan ve doğrusal olmayan parçalı-süreklî bir işaret için, önerilen yöntemlerin başarımları değerlendirilmektedir. Örnek işaret ve olası tüm ÖKİ kombinasyonları ile elde edilen gürültü süzme sonuçları Şekil 4.3’de verilmektedir. İncelenen işaretin tepeden tepeye genlik değeri 60 olduğu için çıkan hata değerlerinin diğer örneklere nazaran epey büyük olacağı beklenmektedir.



Şekil 4.3: Olası tüm kombinasyonların optimum gürültü süzme sonucu.

Şekil 4.3 ile verilen örnek işaret üzerine önerilen yöntemler çerçevesinde HHD uygulanması sonrasında ulaşılan gürültü süzme başarımları Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de listelenmiştir. Tablo 4.7’deki sonuçlara göre, durağan ve doğrusal olmayan

süreçlerdeki beyaz Gauss gürültüsünün süzülmesinde gözlem işareti ile ÖKİ'leri arasındaki çapraz-ilişkilere ve varyans değerlerine dayalı gürültü süzme yöntemlerinin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir.

Tablo 4.7: Durağan ve doğrusal olmayan örnek işarete Beyaz Gauss gürültüsünün süzülme başarımları.

| | SNR = -5dB | | SNR = 0dB | | SNR = 5dB | |
|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 6.35904 | 1.05508 | 4.11472 | 1.03995 | 3.05349 | 0.53242 |
| Klasik Eleme Yöntemi | 19.38481 | 0.00010 | 10.82397 | 0.00009 | 5.64281 | 0.00007 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 6.35904 | 0.03001 | 4.37170 | 0.03356 | 5.69285 | 0.02733 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 6.35904 | 0.00393 | 4.37170 | 0.00356 | 3.87467 | 0.00319 |
| İlk ÖKİ ile İlişki | 19.62586 | 0.00286 | 12.13121 | 0.00280 | 13.72952 | 0.00253 |
| Varyans | 6.35904 | 0.00328 | 4.11472 | 0.00263 | 3.05349 | 0.00258 |
| Gürültü Gücü | 6.35904 | 0.00926 | 4.11472 | 0.01295 | 3.87467 | 0.00401 |
| Frekans Ön Koşulu | 11.52354 | 0.01353 | 6.04069 | 0.01472 | 3.87467 | 0.01733 |

Tablo 4.8’de ise durağan ve doğrusal olmayan örnek işaretin yüksek ve alçak frekanslı gürültülere maruz bırakılması durumunda HHD temelli gürültü süzme yöntemlerinin başarımları verilmektedir. Gürültünün yüksek frekanslı olduğu çalışmalarda oldukça iyi sonuçlar alındığı gözlenmektedir. Alçak frekanslı gürültü ekleme durumunda, gürültü gücü kullanılarak sağlanan gürültü süzme yönteminin, beyaz Gauss gürültüsündeki kadar başarılı sonuçlar üretmediği, fakat yüksek frekanslı gürültülerde aynı başarıyı yakaladığı görülmektedir.

Tablo 4.1-Tablo 4.8’deki sonuçlar incelendiğinde, HHD temelli gürültü süzme yöntemlerinin neredeyse tüm işaret tiplerinde gürültünün önemli bir kısmını süzmeyi başarabildiği gözlemlenmektedir. Bu yöntemler özgün işaretin elimizde var olduğu veya olmadığı tüm durumlarda, çalışılan işaretin durağan veya doğrusal olup olmadığına bakılmaksızın süzme işlemini başarıyla yerine getirebilmektedir. Bu gözlemler ışığında, önerilen yöntemlerin gürültü süzme amaçlı tüm çalışmalarda birincil basamak olarak kullanılabilmesi rahatlıkla söylenebilir.

