

**HABERLEŞME SİNYALLERİNDE MODÜLASYON
SINIFLANDIRMASI AMAÇLI PARAMETRE KESTİRİMİ**

**ESTIMATION OF COMMUNICATION SIGNAL
PARAMETERS FOR MODULATION CLASIFICATION**

SEMA KÜSMEZ

Doç. Dr. CENK TOKER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

SEMA KÜSMEZ'in hazırladığı “**Haberleşme Sinyallerinde Modülasyon Sınıflandırması Amaçlı Parametre Kestirimi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Atila YILMAZ

Başkan

.....

Doç. Dr. Cenk TOKER

Danışman

.....

Yrd. Doç. Dr. Umut SEZEN

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. S. Esen YÜKSEL

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof.Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../2014

Sema KÜSMEZ

ÖZET

HABERLEŞME SİNYALLERİNDE MODÜLASYON SINIFLANDIRMASI AMAÇLI PARAMETRE KESTİRİMİ

Sema KÜSMEZ

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk TOKER

Nisan 2014, 114 sayfa

Alıcı tarafından haberleşme sinyalinin alınması ve gönderilen mesajın algılanması için sinyalin bazı özelliklerinin bilinmesi gerekir. Ancak alıcı tarafından sinyal hakkında hiçbir bilginin bilinmediği durumlar da mevcuttur. Bu durumda sinyalle ilgili bazı parametrelerin sinyal hakkında bilgi olmaksızın kestirilmesi gerekir. Buna gözü kapalı kestirim denir. Gözü kapalı kestirim ile sinyalin modülasyon türünün kestirilmesi hedeflenirse; sinyalin, sinyal gürültü oranı, bantgenişliği, taşıyıcı frekansı ve sembol uzunluğu kestirilmelidir. Sinyal gürültü oranı ve bantgenişliği kestirimi için sinyalin spektrumunun etkin şekilde kestirilmesi oldukça önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması ile modülasyon kestirimi için gerekli tüm parametrelerin etkin bir şekilde kestirilmesi hedeflenmiştir. Gürültünün etkisini azaltmak, kestirim hassasiyetini ve başarımını arttırmak ve tanınacak sinyalin bant aralığının doğru şekilde belirlenmesini sağlamak amacıyla çeşitli spektrum kestirim yöntemleri kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Sinyal gürültü oranı, bantgenişliği, taşıyıcı frekansı ve sembol uzunluğu kestirimi için incelenen yöntemlerin çalışma aralıkları Matlab ortamında yapılan benzetimler ile belirlenmiştir. Literatürde bulunan yöntemler arasından gerçek zamanlı veya gerçeğe yakın hızlarda çalışan yöntemlere öncelik verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: spektrum kestirimi, taşıyıcı frekansı kestirimi, sembol uzunluğu kestirimi, sinyal gürültü oranı kestirimi, bantgenişliği kestirimi, parametre kestirimi

ABSTRACT

ESTIMATION OF COMMUNICATION SIGNAL PARAMETERS FOR MODULATION CLASIFICATION

Sema KÜSMEZ

Master of Science, Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk TOKER

April 2014, 114 pages

In communications, some properties of the transmitted signal has to be known in receiver side so that the information in the transmitted signal could be extracted. But in some cases, there is no prior information about the incoming signal and receiver side has to estimate the required parameters which is known as blind estimation problem. In order to estimate the modulation type of the incoming signal, Signal-to-Noise ratio, bandwidth, carrier frequency and symbol length of the message signal has to be estimated. Spectral estimation is very important for accurate SNR and bandwidth estimation.

In this thesis, our aim is to efficiently estimate the signal parameters related to the modulation recognition of the message signal. Different approaches for spectral estimation are investigated to reduce the effect of noise, improve the precision and success of estimations and provide more accurate bandwidth estimations. Signal-to-Noise ratio, bandwidth, carrier frequency and symbol length estimation are simulated in Matlab enviroment to find out estimation performance and limits of the algorithmis. During the study, methods that are real time or close to real time are studied in a high detail.

Keywords: spectral estimation, carrier frequency estimation, symbol length estimation, signal to noise ratio estimation, bandwidth estimation, parameter estimation

TEŞEKKÜR

Bu alışmaya desteğini hi bir zaman esirgemeyen, değerli fikirleri ve yol gstericiliği ile beni her zaman destekleyen değerli hocam ve danışmanım Sayın Doç. Dr. Cenk TOKER'e teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Benim her zaman olduğumdan daha başarılı olduğumu düşünen ve bana karşı koşulsuz desteklerini her zaman hissettiğim, ocuk ruhlu, sevgili anneme, babama ve ablama teşekkür ederim.

Her umutsuzluğa düştüğümde kurtarıcım olan sevgili Gökhan'a, sahip olduğu her şeyi bir kardeş gibi benimle paylaşan sevgili yol arkadaşım Merve'ye teşekkür ederim.

Bu tez kapsamında yapılan alışmalar T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın SAN-TEZ 00792.STZ.2011-1 no.lu projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER	vi
ŞEKİLLER	vii
KISALTMALAR	xx
SÖZLÜK	xxii
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1 Spektrum Kestirimi	6
2.2 Sinyal Gürültü Oranı Kestirimi	8
2.3 Frekans Kestirimi	9
2.4 Sembol Uzunluğunun Kestirimi	10
3 Spektrum Kestirimi	12
3.1 Parametrik Olmayan Yöntemler	12
3.1.2 Süzgeç Kümesi Spektrum Kestirim Yöntemleri	15
3.2 Parametrik Yöntemler	16
3.2.1 Rasyonel Spektrum için Geliştirilmiş Parametrik Yöntemler	16
3.2.2 Çizgi Spektrum İçin Geliştirilmiş Parametrik Metodlar	22
3.3 Benzetim Çalışmaları	24
4 Sinyal Gürültü Oranı Kestirimi	36
4.1 Benzetim Çalışmaları	38
5 Frekans Kestirimi	44
5.1 Sıfır Kesim Yöntemi	44

5.2	Frekans Alanı Sıfır Kesim Yöntemi	44
5.3	Kay'ın Yöntemi	47
5.4	Benzetim Çalışmaları.....	50
5.4.1	Sıfır Kesim Yöntemi.....	51
5.4.2	Frekans Alanı Sıfır Kesim Yöntemi	54
5.4.3	Kay'ın Yöntemi	55
6	Sembol Uzunluğu Kestirimi	57
6.1	Benzetim Çalışmaları.....	58
7	ENTEGRASYON.....	63
8	SONUÇLAR.....	69
	KAYNAKLAR.....	71
	EKLER	74
	EK 1.1: Sıfır Kesim Yöntemi ile Frekans Kestirimi	74
	EK 1.2: Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemi ile Frekans Kestirimi	87
	EK 1.3: Kay'ın Yöntemi.....	100
	ÖZGEÇMİŞ.....	114

ÇİZELGELER

Sayfa

Tablo 1 16QAM sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)	60
Tablo 2 BPSK sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)	60
Tablo 3 BFSK sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)	61
Tablo 4 QPSK sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)	61
Tablo 5 SNR, Bantgenişliği ve Taşıyıcı Frekansı kestirimleri	66
Tablo 6 Sembol uzunluğu kestirim sonuçları	68

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1-1 Parametre kestirim blokları	2
Şekil 1-2 Spektrum kestirim bloğunun girdileri ve çıktıları.....	3
Şekil 1-3 Sinyal gürültü oranı kestirimi bloğunun girdileri ve çıktıları	3
Şekil 1-4 Taşıyıcı frekansı kestirimi bloğunun girdileri ve çıktıları	4
Şekil 1-5 Sembol uzunluğu kestirimi bloğunun girdileri ve çıktıları	4
Şekil 3-1 15dB sinyal gürültü oranına sahip BPSK ile modüle edilmiş sinyalin Periodogram, Bartlett, Welch Daniell, MTM, Capon yöntemleri ile kestirilen spektrumu	25
Şekil 3-2 15dB sinyal gürültü oranına sahip BFSK ile modüle edilmiş sinyalin Periodogram, Bartlett, Welch Daniell, MTM, Capon yöntemleri ile kestirilen spektrumu	27
Şekil 3-3 15dB sinyal gürültü oranına sahip 16QAM ile modüle edilmiş sinyalin Periodogram, Bartlett, Welch Daniell, MTM, Capon yöntemleri ile kestirilen spektrumu	29
Şekil 3-4 15dB sinyal gürültü oranına sahip BPSK ile modüle edilmiş sinyalin YW, LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, MN ve HOYW yöntemleri ile kestirilen spektrumu	31
Şekil 3-5 15dB sinyal gürültü oranına sahip BFSK ile modüle edilmiş sinyalin LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, MN ve HOYW yöntemleri ile kestirilen spektrumu	32
Şekil 3-6 15dB sinyal gürültü oranına sahip 16QAM ile modüle edilmiş sinyalin YW, LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, MN ve HOYW yöntemleri ile kestirilen spektrumu	34
Şekil 4-1 Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması ile bulunan alt ve üst eşikler..	36
Şekil 4-2 LAD algoritmasının uygulanması.....	38
Şekil 4-3 LAD algoritması uygulanmış sinyalin yakınlaştırılmış hali	40
Şekil 4-4 LAD algoritması uygulanmış sinyalin yakınlaştırılmış hali	41
Şekil 4-5 100 monte carlo benzetimi için başlangıç gürültü seti, tüm sinyalin %10'u olduğunda normal dağılımlı, değişinti değerleri 1/10, 1, 10 olan gürültü için bulunan eşik değerlerine göre hesaplanan hata yüzdesinin girdi olarak verilen hata yüzdesine göre değerleri.....	42
Şekil 4-6 100 monte carlo benzetimi için başlangıç gürültü seti, tüm sinyalin %50'si olduğunda normal dağılımlı, değişinti değerleri 1/10, 1, 10 olan gürültü için bulunan eşik	

değerlerine göre hesaplanan hata yüzdesinin girdi olarak verilen hata yüzdesine göre değerleri.....	43
Şekil 5-1 AR derecelerinin AIC, ARMA derecelerinin AIC, AICc, GIC, BIC yöntemleri ile hesaplanan en küçük hataya dayalı çizimleri	46
Şekil 5-2 Frekans kestirimi yapılacak sinyal modelinin oluşumu.....	48
Şekil 5-3 Mesaj sinyali, mesaj sinyalinin doğru taşıyıcı frekansı ile temelbanda indirilmiş halinin spektrumu, mesaj sinyalinin yanlış taşıyıcı frekansı ile temelbanda indirilmiş halinin spektrumu	50
Şekil 5-4 Eklenen frekans kayması hatalarına karşılık, frekans kayması kestirimindeki hata	51
Şekil 5-5 Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	52
Şekil 5-6 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	52
Şekil 5-7 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	55
Şekil 6-1 Cepstrum grafiği	57
Şekil 6-2 Sembol uzunluğu 200 örnek olan, 10kHz frekans kaymasına sahip sinyalin güç spektrumunun Cepstrum'u (50dB)	58
Şekil 6-3 Sembol uzunluğu 200 örnek olan, 10kHz frekans kaymasına sahip sinyalin güç spektrumunun Cepstrum'u (5dB)	59
Şekil 7-1 Soldan sağa 16QAM, 2PSK ve 2FSK sinyalleri (10dB)	63
Şekil 7-2 Spektrum kestirimi.....	64
Şekil 7-3 LAD algoritması ile bulunan ilk sinyal.....	65
Şekil 7-4 LAD algoritması ile bulunan ikinci sinyal.....	65
Şekil 7-5 LAD algoritması ile bulunan üçüncü sinyal	66
Şekil 7-6 1. Darbant sinyalin taşıyıcı frekans kestirimi ile kaydırılmadan önceki ve sonraki hali	67
Şekil 7-7 2. Darbant sinyalin taşıyıcı frekans kestirimi ile kaydırılmadan önceki ve sonraki hali	67

Şekil 7-8 3. Darbant sinyalin taşıyıcı frekans kestirimi ile kaydırılmadan önceki ve sonraki hali	68
Şekil 10-1: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	74
Şekil 10-2: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	74
Şekil 10-3: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	74
Şekil 10-4: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	75
Şekil 10-5: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	75
Şekil 10-6: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz) ..	75
Şekil 10-7: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	76
Şekil 10-8: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	76
Şekil 10-9: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	76
Şekil 10-10: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	77
Şekil 10-11: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	77

Şekil 10-12: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	77
Şekil 10-13: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	78
Şekil 10-14: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	78
Şekil 10-15: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	78
Şekil 10-16: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz) ..	79
Şekil 10-17: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	79
Şekil 10-18 : 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	79
Şekil 10-19 : 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	80
Şekil 10-20 : 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	80
Şekil 10-21: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	80
Şekil 10-22: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	81

Şekil 10-23: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	81
Şekil 10-24: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	81
Şekil 10-25: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	82
Şekil 10-26: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	82
Şekil 10-27: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	82
Şekil 10-28: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	83
Şekil 10-29: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	83
Şekil 10-30: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	83
Şekil 10-31: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	84
Şekil 10-32: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	84
Şekil 10-33: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	84

Şekil 10-34: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	85
Şekil 10-35: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	85
Şekil 10-36: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz) ..	85
Şekil 10-37: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	86
Şekil 10-38: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	86
Şekil 10-39: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	86
Şekil 10-40: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	87
Şekil 10-41: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	87
Şekil 10-42: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	87
Şekil 10-43: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	88
Şekil 10-44: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	88

Şekil 10-45: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	88
Şekil 10-46: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	89
Şekil 10-47: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	89
Şekil 10-48: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	89
Şekil 10-49: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	90
Şekil 10-50: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	90
Şekil 10-51: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	90
Şekil 10-52: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	91
Şekil 10-53: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	91
Şekil 10-54: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	91
Şekil 10-55: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	92

Şekil 10-56: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	92
Şekil 10-57: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	92
Şekil 10-58: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	93
Şekil 10-59: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	93
Şekil 10-60: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	93
Şekil 10-61: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	94
Şekil 10-62: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	94
Şekil 10-63: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	94
Şekil 10-64: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	95
Şekil 10-65: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	95
Şekil 10-66: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	95

Şekil 10-67: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	96
Şekil 10-68: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	96
Şekil 10-69: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	96
Şekil 10-70: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	97
Şekil 10-71: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	97
Şekil 10-72: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	97
Şekil 10-73: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	98
Şekil 10-74: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	98
Şekil 10-75: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	98
Şekil 10-76: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	99
Şekil 10-77: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	99

Şekil 10-78: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	99
Şekil 10-79: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	100
Şekil 10-80: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	100
Şekil 10-81: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	100
Şekil 10-82: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	101
Şekil 10-83: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	101
Şekil 10-84: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	101
Şekil 10-85: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	102
Şekil 10-86: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	102
Şekil 10-87: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	102
Şekil 10-88: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)	103

Şekil 10-89: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	103
Şekil 10-90: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	103
Şekil 10-91: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	104
Şekil 10-92: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	104
Şekil 10-93: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	104
Şekil 10-94: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	105
Şekil 10-95: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	105
Şekil 10-96: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	105
Şekil 10-97: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	106
Şekil 10-98: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	106
Şekil 10-99: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örneklerle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	106

Şekil 10-100: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	107
Şekil 10-101: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	107
Şekil 10-102: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	107
Şekil 10-103: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	108
Şekil 10-104: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	108
Şekil 10-105: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz).....	108
Şekil 10-106: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	109
Şekil 10-107: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	109
Şekil 10-108: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	109
Şekil 10-109: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	110
Şekil 10-110: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembolleri 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	110

Şekil 10-111: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	110
Şekil 10-112: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	111
Şekil 10-113: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	111
Şekil 10-114: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	111
Şekil 10-115: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)	112
Şekil 10-116: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	112
Şekil 10-117: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	112
Şekil 10-118: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	113
Şekil 10-119: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	113
Şekil 10-120: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz).....	113

KISALTMALAR

Kısaltmalar

16QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation	16 Dördün Genlik Kiplenimi
AIC	Akaike Information Criteria	Akaike Bilgi Kriteri
AICc	Akaike Information Criteria with Correction	Düzeltilmeli Akaike Bilgi Kriteri
AR	Autoregressive Process	Özbağlanımlı Süreç
ARMA	Autoregressive Moving Average Process	Özbağlanımlı Hareketli Ortalama Süreci
BFSK	Binary Frequency Shift Keying	İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama
BIC	Bayesian Information Criterion	Bayes Bilgi Kriteri
BPSK	Binary Phase Shift Keying	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
CME	Consecutive Mean Excision	Ardışık Ortalama Alma
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques	Rotasyonel Değişmez Teknikler ile Parametre Kestirimi
GIC	Generalized Information Criterion	Genelleştirilmiş Bilgi Kriteri
HOYW	High Order Yule Walker Method	Yüksek Dereceli Yule Walker Yöntemi
LAD	Localization Algorithm Based on Double Thresholding	Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması
LSAR	Least Squares Method	En Küçük Kareler Yöntemi
LSARMA	Least Squares ARMA Method	İki-Aşamalı En Küçük Kareler Yöntemi
MA	Moving Average Process	Hareketli Ortalama Süreci
MLE	Maximum Likelihood Estimator	En Çok Olabilirlik Tahmin Edicisi
MN	Minimum Norm Method	En Küçük Norm Yöntemi
MSK	Minimum Shift Keying	En Küçük Kaydırmalı Anahtarlama

MTM	Multitaper Method	Çoklu İnceltilmiş Kestirim
MUSIC	Multiple Signal Classification	Çoklu Sinyal Sınıflandırma
MYWARMA	Modified Yule-Walker ARMA Method	Değiştirilmiş Yule-Walker Yöntemi
PAM	Pulse Amplitude Modulation	Darbe Genlik Modülasyonu
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama
RFB	Refined Filter-Bank Method	Rafine Süzgeç Kümesi Yöntemi
R-MLE	Recursive Maximum Likelihood Estimator	Özyinelemeli En Çok Olabilirlik Kestirici
SNR	Signal to Noise Ratio	Sinyal Gürültü Oranı
SVD	Singular Value Decomposition	Tekil Değer Ayrışımı
ZCFE	Zero Crossing Frequency Estimation	Sıfır Kesim Frekans Kestirimi

SÖZLÜK

Aşan Bantgenişliği	Excess Bandwidth
Benzetim	Simulation
Bölüt	Segment
Conjugate	Eşlenik
Çarpımsal Gürültü	Multiplicative Noise
Çevrimli	Cyclic
Çevrimsel Durağan	Cyclostationary
Çevrimsel İlinti	Cyclic Correlation
Çizgi Spektrum	Line Spectrum
Çözünürlük	Resolution
Dalgacık Dönüşümü	Wavelet Transform
Değişinti	Variance
Devrik	Transpose
Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler Metodu	Nonlinear Least Squares Method
Doğrusal Öngörü	Linear Prediction
Dördün	Quadrature
Dürtü Katarı	Impulse Train
Dürtü Yanıtı	Impulse Response
Düz	Smooth
En Büyük Entropi Yöntemi	Maximum Entropy
En Küçük Değişinti (Capon) Yöntemi	Minimum Variance (Capon) Method
En Yüksek Tutucu	Maximum Hold
Eş Fazlı	Inphase
Geçirme Bandı	Passband
Gerçek Zamanlı	Real Time
Gözü Kapalı	Blind
Korelogram	Correlogram
İstenmeyen Tepeler	Spurious Peaks
Kararsızlık	Uncertainty
Karmaşık	Complex

Ortak Değişinti Yöntemi	Covariance Method
Öngörü Hatası Değişintisi	Prediction Error Variance
Örtüşme	Aliasing
Özilinti	Autocorrelation
Özilinti Yöntemi	Autocorrelation Method
Özyinelemeli	Recursive
Parametrik Olmayan Yöntemler	Nonparametric Methods
Parametrik Yöntemler	Parametric Methods
Pencere Tabanlı Yöntemler	Window Based Methods
Periodogram	Periodogram
Rasyonel Spektrum	Rational Spectrum
Sembol Hızı	Symbol Rate
Sıvanma	Smearing
Sızıntı	Leakage
Spektrum Kestirimi	Spectral Estimation
Tekrarlı	Iterative
Temelbant	Baseband
Tutarlı	Consistent
Uyarlamalı	Adaptive
Uyumlu Süzgeç	Matched Filter
Üç-Aşamalı En Küçük Kareler Yöntemi	Mayne-Firoozan Method
Yan Lob	Side Lobe
Yanlılık	Bias
Yükseltilmiş Kosinüs Süzgeci	Raised Cosine Filter

1 GİRİŞ

Bu tez kapsamında haberleşme sinyallerinin parametrelerinin kestirilmesi amacıyla gerekli kuramsal araştırmalar yapılmış ve çeşitli yöntemler benzetim çalışmalarıyla incelenmiştir. Modülasyon kestirimi amacıyla çeşitli parametre kestirimleri yapılmıştır. Tez kapsamında bu parametre kestirimleri Spektrum Kestirimi, Sinyal Gürültü Oranı Kestirimi, Taşıyıcı Frekansı Kestirimi, Sembol Uzunluğu Kestirimi olmak üzere dört başlık altında incelenmiştir. şekil 1-1'de üzerinde çalışılan bu dört blok gösterilmektedir. Bu tez kapsamında incelenen algoritmaların gözü kapalı kestirim için uygun olması öncelikli şart olarak ele alınmıştır. Geliştirilecek algoritmaların sayısal modülasyonları kestirmek amacıyla kullanılacak olması nedeniyle benzetim çalışmaları sayısal modülasyonlar ile yapılmıştır. Bu alışmalarda Matlab ortamında oluşturulmuş İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK), İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Frequency Shift Keying, BFSK, 16 Dördün Genlik Kiplenimi (16 Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM), En Küçük Kaydırmalı Anahtarlama (Minimum Shift Keying, MSK) ve Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) modülasyonları kullanılmıştır. Bu modülasyonlarla ilgili detaylı bilgi, referans olarak gösterilen tezde mevcuttur [1].

Haberleşmenin gerçekleşebilmesi için mesaj sinyalinin alıcıya ulaşabilmesi gerekir. Bu işlemin verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için sinyalin iletme uygun bir biçime dönüştürülmesine modülasyon denir. Haberleşme, çeşitli modülasyon türleri ile modüle edilmiş sinyaller üzerinden gerçekleşmektedir. Vericinin gönderdiği mesaj sinyali alıcıda demodüle edilerek bilgi elde edilir. Ancak demodülasyon için sinyalin hangi modülasyon türüyle modüle edildiğinin ve o modülasyon türüne ait bantgenişliği, sembol süresi gibi parametrelerin bilinmesi gerekir. Modülasyon türünün bilinmediği durumlarda modülasyon türünün kestirimi için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmaların kullanılabilmesi için sinyalle ilgili çeşitli parametrelerin bilinmesi ya da kestirilmesi gerekir. Sinyalle ilgili parametrelerin ve modülasyon türünün kestirilmesi işlemini bir operatör yardımıyla gerçekleştirilebileceği gibi daha akıllı bir sistem tasarlanarak otomatik olarak da gerçekleştirilebilir.

Bu tezde yapılan çalışmalar gözü kapalı modülasyon türü kestirimi için gerekli parametrelerin kestirilmesini amaçlamaktadır. Modülasyon türünün gözü kapalı kestirimi için sinyalle ilgili parametrelerin kestiriminin de gözü kapalı yapılması gerekir. Bu amaçla alınan sinyal üzerinde yapılan işlemler Şekil 1-1’de bloklar ile gösterilmiştir. Antenden alınıp, alıcıdaki analog ön uçtan geçirilip örneklenen, dördün (Q) ve eş fazlı (I) kanallardaki sinyal kullanılarak Şekil 1-1’deki kestirimler yapılmaktadır. Bu tez kapsamında sinyalin alıcı veya antenden alınmasından modülasyon kestirimine kadar yer alan basamaklarda bulunan ve modülasyon türü kestirimi için gereken parametrelerin kestirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1-1 Parametre kestirim blokları

Alınan sinyalin alıcı tarafından temelbanda indirildiği varsayılmıştır. Sinyalin gücünün bu bantta nasıl dağıldığı, sinyalin spektrumu ile gösterilir. Sinyalin zamana karşı güç dağılımları ile gözlemlenemeyen bir çok bilgiye sinyalin spektrumu ile ulaşılır. Örneğin spektrum sinyaldeki gizli tekrarları açığa vurur. Tıp, ekonomi, meteoroloji, sismoloji gibi bir çok branşta sinyallerin spektrumundan bilgi elde edilir. Örneğin radar ve sonar sistemlerinde sinyalin spektrumu kaynağın yeri hakkında bilgi verir [2].

İncelenen banttaki sinyal varlığının gözlemlenmesi için de spektrumun etkili şekilde kestirilmesi gerekir. Alıcının temelbanda indirdiği sinyale spektrum kestirimi yapılarak kestirilen frekansa bağlı güç değerleri elde edilir. Bu işlemler Şekil 1-2’de gösterilmiştir.



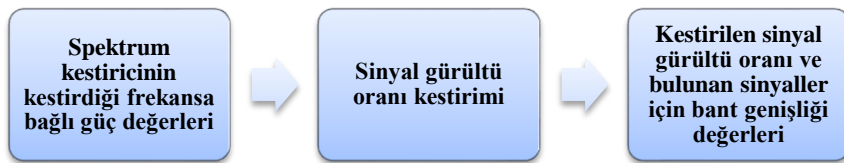
Şekil 1-2 Spektrum kestirim bloğunun girdileri ve çıktıları

Spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrum, bantgenişliğinin ve sinyal gürültü oranının kestirilmesi için de kullanılabilir. Spektrum kestiriminin yanı sıra en yüksek tutuculu gerçek zamanlı tekrarlayan çizimler ile frekanslardaki sinyal varlığı geriye dönük olarak gözlemlenebilir.

Haberleşme sistemlerinde kullanılan kaynaklar verici tarafından gönderilen sinyalin gücü ve bantgenişliğidir. Bu iki kaynağın verimli kullanımı, bir verici sistemi için çok önemlidir. Bantgenişliği mesaj sinyaline ayrılmış frekans bandının genişliğidir. Haberleşme sistemlerinde iç ya da dış kaynaklardan meydana gelen gürültünün varlığı engellenemez. Gürültü, mesaj sinyalinin iletilmesini ve işlenmesini engelleyen, istenmeyen dalgalar olarak düşünülebilir. Yapılan işlemlerde gürültünün etkisinin de hesaba katılması için sinyal gürültü oranı (signal to noise ratio, SNR) parametresi kullanılmaktadır. Sinyal gürültü oranı ortalama sinyal gücünün, ortalama gürültü gücüne oranı olarak tanımlanır [3].

Sinyal gürültü oranı ve bantgenişliği haberleşme sistemlerinin iki önemli parametresi oldukları için gözü kapalı modülasyon kestirimi için bu iki parametrenin kestirilmesi gereklidir. Bantgenişliğinin kestirimi ile kastedilen genişbantlı sinyalin içinde eşik değerleri yardımıyla bulunan darbantlı sinyallerin bantgenişliğidir. Sinyal gürültü oranı da bu darbantlı sinyallerin her biri için bulunan sinyal gürültü oranlarıdır.

Spektrum kestiricinin kestirdiği frekansa bağlı güç değerleri sinyal gürültü oranı kestirimi işleminde kullanılarak sinyal gürültü oranı ve bantgenişliği kestirimleri elde edilir. Bu işlem blok olarak Şekil 1-3’de gösterilmiştir.



Şekil 1-3 Sinyal gürültü oranı kestirimi bloğunun girdileri ve çıktıları

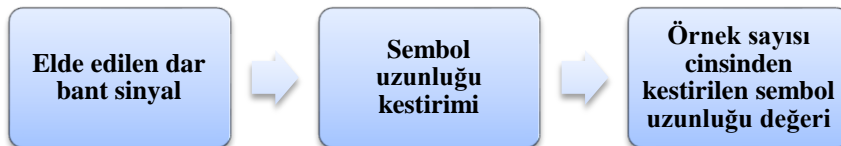
Haberleşme işleminin gerçekleşebilmesi yani mesaj sinyalinin alıcıya yeterli bir şekilde ulaştırılabilmesi için anten boyunun dalga boyu ile aynı derecelerde olması gerekir. Bunun yanında vericilerin kullandığı anten boylarının birbirleri ile aynı derecelerde olması gereklidir. Ayrıca vericilerin kullandıkları frekans bantlarının birbirleriyle çakışmaması gerekir [4]. Modülasyon işleminde taşıyıcı frekansının kullanılması ile bu iki sorun aşılr. Modülasyon tanıma algoritmalarında kullanılan anlık faz, frekans ve genlik bilgisinin doğruluğu bu taşıyıcı frekans bilgisinin doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle ele alınan modülasyon kestirim uygulamasında frekans kestirimi yapılmaktadır. Bu kestirim genişbantlı sinyal içindeki darbantlı sinyaller bulunduktan sonra bu sinyallerin frekanslarının kestirilmesi işlemidir. Elde edilen darbant sinyal için taşıyıcı frekansı kestirimi yapılarak taşıyıcı frekansı kestirilir. Bu işlem blok olarak Şekil 1-4'de gösterilmiştir.



Şekil 1-4 Taşıyıcı frekansı kestirimi bloğunun girdileri ve çıktıları

Haberleşme ortamında, bir saniyede, sembol sayısındaki değişim miktarına sembol hızı denir. Bu değer de modülasyon kestirim algoritmaları tarafından kullanılmaktadır. Bu değeri bulmak için modülasyon işlemindeki bir sembolün örnek sayısı cinsinden değerinin, yani sembol uzunluğunun kestirilmesi yeterlidir.

Diğer parametre kestirim aşamaları yardımıyla elde edilen darbant sinyalin sembol uzunluğu kestirilerek, örnek sayısı cinsinden sembol uzunluğu değeri kestirilir. Bu işlem Şekil 1-5'te blok olarak gösterilmiştir.



Şekil 1-5 Sembol uzunluğu kestirimi bloğunun girdileri ve çıktıları

Bu bloklar Bölüm 3, Bölüm 4, Bölüm 5 ve Bölüm 6'da detaylı şekilde incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları yardımı ile bu blokların oluşturulması amacıyla incelenen bir çok yöntemin başarımları kıyaslanmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları ile ilgili bazı çizimler, tezin akışını bozmaması ve tezin bütünlüğü açısından EKLER bölümüne yerleştirilmiştir.

2 LİTERATÜR TARAMASI

Haberleşme sinyallerinin alınıp çözümlenmesi için sinyallerin sezilmesi ilk ve en önemli adımdır. Bu nedenle literatürdeki bazı spektrum kestirim algoritmaları incelenmiştir [2], [5]. İncelenen banttaki sinyalin taşıdığı bilginin tespit edilmesi için sinyal hakkındaki bilgiler çok önemlidir. Modüle edilmiş sinyali hangi modülasyon türü ile modüle edildiğini bulmak için, sinyalin özellikleri bilinmiyorsa yani gözü kapalı kestirim yapılıyorsa, sinyalin frekans kayması, bantgenişliği, sinyal gürültü oranı ve modülasyon işlemindeki bir sembol uzunluğu gibi parametrelerinin modülasyon türünün kestiriminden önce kestirilmesi gerekir.

2.1 Spektrum Kestirimi

Ortamdaki sinyallerin modülasyon türünü kestirmek için öncelikle sinyalin gücünün frekans değerlerine göre nasıl dağılmış olduğunu kestirmek gereklidir. Bu da ‘Spektrum Kestirimi’ olarak bilinir.

Spektrum Kestirim yöntemlerinin performansları aşağıdaki üç kritere göre değerlendirilebilir:

- Çözünürlük : Spektrumdaki yakın tepeleri ayırt edebilme yeteneğidir.
- Yanlılık : Kestirimin ortalamasının gerçek spektrumdan farkıdır.
- Değişinti : Kestirimin, ortalamasından farkının, karesinin ortalamasıdır.