Tablo 4.8: Durağan ve doğrusal olmayan örnek işaret üzerine eklenen alçak ve yüksek frekanslı gürültülerin süzülme başarımları.

| | Alçak Frekanslı Gürültü | | Yüksek Frekanslı Gürültü | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) | Başarım (RMSE) | Harcanan Süre (s) |
| Olası Tüm Kombinasyonlar | 5.52830 | 0.07568 | 0.87404 | 2.10069 |
| Klasik Eleme Metodu | 5.99857 | 0.00007 | 0.96990 | 0.00008 |
| Özgün İşaret ile İlişki | 5.91899 | 0.02863 | 3.20781 | 0.03006 |
| Gözlem İşareti ile İlişki | 5.86270 | 0.00289 | 0.88400 | 0.00387 |
| İlk ÖKİ ile İlişki | 5.91899 | 0.00217 | 1.96282 | 0.00293 |
| Varyans | 5.86270 | 0.00311 | 1.03036 | 0.00326 |
| Gürültü Gücü | 11.53629 | 0.00368 | 0.96990 | 0.00383 |
| Frekans Ön Koşulu | 8.65756 | 0.01119 | 1.16249 | 0.01445 |

Gürültüye karşı toleransın çok düşük olduğu yöntemlerde ise tezde verilen algoritmalar iki farklı yaklaşımla kullanılabilirler.

- İlk yaklaşım her bir ÖKİ'ne ikincil bir süzgeç uygulanması durumudur. Genellikle dalgacık dönüşümü temelli eşik algoritmaları kullanılarak ÖKİ tamamen veya kısmen kaldırılabilen ve gürültü etkisi çok ciddi şekilde azaltılmaktadır. Bununla birlikte, Savitzky – Golay gibi uyarlamalı filtre tipleri veya destek vektör makinaları gibi uyarlamalı makine öğrenmesine dayalı sınıflandırma veya eğri uydurma algoritmaları da ÖKİ'lerine uygulanmaktadır [31-33,35,38-41,43-46].
- İkinci yaklaşım ise, HHD temelli gürültü süzme algoritmaları sonucunda geri çatılan işarete bir bütün halinde ikincil bir süzgeç uygulanmasıdır. İlk yaklaşımda kullanılan süzgeçler ve makine öğrenmesi yöntemleri bu yaklaşımda da kullanılabilir. Bununla birlikte Kalman gibi karmaşık yapıya sahip uyarlamalı süzgeç tipleri de bu yaklaşımlarda süzme başarımını en üst düzeye çıkarmak amacıyla kullanılmaktadır [3,29].

Bahsedilen yaklaşımlarda mükemmel yakın sonuçlara ulaşıldığı bilinmektedir ve HHD temelli gürültü süzme yöntemlerinin kullanımı artan bir ivmeyle devam etmektedir.

HHD halen tamamlanmış bir kapalı forma sahip olmadığı ve geliştirilmeye devam ettiği için, yöntemin her gelişim adımında, tezde önerilen gürültü süzme yapılarının başarımları da iyileşecektir. Bu sebeple HHD temelli gürültü süzme algoritmaları, çok daha iyi gürültü süzme sonuçları elde eden fakat evrimini tamamlamış süzgeçlerden bir adım öndedir. HHD temel felsefesini tamamlayarak, gözlem işaretini anlık frekansı tam olarak kestirilebilen tüm bileşenlerine keskin bir sınırla ayırmayı başardığında, ikincil bir süzgece gerek olmaksızın tüm gürültü bileşenlerini kestirerek, gözlem işaretinden tamamen atabilecek ve optimum süzgeç olarak tanımlanan Wiener sonuçlarına, özgün işaret bilinmeksizin ulaşabilecektir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., ve Liu, H. H., “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, (Volume 454, Issue 1971), 903 – 995, (1998).
- [2] Huang N.E. ve Shen S. S. P., The Hilbert-Huang Transform and Its Applications Interdisciplinary Mathematical Sciences-Vol.5, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., (2005).
- [3] Elbi, M.D. ve Kizilkaya, A., “Noise cancellation on low-frequency signals using Empirical Mode Decomposition”, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mugla, (2012).
- [4] Weyl, H., “David Hilbert. 1862-1943”, Obituary Notices of Fellows of the Royal Society, (Volume 4, Issue 13), 547 – 553, (1944).
- [5] Cohen, L., Time – Frequency Analysis-Vol. 778, New Jersey: Prentice Hall PTR., (1995).
- [6] Huang, N. E. ve Attoh-Okine, N. O. The Hilbert-Huang transform in engineering, CRC Press, (2010).
- [7] Blakely, Christopher D., "A fast empirical mode decomposition technique for nonstationary nonlinear time series", Preprint submitted to Elsevier Science 3, (2005).
- [8] Rilling, G., Flandrin, P. and Gonçalves, P., “On empirical mode decomposition and its algorithms”, In IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP, (Volume 3), 8 – 11, (2003).