Başlıca spektrum kestirim tekniklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [2], [5], [6], [7]:

- Parametrik Olmayan Yöntemler
 - Temel Parametrik Olmayan Spektrum Kestirim Yöntemleri
 - Periodogram Yöntemi
 - Korelogram Yöntemi
 - Pencere Tabanlı Yöntemler
 - Blackman-Tukey Yöntemi
 - Bartlet Yöntemi
 - Welch Yöntemi
 - Daniell Yöntemi
 - Süzgeç Kümesi (Filter Bank) Spektrum Kestirim Yöntemleri
 - Rafine Süzgeç Kümesi Yöntemi (Refined Filter-Bank Method, RFB)

- Capon (En Küçük Değişinti) Yöntemi
- Çoklu İnceltilmiş Kestirim Yöntemi (Multitaper Method, MTM)
- Parametrik Yöntemler
 - Rasyonel Spektrum için Geliştirilmiş Parametrik Yöntemler
 - Özbağlanımlı Süreç Yöntemler (Autoregressive Process, AR)
 - Yule-Walker Yöntemi (YW)
 - En Küçük Kareler Yöntemi (Least Squares Method, LSAR)
 - En Büyük Entropi Yöntemi
 - Özilinti Yöntemi
 - Prony Yöntemi
 - Ortak Değişinti Yöntemi
 - Burg Yöntemi
 - Özyinelemeli En Çok Olabilirlik Kestirici (Recursive Maximum Likelihood Estimator, R-MLE)
 - Hareketli Ortalama Süreci Yöntemleri (Moving Average Process, MA)
 - Durbin'in Yöntemi
 - Özbağlanımlı Hareketli Ortalama Süreci Yöntemleri (Autoregressive Moving Average Process, ARMA)
 - En Çok Olabilirlik Tahmin Edicisi (Maximum Likelihood Estimator, MLE)
 - Akaike Yöntemi
 - Değiştirilmiş Yule-Walker Yöntemi (Modified Yule-Walker ARMA Method, MYWARMA)
 - İki-Aşamalı En Küçük Kareler Yöntemi (Least Squares ARMA Method, LSARMA)
 - Üç-Aşamalı En Küçük Kareler Yöntemi
 - Çizgi Spektrum İçin Geliştirilmiş Parametrik Metodlar
 - Çoklu Sinyal Sınıflandırma (Multiple Signal Classification, MUSIC)

- Rotasyonel Değişmez Teknikler ile Parametre Kestirimi (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)
- Yüksek Dereceli Yule Walker Yöntemi (High Order Yule Walker Method, HOYW)
- Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler Yöntemi
- Pisarenko Yöntemi
- En Küçük Norm Yöntemi (Minimum Norm Method, MN)

Bu yöntemlerin, spektrumu kestirilen sinyallerin ve ortamın özelliklerine göre birbirlerine karşı çeşitli üstünlükleri vardır.

2.2 Sinyal Gürültü Oranı Kestirimi

Literatürde gözü kapalı sinyal gürültü oranı için önerilmiş bir çok yöntem bulunmaktadır. Bazı yöntemlerde SNR, modüle edilmiş sinyalin yüksek dereceli ortalamalarından elde edilmiştir [8]. Bazı çalışmalarda darbant kanallarda SNR kestirimi sinyalin ve gürültünün ilinti özelliklerinden kestirilmiştir [9]. Bazı kaynaklarda ise yüksek dereceli momentler kullanılarak kestirilmiştir [10]. Birçok yöntemin karşılaştırılmalı analizleri literatürde mevcuttur [11]. Ancak çoğunluğunda ortak olarak şu sorunlar görülmektedir:

- Bazı yöntemler sinyal hakkındaki bazı bilgilerin gerekliliği sebebiyle gerçekten gözü kapalı kestirim yapmamaktadırlar.
- Bazı yöntemler sadece belli darbant sinyaller için kestirim yapmaktadır.
- Bazı yöntemlerin performansı birkaç eş zamanlı darbant sinyalin bulunması sonucu düşmektedir.
- Bazı yöntemler işlemsel olarak oldukça karmaşıktırlar.

Sinyal gürültü oranı kestirimi eşik belirleme ile işlem sayısı açısından kolayca gerçekleştirilebilir. Ancak eşik değeri alçak belirlenirse gürültü, sinyal olarak algılanabilir. Aksine yüksek belirlenirse bu durumda da sinyalin parçalar halinde algılanması söz konusu olabilir. Yani bir sinyal daha darbantlı bir kaç sinyal olarak algılanabilir [12]. Bu sorunların önüne geçmek için iki eşikli Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması (Localization Algorithm Based on Double Thresholding, LAD) ortaya atılmıştır. İlk eşik altındaki örnekler gürültü örnekleri olarak kabul edilmiş, ilk eşik üzerine çıkan

kısımlardan ikinci eşiği de aşan sinyal parçalarında sinyal vardır denilmiştir. Böylece tek eşikli algoritmalarındaki ikilem ortadan kalkmıştır [13].

Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması ile eşik bulma, Ardışık Ortalama Alma (Consecutive Mean Excision, CME) yöntemine dayanır. Bu yöntem, eşik değerinin özyinelemeli olarak bulunması algoritmasıdır [14], [15], [16]. Ortalama bulma işleminde ise Gauss dağılımlı gürültünün gücünün ortalamasının Rayleigh dağılım göstermesi bilgisi kullanılır [17], [18]. Gözlemlenen durumların %95'inde Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritmasının darbant sinyal sayısını başarılı bir şekilde bulduğu belirtilmiştir [19].

2.3 Frekans Kestirimi

Frekans kestirim yöntemleri, taşıyıcı frekansı bilinmeyen geçirme bandındaki bir sinyalin taşıyıcı frekansının, ya da taşıyıcı frekansı tahmini olarak kestirilmiş ve temelbanda indirilmiş bir sinyalin frekansının kestirim hatasının bulunması için kullanılan yöntemlerdir.

Frekans kestirimi konusunda yapılmış çalışmaların kuramsal altyapısı şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Öz ilintiye dayanan yöntemler
- En Çok Olabilirlik (Maximum Likelihood, ML) tabanlı yöntemler
- Ayırık Fourier dönüşümü ile spektrumu kestirmeye dayanan yöntemler
- Diğer yöntemler

Öz ilintiye dayanan yöntemlerin başlıcaları aşağıdaki gibidir:

- Kay'ın Yöntemi [20]
- Fitz Yöntemi [21]
- Luise-Reggiannini Yöntemi [22]
- Mengali and Morelli Yöntemi [22]

Bu yöntemler Kay'ın yönteminin bazı açılardan iyileştirilmiş versiyonlarıdır. Fitz ve Luise-Reggiannini yönteminde kestirimin doğruluğu ve işlem yükü arasında bir ödünleşim vardır [23]. Mengali and Morelli yöntemi kestirilecek yüksek frekanslar için Luise-Reggiannini yönteminden daha iyi sonuç verir. Ancak düşük frekanslar için Luise-Reggiannini yöntemi daha doğru sonuç verir. Bu iki yönteme yakın sonuçlar veren tekrarlı

yöntemler de geliştirilmiştir [24]. Kay yöntemi Fitz ve Luise-Reggiannini yöntemlerine göre daha geniş frekans aralığı için doğru sonuçlar vermeye devam eder ancak; 6 dB sinyal gürültü oranından sonra hata miktarı oldukça artar. Bu iki yöntemde bu sınır 0 dB'dir [23]. Bu iki yöntem daha düşük sinyal gürültü oranında daha iyi sonuçlar verirler ancak buna karşılık işlem yükleri daha ağırdır ve daha dar frekans aralığı için doğru sonuç verirler [25].

En Çok Olabilirlik yönteminin işlem yükü yüksek olduğu için bazı yaklaşık En Çok Olabilirlik yöntemleri geliştirilmiştir [23]. Bu yöntemler de öz ilintiye dayanan yöntemlere yakın performans vermektedir. Bu yöntemler arasında hangisinin daha iyi sonuç vereceği uygulanan sinyalin özelliklerine göre değişir. Performansı etkileyen ana unsurlar sinyal gürültü oranı ve kestirilmeye çalışılan frekansın büyüklüğüdür.

Literatürde ayrık Fourier dönüşümü ile frekans kestirmeye dayalı yöntemler mevcuttur. Bu kestiricilerin başlıcası olarak gösterilen Çevrimli Kestirici genellikle ortalaması sıfır olmayan çarpımsal gürültü varlığında daha iyi sonuç vermektedir [26]. Ancak bu tez kapsamında çarpım gürültüsü incelenmemektedir.

Temel yöntemlere örnek olarak Sıfır Kesim Yöntemi verilebilir. Bu yöntemde diğer yöntemlerin aksine zaman alanında hesaplama yapılmaktadır. Bu nedenle de sinyal gürültü oranı sınırı yüksektir. Ancak yüksek frekansları kestirmede gürültünün etkisi daha azdır [27]. İşlem yükü ise oldukça düşüktür.

2.4 Sembol Uzunluğunun Kestirimi

Sembol uzunluğunun kestirimi konusunda literatürde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bu yöntemlerden bir kısmı çevrimsel ilintiye [28], [29], [30] bir kısmı dalgacık dönüşümüne [31], bir kısmı da ters Fourier dönüşümüne [32], [33], [34] dayanır. Çevrimsel ilinti tabanlı yöntemler ise, sinyalin ilinti değerlerinin sembol hızına karşılık gelen periyodik bileşeninin çevrimsel ilinti katsayılarının mutlak değerler toplamının, çevrimsel frekans düzleminde maksimum olduğu noktaya karşılık gelmesiyle kestirim yapmaktadır. Bu tür yöntemler aşan bantgenişliği düşük olduğu zaman düşük başarımlar gösterirler [35]. Aşan bantgenişliği örnekleme frekansının yarısını yani Nyquist bantgenişliğini aşan bantgenişliğidir. Bu sorunu gidermek için bazı algoritmalar geliştirilmiştir [28]. Ancak bu algoritmaların işlem karmaşıklığı oldukça yüksektir.

Dalgacık dönüşümüne dayanan yöntemlerde, dalgacık dönüşümünün ani değişimlerini yakalayabilme özelliği kullanılıp sinyalin faz değişim noktaları belirlenerek sembol hızı kestirimi yapılmaktadır. Bu nedenle bu yöntemler sürekli fazlı modülasyon türlerinin sembol hızını kestirme konusunda başarısız olmaktadır [35]. Bu sorun sayısal modülasyonlu sinyallerin sembol periyodundan dolayı çevrimsel durağan oluşu ve çevrimsel durağan bir işaretin de, zamanda periyodik değişen özilinti değerlerine sahip oluşu [36], [37] özelliklerine dayanarak aşılmaya çalışılmıştır [35].

Ters Fourier dönüşümüne dayanan yöntemlerde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bazı çalışmalarda sinyalin temel dalga biçiminin yükseltilmiş kosinüs süzgeci olduğu kabulü yapılmıştır. Alınan sinyalin güç spektrumu, sinyale ait pencerelerin ortalamasının alınmasıyla hesaplanmış ve güç spektrumunun ters Fourier dönüşümü ile elde edilen sinyalin temel dalga biçiminin doruk noktası ve bu sinyalin yatay eksenini kestiği nokta arasındaki örnek sayısına bağlı olarak simge hızı kestirimi yapılmıştır [33]. Bu yöntemler aşan bantgenişliğinin düşük olduğu durumda görülen düşük kestirim başarımı sorununu aşmak için işlem yükünü arttırmışlardır. Ters Fourier dönüşümüne dayanan bazı yöntemlerde ise Cepstrum analizinden faydalanılmıştır [35]. Bu uygulamalarda sayısal modülasyonlarla modüle edilmiş sinyalin güç spektrumundaki sıfır noktalarının periyodik olmasından yararlanılmıştır. Ayrıca gerçel Cepstrum'un, sinyalin sembol uzunluğunun kestirilmesinde kullanılabileceği bilgisi kullanılmıştır. Gerçel periyodik Cepstrum güç spektrumundan bulunmuştur. Spektrumdaki periyodik bileşenin Cepstrum'da oluşturacağı tepe yardımıyla sembol uzunluğu bulunmuştur. Bu yöntem işlem yükünün hafif olması sebebiyle gerçek zamanlı uygulamalarda kullanım kolaylığı sağlar. Bu nedenle yapılan uygulamalarda bu algoritma tercih edilmiştir.

3 Spektrum Kestirimi

Bu bölümde alıcıdan alınan sinyalin spektrumunun etkin bir şekilde kestirilebilmesi için kullanılacak spektrum kestirim yöntemleri incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle incelenecek yöntemler parametrik ve parametrik olmayan yöntemler başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Bu yöntemler açıklanıp, Matlab ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır.

3.1 Parametrik Olmayan Yöntemler

Parametrik olmayan yöntemler sinyalin yapısı hakkında herhangi bir bilginin olmadığı durumlar için geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin genel olarak çözünürlük ve kestirim doğrulukları parametrik yöntemlere göre daha düşüktür ancak işlem yükleri daha hafiftir. Ayrıca ilgili sinyal üzerinde bir varsayım olmadığı için spektrum kestirimi ile ilgili birçok probleme direkt olarak uygulanabilmektedir. Bu yöntemler şu iki başlık altında incelenmiştir:

- Temel Parametrik Olmayan Spektrum Kestirim Yöntemleri
- Süzgeç Kümesi Spektrum Kestirim Yöntemleri

3.1.1.1 Temel Parametrik Olmayan Spektrum Kestirim Yöntemleri

3.1.1.2 Periodogram Yöntemi

Parametrik Olmayan yöntemlerden en temeli olan Periodogram yöntemi Denklem (1) ile güç spektrumunu kestirir.

$$\hat{\vartheta}(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{t=1}^N y(t) e^{-j\omega t} \right|^2 \quad (1)$$

Burada $\hat{\vartheta}(\omega)$ güç spektrum yoğunluğunu, $y(t)$ spektrumu incelenecek olan sinyali, N sinyalin örnek sayısını, ω da güç spektrum yoğunluğu kestirilecek olan frekansı ifade eder.

Periodogram yöntemi yanlı bir yöntemdir ve değişintisi yüksektir. Detaylı yanlılık ve değişinti analizleri P. Stoica ve R. Moses'in Spectral Analysis of Signals kitabı yardımıyla incelenebilir [2].

3.1.1.3 Pencere Tabanlı Yöntemler

Periodogram yönteminin çeşitli pencerelerle çarpılmasından Bartlett, Welch ve Daniell yöntemleri oluşur. Tüm bu yöntemler Periodogram yönteminin yüksek olan değişintisini düşürmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde yapılan işlemler sinyali bir pencere vektörü ile çarpıp Periodogram kestirimini bulmaya denk gelmektedir. Tüm bu pencere tabanlı yöntemlerde değişinti ile çözünürlük arasında ödünleşme vardır. Elde edilen spektrum kestirimlerinin değişintisi azalırken, çözünürlüğü kötüleşmektedir.

3.1.1.3.1 Bartlett Yöntemi

Bartlett yöntemi sinyale ait N örneği, M uzunlukta $L=N/M$ gruba ayırarak spektrum değişintisini azaltmayı amaçlar. Bu M ayrı gruba ait örneklerden j 'inci örnek grubu Denklem (2)'deki gibi gösterilebilir.

$$y_j(t) = y((j-1)M + t), \quad t = 1, \dots, M \quad (2)$$
$$j = 1, \dots, L$$

j numaralı örnek grubuna ait spektrum kestirimi ise Denklem (3) ile verilmiştir.

$$\hat{\vartheta}_j(\omega) = \frac{1}{M} \left| \sum_{t=1}^M y_j(t) e^{-j\omega t} \right|^2 \quad (3)$$

Bu durumda Bartlett spektrum kestirimi ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\hat{\vartheta}_B(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \hat{\vartheta}_j(\omega)$$

3.1.1.3.2 Welch Yöntemi

Welch yöntemi de Bartlett yöntemi gibi sinyali eşit parçalara ayırır ancak bu parçalar birbirleriyle örtüşebilirler. Böylece daha fazla örnek kullanarak çözünürlüğün Bartlett yöntemine göre artırılması hedeflenmiştir. Sinyal parçalara ayrıldıktan sonra Bartlett yöntemindeki gibi her bir parçanın Periodogram yöntemiyle spektrum kestirimini bulup, bulunan kestirimlerin ortalamasını alarak spektrum kestirimini hesaplanır.

Welch yöntemindeki j 'inci örnek grubuna ait sinyal Denklem (4) ile gösterilebilir.

$$y_j(t) = y((j-1)K + t), \quad t = 1, \dots, M \quad (4)$$
$$j = 1, \dots, S$$

Bartlett yönteminde olduğu gibi her örnek grubu için Periodogram yöntemiyle spektrum kestirimi Denklem (3)'teki gibi yapılır. Fakat K sayısının seçimine bağlı olarak oluşan toplam örnek grubu sayısı ve hesaplanan Periodogram sayısı değişmektedir. Nitekim örnek grupları zamanda birbirleriyle örtüşmektedir. Bu nedenle Welch spektrum kestirimi Denklem (5)'teki gibi hesaplanabilir.

$$\hat{\vartheta}_\omega(\omega) = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S \hat{\vartheta}_j(\omega) \quad (5)$$

Denklem (5)'te S değeri Denklem (4)'te verilen ve örtüşme miktarını belirleyen K değeri ile ilintili olarak değişmekte ve toplam elde edilen örnek grubu sayısına denk gelmektedir.

3.1.1.3.3 Daniell Yöntemi

Bu yöntemler dışında da pencere alma yöntemleri mevcuttur. Yöntemlerin özellikleri pencerenin yan lobunun yüksekliğine ve ana lobunun genişliğine göre değişir.

Daniell yöntemi sinyalin Periodogram yöntemiyle bulunan spektrum kestiriminin belli sayıda örneğe göre frekans alanında hareketli ortalamasını alır.

Herhangibir sinyale ait Periodogram değerleri $\hat{\vartheta}_p(\omega)$ farklı frekans değerleri için birbirinden ilintisiz rastsal değişkenler olduğu P. Stoica ve R. Moses'in Spectral Analysis of Signals kitabında gösterilmiştir [2]. Bu sebeple temel Periodogram yönteminin değişintisi frekans alanında alınan, yürüyen ortalama ile azaltılabilir.

Daniell yöntemi ile elde edilen spektrum kestirimi Denklem (6) ile hesaplanabilir.

$$\hat{\vartheta}_D(\omega) = \frac{1}{2J+1} \sum_{j=k-j}^{k+j} \hat{\vartheta}_p(\omega_j) \quad (6)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi}{\tilde{N}} k, \quad k = 0, \dots, \tilde{N} - 1$$

Burada \tilde{N} değeri N 'den çok daha büyüktür.

3.1.2 Süzgeç Kümesi Spektrum Kestirim Yöntemleri

Süzgeç Kümesi yöntemleri gözlenen sinyali önce bant geçiren bir süzgeçten geçirip, süzgeç çıkısındaki sinyalin gücünü hesaplayıp süzgeç bantgenişliğine bölmeye dayanır.

3.1.2.1 Çoklu İnceltmiş Kestirim Yöntemi

Rafine Süzgeç Kümesi Yöntemi (Refined Filter-Bank Method, RFB) yönteminde amaç temelbanttaki gücü maksimize edip toplam gücü sabitlemektir. Temelbanttaki gücün en büyük öz değerine karşılık gelen öz vektör en iyi filtreyi verir. Buna *slepian* denir. Eğer sadece ilk *slepian* kullanılırsa buna Rafine Süzgeç Kümesi denir. Birkaç filtre kullanılıp ortalaması alınırsa buna Çoklu İnceltmiş Kestirim (Multitaper Method, MTM) denir. Güç spektrum yoğunluğu Denklem (7)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\hat{\vartheta}(\omega) = \left| \sum_{n=1}^K h_{K-n} y(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (7)$$

h_{K-n} ilgili filtrenin dürtü yanıtını, K kullanılacak olan filtre sayısını ifade eder. Diğer semboller yukarıda kullanıldığı anlamlarda kullanılmıştır.

3.1.2.2 Capon (En Küçük Değişinti) Yöntemi

Capon yönteminde ise süzgeç, gözlem bilgisine yani ölçülen sinyale göre her seferinde tekrar tasarlanır. Tasarlanan süzgeç sinyale göre değiştiği için bu yöntem uyarlamalı bir yöntemdir. Tasarlanan filtreler her seferinde ilgili bant aralığındaki sinyali bozmadan geçirirken diğer bantlardan gelen sinyalin filtre çıkışındaki gücünü azaltmayı amaçlar. Bir başka deyişle Denklem (8)'de verilen en iyileme probleminin çözülerek filtre katsayıları olan h vektörü hesaplanmaktadır.

$$\min_h \mathbf{h}^H \mathbf{R} \mathbf{h} \quad \text{öyle ki} \quad \mathbf{h}^H \mathbf{v}(\omega) = 1 \quad (8)$$

N gözlem sinyalinin uzunluğu olmak üzere, standart yanlılığı olmayan özilinti kestirimi Denklem (9)'da görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

$$\hat{r}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=k+1}^N y[n] y^*[n-k] , \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (9)$$

Bu kestirimler kullanılarak özilinti matrisi oluşturulur.

Denklem (8)'deki $\mathbf{v}(\omega)$ vektörü, Denklem (10)'daki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{v}(\omega) = [1 \ e^{j\omega} \ \dots \ e^{j\omega(N-1)}]^T \quad (10)$$

Denklem (8)'de verilen en iyileme probleminin çözümünün Denklem (11)'deki gibi olduğu P. Stoica ve R. Moses'in Spectral Analysis of Signals kitabında gösterilmektedir [2].

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{R}_{yy}^{-1}\mathbf{v}(\omega)}{\mathbf{v}^H(\omega)\mathbf{R}_{yy}^{-1}\mathbf{v}(\omega)} \quad (11)$$

Denklem (11)'da \mathbf{R}_{yy} gözlem sinyalinin öz ilinti matrisini ifade etmektedir.

Denklem (11)'da verilen filtre katsayıları kullanılarak güç spektrum yoğunluğu frekansa bağlı olarak Denklem (12) ile gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\hat{\vartheta}(\omega) = \frac{1}{\mathbf{v}^H(\omega)\mathbf{R}_{yy}^{-1}\mathbf{v}(\omega)} \quad (12)$$

3.2 Parametrik Yöntemler

Parametrik yöntemler kullanılırken sinyalin belli bir modelinin olduğu kabul edilir ve bu modele ait parametreler kestirildikten sonra spektrum hesaplanır. Eğer kabul edilen model doğruysa parametrik yöntemler parametrik olmayan yöntemlerden daha iyi performans verirler. Parametrik yöntemler spektrumu kestirilecek olan sinyallerin özelliklerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

- Rasyonel Spektrum için Geliştirilmiş Parametrik Yöntemler
- Çizgi Spektrum için Geliştirilmiş Parametrik Yöntemler

3.2.1 Rasyonel Spektrum için Geliştirilmiş Parametrik Yöntemler

Rasyonel spektrum modeli, ilgili sinyalin spektrumunu $e^{-j\omega}$ teriminin polinomlarının rasyonel fonksiyonu olarak tanımlamaktadır. Bu durum matematiksel olarak Denklem (13)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\vartheta(\omega) = \frac{\sum_{k=-q}^q \gamma_k e^{-j\omega k}}{\sum_{k=-p}^p \rho_k e^{-j\omega k}} = \sigma^2 \left| \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \right|^2 \quad (13)$$

Denklem (13)'te $\gamma_{-k}^* = \gamma_k$ ve $\rho_{-k}^* = \rho_k$ olduğu kabul edilmektedir.

Denklem (13)'te verilen sinyal spektrum modelinin parametrik metodlar arasında önemli bir yeri vardır. Weirstrass teoremine göre Denklem (13)'te verilen q ve p değerlerinin yeterince büyük seçilmesi durumunda sürekli güç spektrumların tamamı bu model ile modellenenbilmektedir.

Denklem (13) incelendiğinde $\vartheta(\omega)$ 'nin, değışintisi σ^2 olan beyaz gürültünün, frekans tepkisi $\left|\frac{B(\omega)}{A(\omega)}\right|^2$ olan, bir filtreden geçmesi sonucu elde edilen bir sinyalin spektrumu olduğu düşünölebilir.

Yukarıda verilen formüllerin hepsi Z alanı içinde yazılabilir. Bu durumda aşğıdaki ifadeler elde edilir.

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^q b[k]z^{-k}}{\sum_{l=0}^p a[l]z^{-l}} \quad (14)$$

Denklem (14) zaman alanında Denklem (15) ile ifade edilebilir.

$$y[n] = \frac{B(z)}{A(z)}u[n] \quad (15)$$

Denklem (14)'deki $H(z)$, $y[n]$ ile $u[n]$ arasındaki transfer fonksiyonudur. Denklem (14)'de verilen $u[n]$ beyaz gürültüyü göstermektedir. Ayrıca z^{-1} birim geciktirmeyi ifade etmektedir.

Denklem (15)'in frekans karşılığı ise şöyledir:

$$\vartheta_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 \vartheta_{uu}(\omega)$$

Eğer $u[n]$ değışintisi σ^2 olan sıfır ortalamalı beyaz gürültü ise, Denklem (16) oluşur,

$$\vartheta_{yy}(\omega) = \sigma^2 \left|\frac{B(\omega)}{A(\omega)}\right|^2 \quad (16)$$

Denklem (15) ve Denklem (16)'da $\vartheta_{yy}(\omega)$ değeri güç spektral yoğunluğunu verir.

Denklem (14)'de pay kısmı MA kısmını oluşturur. Payda ise AR kısmını oluşturur. $a[l]$ değeri AR katsayılarıdır, $b[k]$ ise MA katsayılarıdır. Denklem (14)'ü sağlayan $y[n]$ sinyali ARMA(p, q) modeli ile modellenmiştir denir. p AR parametrelerinin sayısını q da MA parametrelerinin sayısını gösterir. Herhangi bir AR model sonsuz dereceli bir MA

model ile modellenebilir. Aynı şekilde herhangi bir MA model de sonsuz dereceli bir AR model ile modellenebilir.

Denklem (17)'de ARMA, AR ve MA modelleri özetlenmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{ARMA:} \quad & A(q) y[n] = B(q) u[n] \\
 \text{AR:} \quad & A(q) y[n] = u[n] \\
 \text{MA:} \quad & y[n] = B(q) u[n]
 \end{aligned} \tag{17}$$

Denklem (17)'de ARMA model için önerilen model Denklem (18)'deki gibi düzenlenebilir.

$$y[n] = - \sum_{l=1}^p a[l] y[n-l] + \sum_{k=0}^q b[k] u[n-k] \tag{18}$$

Bu model için oluşturulan matris formu Denklem (19) ile gösterilmiştir:

$$\begin{bmatrix} r_{yy}[0] & \cdots & r_{yy}[-(p-1)] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{yy}[p-1] & \cdots & r_{yy}[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a[1] \\ \vdots \\ a[p] \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_{yy}[1] \\ \vdots \\ r_{yy}[p] \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\mathbf{R}_{yy} \boldsymbol{\theta} = -\mathbf{r}_{yy} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{r}_{yy} \tag{21}$$

$r_{yy}[n]$ özilinti değerleridir, \mathbf{R}_{yy} ise özilinti matrisidir, $\boldsymbol{\theta}$ AR değişken vektörüdür.

Denklem (21) ile gösterilen form Yule-Walker eşitliğidir.

3.2.1.1 Özbağımlı Yöntemler (AR)

3.2.1.1.1 Yule-Walker Yöntemi

Yule – Walker Spektrum kestirim yönteminde önce öz ilinti değerleri kestirilir ardından Denklem (20) çözülerek AR değişkenleri bulunur.

$$\epsilon = \frac{\text{örnek sayısı}}{\text{AR parametre sayısı}}$$

ϵ değeri arttıkça değışinti düşer.

Yule-Walker yöntemi Çizgi Spektrum metodlarına göre yüksek sinyal gürültü oranında daha yüksek çözünürlüğe ulaşır. Örnek sayısı arttıkça Çizgi Spektrum metodlarının oluşturduğu spektrumun çözünürlüğü de Yule-Walker yöntemine göre artar. Aynı zamanda AR model derecesi arttıkça Yule-Walker kestiriminin çözünürlüğü artar. Ancak bu değışintiyi artırır ve spektrumda olmayan tepeler gözlemlenmeye başlanır.

3.2.1.1.2 En Küçük Kareler Yöntemi

Diğer bir AR modelleme yöntemi En Küçük Kareler (Least Squares, LSAR) yöntemidir. Gözlem bilgisinin p dereceli AR tip bir sinyal olduğu varsayılmıştır. Burada doğrusal öngörü yöntemi kullanılarak, p önceki örnekten $p + 1$ 'inci örnek tahmin edilmeye çalışılır. Toplam N adet gözlem bilgisinin mevcut olduğu varsayılır.

$$\boldsymbol{\varphi}[n] = (y[n-1], \dots, y[n-p])^T$$

$$e[n] = y[n] + \sum_{i=1}^p a_i y[n-i] = y[n] + \boldsymbol{\varphi}^T[n] \boldsymbol{\theta} \cong y[n] + \hat{y}[n]$$

$\hat{y}[n]$, $y[n]$ 'nin doğrusal tahmini ve $\boldsymbol{\theta}$, AR değişken vektörü olmak üzere, öngörü hatası değişintisi σ_p^2 için, Denklem (22)'de gösterilen eşitlik geçerlidir:

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= E\{|e[n]|^2\} = E\{[y^*[n] + \boldsymbol{\theta}^* \boldsymbol{\varphi}^H[n]][y[n] + \boldsymbol{\varphi}^T[n] \boldsymbol{\theta}]\} \\ &= r[0] + \mathbf{r}_p^* \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\theta}^* \mathbf{r}_p + \boldsymbol{\theta}^* \mathbf{R}_p \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (22)$$

$\boldsymbol{\varphi}^H[n]$, $\boldsymbol{\varphi}[n]$ değerinin eşleniğinin devriğidir.

$\boldsymbol{\theta} = -\mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{r}_p$ bilgisi kullanılarak Denklem (23)'e ulaşılır:

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= r[0] - \mathbf{r}_p^* \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{r}_p \\ \sigma_p^2 &= r[0] - \mathbf{r}_p^* \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (23)$$

Denklem (23) Yule-Walker eşitliğidir. Bu Denklem $N - p$ değer için çözülür, Denklemler birleştirilirse Denklem (24) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} y[p] & \cdots & y[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y[N-1] & \cdots & y[N-p] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a[1] \\ \vdots \\ -a[p] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u[p+1] \\ \vdots \\ u[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[p+1] \\ \vdots \\ y[N] \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{Y}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{u} = \mathbf{y} \quad (25)$$

Denklem (25) için hatayı minimize eden çözüm Denklem (26) ile verilmiştir:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = -(\mathbf{Y}^*\mathbf{Y})^{-1}(\mathbf{Y}^*\mathbf{y}) \quad (26)$$

Matris herhangi bir örnek ile başlayabilir ve sütun uzunluğu istenilen sayıda olabilir. Eğer matrisin ilk sütunu $y[1]$ örneğiyle başlayıp $y[N + p]$ örneği ile biterse kestirim Özilinti yöntemine karşılık gelir. Eğer $y(p + 1)$ örneğiyle başlayıp $y(N)$ örneğiyle biterse kestirim Ortak Değişinti yöntemine karşılık gelir.

N gözlem bilgisi sayısı arttıkça Yule-Walker yöntemi ve En Küçük Kareler yöntemi ile bulunan AR değişkenlerinin benzerlik miktarı artar. Yule-Walker yöntemi kullanılarak kestirilen AR modeli her zaman kararlıdır. Ancak En Küçük Kareler yöntemi ile kestirilen AR modeli kararsız da olabilir. Bunun yanında En Küçük Kareler yöntemiyle bulunan değişkenler gerçek değerlere daha yakındır.

3.2.1.2 Hareketli Ortalama Süreci Yöntemleri

Spektrumu MA model ile modelleyen yöntemler spektrumda daha çok vadiler olduğunda kullanılırlar. Ancak MA model herhangi bir spektrum aynı zamanda daha yüksek dereceli ARMA model olarak da modellenebilir. Bu nedenle bu yöntemler üzerinde durulmamıştır. Ancak İki-Aşamalı En Küçük Kareler yöntemi başlığı altında Durbin metodundan bahsedilmiştir.

3.2.1.3 Özbağlanımlı Hareketli Ortalama Süreci Yöntemleri

3.2.1.3.1 Değiştirilmiş Yule-Walker Yöntemi

ARMA modellemesi yapmak için kullanılan yöntemlerden biri Değiştirilmiş Yule-Walker Yöntemidir (Modified Yule-Walker ARMA Method, MYWARMA). Bu yöntemde Yule-Walker yöntemi ile kestirilen AR değişkenleri kullanılır. Gürültünün değişintisi σ^2 kabul edilirse:

$$\sigma^2 |B[w]|^2 = \sum_{k=-q}^q E\{(B[z]e[n])(B[z]e[n-k])^*\} e^{-jwk} = \sum_{k=-q}^q r_{MAk} e^{-jwk}$$

Denklem (7) kullanarak r_{n_k} eşitliği şöyle bulunur:

$$E\{(B[z]e[n])(B[z]e[n-k])^*\} = E\{(A[z]x[n])(A[z]x[n-k])^*\} = r_{MAk}$$

p , AR parametre sayısı, q MA parametre sayısı olmak üzere:

$$\hat{r}_{MA_k} = \begin{cases} \sum_{u=0}^p \sum_{v=0}^p \hat{a}_j \hat{a}_p^* \hat{r}[k+v-u], & k = 0, \dots, q \\ \hat{r}_{-n_k}, & k = -1, \dots, -q \end{cases}$$

\hat{r}_{MA_k} değeri Denklem (15)'teki eşitliğin sağ tarafının payının Güç Spektral Yoğunluğunun ters Fourier dönüşümüne karşılık gelir. Bu değeri elde ettikten sonra ARMA Güç Spektral Yoğunluğu (PSD) şöyle bulunur:

$$\hat{\vartheta}(\omega) = \frac{\sum_{k=-q}^q \hat{r}_{MA_k} e^{-j\omega k}}{|\hat{A}[\omega]|^2}$$

3.2.1.3.2 İki-Aşamalı En Küçük Kareler Yöntemi

İki-Aşamalı En Küçük Kareler (Least Squares ARMA Method, LSARMA) yöntemi ARMA model değişken kestirimi yapmak için kullanılan bir diğer yöntemdir. Önce gürültü sinyali kestirilip, bu sinyal kullanarak ARMA parametreleri kestirilir. Gürültü sinyalini kestirmek için ise, önce sinyal yüksek dereceli AR modeliyle kestirilir. Daha sonra ilk kısımda bulunan değişkenler ile Denklem (27) kullanılarak gürültü kestirilir.

$$(1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2} + \dots)y[n] = e[n] \quad n = P + 1, \dots, N \quad (27)$$

P dereceli AR kestiricisi için $N - P$ uzunluğunda gürültü kestirilir.

$$\begin{bmatrix} y[P] & \dots & y[P-p+1] & -e[P] & \dots & -e[P-q+1] \\ y[P+1] & \dots & y[P-p+2] & -e[P+1] & \dots & -e[P-q+2] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y[N-1] & \dots & y[N-p] & -e[N-1] & \dots & -e[N-q] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \\ b_1 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y[P+1] \\ y[P+2] \\ \vdots \\ \vdots \\ y[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e[P+1] \\ e[P+2] \\ \vdots \\ \vdots \\ e[N] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{z} = \mathbf{e} \quad (28)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = -(\mathbf{Z}^* \mathbf{Z})^{-1} (\mathbf{Z}^* \mathbf{z}) \quad (29)$$

Bu kestirimlerle ARMA değişkenleri Denklem (29) çözülerek bulunur. ARMA değişkenleri Denklem (28)'de yerlerine konularak En Küçük Kareler hatası bulunur.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-k} \hat{\mathbf{e}}^* \hat{\mathbf{e}}, \quad k = p + q$$

$\hat{\sigma}^2$ değeri, ARMA değişkenleri kullanılarak Denklem (16) ile güç spektral yoğunluğu bulunur. Bu yöntemde ikinci aşamada sadece MA parametreleri kestirilirse bu Durbin metoduna karşılık gelir.

Değiştirilmiş Yule-Walker yöntemi kullanıldığında negatif güç spektral yoğunluğu değerleri ortaya çıkabilir. Ancak İki-Aşamalı En Küçük Kareler yöntemi ile her zaman pozitif değerler bulunur. İki-Aşamalı En Küçük Kareler yöntemi yanlı bir kestirimdir. İlk aşamadaki AR parametre sayısı yani P arttırılarak yanlılık azaltılabilir. Ancak P değeri gözlem bilgisi sayısına yani N değerine yaklaşırsa ikinci aşamadaki parametre kestirimlerinin gerçekçiliği azalır.

3.2.2 Çizgi Spektrum İçin Geliştirilmiş Parametrik Metodlar

Çizgi Spektrum yöntemleri belli frekanslarda saf sinüsoidal bileşenlerden oluşan sinyalleri modellemek için kullanılırlar. Bu saf sinüsoidallerin birleşiminden oluşan sinyal Denklem (30)'daki gibi ifade edilebilir.

$$X(t) = \sum_{n=1}^p \alpha_n e^{j(\omega_n t + \varphi_n)} + e(t) \quad (30)$$

Burada α_n genlik, ω_n açısal frekans, φ_n ise başlangıç fazıdır. Çizgi spektrum yöntemlerinin çözünürlüğü çok yüksektir. Modelin derecesi bir başka deyişle sinyal içinde bulunan bileşenlerin sayısı doğru seçilirse tutarlıdır ve değişimleri düşüktür.

3.2.2.1 Çoklu Sinyal Sınıflandırma

Çoklu Sinyal Sınıflandırma (Multiple Signal Classification, MUSIC) yöntemi sinyal alt uzayının gürültü alt uzayına dik olduğu bilgisini kullanır.

Gözlem vektörünün özilinti değerleri Denklem (9)'daki gibi hesaplanarak öz ilinti matrisi bulunur. Özilinti matrisine özdeğer analizi yapılarak p adet sinüsoidal için en büyük p adet öz değer ile $\hat{\mathcal{S}}[u]$ vektörü oluşturulur. Bu öz değerlerin öz vektörleri sinyal alt uzayını oluşturur. Diğer öz değerlere ait öz vektörler de gürültü alt uzayını oluşturur.

$$\hat{\mathcal{S}}[u] = [s_1 \dots s_p] \quad \hat{\mathcal{G}}[u] = [g_{q-p} \dots g_q] \quad (31)$$

Sinyal ve gürültü alt uzayını tarayan özvektörlerin oluşturduğu vektörler Denklem (31)'de verilmiştir.

$$\hat{\vartheta}_{music}(\omega) = \frac{1}{\mathbf{v}^H(\omega) \hat{\mathbf{G}} \hat{\mathbf{G}}^H \mathbf{v}(\omega)} \quad (32)$$

$$\mathbf{v}(\omega) = [1 e^{j\omega} \dots e^{j\omega(N-1)}]^T$$

Frekans kestirimleri Denklem (32)'nin p adet en büyük tepesine karşılık gelen frekans değerlerine eşittir. Gürültü alt uzayının sinüsoidal varlığında sıfır değerini alacağı bilgisi ile Denklem (32)'nin değerinin sonsuza gideceği bilgisi kullanılmıştır. Bu sebeple algoritma sinüsoidal bulunan frekanslarda tepeler gözlemleneceği düşünülerek geliştirilmiştir.

3.2.2.2 Rotasyonel Değişmez Teknikler ile Parametre Kestirimi

Rotasyonel Değişmez Teknikler ile Parametre Kestirimi (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT) yönteminde ise

$$\mathbf{S}_1 = [\mathbf{I}_{m-1} \mathbf{0}] \mathbf{S} \quad \mathbf{S}_2 = [\mathbf{0} \mathbf{I}_{m-1}] \mathbf{S} \quad (33)$$

\mathbf{I}_{m-1} köşegeni üzerinde bulunan elemanları 1 diğer elemanları 0 olan birim matristir. $[\mathbf{I}_{m-1} \mathbf{0}]$ matrisinde bu matrise sağ taraftan 0 vektörü eklenmiştir. $[\mathbf{0} \mathbf{I}_{m-1}]$ matrisinde ise sol taraftan 0 vektörü eklenmiştir. Burada amaç \mathbf{S} vektörünün son satırını sıfırlamaktır.

$$\boldsymbol{\varphi} = (\mathbf{S}_1^* \mathbf{S}_1)^{-1} \mathbf{S}_1^* \mathbf{S}_2 \quad (34)$$

Denklem (33) çözüldükten sonra $\boldsymbol{\varphi}$ 'nin özdeğerlerinin açıları kestirilmek istenen frekanslara karşılık gelir. Bu frekanslar spektrumda sinüsoidallerin bulunduğu frekanslardır.

3.2.2.3 En Küçük Norm Yöntemi (Minimum Norm Method, MN)

Öklid normu $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x}^* \mathbf{x}}$ olarak tanımlanmak üzere, gürültü alt uzayında Öklid normu en küçük olan vektör, $\hat{\mathbf{g}}$ vektörü olarak seçilir.

$$\hat{\vartheta}_{min-norm}(\omega) = \frac{1}{\left| \mathbf{v}^H(\omega) \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{\mathbf{g}} \end{bmatrix} \right|^2} \quad (35)$$

Denklem (35)'in p en büyük tepesine karşılık gelen frekans değerleri frekans kestirimlerini oluşturur. Bu frekanslar spektrumda sinüsoidallerin bulunduğu frekanslardır. p değeri ise çizgi spektrumdaki sinüsoidal sayısıdır. Bu değer bilinmiyorsa derece kestirimi ile bulunabilir.

Burada $\hat{\mathbf{g}}$ vektörünün tek bir sütun seçilmesindeki amaç işlem yükünü azaltmaktır. MN yöntemi işlemsel yükünün hafifliğine rağmen MUSIC yöntemine yakın sonuç verir.

3.2.2.4 Yüksek Dereceli Yule Walker Yöntemi

Yüksek Dereceli Yule Walker Yöntemi (High Order Yule Walker Method, HOYW) Çizgi Spektrum yöntemi olmasına rağmen L dereceli ARMA modeline dayanır.

$$\mathbf{r} = \left\{ \begin{bmatrix} x(t-L-1) \\ \vdots \\ x(t-L-M) \end{bmatrix} [x^*(t) \dots x^*(t-L)] \right\} \quad (36)$$

Denklem (36)'da verilen matris için gerekli çarpımlar gerçekleştirildiğinde modelinin ilk kolonu Denklem (37)'nin sağ tarafının negatifini oluşturur. Diğer kısım ise Denklem (37)'nin sol tarafında bulunan matrisi oluşturur.

$$\begin{bmatrix} \hat{r}(L) & \dots & \hat{r}(L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{r}(L+M-1) & \dots & \hat{r}(M) \end{bmatrix} \hat{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \hat{r}(L+1) \\ \vdots \\ \hat{r}(L+M) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\hat{\mathbf{R}}\hat{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{r}}$$

$\hat{\mathbf{R}}$ ortak değışinti matrisinin tekil değeri ayrışımı yapılır.

$$\mathbf{U}\mathcal{E}\mathbf{V}^* \cong [\mathbf{U}_1 \ \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathcal{E}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathcal{E}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^* \\ \mathbf{V}_2^* \end{bmatrix}$$

Burada \mathbf{U}_1 'in boyutu n , \mathbf{U}_2 'nin boyutu $M - n$ 'dir.

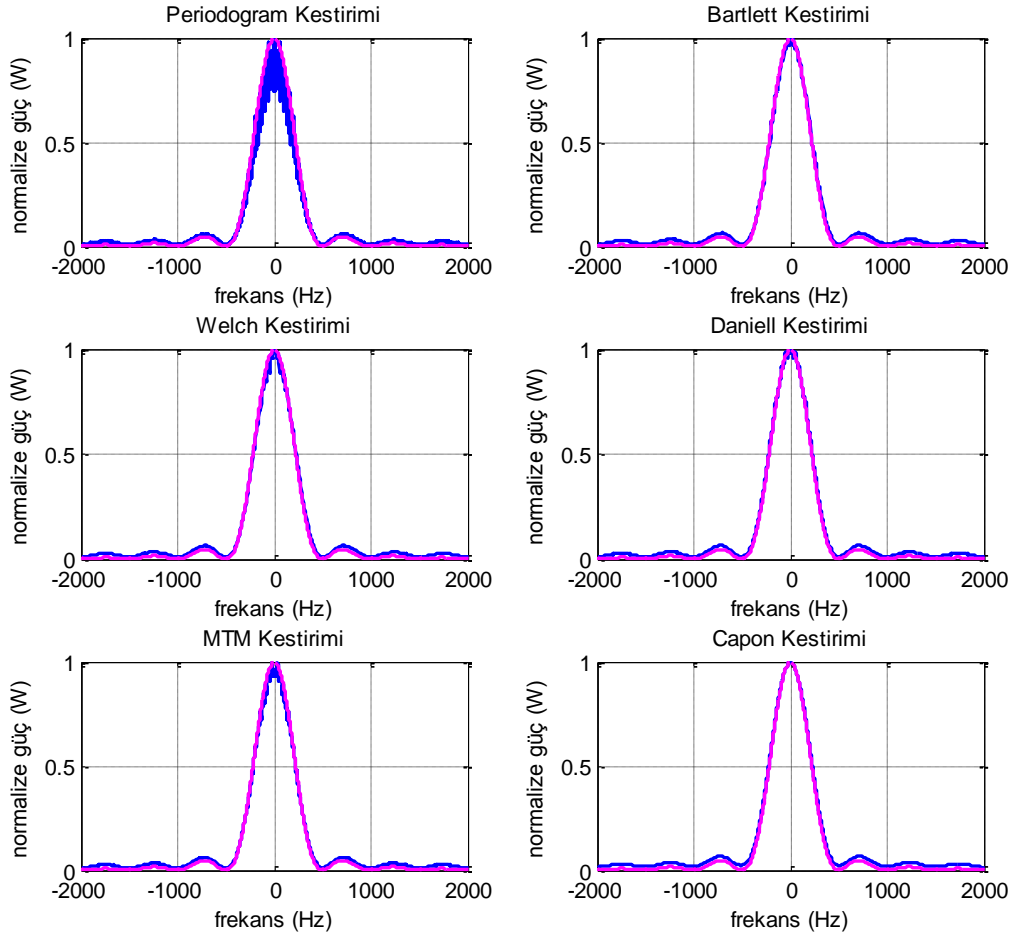
$$\hat{\mathbf{b}} = -\mathbf{V}_1\mathcal{E}_1^{-1}\mathbf{U}_1^* \begin{bmatrix} \hat{r}(L+1) \\ \vdots \\ \hat{r}(L+M) \end{bmatrix}$$

$\hat{\mathbf{b}}$ kestirim değeri'dir. Bu değeri bulunduktan sonra frekans kestirimleri bu köklerin açıları olarak elde edilir. L 'i n 'den büyük seçmek doğruluğu genellikle artırır, ancak bazen spektrumda olmayan tepeler görülebilir. $L = n$ seçildiğinde böyle bir risk yoktur.

3.3 Benzetim Çalışmaları

Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2'de bahsedilen parametrik ve parametrik olmayan temel spektrum kestirim algoritmaları Matlab ortamında incelendi. Matlab ortamında Periodogram, Bartlet, Welch, Daniell, MTM, Capon, YW, LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, HOYW, MN yöntemleri benzetim çalışmaları ile uygulandı.

1024 örnek uzunluğundaki mesaj vektörü, Şekil 3-1, Şekil 3-2, Şekil 3-3, Şekil 3-4, Şekil 3-5, Şekil 3-6'da belirtilen modülasyon türleri ile sembol uzunluğu 8 örnek olacak şekilde modüle edilmiştir. Sinyal gürültü oranı 10dB olacak şekilde toplanır beyaz Gauss gürültüsü eklenmiştir. 200 Monte Carlo benzetimi için çeşitli spektrum kestirim yöntemleri ile spektrum kestirimi yapılmış, kestirimlerin ortalaması elde edilip çizdirilmiştir. Örnekleme frekansı 4kHz'dir.



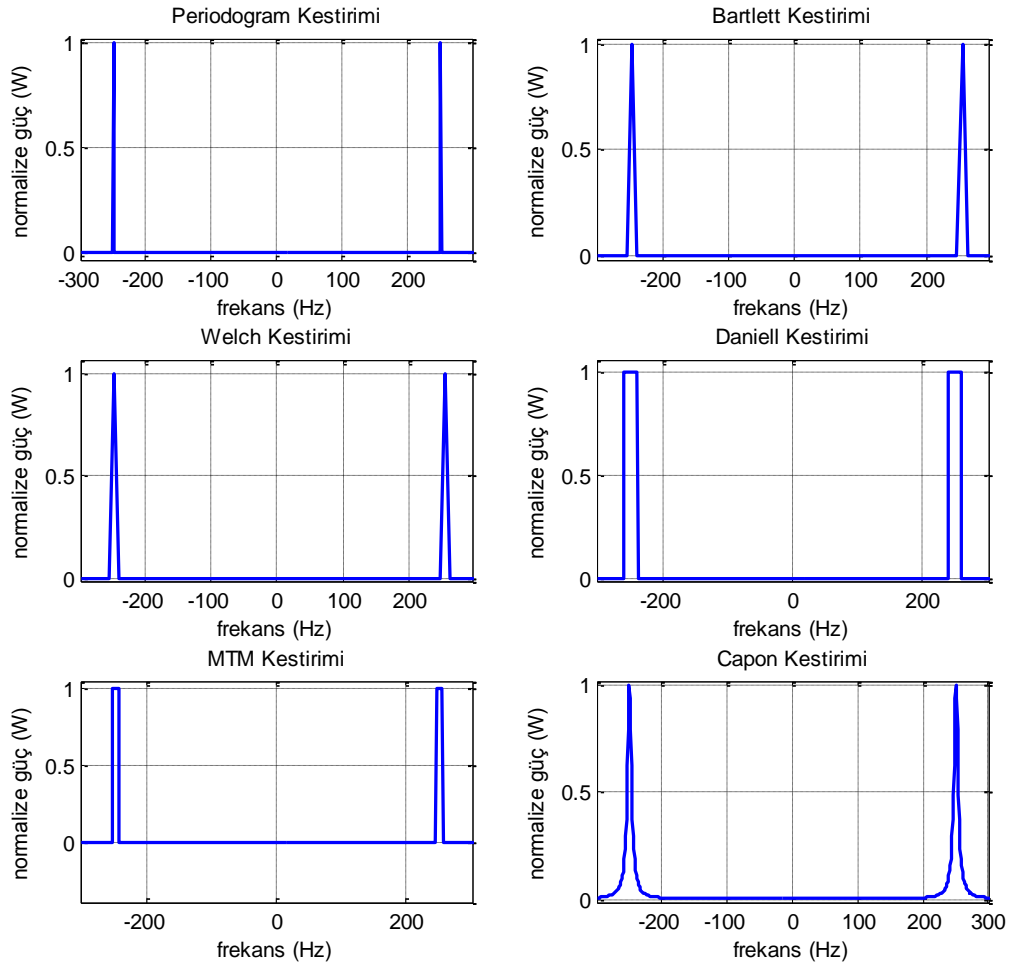
Şekil 3-1 10dB sinyal gürültü oranına sahip BPSK ile modüle edilmiş sinyalin Periodogram, Bartlett, Welch Daniell, MTM, Capon yöntemleri ile kestirilen spektrumu (Mavi çizgi kestirilen spektrum, pembe çizgi kuramsal spektrumdur.)

Şekil 3-1 BPSK modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyalin parametrik olmayan spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrumunu göstermektedir.

Parametrik olmayan yöntemlerden en temeli ve işlem yükü en az olan Periodogram yöntemi ile, çözünürlüğün yüksek ancak değişintinin de yüksek olduğu görölmektedir. Aynı zamanda bu yöntemde yanlılığın var olduğu da bilinmektedir. Yanlılık örnek sayısının arttırılmasıyla düşürülebilir. Periodogram yönteminin çözünürlüğü $\left(\frac{1}{\text{örnek sayısı}}\right)$ olarak ifade edilir.

Pencere Alma yöntemleri ile Periodogram yönteminin değişintisi düşürölmeye çalışılmıştır. Şekil 3-1’de Welch ve Bartlet yöntemi ile kestirilen spektrum çizimlerinde ortalama spektrum kestirim eğrisi gözle görölr miktarda düzleşmiştir. Ancak bu etkinin karşılığı olarak çözünürlük düşmüş ve Şekil 3-2’de göröldüğü gibi Welch ve Bartlet yöntemi ile kestirilen spektrum çizimlerinde görölen tepeler Periodogram kestirimine göre genişlemiştir. Bu genişlik kestirimin çözünürlüğüne eşittir.

Pencere alma yöntemleri değişintiye düşürse de uygulanan pencerenin ana lob genişliği ve yan lob yüksekliği spektrumu Şekil 3-2’de göröldüğü gibi bozmaktadır. Ana lob genişliği spektrumun çözünürlük sınırını belirler. Bu değer ana lob genişliğinin frekans değeri olan $(1 / \text{pencere genişliği})$ ’dir. Bu da Şekil 3-2’de Bartlet ve Welch çizimlerindeki dürtünün genişliğine eşittir. Gerçek hayat için bu değer (örnekleme frekansı / pencere genişliği) olarak düşünölebilir.



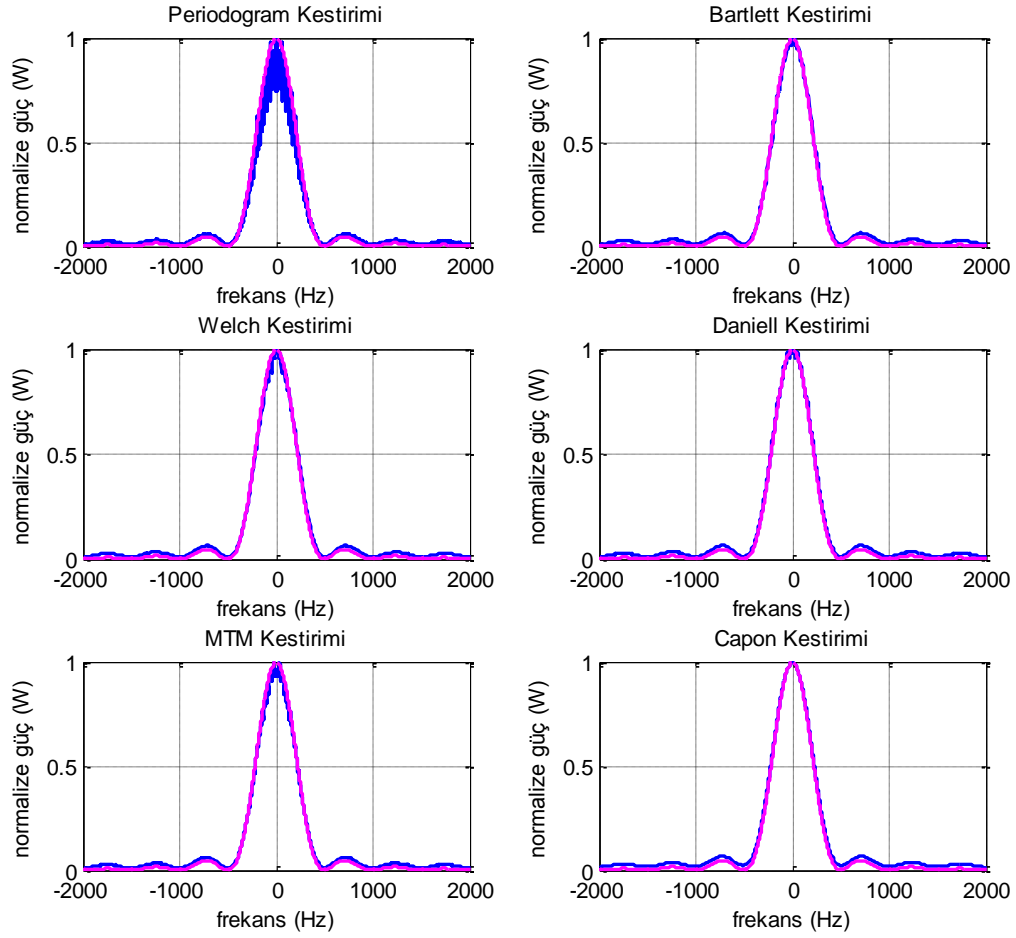
Şekil 3-2 10dB sinyal gürültü oranına sahip BPSK ile modüle edilmiş sinyalin Periodogram, Bartlett, Welch Daniell, MTM, Capon yöntemleri ile kestirilen spektrumu (Yakınlaştırılmıştır.)

Şekil 3-2 BPSK modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyalin parametrik olmayan spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrumunu göstermektedir.

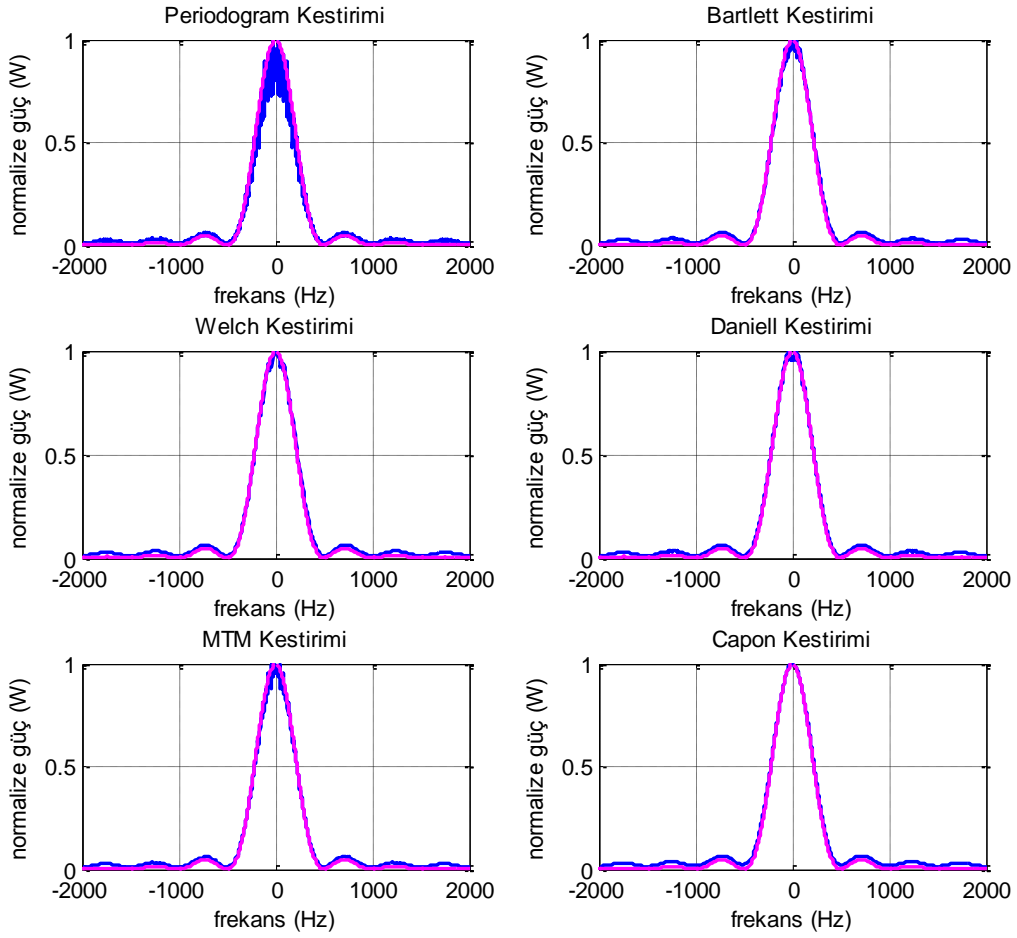
Ana lob genişliği arttıkça spektrumun düzleştiği görülür. Buna *sıvanma* denir. Bu nedenle ana lob genişliği arttıkça çözünürlük düşer. Yan loblar ise gücü, gerçekte gücün yüksek olduğu bantlardan, düşük olduğu bantlara transfer eder. Buna *sızıntı* denir. Bu da gerçekte spektrumun sıfır olduğu kısımlarda güç görülmesine sebep olur. Bu etki Şekil 3-2’de Bartlett ve Welch çizimlerinde iki tepenin arasındaki yükselti olarak görülmektedir. Yan lob ve ana lob etkisi çok tepeli spektrumlarda etkisini daha çok gösterdiği için Şekil 3-2’de bu etkiler daha net görülmektedir.

Bartlett yöntemi ile Welch yöntemi arasındaki fark çizimlerde net görülememektedir ancak gözlem bilgisinin çok düşük olduğu uygulamalarda Welch yönteminin değişintiyi daha fazla düşüreceği aynı zamanda çözünürlüğü de arttıracakđı bilinmektedir.

Daniell yönteminde ise ortalama alma işlemleri frekans alanında yapılır. Bu da diğer yöntemler gibi pencere ile çarpmaya karşılık gelir. Bu yöntemin de değişintiyi düşürdüğü gözlemlendi. Ancak pencere uzunluğu daha kısa olduğu için



Şekil 3-1'de görüldüğü gibi değişinti daha çok düştü. Buna karşılık çözünürlüğün de Bartlett ve Welch yöntemlerinden daha düşük olduğu Şekil 3-2'deki tepenin genişliğinden açıkça görülmektedir.



Şekil 3-3 10dB sinyal gürültü oranına sahip 16QAM ile modüle edilmiş sinyalin Periodogram, Bartlett, Welch Daniell, MTM, Capon yöntemleri ile kestirilen spektrumu (Mavi çizgi kestirilen spektrum, pembe çizgi kuramsal spektrumdur.)

Şekil 3-3 16QAM modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyalin parametrik olmayan spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrumunu göstermektedir.

Periodogram yöntemi için çözünürlük hesabı şöyledir:

$$\text{Örnekleme Frekansı} = 4 \text{ kHz} \quad \text{Örnek Sayısı} = 4096$$

$$\text{Çözünürlük} = \frac{\text{Örnekleme Frekansı}}{\text{Örnek Sayısı}} = 0.976 \text{ Hz}$$

Bartlett ve Welch yöntemleri için pencereler 512 örnek uzunluğunda alınmıştır. Bu durumda çözünürlük şöyle değişir:

$$\text{Çözünürlük} = \frac{\text{Örnekleme Frekansı}}{\text{Pencere uzunluğu}} = 7.812 \text{ Hz}$$

Çözünürlüğün yaklaşık 8 kat düştüğü görülmektedir.