- [9] Wu, Z. ve Huang, N. E., “Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, (Volume 1, Issue 1), 1 – 41, (2009).
- [10] Wu, Z., Huang, N. E. ve Chen, X., “The multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition method”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, (Volume 1, Issue 3), 339 – 372, (2009).
- [11] Huang, N. E., Wu, M. L. C., Long, S. R., Shen, S. S., Qu, W., Gloersen, P., ve Fan, K. L., “A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, (Volume 459, Issue 2037), 2317 – 2345, (2003).
- [12] Tanaka, T., ve Mandic, D. P., “Complex empirical mode decomposition”, *Signal Processing Letters, IEEE*, (Volume 14, Issue 2), 101 – 104, (2007).
- [13] Rilling, G. and Flandrin, P., “One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers”, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, (Volume 56, Issue 1), 85 – 95, (2008).
- [14] Rilling, G., Flandrin, P., Gonalves, P. ve Lilly, J. M., “Bivariate empirical mode decomposition”, *Signal Processing Letters, IEEE*, (Volume 14, Issue 12), 936 – 939, (2007)
- [15] Yang, Z. ve Yang, L., “An Improved Empirical Mode Decomposition”, In *Image and Signal Processing, 2009. CISP'09. 2nd International Congress on*, 1 – 5, (2009).
- [16] Huang, N. E., ve Wu, Z., “A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies”, *Reviews of Geophysics*, (Volume 46, Issue 2), RG2006, (2008).
- [17] Ni, S. H., Xie, W. C. ve Pandey, M., “Application of Hilbert-Huang Transform in Generating Spectrum-Compatible Earthquake Time Histories”, *ISRN Signal Processing*, (2011).

- [18] Isabekov, A., Baykut, S. ve Akgul, T., “Underwater ambient noise analysis using Empirical Mode Decomposition method”, In Signal Processing and Communications Applications Conference, 2009. SIU 2009. 640 – 643, (2009).
- [19] Hassan, M., Boudaoud, S., Terrien, J., Karlsson, B. ve Marque, C., “Combination of canonical correlation analysis and empirical mode decomposition applied to denoising the labor electrohysterogram”, Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, (Volume 58, Issue 9), 2441 – 2447, (2011).
- [20] Huang, N. E., Wu, M. L., Qu, W., Long, S. R. ve Shen, S. S., “Applications of Hilbert–Huang transform to non-stationary financial time series analysis”, Applied Stochastic Models in Business and Industry, (Volume 19, Issue 3), 245 – 268, (2003).
- [21] Loutridis, S. J., “Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition”, Engineering Structures, (Volume 26, Issue 12), 1833 – 1841, (2004).
- [22] Jun, C. ve Xingsong, W., “Decomposition of mechanical signals”, In Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE, 2020 – 2025, (2009).
- [23] Onal, Y., Ece, D. G. Ve Gerek, O. N., “Analysis of voltage flicker using Hilbert-Huang Transform”, In Signal Processing and Communications Applications (SIU), 2011 IEEE 19th Conference on, 226 – 229, (2011).
- [24] Wu, Z. ve Huang, N. E., “A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, (Volume 460, Issue 2046), 1597 – 1611, (2004).
- [25] Flandrin, P., Rilling, G. ve Goncalves, P., “Empirical mode decomposition as a filter bank”, Signal Processing Letters IEEE, (Volume 11, Issue 2), 112 – 114, (2004).

- [26] Schlotthauer, G., Torres, M. E., Ruffner, H. L. and Flandrin, P., “EMD of gaussian white noise: effects of signal length and sifting number on the statistical properties of intrinsic mode functions”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, (Volume 1, Issue 04), 517 – 527, (2009).
- [27] Kaslovsky, D. N. ve Meyer, F. G., “Noise corruption of empirical mode decomposition and its effect on instantaneous frequency”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, (Volume 2, Issue 3), 373 – 396, (2010).
- [28] Peng, Z. K., Tse, P. W. ve Chu, F. L., “A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: application to fault diagnosis for rolling bearing”, *Mechanical systems and signal processing*, (Volume 19, Issue 5), 974 – 988, (2005).
- [29] Flandrin, P., Gonçalves, P. and Rilling, G., “Detrending and denoising with empirical mode decompositions”, *Proceedings of the 12th European Signal Processing Conference (EUSIPCO’04)*, (Volume 2), 1581 – 1584, (2004).
- [30] Qiu, G., Liu, J., Ling, T. ve Zheng, H., “A new adaptive denoising method based on empirical mode decomposition in ultrasonic elastography”, In *Multimedia Technology (ICMT), 2011 International Conference on*, 68 – 72, (2011).
- [31] Anbing, Z., Xinxia, L. ve Xipan, L., “The Denoising Based on the Fusion Method of Kalman Filter and EMD”, In *Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on*, 1 – 4, (2009).
- [32] Zhang, Y., Ma, X., Hua, D., Cui, Y. ve Sui, L., “An EMD-based denoising method for lidar signal”, In *Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on*, (Volume 8), 4016 – 4019, (2010).
- [33] Chacko, A. and Ari, S., “Denoising of ECG signals using Empirical Mode Decomposition based technique”, *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on, Nagapattinam, Tamil Nadu*, 6 – 9, (2012).

- [34] Xiaofeng, L. ve Mingjie, L., “The de-noising method of EMD threshold based on correlation”, In Signal Processing (ICSP), 2010 IEEE 10th International Conference on, 2613 – 2616, (2010).
- [35] Jenitta, J. ve Rajeswari, A., “Denoising of ECG signal based on improved adaptive filter with EMD and EEMD”, In Information & Communication Technologies (ICT), 2013 IEEE Conference on, 957 – 962, (2013).
- [36] Su, M. L. ve Chuang, K. S., “An ECG Signal Enhancement Based on Improved EMD”, PIERS Proceedings, Taipei, (2013).
- [37] Sun, T. Y., Liu, C. C., Jheng, J. H. ve Tsai, T. Y., “An efficient noise reduction algorithm using empirical mode decomposition and correlation measurement”, In Intelligent Signal Processing and Communications Systems, 2008. ISPACS 2008. International Symposium on, 1 – 4, (2009).
- [38] Sun, M., Shen, Y. ve Zhang, W., “A wavelet threshold denoising method for ultrasonic signal based on EMD and correlation coefficient analysis”, In Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on, (Volume 8), 3992 – 3996, (2010).
- [39] Boudraa, A. O., Cexus, J. C. and Saidi, Z., “EMD-based signal noise reduction”, International Journal of Signal Processing, (Volume 1, Issue 1), 33 – 37, (2004).
- [40] Kopsinis, Y., and McLaughlin, S., “Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding”, Signal Processing, IEEE Transactions on, (Volume 57, Issue 4), 1351 – 1362, (2009).
- [41] Andrade, A. O., Nasuto, S., Kyberd, P., Sweeney-Reed, C. M. and Van Kanijn, F. R., “EMG signal filtering based on empirical mode decomposition”, Biomedical Signal Processing and Control, (Volume 1, Issue 1), 44 – 55, (2006).
- [42] Lu, Y., Haitao, Y. ve Huairong, S., “A comparative analysis on HHT and ANFIS in nonlinear noise cancellation”, (2010).

- [43] Cheng, J., Zou, D. S., Sun, X., Lv, D. ve An, G., “An improved method on reducing measurement noise based on Hilbert-Huang transform”, In Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on, (Volume 3), 627 – 630, (2009).
- [44] Jun-chang, Z. ve Li, Z., “A speech denoising method based on improved EMD”, In Multimedia and Signal Processing (CMSP), 2011 International Conference on, (Volume 2), 305 – 309, (2011).
- [45] Chatlani, N. ve Soraghan, J. J., “EMD-based filtering (EMDF) of low-frequency noise for speech enhancement”, Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on, (Volume 20, Issue 4), 1158 – 1166, (2012).
- [46] Issaoui, H., Bouzid, A. ve Ellouze, N., “Noisy Speech Enhancement Using Soft Thresholding on Selected Intrinsic Mode Functions”, Signal Processing: An International Journal (SPJI), (Volume 5, Issue 3), 93 – 100, (2011).
- [47] Kais, K., Abdel-Ouahab, B., Abdelkhalek, B. ve Monia Turki-Hadj, A., “Speech enhancement via EMD”, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, (2008).
- [48] Linderhed, A., “Image compression based on empirical mode decomposition”, In Proc. of SSAB Symposium Image Analysis, 110 – 113, (2004).
- [49] Johansson, M., “The Hilbert Transform”, Mathematics Master’s Thesis, Växjö University, Suecia, (1999).
- [50] Kschischang, F., R., “The Hilbert Transform”, University of Toronto, (2006).
- [51] Cizek, V., “Discrete Hilbert Transform”, Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions on, (Volume 18, Issue 4), 340 – 343, (1970).
- [52] Manolakis, D., G., Ingle, V., K. ve Kogon, S., M., Statistical and Adaptive Signal Processing, Boston: McGraw-Hill, (2000).