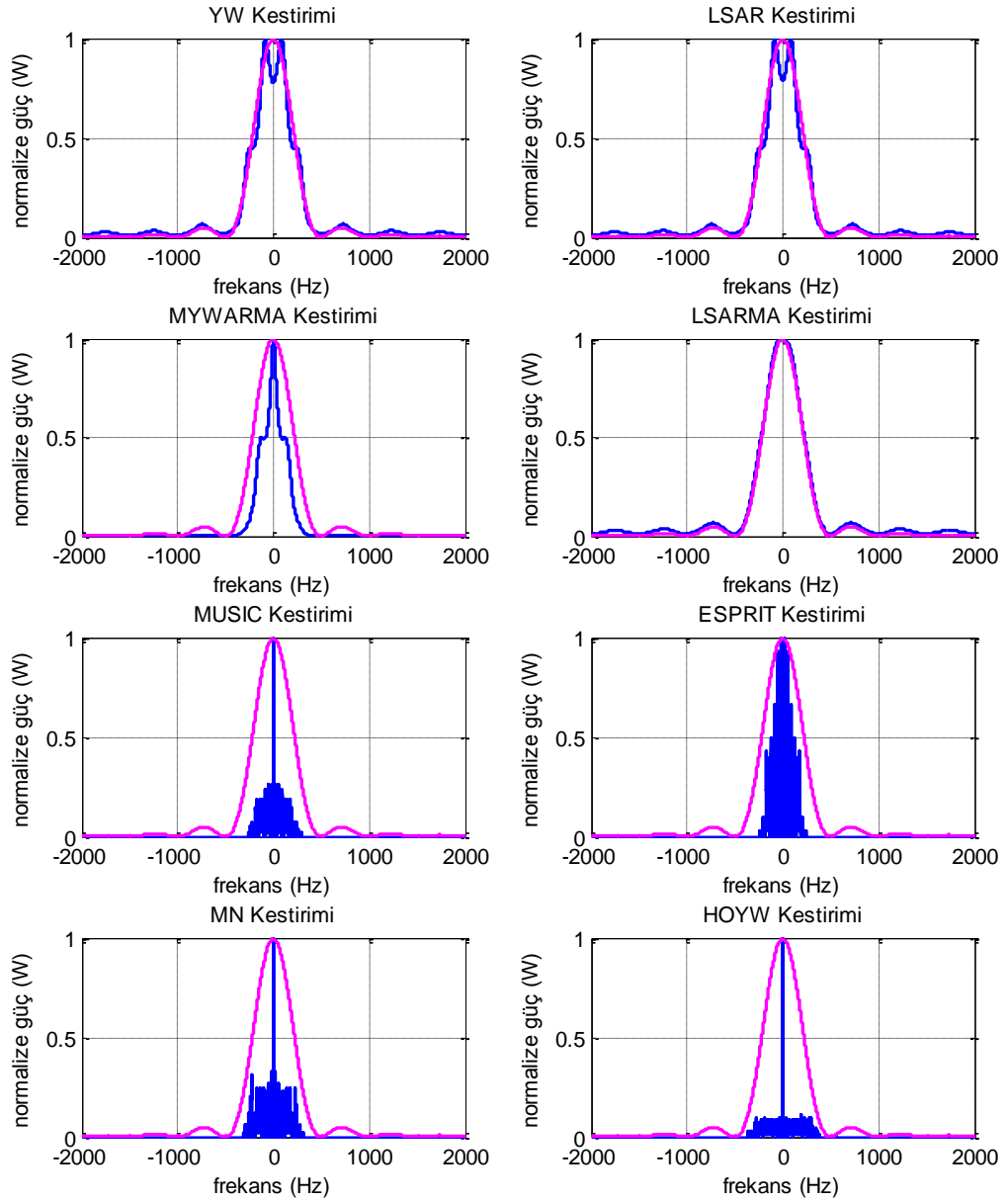
Süzgeç kümesi yöntemlerinden Çoklu İnceltilmiş Kestirim yöntemi ile yapılan kestirimlerde değişiminin Periodogram yöntemine göre düşük olduğu ancak pencere alma yöntemlerinden daha yüksek olduğu Şekil 3-1 ve Şekil 3-3 yardımıyla görüldü. Ancak çözünürlüğün pencere alma yöntemlerinden yüksek olduğu Şekil 3-2'deki MTM kestirimindeki tepelerin genişliğinin, diğer yöntemlerle yapılmış kestirimlerdeki tepelerin genişliğinden küçük olduğu gözlemlendi. Capon yönteminin ise çok düşük değişimi gösterdiği görüldü. Şekil 3-1 ve Şekil 3-3'te bu fark daha net gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan incelemelerde MTM yöntemindeki filtre sayısının arttırılmasıyla değişimi ve çözünürlüğün beklenildiği gibi düştüğü görüldü.

Çoklu İnceltilmiş Kestirim yönteminin uygulanmasında beyaz gürültü sebebiyle oluşmuş çıkış gücünün tekil değer ayrışımı işleminin, verinin uzunluğu nedeniyle Matlab'da hesaplanamadığı görüldü. Bunun yerine bu değer uyarlamalı bir yaklaşımla yaklaşık olarak hesaplanabilir. Denklem (39) ile değeri 1 olan özdeğerlere karşılık gelen öz vektörler hesaplanabilmektedir [2]. N örnek sayısını ifade etmektedir.

$$u(w) = [1 e^{-jw} \dots e^{-jw(N-1)}]^T \quad (38)$$

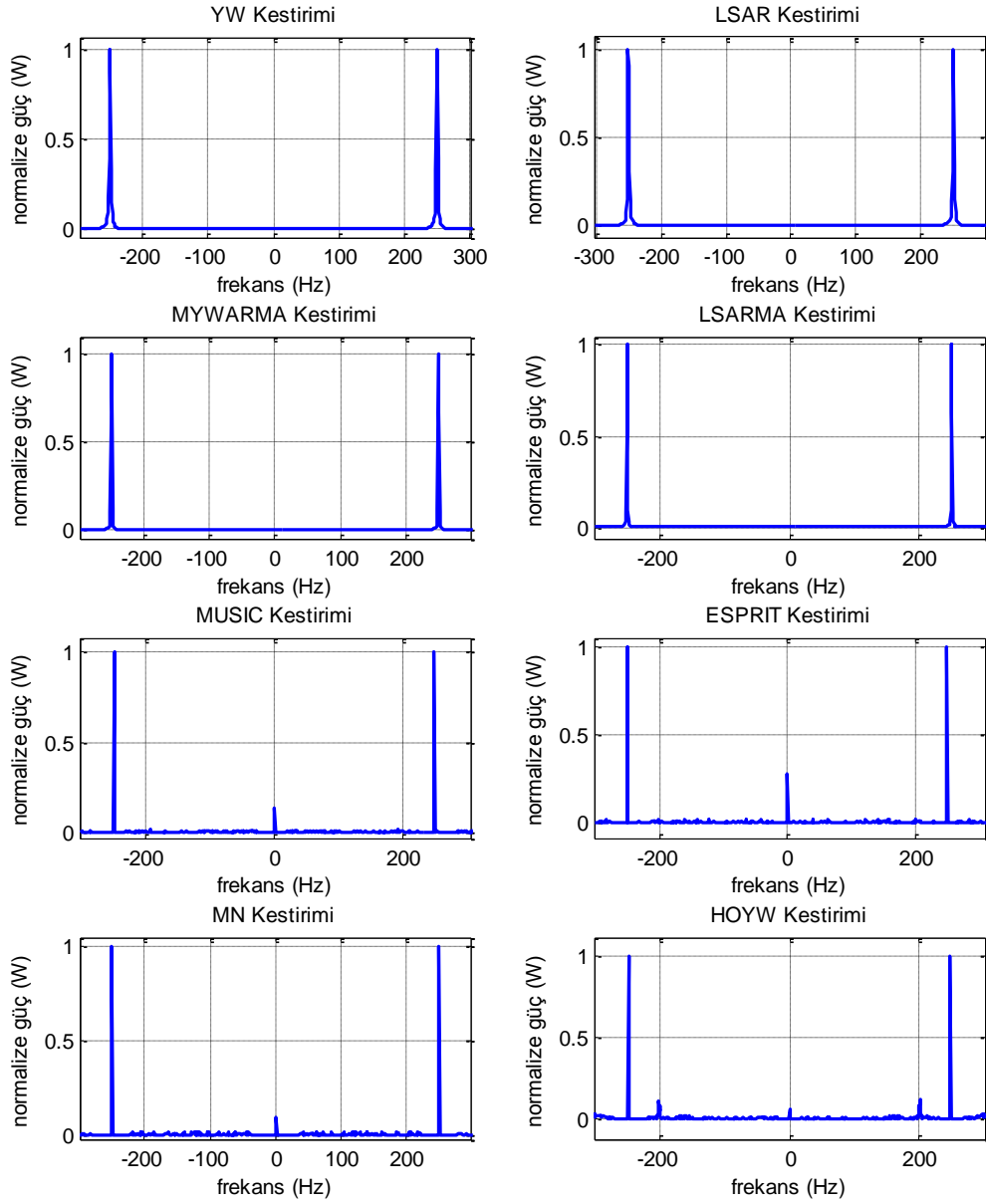
$$\left\{ u\left(\frac{2\pi}{N}k\right) / \sqrt{N} \right\}, \quad k = \left(-\frac{N}{2} + 1\right) \dots \dots \frac{N}{2} \quad (39)$$

Bu uyarlamalı yaklaşım bilinen tekil değer ayrışımı yapma işleminden çok daha hızlıdır ancak bu yöntemde, filtre sayısının çift sayı olarak seçilme zorunluluğu vardır.



Şekil 3-4 10dB sinyal gürültü oranına sahip BPSK ile modüle edilmiş sinyalin YW, LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, MN ve HOYW yöntemleri ile kestirilen spektrumu (Mavi çizgi kestirilen spektrum, pembe çizgi kuramsal spektrumdur.)

Şekil 3-4 BPSK modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyalin parametrik spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrumunu göstermektedir.

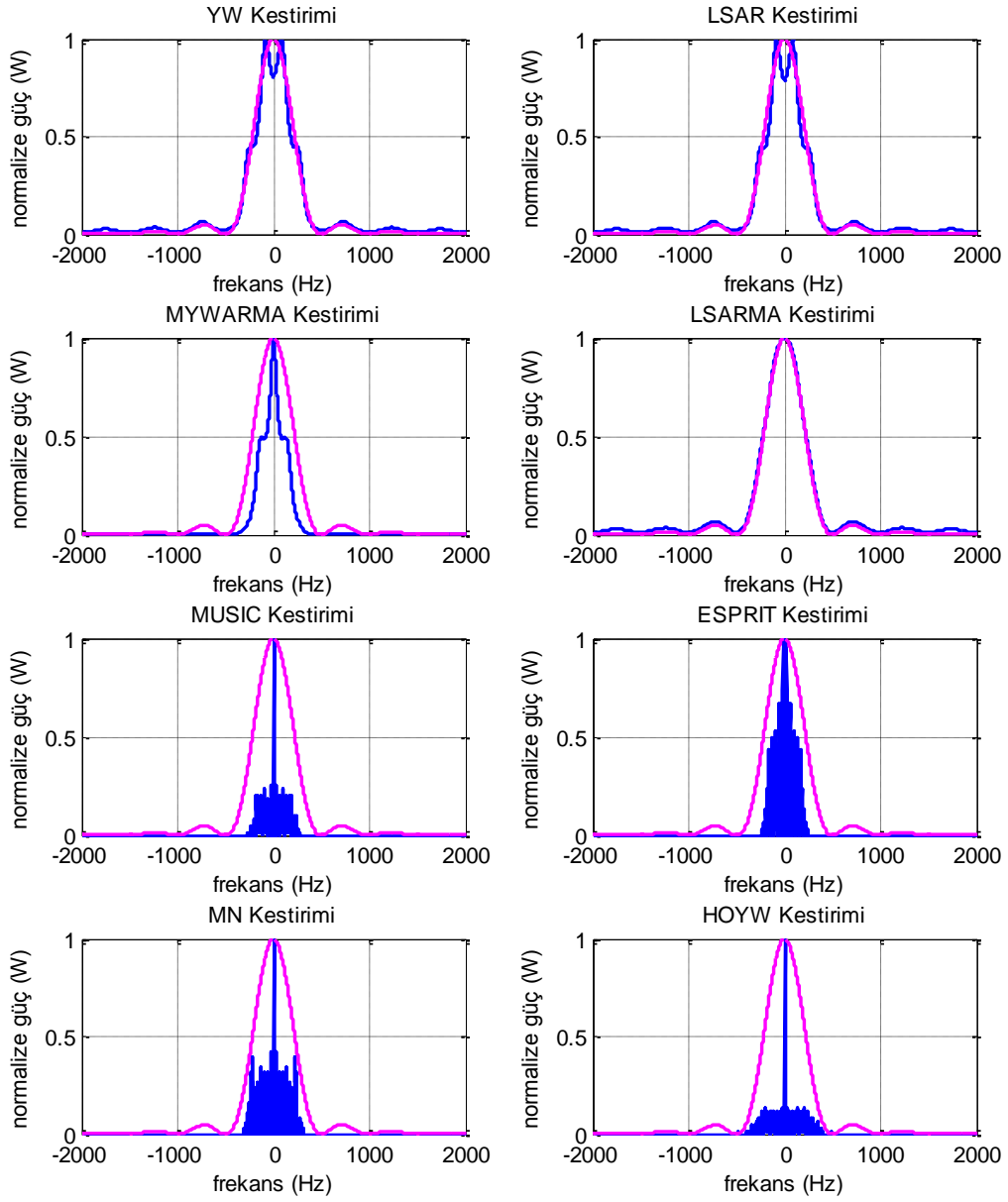


Şekil 3-5 10dB sinyal gürültü oranına sahip BFSK ile modüle edilmiş sinyalin LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, MN ve HOYW yöntemleri ile kestirilen spektrumu (Yakınlaştırılmıştır.)

Şekil 3-5 BFSK modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyalin parametrik spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrumunu göstermektedir.

Rasyonel Spektrumlu yöntemler incelenirken yüksek dereceli modellemenin spektrumdaki tepe ve vadileri kestirmede daha başarılı olduğu bilgisiyle, herhangi bir yüksek derece olarak, AR(16) ve ARMA(16,16) dereceleri, derece kestirimi yapmaksızın seçildi. Burada derece kestirimi yapmanın getireceği hesapsal yük nedeniyle derece kestirimi yapılmamıştır. Seçilen yüksek derecelerle spektrum kestiriminin beklenen spektruma yakın sonuç verdiği gözlemlendi. Ancak düşük derece seçimi ile beklenen spektrumun elde edilemediği gözlemlendi. Gözlem vektörünün uzunluğu yüksek olduğu için Yule Walker ve En Küçük Kareler yöntemleri ile yapılan kestirimlerin Şekil 3-6'da ilgili grafiklerde görüldüğü gibi, birbirlerine çok benzer olduğu beklendiği gibi görüldü. 16QAM ve BPSK modülasyon spektrumları düz yapıda olduğu ve ARMA modelin de spektrumdaki tepeleri ve vadileri modellediği bilindiği için Şekil 3-4'de ve Şekil 3-6'da ilgili grafiklerde bu tekniklerle yapılan kestirimlerin değişintisinin yüksek olduğu gözlemlendi. Ayrıca bu spektrumlarda bazı var olmayan tepelerin varlığı da beklendiği gibi görüldü.

Çizgi spektrum yöntemlerinin çözünürlüğünün rasyonel spektrum yöntemlerinden daha yüksek olduğu bilgisi Şekil 3-5'te ilgili grafiklerle doğrulandı. Çizgi Spektrum yöntemleri BFSK modülasyonun tepeli grafiğini kestirmede nispeten başarılı olsa da bu yöntemlerle vadili BPSK ve 16QAM spektrumlarını kestirmede Şekil 3-4'de ve Şekil 3-6'da görüldüğü gibi başarılı olunamamıştır. Bu yöntemlerle BFSK spektrumu başarılı bir şekilde kestirilse dahi sistemin gerçek derecesini bilmemiz gerektiği görüldü. Bu modülasyonda spektrum derecesi olarak 2 değeri alınmıştır. Bu sorun Rasyonel Spektrum kestirim yöntemlerindeki gibi çok yüksek derece seçilerek çözülemedi. Bu nedenle bu yöntemlerin gözü kapalı spektrum kestirimi için uygun olmadıkları gözlemlendi.



Şekil 3-6 10dB sinyal gürültü oranına sahip 16QAM ile modüle edilmiş sinyalin YW, LSAR, MYWARMA, LSARMA, MUSIC, ESPRIT, MN ve HOYW yöntemleri ile kestirilen spektrumu

Şekil 3-6 16QAM modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyalin parametrik spektrum kestirim yöntemleri ile kestirilen spektrumunu göstermektedir.

Data seçiminde öncelikle daha uzun, 204800 örnek uzunluğunda 20MHz sinyal seçilmiş ancak parametrik yöntemlerdeki ve Capon yöntemindeki ters alma ve tekil değer ayrışımı gibi işlemlerin Matlab ortamında gerçekleştirilememesi ya da çok uzun sürmesi sebebiyle örnek sayısı azaltılmıştır. Parametrik olmayan yöntemlerin işlem kolaylığı ve sinyal hakkında bilgi gerektirmemesi açısından modülasyon kestirimi için daha elverişli olduğu tespit edilmiştir.

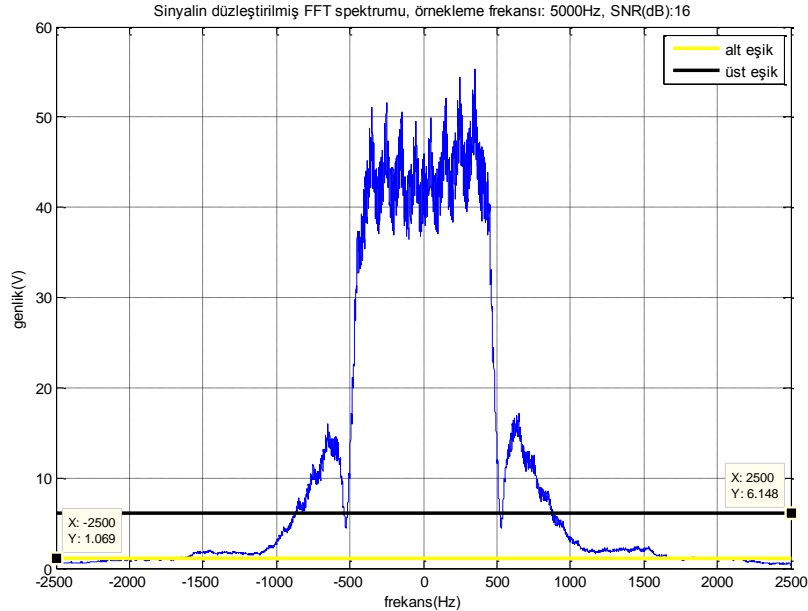
Bu analizler doğrultusunda Welch yönteminin kullanılması uygun görülmüştür. Welch yöntemi parametrik olmaması sebebiyle parametrik yöntemlere, gözü kapalı kestirimde, üstünlük sağlamaktadır. Periodogram yönteminin yüksek olan değişimini düşürür. Daniell ve Bartlett yöntemlerine göre özellikle örnek sayısının az olduğu durumlarda daha yüksek çözünürlükle kestirim yapar. Capon ve MTM yöntemlerinden ise çok daha hızlıdır. Bu bilgiler ışığında bantgenişliği ve sinyal gürültü oranı kestirimlerinde Welch yöntemi ile spektrum kestirilmiştir.

4 Sinyal Gürültü Oranı Kestirimi

Bu bölümde alıcıdan alınan sinyalin ya da spektrumu kestirilmiş olan sinyalin sinyal gürültü oranının ve bantgenişliğinin kestirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bu iki kestirimi birden yapabilen Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması incelenecektir. Bu yöntemin genel çalışma prensipleri açıklanacak ardından benzetim çalışmaları yer alacaktır.

Spektrumu kestirilen genişbantlı sinyalin içerdiği darbantlı sinyallerin kestirilmesi için önerilen yöntemlerden bir kısmı bir eşik değeri belirleyerek sinyalin bantgenişliğinin ve sinyal gürültü oranının kestirilmesine dayanır. Bu yöntemler belirlenen eşik değerini geçen darbantlı sinyal parçalarında sinyal varlığını kabul eder. Böylece eşik değeri sinyal varlığının kestirilmesi için bir kriter olarak seçilir. Ancak bu yöntemlerin etkin şekilde kullanılabilmesi için eşik değerinin doğru seçilmesi çok önemlidir. Çünkü eşik değeri olması gerekenden büyük seçilirse bazı sinyaller kaçırılır, küçük seçilirse gürültü etkisi sinyal varlığı olarak algılanmaya başlar.

Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması ise tek eşik değeri yerine çift eşik değeri kullanarak bu fikri geliştirmiştir. Böylece tek eşikli uygulamalardaki eşik ayarlanması sorunu aşılma çalışılmıştır.



Şekil 4-1 Çift Eşiklemeye Dayanan Sınırlama Algoritması ile bulunan alt ve üst eşikler

LAD ile eşik bulma; Ardışık Ortalama Alma yöntemine dayanır. Ortalama bulma işleminde ise Gauss dağılımlı gürültünün gücünün ortalamasının Rayleigh dağılım gösterdiği bilgisini kullanılmıştır [5].

$P_{FA,DES}$ sadece gürültünün var olduğu ortamda eşik değerinin üstündeki örnek sayısı, yani hatalı tespit edilmesine izin verilen örnek sayısını ifade etmektedir.

Örneğin alt ve üst eşik için şu iki değer seçilebilir:

$$P_{FA,DES_{Alt}} = 0.07 \quad P_{FA,DES_{Üst}} = 10^{-6}$$

$P_{FA,DES_{Alt}}$ parametresinin 0.07 olması tüm örneklerin %7'sinin sinyal örnekleri sayılacağı anlamına gelir. Burada başlangıçta örneklerin Gauss gürültü örnekleri olduğu varsayımı yapılmıştır.

$P_{FA,DES_{Alt}}$ ve $P_{FA,DES_{Üst}}$ değerleri kullanılarak çarpan değeri hesaplanır:

$$T_{CME} = -\ln(P_{FA,DES})$$

Bu çarpan değerleri eşik değeri ortalamaya göre belirler. Algoritmanın ilk adımı olarak sinyalin gücü hesaplanır. Güç örnekleri büyüklük sırasına dizilir. Bu örneklerin en küçük kısmından belli bir yüzdesi ilk eşik değeri hesaplamak için gürültü örnekleri olarak ayrılır. Bu örnekler ilk gürültü setini oluşturur. Bu örneklerle aşağıdaki eşitlikten ilk eşik değeri hesaplanır.

$$T_h = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |x_i|^2 \cdot T_{CME}$$

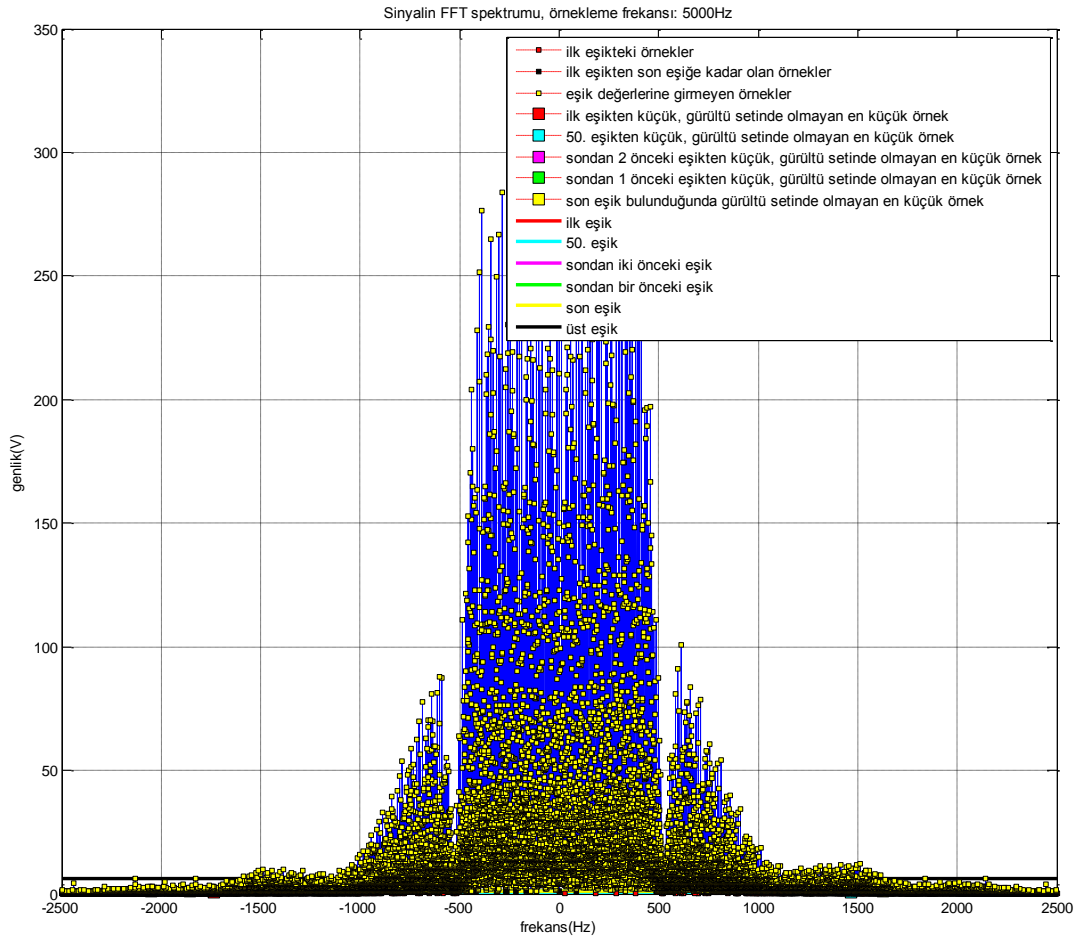
Daha sonra eğer bu eşik değerinin altında ilk sette olmayan örnekler varsa bu örneklerin en küçüğü de hesaba katılarak eşik değeri tekrar hesaplanır. Bu şekilde eşik değerinin altında bir önceki setin dışında örnek kalmayınca kadar işlem özyinelemeli olarak tekrarlanır.

Alt eşik ve üst eşik için bu işlemler tekrarlanır. Bu iki eşik değeri belirlendikten sonra alt eşik değerinin altında kalan örneklerin oluşturduğu set gürültü seti olarak kabul edilir. Alt eşik değerini geçen sinyal parçalarından üst eşik değerini de geçen parçalar, darbant sinyallerin bulunduğu parçalar olarak kabul edilir ve buralarda anlamlı sinyal parçalarının var olduğu kabulü yapılır.

Bantgenişliği bulunan darbant sinyaller için, alt eşik değeri ile sınırlanan genişliktir. Sinyal gürültü oranı ise bu darbantlı sinyaller için, sinyalin olduğu banttaki ortalama gücün gürültü setinin ortalama gücüne oranı şeklinde hesaplanır.

4.1 Benzetim alışmaları

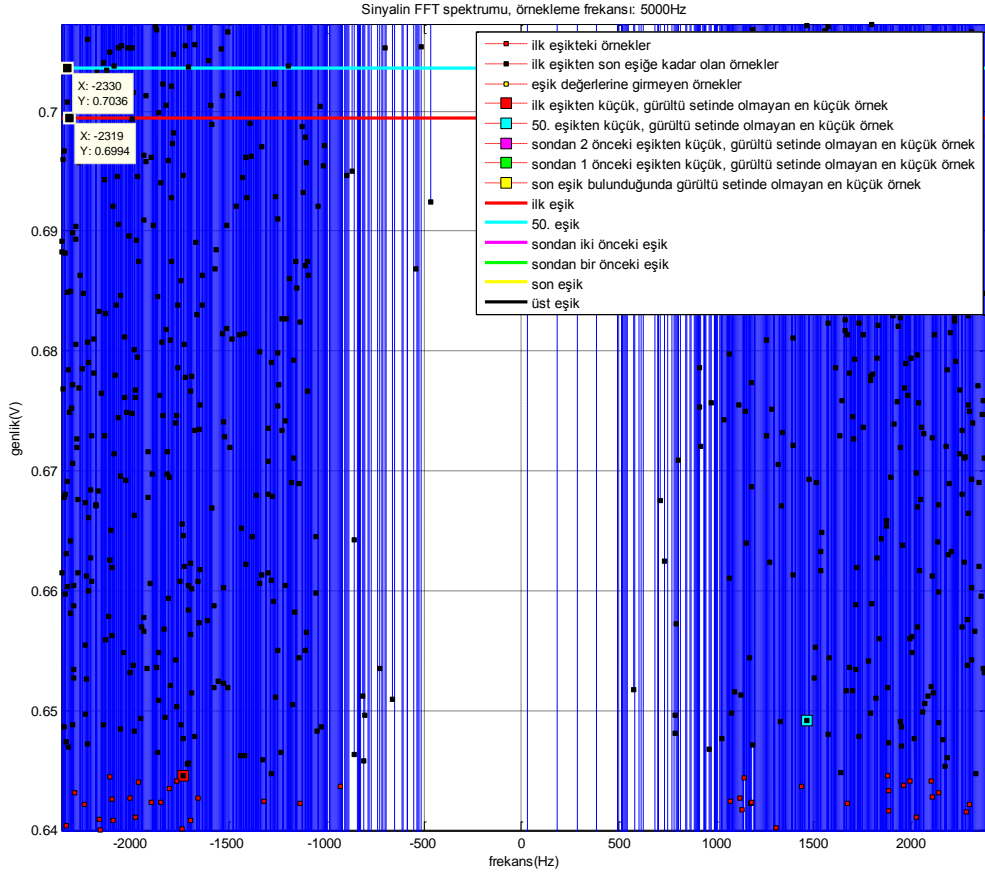
Aşağıdaki şekilde alt ve üst eşik değerleri, yapılan uygulamalarla kestirilen bir sinyal, temsili olarak gösterilmektedir. İlerleyen iki şekilde bu şeklin yakın plan çizimleri yer almaktadır. Bu şekiller algoritmanın anlaşılrlılığını arttırmak amacıyla çizdirilmiştir.



şekil 4-2 LAD algoritmasının uygulanması

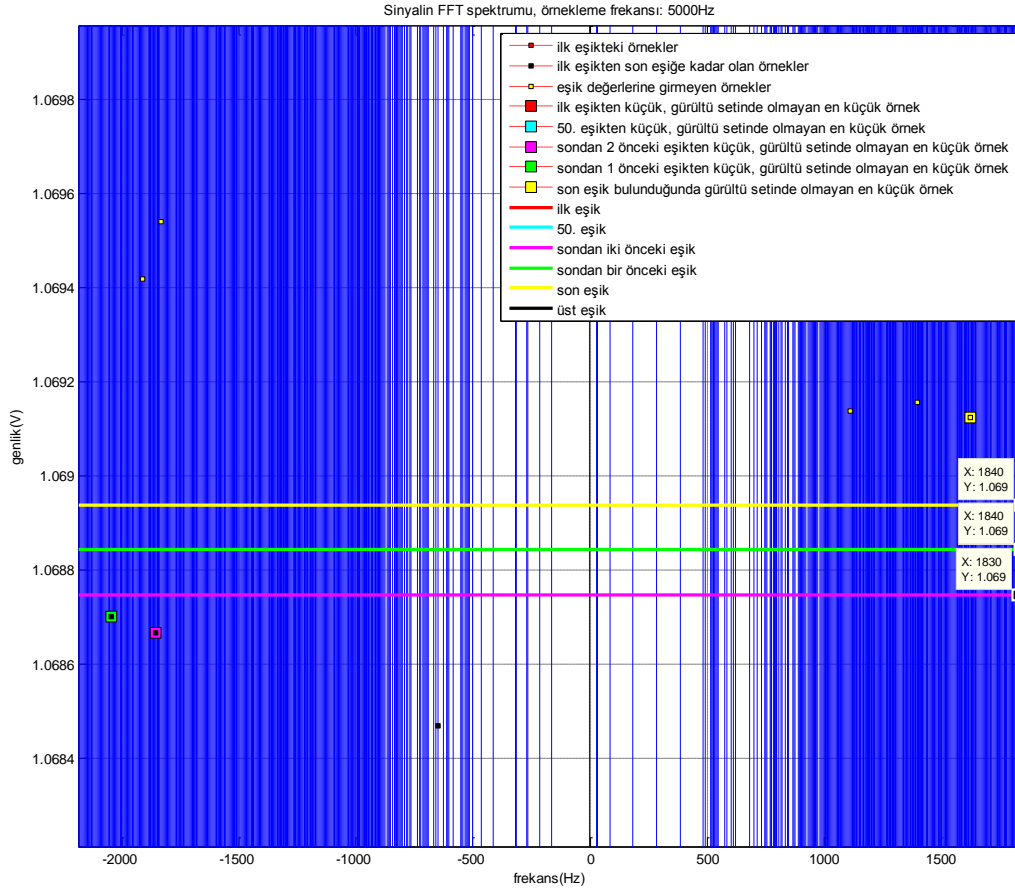
Şekil 4-2, Şekil 4-3 ve Şekil 4-4 için küçük kırmızı kutucuklar ilk eşikteki örnekleri, küçük siyah kutucuklar ilk eşikten son eşığe kadar olan örnekleri, küçük sarı kutucuklar eşik değerlerine girmeyen örnekleri, büyük kırmızı kutucuk ilk eşikten küçük, gürültü setinde olmayan en küçük örneği, büyük mavi kutucuk 50. eşikten küçük, gürültü setinde olmayan en küçük örneği, büyük pembe kutucuk sondan iki önceki eşikten küçük gürültü setinde olmayan en küçük örneği, büyük yeşil kutucuk sondan bir önceki eşikten küçük, gürültü setinde olmayan en küçük örneği, büyük sarı kutucuk son eşik bulunduğu gürültü setinde olmayan en küçük örneği, kırmızı çizgi ilk eşığı, mavi çizgi 50. eşığı, pembe çizgi sondan iki önceki eşığı, yeşil çizgi sondan bir önceki eşığı, sarı çizgi son eşığı yani alt eşığı, siyah çizgi ise üst eşığı göstermektedir. Bahsedilen kutucuk ve çizgiler tek bir çizimde gösterilememesi nedeniyle, üç çizim ile gerekli yaklaşımlar yapılarak gösterilmiştir (Şekil 4-2, Şekil 4-3 ve Şekil 4-4).

Şekil 4-3'ün alt kısmında görülen noktacıklar ilk aşamada gürültü seti olarak seçilen, tüm örneklerin %10'luk en küçük kısmını göstermektedir. Bu örneklerle oluşturulan ilk eşik değeri kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Bu eşik değerinin altında ilk sete dahil olmayan siyah küçük noktacıklardan var olduğu sürece algoritma özyinelemeli olarak, eşik değerinin altındaki her bir örnek için tekrarlanır. İlk eşikten sonra hesaplanan ikinci eşik değeri, büyük kırmızı kutucukla gösterilen örneğin de ortalama alma işlemine katılmasıyla bulunur. Bu şekilde bulunan 50. eşik mavi çizgi ile gösterilmiştir. Bu eşığın altında yer alan ve mevcut gürültü setine girmeyen en küçük örnek mavi büyük kutucuk ile gösterilmiştir. Bu değer mavi ile gösterilmiş 50. eşığın altında kaldığı için algoritma tekrarlanmaya devam eder.



Şekil 4-3 LAD algoritması uygulanmış sinyalin yakınlaştırılmış hali

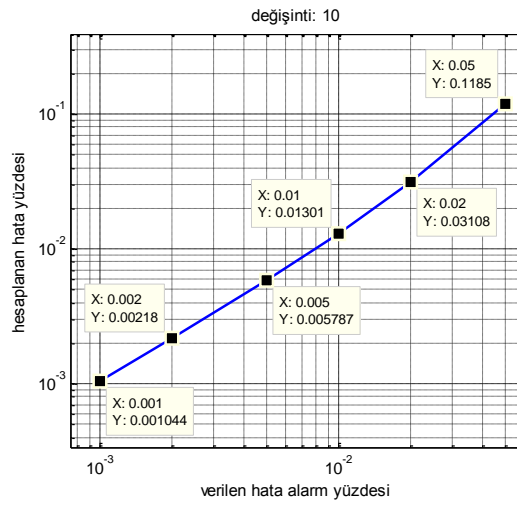
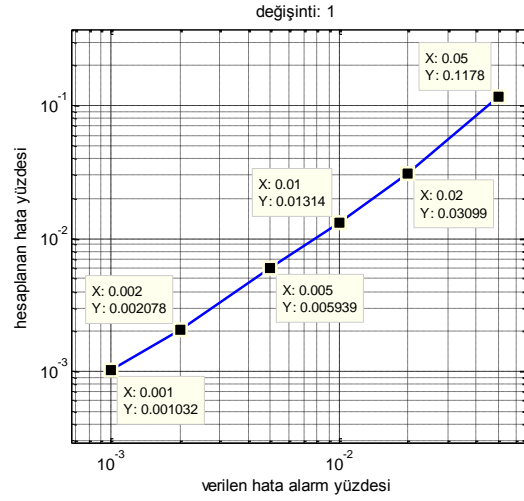
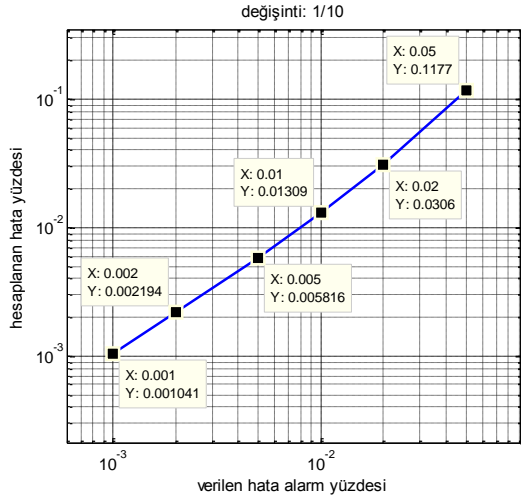
Şekil 4-4 algoritma özyinelemeli bir şekilde devam ederken hesaplanan son üç eşik değerini göstermektedir. Pembe çizgi ile hesaplanan eşik hesaplandıktan sonra gürültü setinin dışında kalan örneklerden en küçüğü büyük pembe kutucuk ile gösterilen örnektir. Bu örnek pembe eşik değerinin altında olduğu için, bu örnek de ortalama hesabına katılarak eşik değeri yeniden hesaplanır. Yeşil çizgi ile gösterilen eşik değeri bulunur. Gürültü setinin dışında kalan örneklerden en küçüğü, büyük yeşil kutucuk ile gösterilen örnektir. Bu örnek yeşil çizgi ile gösterilen eşik değerinin altında kaldığı için bu örnek de gürültü setine eklenir. Ortalama değerinin bulunması bu örnek de hesaba katılarak tekrarlanır. Ortalama değeri kullanılarak sarı çizgi ile gösterilmiş bir sonraki eşik bulunur. Gürültü setinin dışında kalan örneklerden en küçüğü sarı büyük kutucuk ile gösterilen örnektir. Bu örnek son eşik değerinden büyük olduğu için eşik bulma algoritması burada sonlandırılır. Son eşik yani sarı çizgi ile gösterilen eşik değeri aranan eşik değeri olarak belirlenir. Küçük sarı kutucuklar gürültü setine girmeyen örnekleri göstermektedir.



Şekil 4-4 LAD algoritması uygulanmış sinyalin yakınlaştırılmış hali

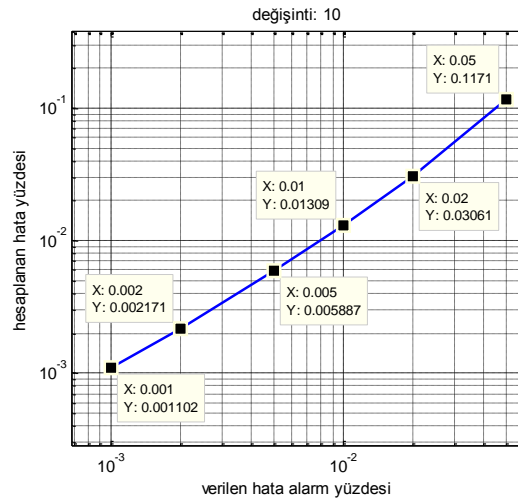
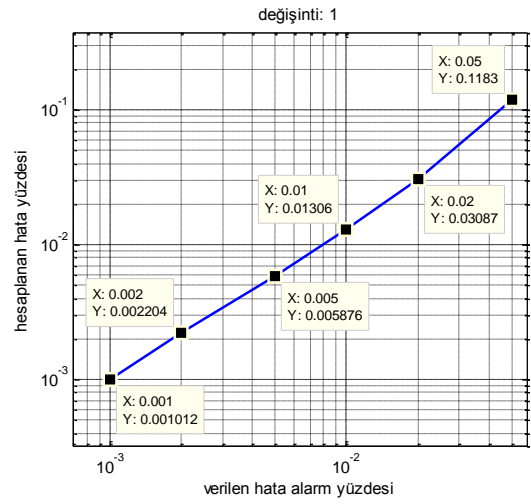
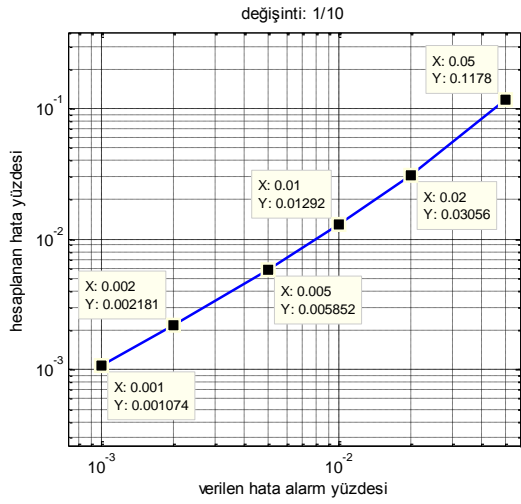
Yukarıda bahsedilen işlemler alt ve üst eşik değerinin bulunması için tekrarlanmıştır. Bu iki eşik değeri kullanılarak sinyal gürültü oranı ve bantgenişliği kestirilmiştir. İki eşik değeri kullanılmasıyla tek eşikli uygulamalardaki eşik ayarlanması sorunu aşılmıştır. Tek eşikli uygulamalarda eşik değeri büyükse bazı sinyaller kaçırılır, eşik değeri küçükse gürültü etkisi sinyal varlığı olarak algılanmaya başlar. İki eşik kullanılarak bu sorunlar giderilmiştir.

$P_{FA,DES}$ değeri sadece gürültünün var olduğu ortamda eşik değerinin üstündeki örnek sayısı, yani hatalı tespit edilecek örnek sayısı olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle algoritmanın hangi aralıkta çalışabildiğini gözlemlemek için normal dağılımlı gürültü LAD algoritmasına girdi olarak verilmiştir. Girdi olarak girilen $P_{FA,DES}$ değeri ile bulunan eşik değerinin üzerinde kalan örnek sayısının, tüm örnek sayısına oranı ile bulunan değer benzer değerler olması beklenmiştir.



Şekil 4-5 100 monte carlo benzetimi için başlangıç gürültü seti, tüm sinyalin %10'u olduğunda normal dağılımlı, değişinti değerleri 1/10, 1, 10 olan gürültü için bulunan eşik değerlerine göre hesaplanan hata yüzdesinin girdi olarak verilen hata yüzdesine göre değerleri

Algoritmanın $P_{FA,DES}$ hata oranının 0.02 değerine kadar olan değerleri için beklenildiği gibi sonuç verirken, bu değerden daha büyük değerler için düzgün çalışma alanından çıktığı görülmüştür. Bu sonuç eşik değerinin çok fazla aşağı çekilemeyeceğini göstermiştir. Bunun yanında algoritmanın farklı değişinti değerleri için benzer sonuçlar verdiği yani gürültünün değişintisinden etkilenmediği görülmüştür.



Şekil 4-6 100 monte carlo benzetimi için başlangıç gürültü seti, tüm sinyalin %50'si olduğunda normal dağılımlı, değişinti değerleri 1/10, 1, 10 olan gürültü için bulunan eşik değerlerine göre hesaplanan hata yüzdesinin girdi olarak verilen hata yüzdesine göre değerleri

Şekil 4-5'te ilk gürültü seti olarak sinyalin örneklerinden en küçük %10'u alındı. Şekil 4-6'da ise gürültü seti olarak sinyalin örneklerinden en küçük %50'si alındı. Bu iki şekil karşılaştırıldığında iki şeklin de benzer özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Buradan algoritmanın ilk gürültü setinin büyüklüğünden etkilenmediği anlaşılmıştır. Ancak ilk gürültü setinin çok büyük seçilmesi halinde algoritmanın ıraksadığı gözlemlenmiştir.

5 Frekans Kestirimi

Bu bölümde alınan belli bir taşıyıcı frekansındaki sinyalin taşıyıcı frekansının kestirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Sıfır Kesim yöntemi, frekans alanı Sıfır Kesim yöntemi ve Kay'ın yöntemi incelenmiştir. Önce sırasıyla bu yöntemlerin genel çalışma prensipleri açıklanacak ardından benzetim çalışmaları yer alacaktır.

5.1 Sıfır Kesim Yöntemi

Alınan sinyalin Denklem (40)'daki forma sahip olduğu varsayılmıştır [27], [38].

$$r(t) = s(t) + w(t) \quad (40)$$

Bir sıfırı kesme örnekleyicisi tarafından sinyalin sıfır kesme zamanları bir $x(k)$ dizisine art arda sıralanır. M adet sıfırı kesme noktasının değeri kullanılarak $y(k)$ dizisi Denklem (41)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$y(k) = x(k + 1) - x(k) \quad k = 1, 2 \dots M - 1 \quad (41)$$

Sinyalin bir sembol süresince sabit kaldığı varsayılmıştır. Aslında bazı geçişler sözkonusu olduğu bilinmektedir, bu geçişleri yok etmek için bazı teknikler geliştirilmiştir. $y_a(k)$ 'nin bu yok etmeler gerçekleştirildikten sonra oluşturulan diziye eşit olduğu varsayılırsa, frekans kestirimi Denklem (42) ile bulunabilir.

$$\hat{f}_c = \frac{N_y}{2 \sum_{k=1}^{N_y} y_a(k)} \quad (42)$$

Burada N_y değeri $y_a(k)$ dizisinin uzunluğudur. Çok daha basit bir kestirim ise L bölüt uzunluğu olmak üzere Denklem (43)'teki gibi tanımlanmıştır.

$$\hat{f}_c = \frac{M - 1}{2L} \quad (43)$$

5.2 Frekans Alanı Sıfır Kesim Yöntemi

Sıfır Kesim Yöntemi'nin daha iyi sonuç vermesi için işlem basamakları frekans alanına taşınmaya çalışıldı. Sıfır Kesim noktalarına dürtü konularak oluşan sinyalin Fourier dönüşümü alındı. Spektrumda oluşan tepelerden sıfıra en yakın olanın frekans değerinin yarısının frekans kestirimini vereceği analiz edildi. Burada dürtü katarı sinyalinin Fourier dönüşümündeki ilk tepenin bulunduğu frekans değerinin yarısının, dürtü katarı sinyalinin frekans değerini verdiği bilgisi kullanıldı [39].

İlk tepenin bulunduğu frekansı otomatik olarak bulabilmek için MUSIC yönteminden yararlanıldı. Çizgi spektrumdaki tepelerin sayısını yani spektrumun derecesini bulmak için ise Akaike Bilgi Kriteri yöntemi kullanıldı.

Literatürde yer alan derece kestirimi için kullanılan yöntemlerin başlıcaları şöyledir:

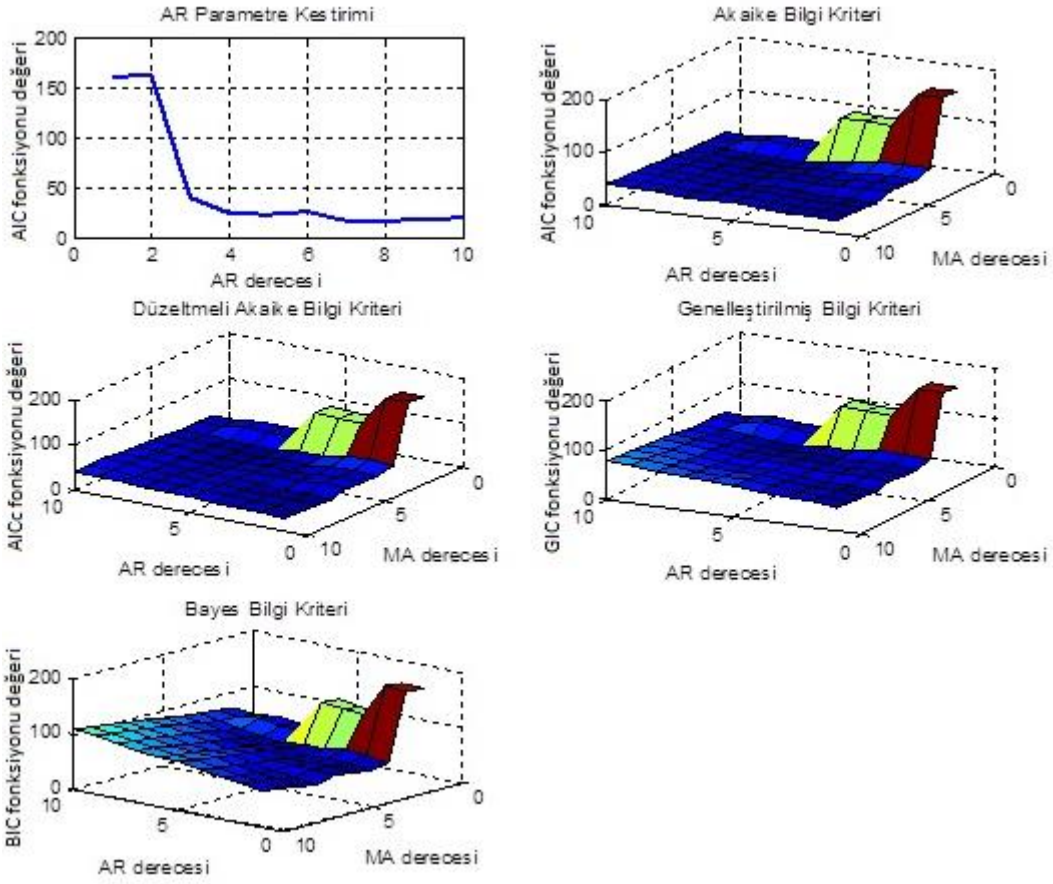
Akaike Bilgi Kriteri (Akaike Information Criteria, AIC) : $N \ln(\sigma_m^2) + 2m$

Düzeltilmeli Akaike Bilgi Kriteri (Akaike Information Criteria with Correction, AICc) : $N \ln(\sigma_m^2) + 2 \frac{N}{N-m-1} m$

Genelleştirilmiş Bilgi Kriteri (Generalized Information Criterion, GIC) : $N \ln(\sigma_m^2) + \mu m$

Bayes Bilgi Kriteri (Bayesian Information Criterion, BIC) : $N \ln(\sigma_m^2) + \ln(N)m$

σ_m^2 kestirim hatasının gücüdür. N bilgi vektörünün uzunluğudur, *Stoica* ve *Mosses*'in *Spectral Analysis of Signals* kitabında μ değerinin 2 ile 6 arasında bir değer seçilmesi durumunda derece kestiriminin en iyi sonuç vereceği belirtilmiştir [2]. Uygulamalarda bu değer 4 olarak alınmıştır. m model derece vektörüdür. Sonuçları denenecek olan derecelerden oluşur. AR derece kestirimi için vektör olarak, ARMA derece kestirimi için matris olarak oluşturulur.



Şekil 5-1 AR derecelerinin AIC, ARMA derecelerinin AIC, AICc, GIC, BIC yöntemleri ile hesaplanan en küçük hataya dayalı çizimleri

Kestirim hatasının gücüyle yani σ_m^2 değeriyle hesaplanan eşitlikler ile bulunan değerler en iyi derece kestirimi hakkında fikir verir. Bu kriterlerden biri kullanılarak istenilen aralıkta tüm dereceler için eşitliğin sonucu hesaplanır. En küçük sonucu veren derece o yöntemin önerdiği kestirilen en iyi derecedir. Eğer sistemin derecesi çok küçük seçilirse kestirilen spektrum çok düz olur ve spektrumda bazı tepeler kaçırılabilir. Sistemin derecesi çok büyük seçilirse bu durumda da istenmeyen tepeler ve istatistiksel kararsızlık ortaya çıkar [40]. Bu nedenle genellikle grafikteki ilk keskin inişin gerçekleştiği derece seçilir. Yapılan uygulamalarda algoritmanın otomatikliği açısından en küçük değeri veren derece sistemin derecesi olarak seçilmiştir.

Akaike Bilgi Kriteri ile derece kestirimi yaparken kestirim hatasının gücü En Küçük Kareler yöntemi ile bulunmuş ardından bu değerler kullanılarak AIC yöntemi ile derece kestirimi yapılmıştır. Kestirilen derece kullanılarak MUSIC yöntemi ile spektrumdaki harmoniklerin yerleri bulunmuştur. Spektrum $-\frac{\text{örnekleme frekansı}}{2}$ 'den $\frac{\text{örnekleme frekansı}}{2}$ 'ye çizdirilmiş, sıfır frekansındaki, yani merkezdeki harmoniğe en yakın pozitif değerli frekansa sahip harmoniğin bulunduğu frekans değerinin yarısı hesaplanarak aranan frekans kestirim değeri bulunmuştur.

5.3 Kay'ın Yöntemi

Kestirime giren sinyal modelinin gösterilmesi için oluşturulmuş bir Darbe Genlik Modülasyonu (Darbe Genlik Modülasyonu, PAM) sinyali aşağıdaki gibidir [23]. (Aşağıdaki işlemler gözü kapalı kestirimde yapılmamaktadır. Ancak kestirimin, sinyalin modeli olarak kabul ettiği modelin çıkarımının gösterilmesi ve bütünlüğün bozulmaması açısından bu işlemlerden bahsedilmiştir.)

$$s'(t) = \sum_i c_i g(t - iT - \tau)$$

Burada c_i M sembollü bir PAM sinyalinin bir sembolüdür. Kanalin tepkisi $g(t)$, ve ona karşı gelen uyumlu süzgeç $g(-t + t_0)$ 'dir. t_0 sıfıra eşitlenebilir ($h(t) = g(t) * g(-t)$).

Bu durumda temelbantta alınan sinyal Denklem (44)'deki gibidir.

$$r'(t) = s'(t) + w'(t) \quad (44)$$

Bu durumda geçirme bandındaki gürültüsüz sinyal Denklem (45) ile gösterilebilir.

$$s(t) = e^{j(2\pi ft + \theta)} \sum_i c_i g(t - iT - \tau) \quad (45)$$

Geçirme bandında alınan sinyal ise Denklem (46)'da gösterildiği gibidir.

$$r(t) = e^{j(2\pi ft + \theta)} \sum_i c_i g(t - iT - \tau) + w(t) \quad (46)$$

Uyumlu süzgeç ile elde edilen sinyal ise şöyledir:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) g(t - kT - \tau) dt$$

$$y(t) = e^{j(2\pi f t + \theta)} \sum_i c_i h(t - iT - \tau) + n(k)$$

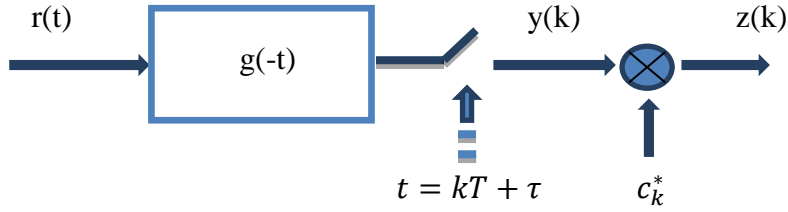
Bu sinyal her $kT + \tau$ zamanda bir örneklenirse Denklem (47) oluşur.

$$y(k) = c_k e^{j[2\pi f(kT + \tau) + \theta]} + n(k) \quad (47)$$

Bu form genellikle frekans kestirimin algoritmalarında alınan sinyal olarak kabul edilen sinyal formudur.

Modülasyonu yok etmek için c_k^* ile çarparsak $z(k)$ oluşur.

$$z(k) = e^{j[2\pi f(kT + \tau) + \theta]} + n'(k)$$



Şekil 5-2 Frekans kestirimi yapılacak sinyal modelinin oluşumu

Bu frekans kestirim algoritmaları genellikle şu iki kabule dayanır:

- $g(t) * g(-t)$ konvolüsyon işlemi Nyquist'tir, yani

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(t)g(t - kT)dt = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$$

- f 'in kararsızlık aralığı sembol oranından küçüktür.

Bu formu kullanan pek çok frekans kestirim yöntemi vardır. Bu yöntemlere ait algoritmaların genellikle işlem yükü hafiftir [23], [41].

Bu bilgiler doğrultusunda **Kay'ın Yöntemi** aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$z(k)$ şöyle düzenlenebilir:

$$z(k) = \rho(k) e^{j[2\pi f(kT + \tau) + \theta + \varphi(k)]}$$

Burada $\rho(k)$, Denklem (48) ile tanımlanır.

$$\rho(k)e^{j\varphi(k)} \sim 1 + n'(k)e^{-j[2\pi f(kT+\tau)+\theta]} \quad (48)$$

İki bitişik örneği yani $z(k)$ ve $z^*(k-1)$ 'i kullanarak bir Denklem (49)'daki açı eşitliği elde edilir.

$$\arg\{z(k)z^*(k-1)\} = 2\pi fT + \varphi(k) - \varphi(k-1) \quad (49)$$

Elde edilen açı eşitliği kullanılarak frekans kestirimi Denklem (50) ile bulunur.

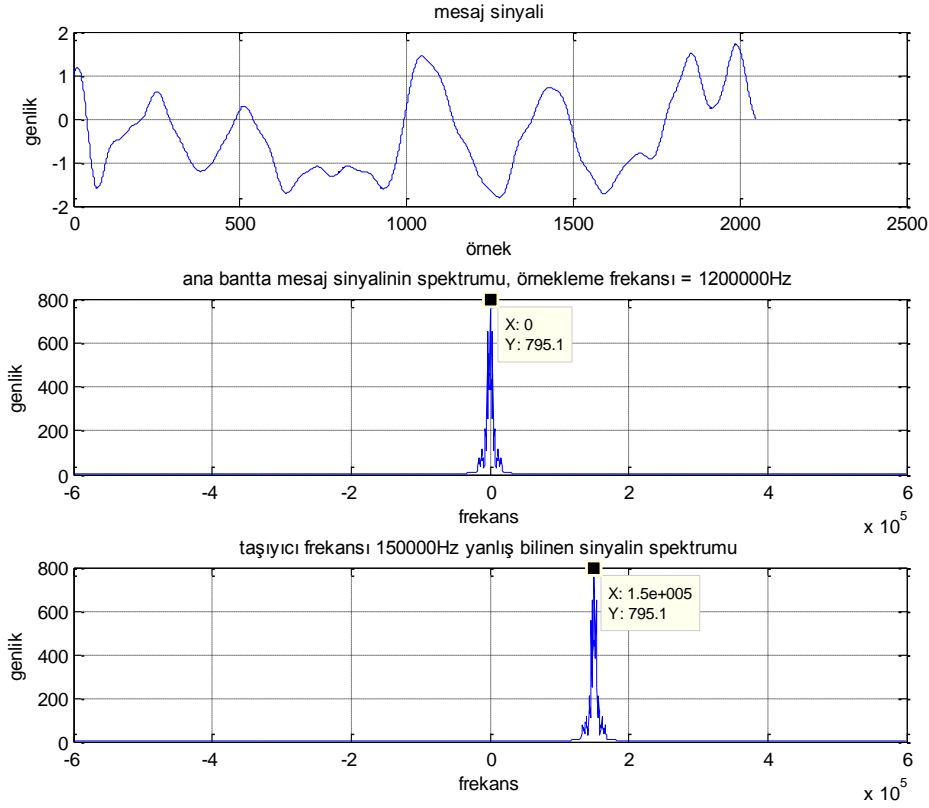
$$\hat{f} = \frac{1}{2\pi T} \sum_{k=1}^{L_0-1} \gamma(k) \arg\{z(k)z^*(k-1)\} \quad (50)$$

Bu eşitliğin birbirine karşı üstünlükleri olan dört değişik versiyonu vardır. γ düzenleme katsayısıdır.

$$\gamma(k) = \frac{3}{2} \frac{L_0}{L_0^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{2k - L_0}{L_0} \right)^2 \right], \quad k = 1, 2, \dots, L_0 - 1$$

5.4 Benzetim Çalışmaları

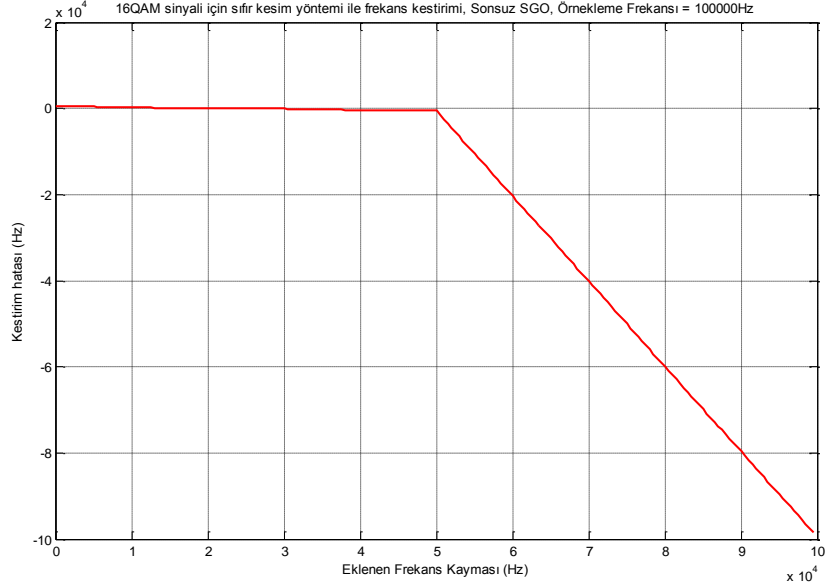
Frekans kestirimi geçirme bandındaki sinyal, temelbanda indirilirken yapılan frekans hatasının düzeltilmesi için ya da temelbanttaki genişbantlı sinyalde bulunan darbantlı parçaların merkez frekansının kestirilmesi için yapılmaktadır. Oluşturulan ve yararlanılan algoritmalar her iki amaç için de uygundur.



Şekil 5-3 Mesaj sinyali, mesaj sinyalinin doğru taşıyıcı frekansı ile temelbanda indirilmiş halinin spektrumu, mesaj sinyalinin yanlış taşıyıcı frekansı ile temelbanda indirilmiş halinin spektrumu

Şekil 5-3'teki ilk şekildeki mesaj sinyali geçirme bandına çıkarılıp doğru taşıyıcı frekansıyla geri indirilirse ikinci şekildeki gibi görünür. Ancak yanlış bir taşıyıcı frekansıyla indirilirse spektrumu üçüncü şekildeki gibi görünür. Burada frekans hatası abartılı olarak gösterilmiştir. Bu hatayı düzeltmek için taşıyıcı frekansı kestirimi yapılır. Bunun yanında alıcıdan alınan genişbantlı sinyalin içinde bulunan darbantlı sinyallerin merkezlerinin spektrumun merkezinden olan uzaklıkları da frekans kestirim algoritmalarıyla bulunmaya çalışılmıştır.