EKLER

6. EKLER

EK A Hilbert – Huang Dönüşümü Matlab Kodları

```
function [c,r,f,te] = EmdSift_1D(t,x,opt)
% tip
% 'nearest' Nearest neighbor interpolation
% 'linear' Linear interpolation (default)
% 'spline' Cubic spline interpolation
% 'pchip' Piecewise cubic Hermite interpolation
% 'cubic' (Same as 'pchip')
% 'v5cubic' Cubic interpolation used in MATLAB 5.
%           This method does not extrapolate.
%           Also, if x is not equally spaced, 'spline' is used
tic;
if nargin == 2
    opt.maximf = inf;
    opt.ort = 1e-2;
    opt.ite = 1e5;
    opt.sdk = 1e-3;
    opt.env_type = 'spline';
end
[utc,~,atc,~,~] = Extrema_1D(x);
ii = 0;
c = []; f = [];
while length(atc)-1>0 & length(utc)-1>0
    ii = ii + 1;
    [c(ii,:),f(ii,:),~] = Imf_1D(t,x,opt);
    x = x - c(ii,:);
    clear atc utc
    [utc,~,atc,~,~] = Extrema_1D(x);
    if var(x) < 1e-3
        break;
    end
    if ii > opt.maximf
        break;
    end
end
end
r = x;
te = toc;
```

```
function [ut,ux,at,ax,s] = Extrema_1D(x,Ex_type,Nex)
% Ex_type = 1 ==> Normal
% Ex_type = 2 ==> Regulated
% Ex_type = 3 ==> Mirror Extrapolated
if nargin == 1
    Ex_type = 1;
elseif nargin == 2
    Nex = 3;
```

```

end
iu = find(diff(diff(x)<0)>0) + 1;
ia = find(diff(diff(-x)<0)>0) + 1;
z = diff(x)==0;
if any(z)
    if z(1) == 1, z(1) = 0; end
    if z(end) == 1, z(end) = 0; end
    zs = find(diff(z) == 1);
    zf = find(diff(z) == -1);
    for ii = 1 : length(find((zf-zs)<4))
        z(zs(ii):zf(ii)) = 0;
    end
    clear zs zf
    zs = find(diff(z) == 1);
    zf = find(diff(z) == -1);
    sz = length(find((zf-zs)>4));
    if sz~=0
        for ii = 1 : sz
            k = zs(ii)-1:zf(ii)+1;
            for ui = 1 : length(iu)
                if ~isempty(find(k==iu(ui)))
                    iu(ui) = round(mean(k))+1;
                end
            end
            for ai = 1 : length(ia);
                if ~isempty(find(k==ia(ai)))
                    ia(ai) = round(mean(k))+1;
                end
            end
            clear k;
        end
    end
end
s = find(abs(diff(sign(x+eps)))>0);
switch Ex_type
case 1
    u = [iu;x(iu)]; ut = u(1,:); ux = u(2,:);
    a = [ia;x(ia)]; at = a(1,:); ax = a(2,:);
case 2
    iu = [1 , iu , length(x)];
    ia = [1 , ia , length(x)];
    u = [iu;x(iu)];
    a = [ia;x(ia)];

    if length(iu) > 3
        mi = (u(2,2)-u(2,3))/(u(1,2)-u(1,3));
        ni = u(2,2)-u(1,2)*mi;
        di = mi*u(1,1)+ni;
        if di > u(2,1)
            u(2,1) = di;
        end

        mi = (u(2,end-1)-u(2,end-2))/...
            (u(1,end-1)-u(1,end-2));
        ni = u(2,end-1)-u(1,end-1)*mi;
        di = mi*u(1,end)+ni;
        if di > u(2,end)
            u(2,end) = di;
        end
    end
end
end