Şekil 5-4’de sinyalin sahip olduğu frekans hatası değerleri grafiğin yatay ekseninde bulunurken, bu değerleri kestirmede yapılan hatalar grafiğin dikey ekseninde bulunmaktadır. Konuyla ilgili yer alan diğer şekiller de aynı formata sahiptir.



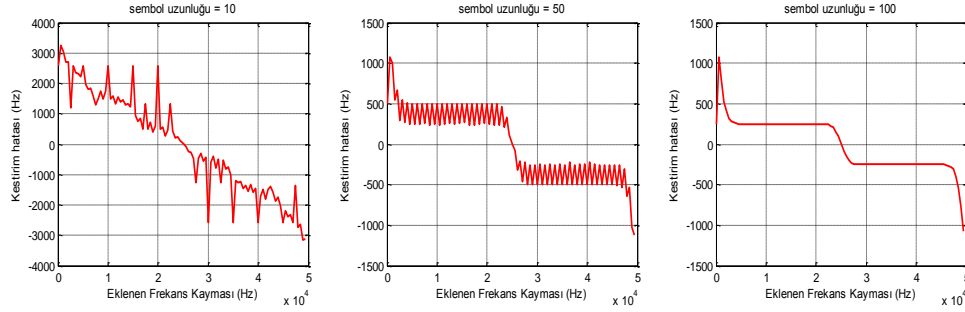
Şekil 5-4 Eklenen frekans kayması hatalarına karşılık, frekans kayması kestirimindeki hata

Şekil 5-4’deki gibi, sinyalin sahip olduğu frekans hatası, örnekleme frekansının yarısından fazlaysa hatanın hızla artmaya başladığı beklendiği gibi görülmüştür. Bu durumun sebebi örtüşmedir. Bu nedenle analizler örnekleme frekansının yarısına kadar büyüklükte frekans hataları eklenerek yapılmıştır.

5.4.1 Sıfır Kesim Yöntemi

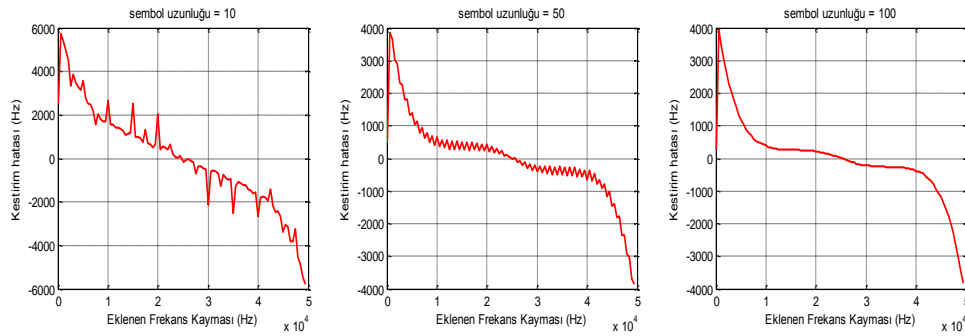
2048 örneklilik mesaj dizisi ile 10, 50 ve 100 (örnek / sembol) sembol uzunluklarına sahip olacak şekilde BPSK, BFSK, 16QAM ve MSK modülasyonlarıyla modüle edilmiş sinyaller 100kHz ve 1MHz örnekleme frekansı ile oluşturuldu. Mesaj sinyaline sıfırdan başlayarak 500Hz aralıklarla, örnekleme frekansının yarısına kadar frekans kaymaları eklendi. Bu kaymalar, darbantlı sinyalin merkezinin, merkez frekansına olan uzaklığını temsil etmektedir. Bu frekans kaymaları (ofset) Sıfır Kesim yöntemiyle kestirildi, bu işlem sırasında yapılan kestirim hatalarına göre çizdirildi. Bu işlemlere ait çizimler EK 1.1’de yer almaktadır.

- Artan sembol uzunluğu değerleri ile hatanın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 5-5'deki üç çizim için ilk çizimde yüksek olan hatanın üçüncü çizimde sembol uzunluğunun artması ile gözlemlenmiştir.



Şekil 5-5 Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

- Artan gürültü miktarı ile kestirim başarımının düştüğü gözlemlenmiştir. Sıfır Kesim yönteminin gürültüye çok duyarlı olduğu bilgisi doğrulandı. Örneğin Şekil 5-6'da Şekil 5-5'te yer alan daha yüksek sinyal gürültü oranlı çizime göre hata miktarının özellikle küçük ve yüksek frekans kayması değerleri için arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5-6 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

- Gürültü miktarı arttıkça özellikle düşük frekans kaymalarının kestirim hızla kötüleştiği görüldü. En az hata ile kestirimin örnekleme frekansının %10'u ile %40'ı arasındaki frekans kaymalarının kestiriminde yapıldığı gözlemlenmiştir.

- BPSK modüleli sinyalin frekans kestirimi yapıldı. Kestirimin verimli çalıştığı %10-%40 aralığı için gürültüsüz ortamda sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %30'u kadar hata yaptığı görüldü. Sembol uzunluğu 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %5'i, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %2.5'i kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir. 5dB gürültünün var olduğu ortamda ise sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %40'ı kadar hata yaptığı görülmüştür. Sembol uzunluğu 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %20'si, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %20'si kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir.
- BFSK modüleli sinyalin frekans kestirimi yapıldı. Kestirimin verimli çalıştığı %10-%40 aralığı için gürültüsüz ortamda sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %3'ü kadar hata yaptığı görülmüştür. 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %0.6'sı, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %0.3'ü kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir. 5dB gürültünün var olduğu ortamda ise sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %40'ı kadar hata yaptığı görülmüştür. 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %20'si, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %18'i kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir.
- 16QAM modüleli sinyalin frekans kestirimi yapıldı. Kestirimin verimli çalıştığı %10-%40 aralığı için gürültüsüz ortamda sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %15'i kadar hata yaptığı görülmüştür. 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %4'ü, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %2'si kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir. 5dB gürültünün var olduğu ortamda ise sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %40'ı kadar hata yaptığı görülmüştür. 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek

frekansın %35'i, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %30'u kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir.

- MSK modüli sinyal için frekans kestirimi yapılmıştır. Kestirimin verimli çalıştığı %10-%40 aralığı için gürültüsüz ortamda sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %0.75'i kadar hata yaptığı görülmüştür. 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %0.15'i, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %0.1'i kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir. 5dB gürültünün var olduğu ortamda ise sembol uzunluğu 10 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %25'i kadar hata yaptığı görülmüştür. 50 (örnek / sembol) olan sinyal için en fazla kestirilecek frekansın %20'si, 100 (örnek / sembol) olan sinyal için ise en fazla kestirilecek frekansın %15'i kadar hata yaptığı gözlemlenmiştir.

5.4.2 Frekans Alanı Sıfır Kesim Yöntemi

2048 örneklilik mesaj dizisi ile 10, 50 ve 100 (örnek / sembol) sembol uzunluklarına sahip olacak şekilde BPSK, BFSK, 16QAM ve MSK modülasyonlarıyla modüle edilmiş sinyaller 100kHz ve 1MHz örnekleme frekansı ile oluşturuldu. 100kHz örnekleme frekansında yapılan ölçümler için mesaj sinyaline, sıfırdan başlayarak 500Hz aralıklarla örnekleme frekansının yarısına kadar frekans kaymaları eklendi. 1MHz örnekleme frekansında yapılan ölçümler için mesaj sinyaline, sıfırdan başlayarak 5000Hz aralıklarla örnekleme frekansının yarısına kadar frekans kaymaları eklendi. Bu frekans kaymaları, darbantlı sinyalin merkezinin, merkez frekansına olan uzaklığını temsil etmektedir. Bu frekans kaymaları frekans alanı Sıfır Kesim yöntemiyle kestirildi, bu işlem sırasında yapılan kestirim hatalarına göre çizdirildi. Bu işlemlere ait çizimler EK 1.2 bölümünde yer almaktadır.

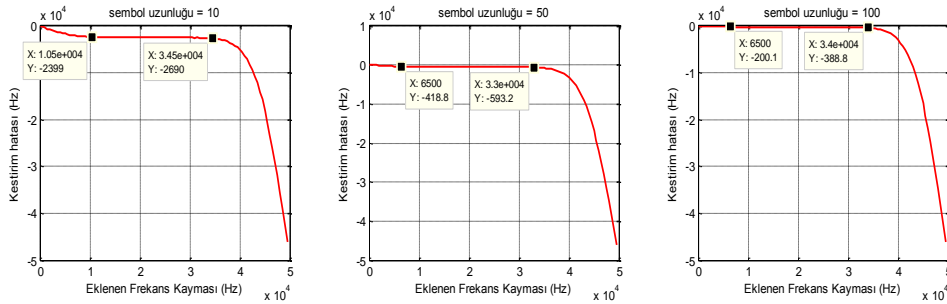
- Bu yöntem BFSK dışındaki yöntemlerde özellikle düşük sinyal gürültü oranında ve düşük frekans kayması kestirimleri için hatayı oldukça düşürmüştür. Ancak derece kestirimi gibi hata olasılığı yüksek işlemler sebebiyle ve buralarda yapılan küçük hataların kestirimde büyük hatalara sebep olması nedeniyle rassal olarak bazı frekans kayması kestirimlerinde büyük hatalar yapabilmektedir. Ayrıca bu yöntemin işlem yükü oldukça

fazladır ve bu sebeple de algoritma yavaştır. Bunun için de gerçek zamanlı bir sistem için uygun değildir.

5.4.3 Kay'ın Yöntemi

2048 örneklilik mesaj dizisi ile 10, 50 ve 100 (örnek / sembol) sembol uzunluklarına sahip olacak şekilde BPSK, BFSK, 16QAM ve MSK modülasyonlarıyla modüle edilmiş sinyaller 100kHz ve 1MHz örnekleme frekansı ile oluşturulmuştur. Mesaj sinyaline sıfırdan başlayarak 500Hz aralıklarla, örnekleme frekansının yarısına kadar frekans kaymaları eklendi. Bu frekans kaymaları, darbantlı sinyalin merkezinin, merkez frekansına olan uzaklığını temsil etmektedir. Bu frekans kaymaları Kay'ın yöntemiyle kestirilmiştir, bu işlem sırasında yapılan kestirim hatalarına göre çizdirildi. Bu işlemlere ait çizimler EK 1.3 bölümünde yer almaktadır.

- Yükselen frekans ofset değerleri için bu ofset değerlerini kestirmede yapılan hatanın 16QAM modülasyonu için arttığı; BPSK, BFSK, QPSK için neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir.
- Artan sembol uzunluğu değerleri ile hatanın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 5-7'de artan sembol uzunluğu değerleri ile azalan hata miktarı ile görülmektedir.



Şekil 5-7 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

- BPSK modüleli sinyal için 10dB'ye kadar örnekleme frekansının %10'u ile %40'ı arasındaki frekans kaymalarının kestiriminde Sıfır Kesim yöntemi ile Kay'ın yöntemi çok benzer sonuçlar verirler. Bu aralığın öncesindeki küçük frekanslar için Kay'ın yöntemi daha iyi sonuç verir. Sıfır Kesim yönteminde görülen giriş kısmındaki tepe bu kestirimde görülmez. Bu aralıktan büyük

değerler için ise Sıfır Kesim yöntemi tercih edilmelidir. Bu durum Şekil 5-6'daki hata miktarlarının Şekil 5-7'de düşmesi ile de görülmektedir.

- BFSK modüleli sinyal için Kay'ın frekans kestirimi gürültüsüz ortamda Sıfır Kesim yönteminden daha iyi sonuç verir ancak daha düşük sinyal gürültü oranı varlığında yüksek frekans kaymalarının kestirimi için Sıfır Kesim yöntemi daha iyi sonuç vermektedir. Örneğin 5dB sinyal gürültü oranında örnekleme frekansının %20'si büyüklüğüne kadar olan frekans kayması kestirimleri için Kay yöntemi daha iyi sonuç verirken, daha yüksek frekans kayması değerleri için Sıfır Kesim yöntemi daha iyi sonuç vermektedir.
- 16QAM ve MSK modüleli sinyaller için örnekleme frekansının %10'u büyüklüğüne kadar olan frekans kayması kestirimleri için Kay yöntemi daha iyi sonuç verirken, daha yüksek frekans kayması değerleri için Sıfır Kesim yöntemi daha iyi sonuç vermektedir.

6 Sembol Uzunluğu Kestirimi

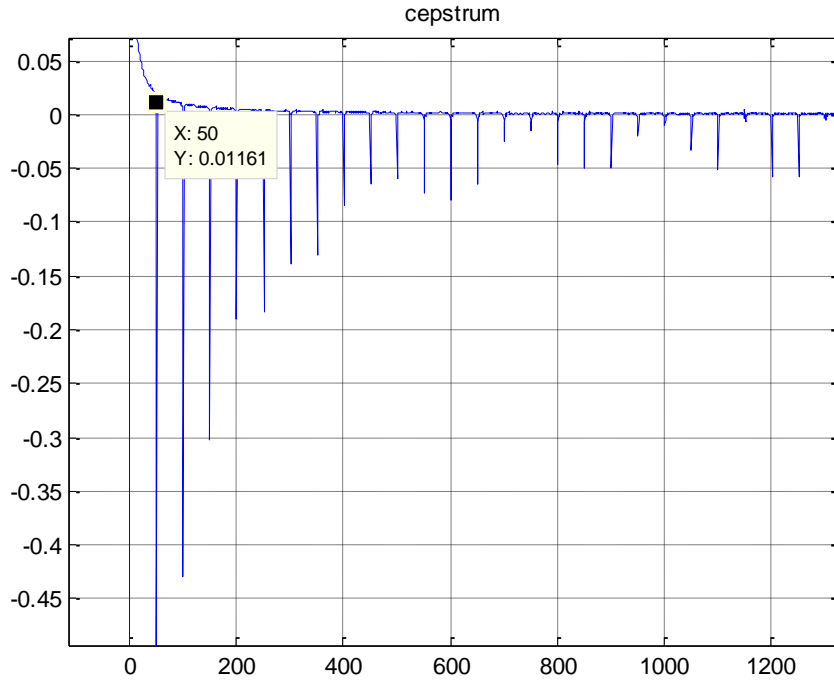
Bu bölümde sayısal modülasyon türlerinden biriyle modüle edilmiş sinyalin modülasyonu sırasında kullanılan sembol uzunluğunun kestirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla ters Fourier dönüşümü tabanlı bir yöntem incelenecek, önce bu yöntemin çalışma prensipleri açıklanacak ardından benzetim çalışmaları yer alacaktır.

Sembol uzunluğu kestirim için, ters Fourier dönüşümü ile sembol uzunluğu bulma yöntemlerinden biri olan, *Kubankova* ve *Kubanek* tarafından ortaya atılmış yöntem incelenmiştir [35]. Bu yöntem sinyalin güç spektrumu ile Cepstrum değerini hesaplayarak, sinyalin içindeki tekrarlardan yararlanıp sembol uzunluğu değerinin olduğu örnekte bir tepe oluşturmayı ve bu tepenin bulunduğu örnek sayısından sembol uzunluğunu kestirmeyi hedefler. Cepstrum değeri Denklem (51)'de gösterildiği gibi hesaplanır:

$$c(n) = \text{Re}\{IFFT[\log|S(f)|]\} \quad (51)$$

Burada *IFFT* ters Fourier dönüşümünü, *log* logaritma alma işlemini, *Re* gerçel alma işlemini ifade eder. $S(f)$ güç spektrumdur ve Denklem (52)'de gösterildiği gibi hesaplanır. N , $y[n]$ sinyalinin örnek sayısıdır.

$$S(f) = (FFT(y[n]) \cdot FFT(y[n])^*)/N \quad (52)$$



Şekil 6-1 Cepstrum grafiği

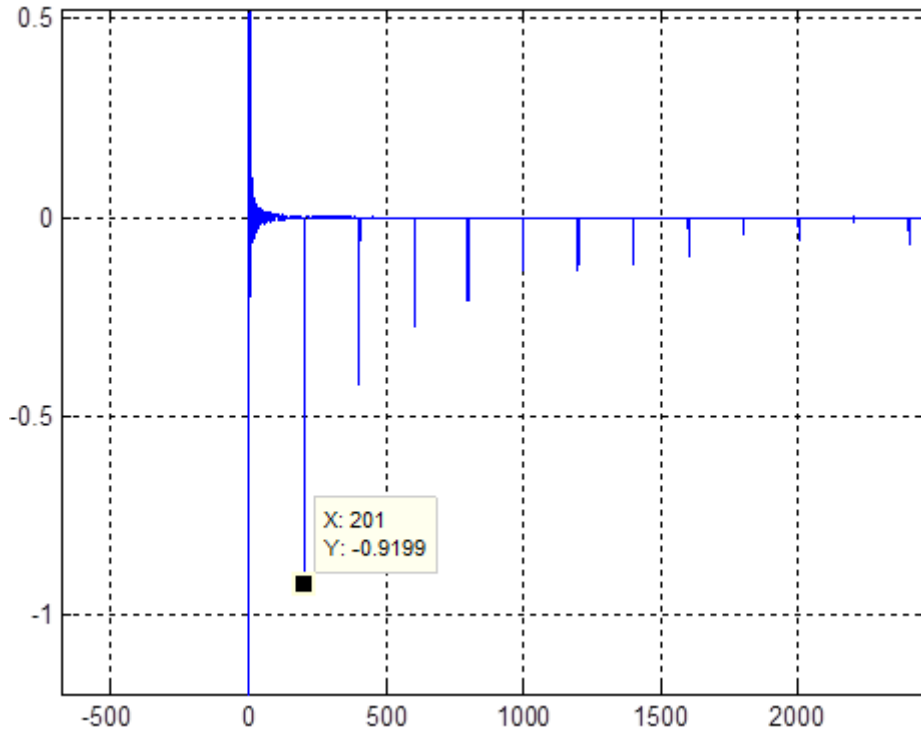
Şekil 6-1’ de örnek gösterildiği gibi Cepstrum sonucunun mutlak olarak en yüksek değerinin bulunduğu örnek sembol uzunluğunun örnek cinsinden değerini verir. Sinyalin başlangıç kısmında yer alan istenmeyen tepe gözardı edilmelidir.

6.1 Benzetim Çalışmaları

Cepstrum analizi kullanılarak sembol uzunluğunun kestirilebileceği bilgisi kullanıldı. Sembol uzunluğu Cepstrum analizi ile otomatik olarak kestirilmeye çalışıldı. Sinyalin Cepstrum’unun mutlak olarak en yüksek değerinin bulunduğu örneğin yerinden sembol uzunluğu bulundu.

Sayısal modülasyon türleri ile modüle edilmiş sinyale çeşitli frekans kayması ve gürültü değerleri eklenerek sembol uzunluğu kestirilmeye çalışıldı.

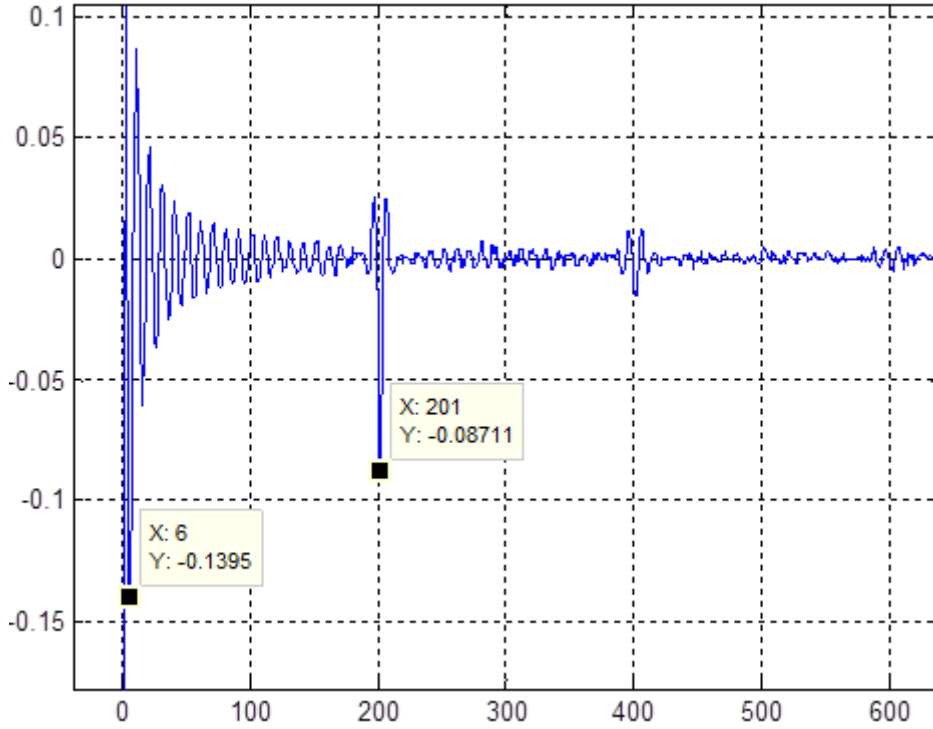
Örneğin BPSK ile modüle edilmiş, sembol uzunluğu 200 örnek olan, 10kHz frekans kaymasına sahip sinyalin 50dB sinyal gürültü oranında Cepstrum grafiği Şekil 6-2 ile verilmiştir.



Şekil 6-2 Sembol uzunluğu 200 örnek olan, 10kHz frekans kaymasına sahip sinyalin güç spektrumunun Cepstrum’u (50dB)

Burada sinyalin giriş kısmında yer alan istenmeyen dalgalanma gözardı edildiğinde mutlak değer olarak en büyük değerinin bulunduğu örneğin sembol uzunluğu kestirimini doğru olarak verdiği görülmektedir.

Sinyalin sinyal gürültü oranı 5dB'ye düşürüldüğünde oluşan Cepstrum grafiği Şekil 6-3' te gösterilmiştir.



Şekil 6-3 Sembol uzunluğu 200 örnek olan, 10kHz frekans kaymasına sahip sinyalin güç spektrumunun Cepstrum'u (5dB)

Şekil 6-3'te görüldüğü gibi gürültü miktarının artması ile sinyalin giriş baş kısmında yer alan istenmeyen dalgalar artmıştır. Ancak sinyalin 7. örnekten öncesi kesilirse doğru bir kestirim elde edilebilir. Çünkü bu örnekten önceki örneklerin mutlak değer olarak büyüklükleri sembol uzunluğunu gösteren tepenin büyüklüğünden büyüktür.

Bu yaklaşım ile sinyalin baş kısmında yer alan istenmeyen dalgalanmaların hangi örneğe kadar devam ettiği Matlab ortamında incelenmeye çalışıldı. Elde edilen veriler tablolaştırılarak Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4'te gösterilmiştir.

İncelemeler çeşitli frekans kayması değerleri ve değişik sinyal gürültü oranı değerlerine sahip 16QAM, BPSK, BFSK, QPSK modülasyonları ile modüle edilmiş sinyaller için yapıldı. Sinyallerin Cepstrum grafiklerinin baş kısmında yer alan istenmeyen dalgalanmaların hangi örneğe kadar kesilmesi gerektiği tablolarda gösterildi. Tablo kutucuklarının X olarak gösterilmesi, o koşullar altında algoritmanın yanlış sonuç verdiğini göstermektedir.

Tablo 1 16QAM sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)

SNR	Sembol Uzunluğu	Frekans Kayması							
		0Hz	400Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz	10000Hz	20000Hz
10dB	10	5	5	5	5	5	5	5	8
	50	7	7	7	7	8	X	6	6
15dB	10	3	4	4	4	3	3	4	7
	50	5	5	5	5	6	X	5	4
20dB	10	3	3	3	3	3	3	3	6
	50	4	3	3	4	4	X	3	3

Tablo 2 BPSK sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)

SNR	Sembol Uzunluğu	Frekans Kayması							
		0Hz	400Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz	10000Hz	20000Hz
10dB	10	4	5	5	5	5	5	5	8
	50	7	7	7	8	8	X	6	6
15dB	10	3	4	4	4	4	4	4	7
	50	4	5	4	5	5	X	5	4
20dB	10	3	3	3	3	3	3	3	6
	50	3	4	4	4	4	X	3	3

Tablo 3 BFSK sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)

SNR	Sembol Uzunluğu	Frekans Kayması							
		0Hz	400Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz	10000Hz	20000Hz
10dB	10	8	8	8	8	8	8	8	9
	50	31	30	31	32	33	X	12	30
15dB	10	8	8	8	8	7	7	8	8
	50	28	26	29	29	30	X	11	27
20dB	10	7	7	7	7	7	7	7	8
	50	10	11	11	10	11	X	10	9

Tablo 4 QPSK sinyali için Cepstrum çiziminde sembol uzunluğunu gösteren tepenin öncesinde oluşmuş istenmeyen tepelerin bittiği örnek (Örnekleme Frekansı = 1MHz)

SNR	Sembol Uzunluğu	Frekans Kayması							
		0Hz	400Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz	10000Hz	20000Hz
10dB	10	5	5	5	4	5	5	5	8
	50	7	7	7	7	8	X	6	6
15dB	10	4	4	3	4	4	4	4	7
	50	5	4	5	5	5	X	4	4
20dB	10	3	3	3	3	3	3	3	6
	50	4	3	4	4	4	X	3	4

Tablolarda yer alan verilere göre çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sonuçlar ile BFSK modüleli bir sinyalin sembol uzunluğunun yüksek olduğu durumlarda, bu sinyalin sembol uzunluğunun, 20dB gibi yüksek SNR değerlerinde bile kestirilemediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin bu modülasyon için, sinyalin Cepstrum grafiğinin baş kısmında yer alan istenmeyen dalgalanmaların, yüksek örnek değerlerinde görülmesi olduğu anlaşılmıştır.

Diğer üç modülasyon türü ile modüle edilmiş sinyaller için, 10dB SNR'da, sembol uzunluklarının, çok yüksek olmamaları kaydıyla kestirilebildikleri gözlemlenmiştir. Sembol uzunluğunun çok yüksek olmadığı durumlarda, 5dB SNR'da bile Cepstrum analiz ile değişik frekans kayması değerlerinde genellikle doğru sonuçlar elde edilmiştir.

Sinyalin başlangıç kısmında yer alan istenmeyen dalgalanmaların yerinin:

- sembol uzunluğunun arttırılması ile sağa kaydığı yani arttığı,
- SNR değerinin düşürülmesi ile arttığı,
- frekans kayması ile ilintili olmadığı, ancak 10kHz gibi çok yüksek frekans kayması değerlerinde bir artış görüldüğü gözlemlenmiştir.

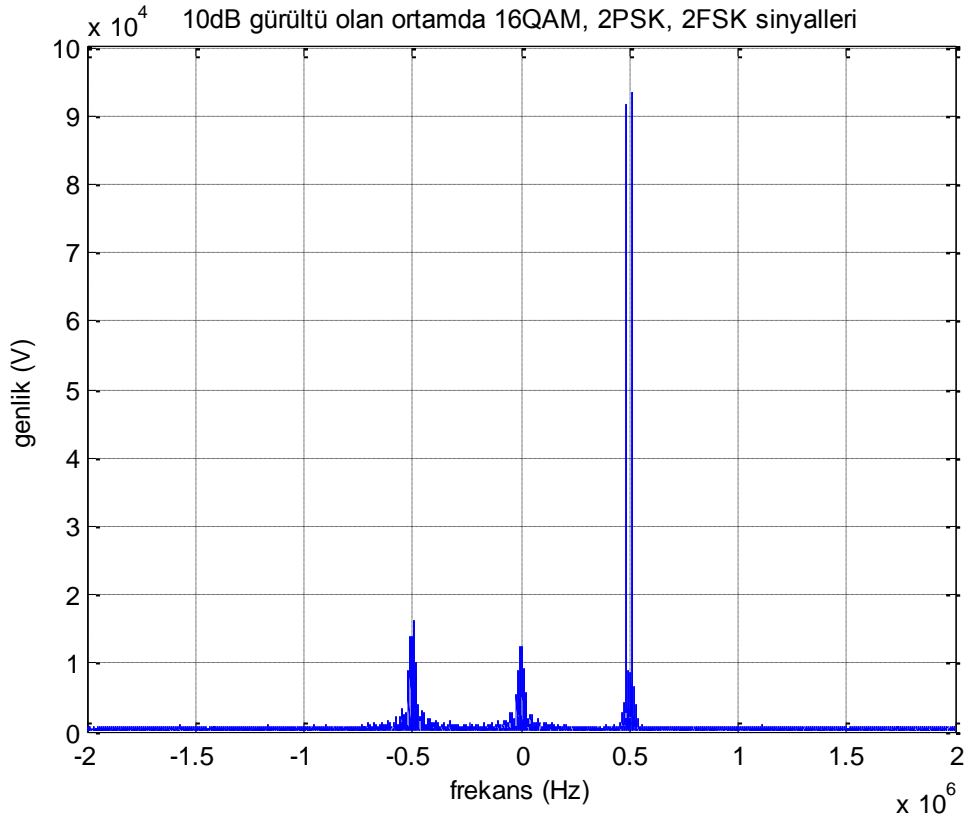
Bazı frekans kayması değerlerinde, eşit sembol uzunluğu için, modülasyon türü ve SNR değeri farketmeksizin Cepstrum analizinin hatalı sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ancak bu durum nadir olarak gözlemlenmiştir. (Denenen 8 frekans kayması değerinden birinde ve denenen 2 sembol uzunluğundan biri için gözlemlenmiştir.)

Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4 incelenerek sinyalin Cepstrum'unun ilk 10 örneğinin kesilmesine karar verilmiştir. Cepstrum dizisinin ilk kısmının kesilmesi ile BFSK dışındaki üç modülasyon türü için (16QAM, BPSK, QPSK) 10, 15, 20dB sinyal gürültü oranlarında başarılı kestirimler yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu üç modülasyon türü için yapılan incelemelerin %93.75'inde başarılı bir şekilde sembol uzunluğu kestirilmiştir. BFSK modülasyonu için ise başarı oranı %50 olarak tespit edilmiştir. Ancak Cepstrum 10. Örnekten kesildiği için, sembol uzunluğu bu değerden küçük olan sinyallerin sembol uzunluğunun kestirilemeyeceği bilindiği halde, diğer kestirimlerin doğru elde edilebilmesi için bu değer ve altı kestirimlerden ödün verilmiştir.

Yukarıda belirtilen başarı oranları sembol uzunluğunun artması ile düşmektedir. Eğer sinyalin sembol uzunluğunun belli bir değerden yüksek olduğu bilgisi varsa, Cepstrum dizisi o örnekten kesilerek başarı oranı arttırılabilir.

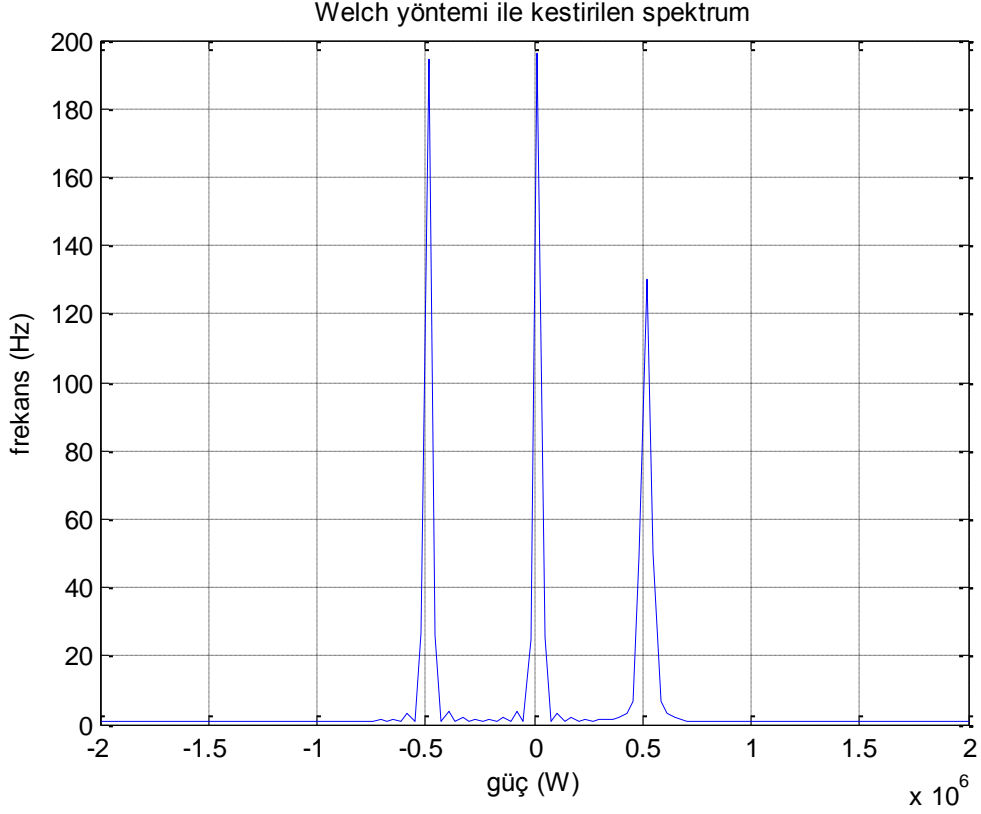
7 ENTEGRASYON

Bu bölümde Bölüm 3, Bölüm 4, Bölüm 5 ve Bölüm 6’da detaylandırılan kestirimler tasarlandığı gibi genişbantlı bir sinyalin içindeki darbant sinyallerin, ve bu sinyallerin parametrelerinin kestirilmesinde kullanılmıştır. Bu işlem için kullanılmak üzere 16QAM, 2PSK ve 2FSK ile modüle edilmiş üç sinyal 10dB gürültü bulunan ortamda oluşturulmuştur. Bu üç sinyal temelbantta Şekil 7-1’deki gibi görülmektedir. Sinyallerin örnekleme frekansı 4MHz, sembol uzunluğu 128’dir. 2FSK için frekans ayrıklığı sembol oranına eşit olarak alınmıştır.



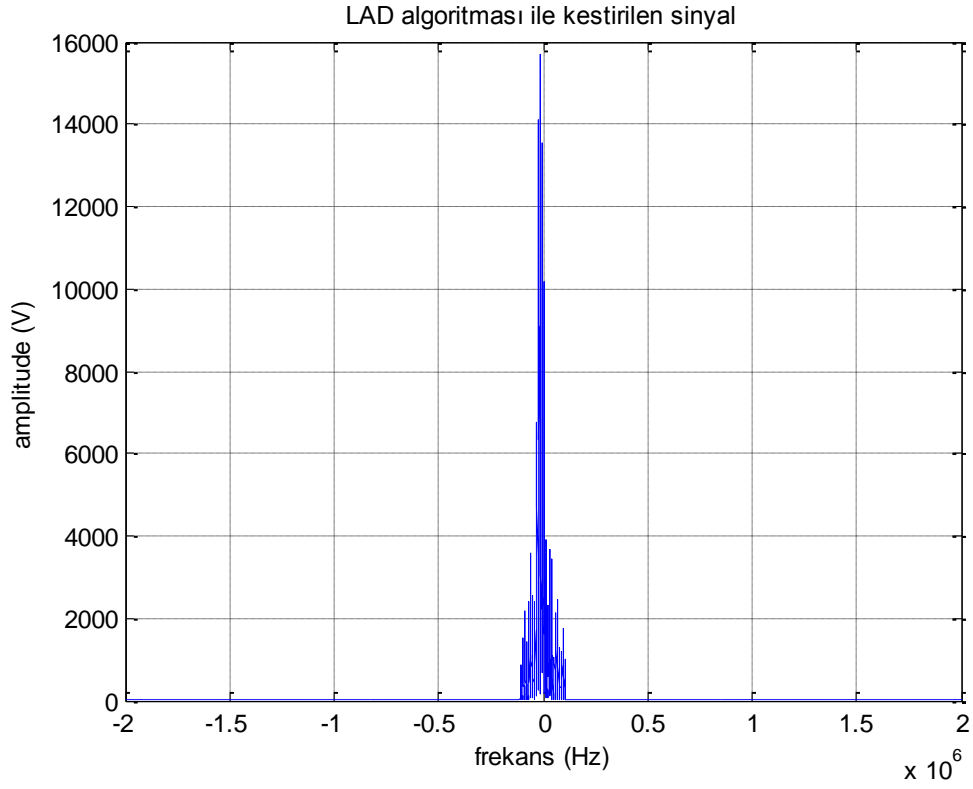
Şekil 7-1 Soldan sağa 16QAM, 2PSK ve 2FSK sinyalleri (10dB)

Temelbanttaki sinyalin spektrumu Welch yöntemi ile pencere uzunluğu 128 olacak şekilde kestirilmiştir. Bu kestirim Şekil 7-2’de görülmektedir.

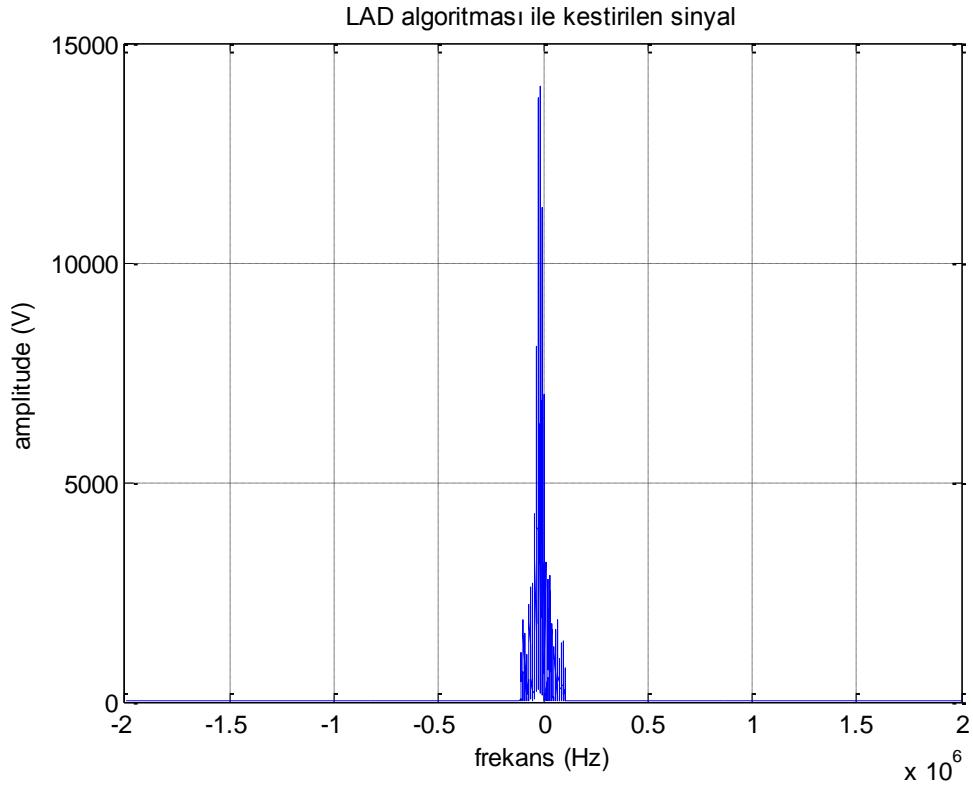


Şekil 7-2 Spektrum kestirimi

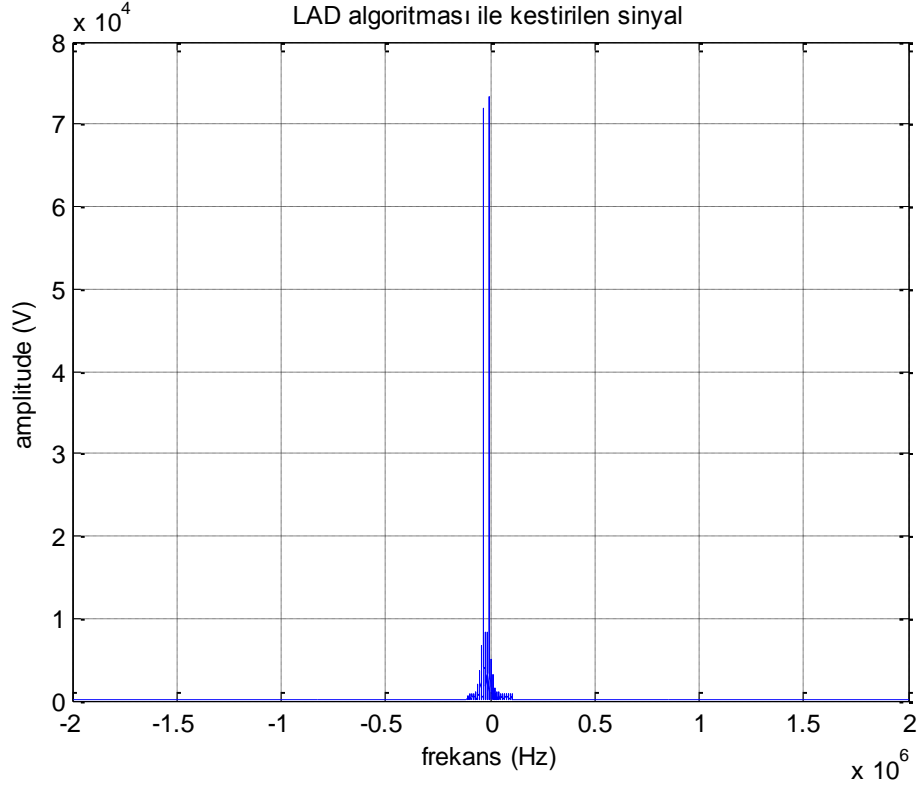
Bu genişbant sinyalin içinde bulunan darbant sinyallerin bulunması, bulunan darbant sinyallerin sinyal gürültü oranı ve bantgenişliğinin kestirimi için LAD algoritması uygulanmıştır. Burada alt eşik için yanlış alarm oranı ($P_{FA,DES_{Alt}}$) 0.001, üst eşik için yanlış alarm oranı ($P_{FA,DES_{Üst}}$) 0.0000007 ve ilk gürültü setinin oranı %20 olacak şekilde LAD algoritması çalıştırılmıştır. Algoritma üç adet darbantlı sinyal bulmuştur. Bulunan bu sinyaller önce yaklaşık bir taşıyıcı sinyalle temelbanda indirilmiş ardından sabit genişlikte bir filtre ile filtelenmişlerdir. Bu işlemler sonucu oluşan sinyaller Şekil 7-3, Şekil 7-4 ve Şekil 7-5'te gösterilmiştir.



Şekil 7-3 LAD algoritması ile bulunan ilk sinyal



Şekil 7-4 LAD algoritması ile bulunan ikinci sinyal



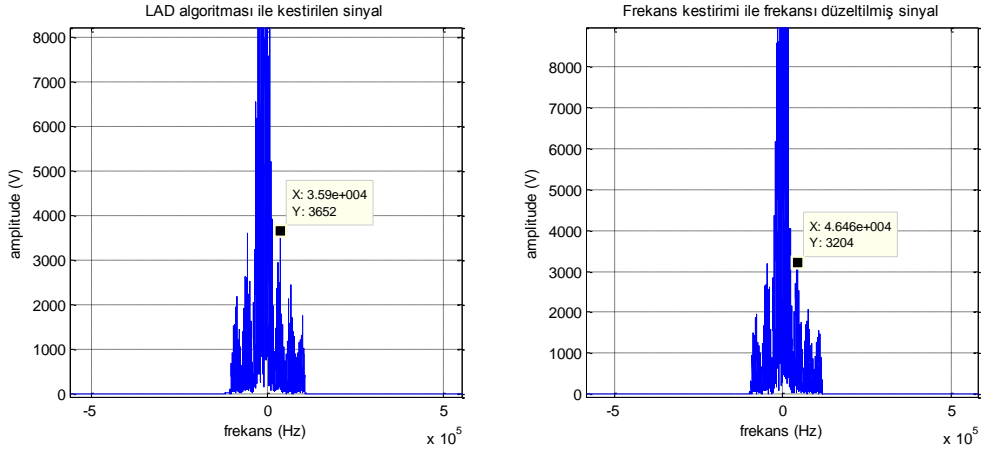
Şekil 7-5 LAD algoritması ile bulunan üçüncü sinyal

LAD algoritması ile SNR ve bantgenişliği kestirimleri de yapılmıştır. Bu iki kestirim için bulunan sonuçlar Tablo 5'in ilk iki sırasında gösterilmiştir. Burada SNR değerleri seçtiğimiz yanlış alarm yüzdesine göre değiştiği için doğru sonuçlar elde edilememiştir. Bantgenişliği kestiriminde ise doğru sonuçlara yakın değerler elde edilmiştir. 3. Sinyal 2FSK ile modüle edilmiş olduğu için, bantgenişliğinin diğer iki sinyalin iki katı olması beklenmiş ve kestirimler bu beklentilerle örtüşmüştür.

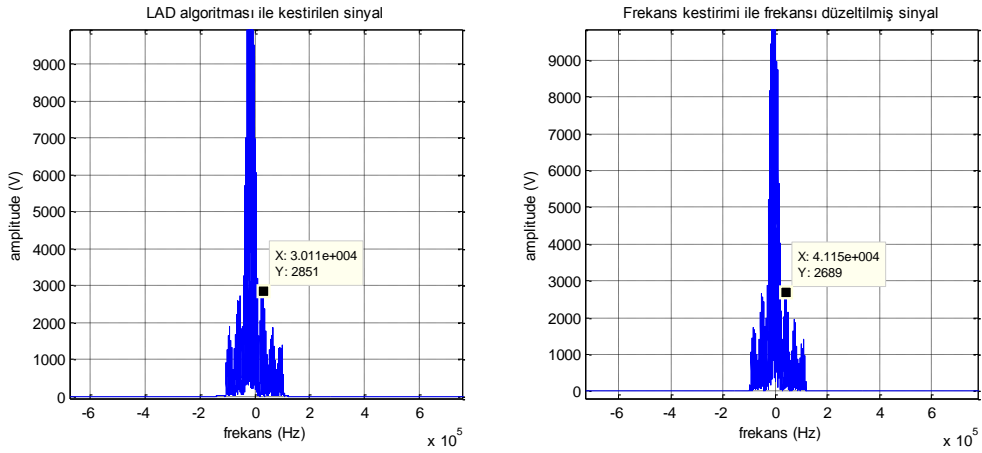
Tablo 5 SNR, Bantgenişliği ve Taşıyıcı Frekansı kestirimleri

	1. Sinyal	2. Sinyal	3. Sinyal
SNR	21,2027195845163	21,1803698761545	18,1139652899352
Bantgenişliği	62992,1259842520	62992,1259842522	125984,251968504
Taşıyıcı Frekansı	-10569,1904843208	-10933,5775795019	-19573,7655491968

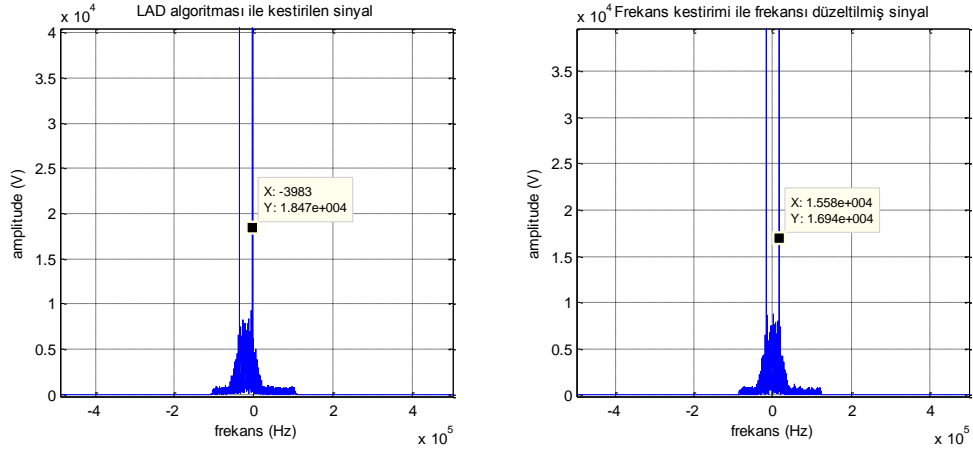
Ardından bu darbant sinyallerin taşıyıcı frekansları kestirilmiştir. Bu kestirimler Tablo 5'in son satırında yer almaktadır. Sinyallerin simetrikliği baz alındığında, yapılan kestirim ile sıfır noktasına göre simetrikliğin artırıldığı gözlemlenmiştir. Frekans kestirimi öncesi darbant sinyaller ve frekans kestirimi sonrası kestirilen frekanslar ile kaydırılmış sinyaller Şekil 7-6, Şekil 7-7 ve Şekil 7-8 ile gösterilmiştir.



Şekil 7-6 1. Darbant sinyalin taşıyıcı frekans kestirimi ile kaydırılmadan önceki ve sonraki hali



Şekil 7-7 2. Darbant sinyalin taşıyıcı frekans kestirimi ile kaydırılmadan önceki ve sonraki hali



Şekil 7-8 3. Darbant sinyalin taşıyıcı frekans kestirimi ile kaydırılmadan önceki ve sonraki hali

Sinyallerin frekansları kaydırıldıktan sonra sembol uzunluğu kestirimi yapılmıştır. Kestirim sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6 Sembol uzunluğu kestirim sonuçları

	1. Sinyal	2. Sinyal	3. Sinyal
SNR	126	125	85

Tablo 6’da verilen kestirim sonuçlarına göre Cepstrum algoritması 1. Sinyal ve 2. Sinyal için gerçek değer olan 128’i kestirmede %2.34 oranında, 3. Sinyal olan 2FSK’yı kestirmede %33.5 hata yapmıştır. Bu sonuçlar benzetim çalışmalarında yapılan analizlerle örtüşmektedir. 2FSK’nın sembol uzunluğunun kestiriminde beklendiği gibi yüksek hata yapılmıştır.

8 SONUÇLAR

Gözü kapalı parametre kestirimi, otomatik modülasyon tanıma için ilk adımdır. Modülasyonun tanınabilmesi için her bir parametrenin etkin bir şekilde kestirilmesi gerekir. Parametrelerin yeterince iyi kestirilememesi, kendisinden sonra gelecek sınıflandırma işleminin yanlış sonuçlar vermesine neden olabilir. Bu nedenle parametre kestirim işleminin her bir basamağına özen gösterilerek, ilgili parametrelerin etkin bir şekilde kestirilmesi amaçlanmalıdır.

Alıcı ya da antenden alınan genişbantlı sinyallerin içerdiği darbantlı sinyallerin tespiti için, sinyal gürültü oranlarının ve bantgenişliklerinin kestirilmesi gerekmektedir. Sinyal gürültü oranının ve bantgenişliğinin etkin şekilde kestirimi spektrumun etkin şekilde kestirilmesine bağlıdır. Bu nedenle yapılan çalışmada bir çok spektrum kestirim yöntemi karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler arasında özellikle kestirimin gözü kapalı yapılması belirleyici rol oynamıştır. Spektrum kestiriminde kullanılan parametrik yöntemlerin kestirim için, sinyal hakkında çeşitli bilgilere ihtiyaç duyması, bu yöntemlerle yapılan kestirimlerin başarımını düşürmüştür. Parametrik olmayan yöntemlerin sinyal hakkında herhangi bir bilgi gerektirmemesi bu yöntemleri öne çıkarmıştır. Bu yöntemler arasında çözünürlük ve değişinti ödünleşimi vardır. İncelenen parametrik olmayan spektrum kestirim yöntemleri arasından Welch yöntemi uygulama kolaylığı ile öne çıkmaktadır. Bu yöntem uygulandığında, pencere uzunluğunun değiştirilmesi ile çözünürlüğe ya da değişintiye rahatlıkla ağırlık verilebilmektedir. Ayrıca seçilen pencerelerin birbirleri ile örtüşüyor olması ile (özellikle örnek sayısının az olduğu durumlarda) diğer pencere alma yöntemlerine karşı, çözünürlük ve değişinti açısından üstünlük sağlar. Özellikle sinyal gürültü oranı ve bantgenişliği kestiriminin eşik değeri kullanılarak yapıldığı kestirimlerde spektrum kestirimi değişintinin düşürülmesi ile bu kestirimlerin başarımını artırır. Yapılan uygulamalarda iki eşikli LAD algoritması kullanılarak sinyale bağımlılık azaltılmıştır. Böylece yüksek eşik kullanıldığında sinyalin kaçırılması, düşük eşik kullanıldığında gürültünün sinyal olarak algılanması sorunlarının önüne geçilmiştir.

Alıcı ya da antenden alınan geçiş bandındaki sinyalin temelbanda etkin şekilde indirilmesi, alıcı tarafından temelbanda indirilmiş sinyalin taşıyıcı frekansı hatasının düzeltilmesi ya da genişbantlı sinyal üzerinde kestirilen darbantlı sinyallerin temelbanda indirilmesi için taşıyıcı frekansının kestirilmesi gerekir. İncelenen taşıyıcı frekansı kestirim algoritmalarından Frekans Alanı Sıfır Kesim yöntemi işlem yükünün ağırlığı ve derece

kestiriminde yapılan hataların yol açtığı büyük kestirim hataları sebebiyle Sıfır Kesim yöntemi ve Kay'ın yöntemine göre tercih edilmemektedir. Bu iki yöntem EKLER bölümündeki şekiller yardımıyla detaylı olarak incelenmiştir. İnceleme sonuçları Bölüm 5.4'de yer almaktadır. Kay yöntemi ile yapılan 16QAM, BPSK, QPSK ile modüle edilmiş sinyallerin frekans kestirimlerinin, örnekleme frekansının %10'undan az olan frekans kayması değerinin varlığında, Sıfır Kesim yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. BFSK ile modüle edilmiş sinyaller için ise örnekleme frekansının %20'sinden az olan frekans kayması değerlerinin varlığında Sıfır Kesim yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu değerlerden daha yüksek olan frekans kayması değerlerinin varlığında, sıfır kesim yöntemi ile yapılan kestirimlerin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu iki yöntemin de işlem yükleri oldukça hafiftir. Sıfır Kesim yöntemi görece daha az işlem gerektirir.

Modülasyon sınıflandırma algoritmalarında kullanılan bir diğer parametre sembol uzunluğudur. Sembol uzunluğunun kestirilmesi için ters Fourier dönüşümüne dayanan ve *Kubankova* ve *Kubanek* tarafından ortaya atılmış olan yöntem incelenmiştir. Bu yöntemle yapılan incelemelerde BFSK dışındaki üç modülasyon türü için (16QAM, BPSK, QPSK) 10, 15, 20dB sinyal gürültü oranlarında başarılı kestirimler yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu üç modülasyon türü için yapılan incelemelerin %93.75'inde başarılı bir şekilde sembol uzunluğu kestirilmiştir. BFSK modülasyonu için ise başarı oranı %50 olarak tespit edilmiştir. Başarım sembol uzunluğunun artması ile düşmektedir. Bu kestirim için sembol uzunluğunun belli bir değerden yüksek olduğunu bilmek, yüksek sembol uzunluklu modülasyon türlerinin sembol uzunluklarının kestirim başarımını arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Z. Çoban, "Haberleşme Sistemlerinde Sayısal Kiplenim Yöntemlerinin Otomatik Sınıflandırılması." Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [2] P. Stoica and R. Moses, *Spectral Analysis of Signals*. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [3] S. Haykin, *Communication Systems*. Wiley, 2001.
- [4] H. Derin and M. Aşkar, *İletişim Kuramı*. ODTÜ Yayınları, 2012.
- [5] S. M. Kay, "Modern Spectral Estimation: Theory and Application." Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [6] S. L. Marple, "A Tutorial Overview of Modern Spectral Estimation," *ICASSP-89*, vol. 4, pp. 2152–2157, 1989.
- [7] S. M. Kay and S. L. Marple, "Spectrum Analysis-A Modern Perspective," *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 11, 1981.
- [8] T. Benedict and T. Soong, "The Joint Estimation of Signal and Noise from the Sum Envelope," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 13, 1967.
- [9] B. Shah and S. Hinedi, "The Split Symbol Moments SNR Estimator in Narrow-Band Channels," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 26, 1990.
- [10] R. Matzner and F. Englberger, "An SNR Estimation Algorithm Using Fourth-Order Moments," *Proc. 1994 IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, 1994.
- [11] D. R. Pauluzzi and N. C. Beaulieu, "A Comparison of SNR Estimation Techniques for the AWGN Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, 2000.
- [12] J. Vartiainen, J. J. Lehtomaki, S. Aromaa, and H. Saarnisaari, "Localization of Multiple Narrowband Signals Based on the FCME Algorithm," in *Nordic Radio Symp.*, 2004.
- [13] J. Vartiainen, H. Saarnisaari, J. J. Lehtom, and M. Juntti, "A Blind Signal Localization and SNR Estimation Method," *Mil. Commun. Conf. 2006 - MILCOM 2006*, pp. 1–7.
- [14] P. Henttu and S. Aromaa, "Consecutive Mean Excision Algorithm," *IEEE Seventh Int. Symp. Spread Spectr. Tech. Appl.*, vol. 2, 2002.
- [15] J. Vartiainen, J. J. Lehtomaki, H. Saarnisaari, and M. Juntti, "Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms," *Cent. Wirel. Commun. - CWC*, 2010.

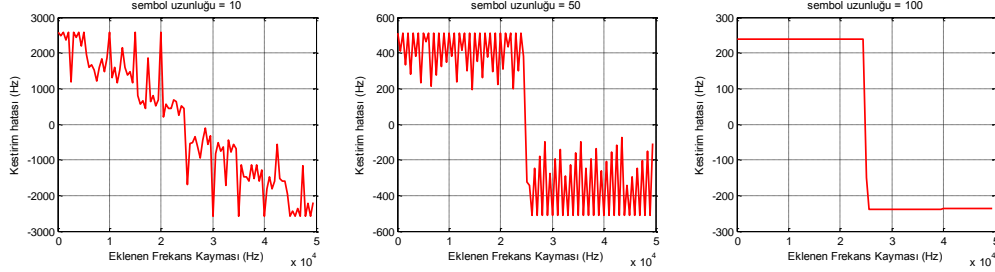
- [16] H. Saarnisaari and P. Henttu, "Impulse Detection and Rejection Methods for Radio Systems."
- [17] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 5th ed., vol. 11. 2008, pp. 41–50.
- [18] J. Vartiainen, "Concentrated Signal Extraction Using Consecutive Mean Excision Algorithms," University of Oulu, 2010.
- [19] J. Vartiainen, J. J. Lehtomaki, and H. Saarnisaari, "Double-Threshold Based Narrowband Signal Extraction," *2005 IEEE 61st Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, 2005.
- [20] S. Kay, "A Fast and Accurate Single Frequency Estimator," *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 37, no. 12, pp. 1987–1990, 1989.
- [21] M. P. Fitz, "Further Results in the Fast Estimation of a Single Frequency," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 21314, pp. 862–864, Times Cited: 120, 1994.
- [22] U. Mengali and M. Morelli, "Data-Aided Frequency Estimation for Burst Digital Transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 1, pp. 23–25, 1997.
- [23] U. Mengali and A. Andrea, "Synchronization Techniques for Digital Receivers Applications of Communications Theory." Springer US, pp. 79–146, 1997.
- [24] H. Xu and D. Zhang, "A Simple Iterative Carrier Frequency Estimation Algorithm," *IEEE Conf. Publ. Networks Secur. Wirel. Commun. Trust. Comput. NSWCTC '09. Int. Conf.*, pp. 724–727, 2009.
- [25] D. Kim, M. J. Narasimha, and D. C. Cox, "An Improved Single Frequency Estimator," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 3, no. 7, pp. 212–214 Times Cited:50, 1996.
- [26] G. Zhou and G. B. Giannakis, "Harmonics in Multiplicative and Additive Noise: Performance Analysis of Cyclic Estimators," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 43, no. 6, pp. 1445–1460, Jun. 1995.
- [27] D. Le Guen and A. Mansour, "Automatic Recognition Algorithm for Digitally Modulated Signals," *Proc. IASTED Int. Conf.*, pp. 32–37, 2002.
- [28] P. Loubaton and L. Mazet, "Cyclic Correlation Based Symbol Rate Estimation," *33rd Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput. Piscataway, USA*, pp. 1008–1012, 1999.
- [29] P. Ciblat, P. Loubaton, E. Serpedin, and G. B. Giannakis, "Asymptotic Analysis of Blind Cyclic Correlation-Based Symbol-Rate Estimators," *IEEE JOURNALS Mag.*, vol. 48, no. 7, pp. 1922–1934, 2002.
- [30] S. Tang and Y. Yu, "Fast Algorithm for Symbol Rate Estimation," *IEICE TRANS. COMMUN.*, vol. E88-B, no. 4, pp. 1649–1652, 2005.

- [31] Y. Chan, J. Plews, and K. Ho, "Symbol Rate Estimation by the Wavelet Transform," *IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 177–180, 1997.
- [32] M. Flohberger, W. Kogler, W. Gappmair, and O. Koudelka, "Symbol Rate Estimation with Inverse Fourier Transforms," *Satell. Sp. Commun.*, pp. 110 – 113, 2006.
- [33] E. Terzi and H. Aslan, "Blind Symbol Rate Estimation : A Two Stage Algorithm," *IEEE Conf. Publ.*, pp. 750–753, 2009.
- [34] A. Kubankova and D. Kubanek, "Algorithms of Digital Modulation Classification and Their Verification," *WSEAS Trans. Commun.*, vol. 9, no. 9, pp. 563–572, 2010.
- [35] A. Güner and İ. Kaya, "Gözü Kapalı Simge Hızı Kestirimi için Yeni Bir Yaklaşım," *6th Int. Adv. Technol. Symp.*, 2011.
- [36] W. A. Gardner, A. Napolitano, and L. Paura, "Cyclostationarity: Half a century of research," *Signal Processing*, vol. 86, no. 4, pp. 639–697, Apr. 2006.
- [37] W. A. Gardner, "The Spectral Correlation Theory Of Cyclostationary Time-Series," *Signal Processing*, vol. 11, pp. 13–36, 1986.
- [38] S. Z. Hsue and S. S. Soliman, "Automatic Modulation Classification Using Zero Crossing," *IEE Proc. F Radar Signal Process.*, vol. 137, no. 6, p. 459, 1990.
- [39] A. V Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Signals and Systems*, 2nd ed., vol. 2nd ed. 1997, pp. 299 – 300.
- [40] M. Ghil and C. Taricco, "Advanced Spectral Analysis Methods," *Past Present Var. Solar-Terrestrial Syst. Meas. Data Anal. Theor. Model.*, pp. 1–28, 1997.
- [41] M. K. Nezami, "RF Architectures & Digital Signal Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers," 2003.