```

```

    if length(ia) > 3
        mi = (a(2,2)-a(2,3))/(a(1,2)-a(1,3));
        ni = a(2,2)-a(1,2)*mi;
        di = mi*a(1,1)+ni;
        if di < a(2,1)
            a(2,1) = di;
        end

        mi = (a(2,end-1)-a(2,end-2))/...
            (a(1,end-1)-a(1,end-2));
        ni = a(2,end-1)-a(1,end-1)*mi;
        di = mi*a(1,end)+ni;
        if di < a(2,end)
            a(2,end) = di;
        end
    end
    ut = u(1,:); ux = u(2,:);
    at = a(1,:); ax = a(2,:);
case 3
    t = 1:length(x);
    [ut,ux,at,ax] = edge_extrapolation(iu,ia,x,t,Nex);
otherwise
    warning('Extrema Type had been chosen as
            Edge_Extrapolation!');
    t = 1:length(x);
    [ut,ux,at,ax] = edge_extrapolation(iu,ia,x,t,Nex);
end

```

```

function [c,f,te] = Imf_1D(t,x,opt)
tic;
if nargin == 2
    opt.ex_type = 3;
    opt.ort = 1e-1;
    opt.ite = 1e3;
    opt.sdk = 1e-9;
    opt.env_type = 'spline';
end
ii = 1;
h1 = x;
while 1
    [utc,~,atc,~,s] = Extrema_1D(h1,1);
    if ~(length(atc)-1>0 & length(utc)-1>0)
        [ut,ux,at,ax,~] = Extrema_1D(h1,2);
    else
        [ut,ux,at,ax,~] = Extrema_1D(h1,opt.ex_type);
    end
    [az,uz] = Zarf_1D(ut,ux,at,ax,t,opt.env_type);
    mz = mean([az;uz]);
    ii = ii + 1;
    h2 = h1 - mz;
    sd = sum((h1-h2).^2)/((h1.^2)+eps);
    % imf çıkış şartları :
    s1 = abs(length(atc)+length(utc)-length(s)) < 2;
    clear utc atc;
    % |_ imf'nin 1. şartı
    s2 = all(abs(mz) < opt.ort);
    % |_ imf'nin 2. şartı
    s3 = sd < opt.sdk;

```

```

% |_ imf algoritmasındaki değişim hızı
if s3
    f = [2,ii-1];
    % i. iterasyonda imf'ye yeterince yaklaşıldı
    break;
end
if s1 && s2
    f = [1,ii-1];
    % i. iterasyonda imf'ye ulaşıldı
    break;
end
if ii > opt.ite
    f = [0,ii-1];
    % azami iterasyona ulaşıldı, imf başarısız
    break;
end
clear ax at ux ut s
h1 = h2;
end
c = h2;
te = toc;

```

```

function [az,uz] = Zarf_1D(ut,ux,at,ax,t,env_type)
% env_type <=>
% 'nearest' Nearest neighbor interpolation
% 'linear' Linear interpolation (default)
% 'spline' Cubic spline interpolation
% 'pchip' Piecewise cubic Hermite interpolation
% 'cubic' (Same as 'pchip')
% 'v5cubic' Cubic interpolation used in MATLAB 5.
%           This method does not extrapolate.
%           Also, if x is not equally spaced, 'spline' is used
if nargin == 5
    env_type = 'spline';
end
uz = interp1(ut,ux,t,env_type);
az = interp1(at,ax,t,env_type);

```

7. ÖZGEÇMİŞ

| | |
|----------------------|---|
| Ad Soyad | Mehmet Doğan Elbi |
| Dođum Yeri ve Tarihi | Denizli 24/05/1988 |
| Lisans | Pamukkale Üniversitesi |
| Elektronik Posta | melbi@pau.edu.tr |
| İletişim Adresi | Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi A Blok Oda: 430 Kınıklı Kampüs Denizli |

Yayın Listesi

- **Elbi M.D.** ve Kızılkaya A., “Kamera-Motor Düzeneđi ile Görüntü İşleme Tabanlı Hareketli Nesne Takibi”, TOK 2011 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İzmir, (2011)
- **Elbi M.D.** ve Kızılkaya, A., “Noise cancellation on low-frequency signals using Empirical Mode Decomposition”, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mugla, (2012).
- Ukte, A., Kızılkaya, A. ve **Elbi M. D.**, “Two empirical methods for improving the performance of statistical multirate high-resolution signal reconstruction”, Digital Signal Processing, (2014).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2013.11.014>.