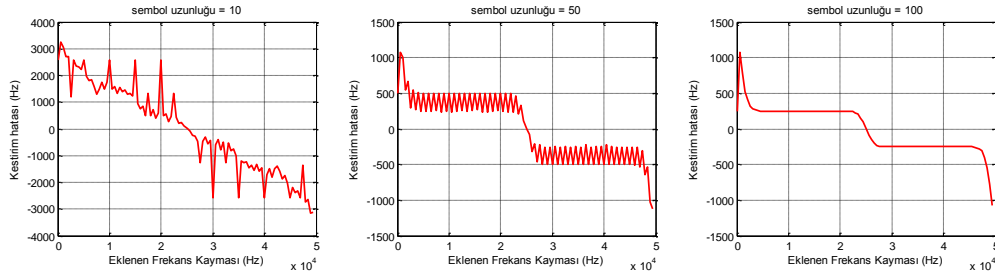
EKLER

EK 1.1: Sıfır Kesim Yöntemi ile Frekans Kestirimi

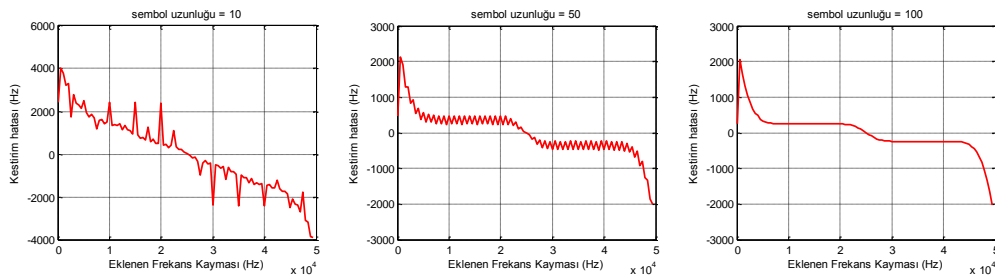
EK 1.1.1: BPSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



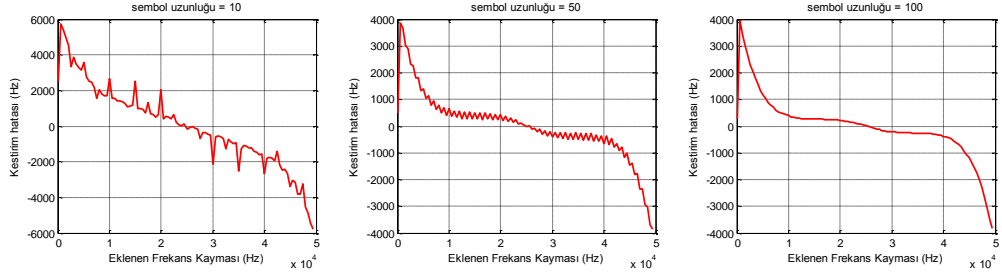
Şekil 0-1: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



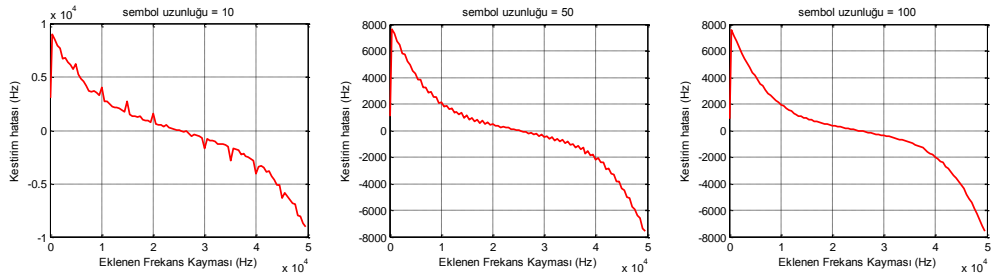
Şekil 0-2: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-3: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

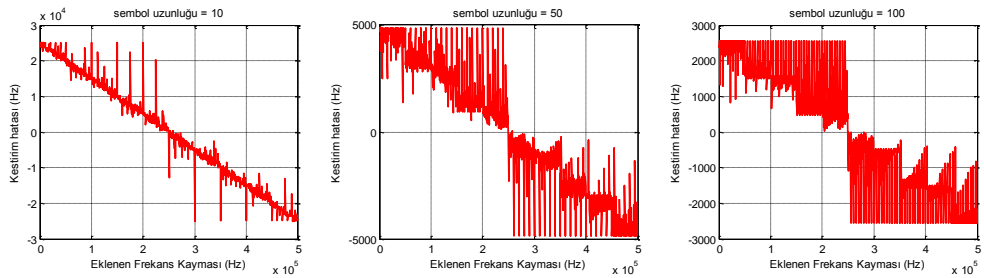


Şekil 0-4: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

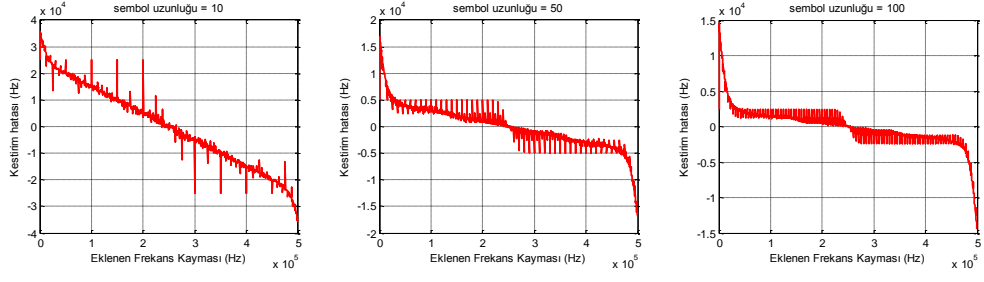


Şekil 0-5: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

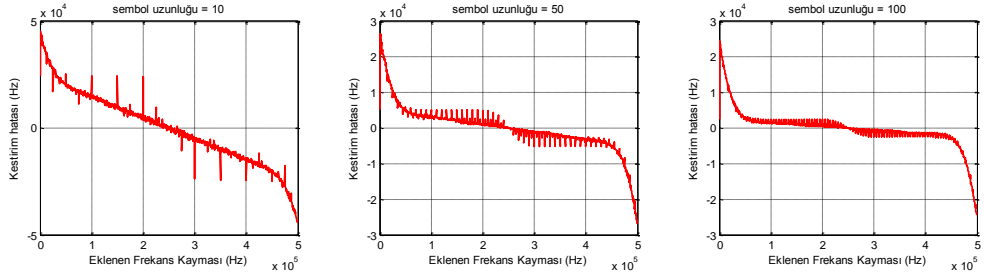
EK 1.1.2: BPSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



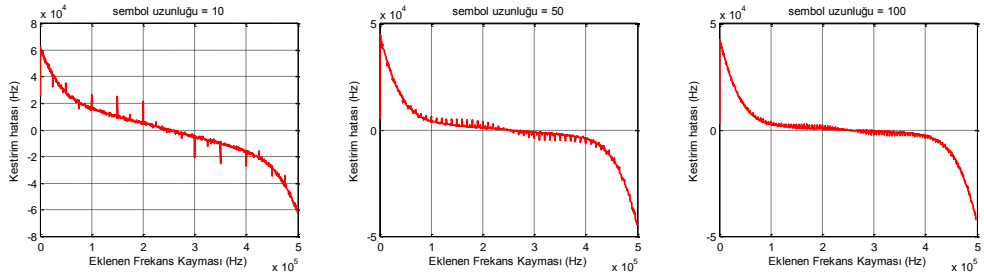
Şekil 0-6: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



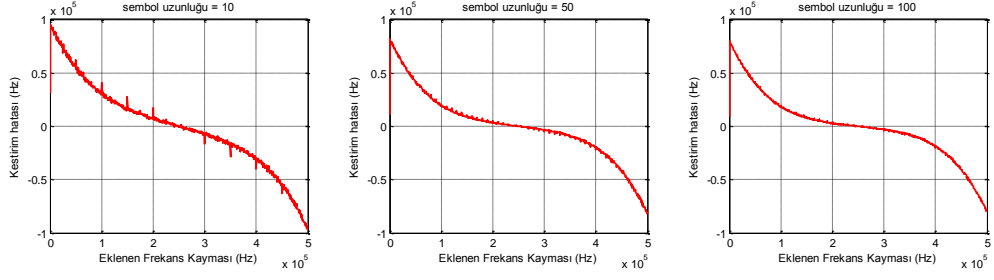
Şekil 0-7: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-8: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

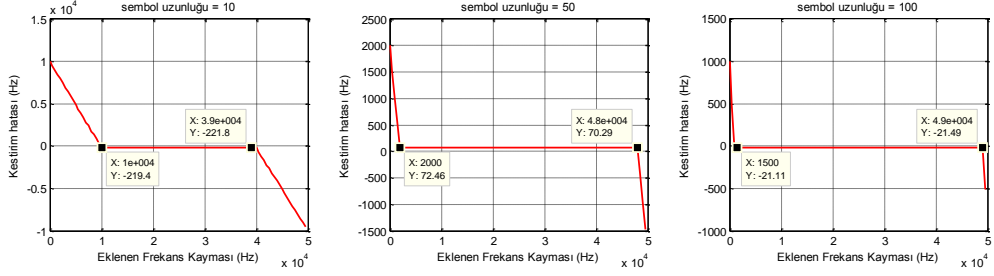


Şekil 0-9: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

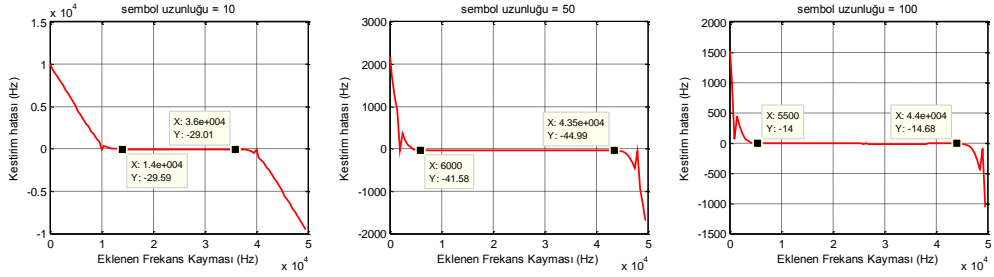


Şekil 0-10: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

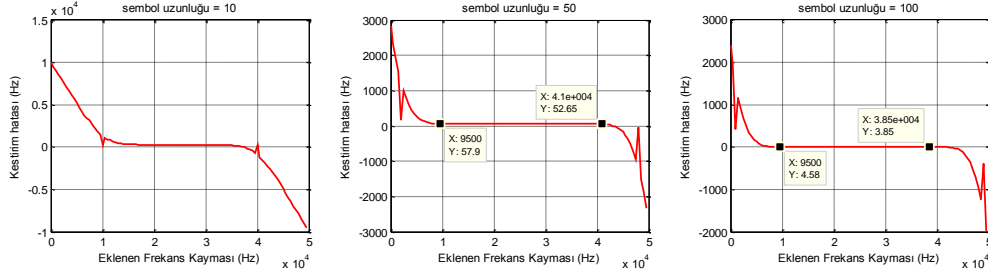
EK 1.1.3: BFSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



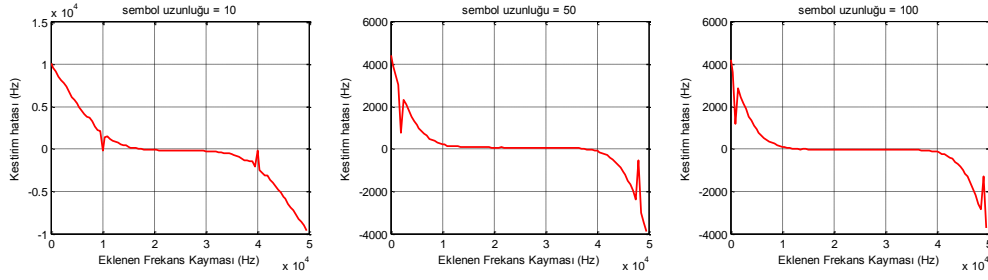
Şekil 0-11: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



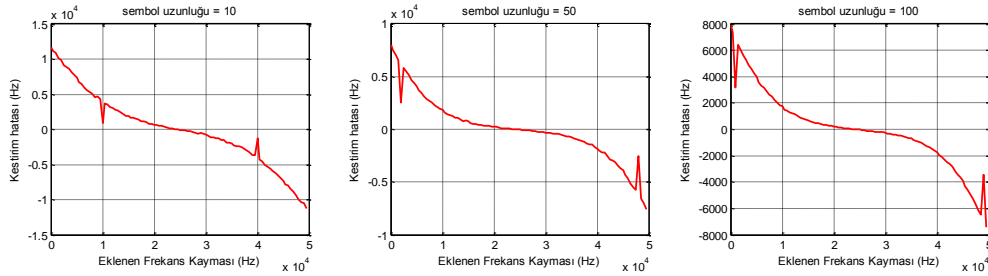
Şekil 0-12: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-13: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

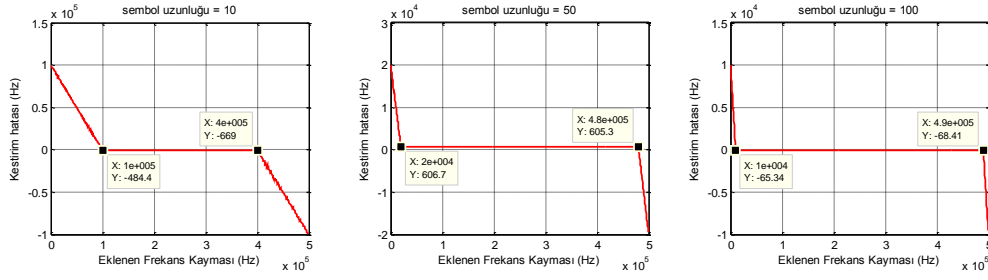


Şekil 0-14: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

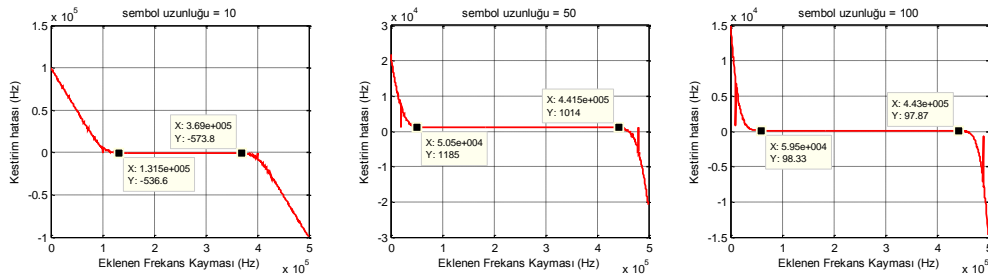


Şekil 0-15: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

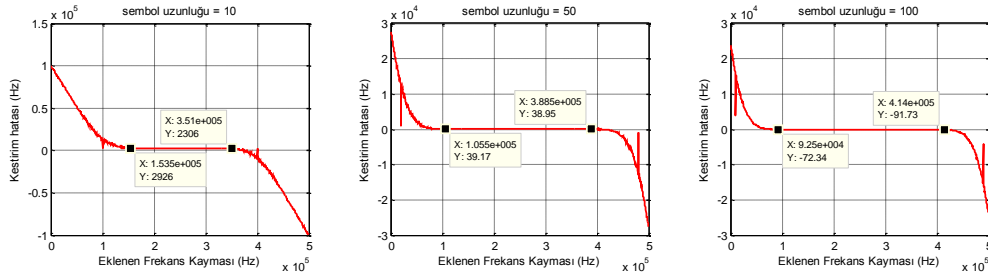
EK 1.1.4: BFSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



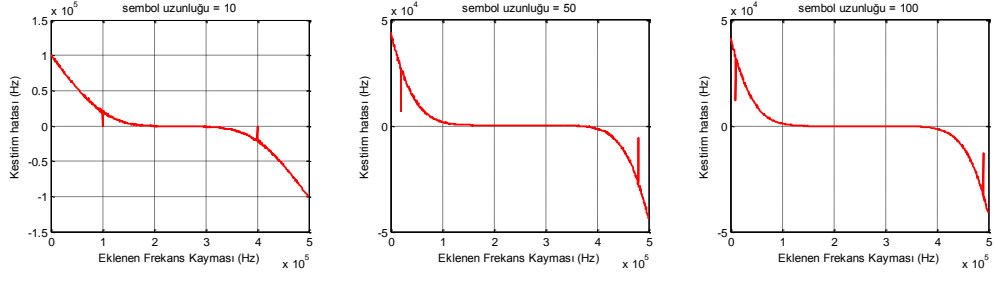
Şekil 0-16: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



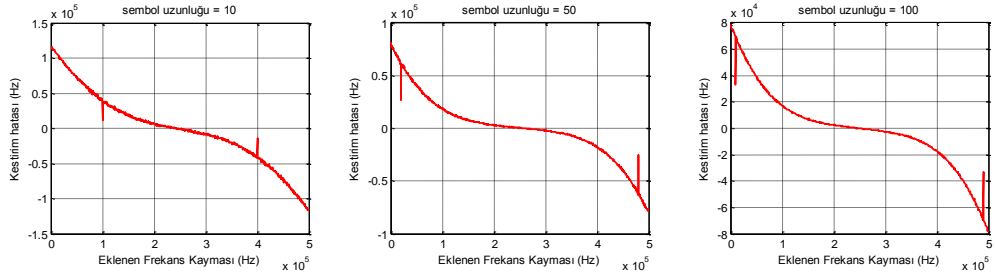
Şekil 0-17: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-18 : 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

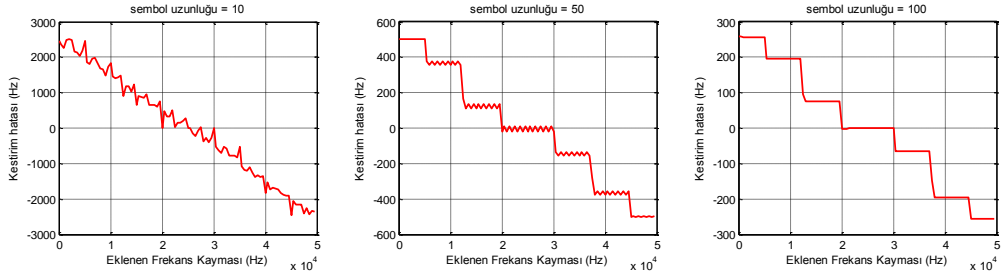


Şekil 0-19 : 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

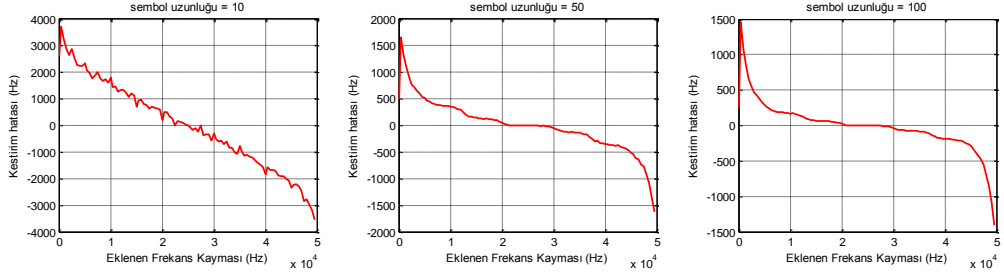


Şekil 0-20 : 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

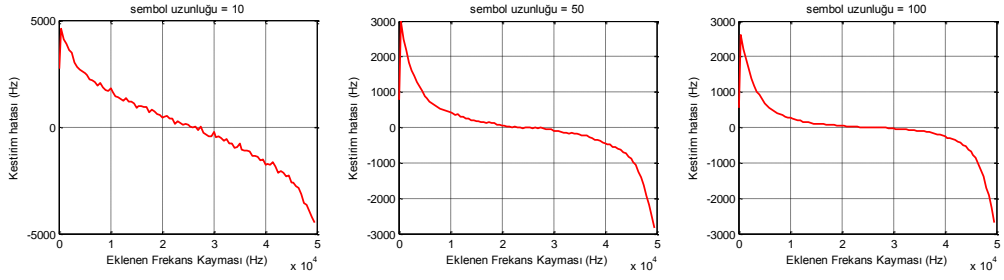
EK 1.1.5: 16 QAM sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



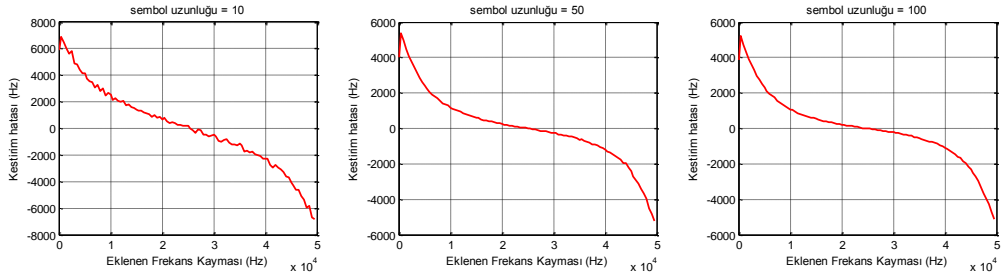
Şekil 0-21: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



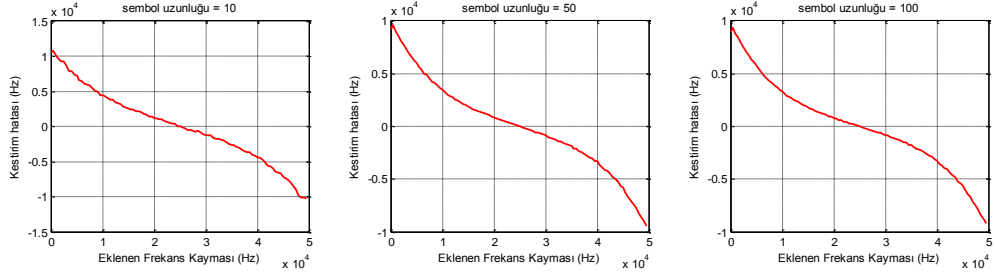
Şekil 0-22: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-23: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

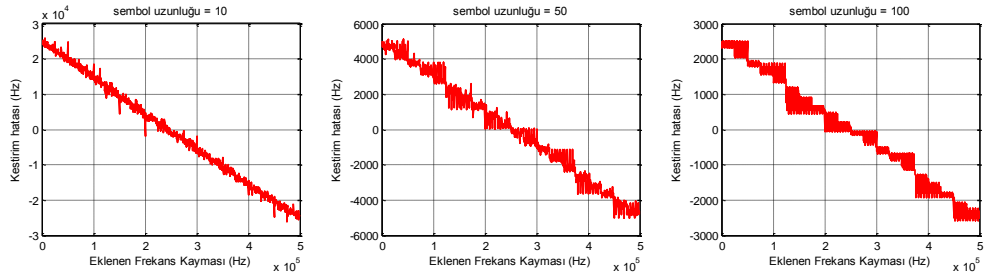


Şekil 0-24: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

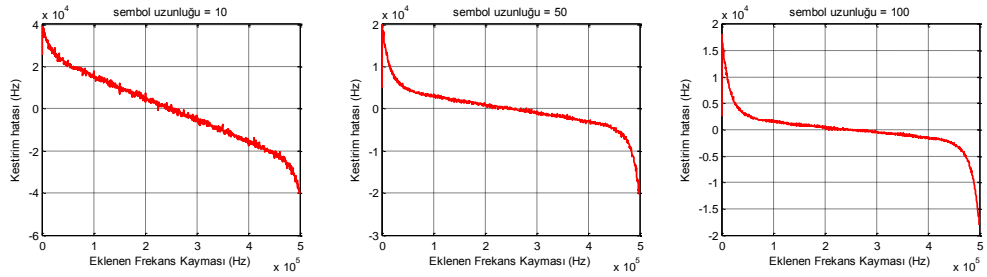


Şekil 0-25: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

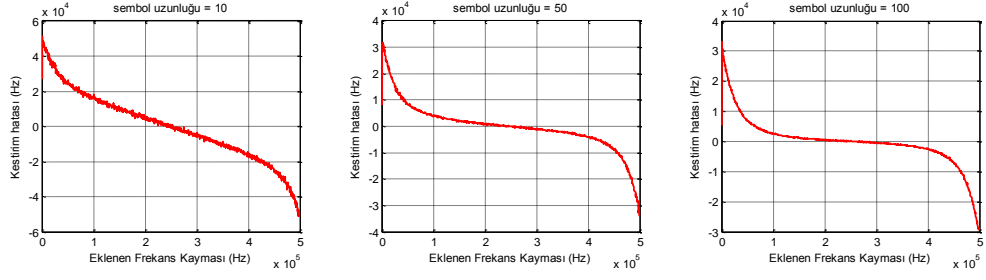
EK 1.1.6: 16 QAM sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



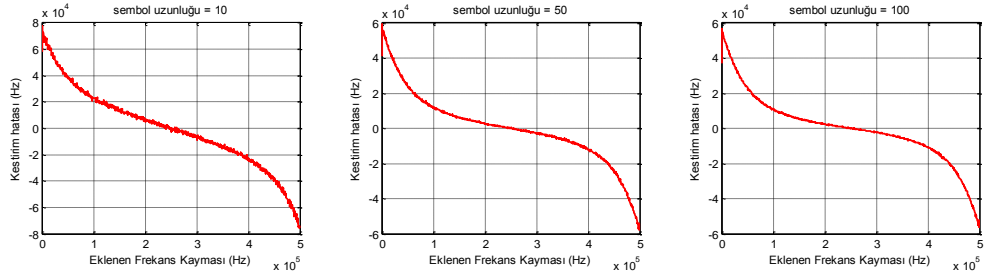
Şekil 0-26: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



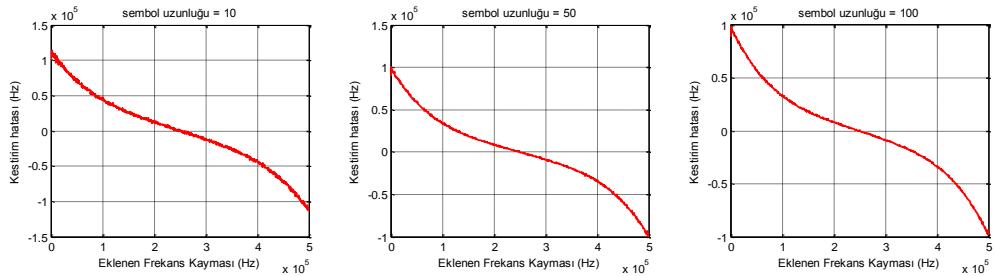
Şekil 0-27: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-28: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

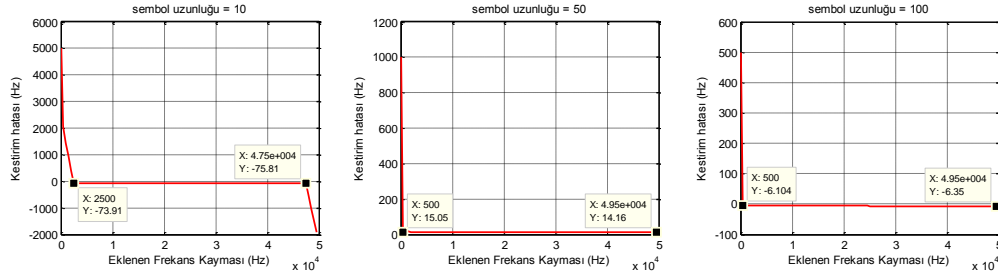


Şekil 0-29: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

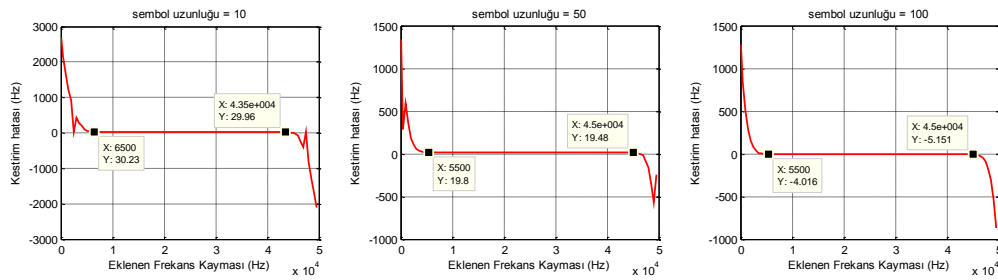


Şekil 0-30: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

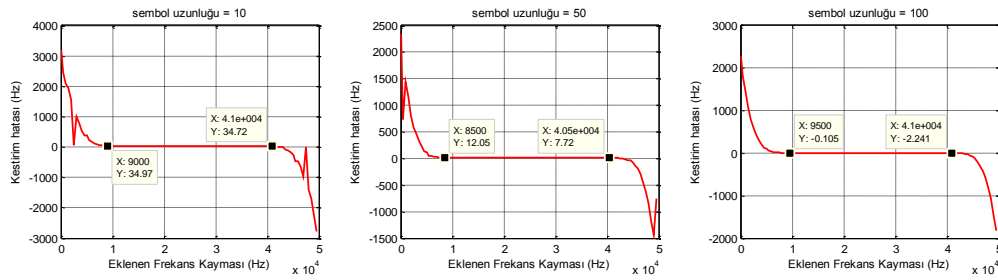
EK 1.1.7: MSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



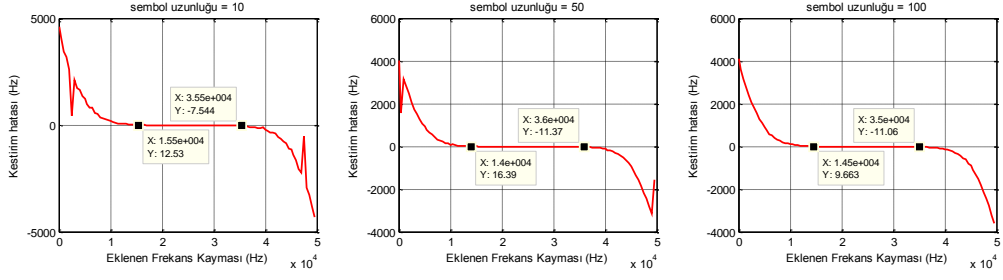
Şekil 0-31: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



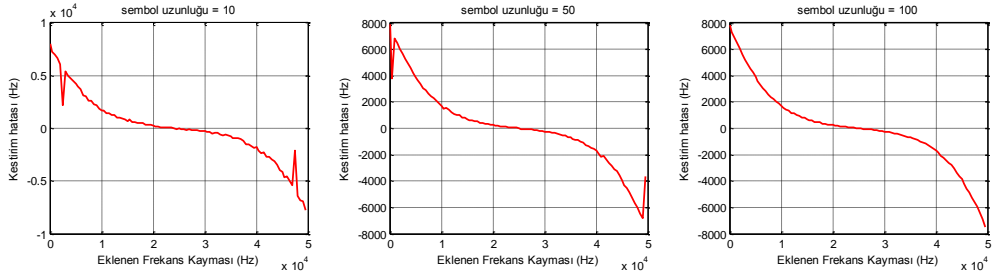
Şekil 0-32: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-33: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

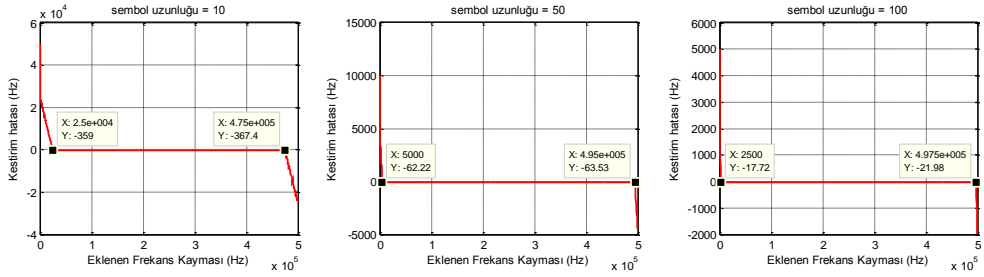


Şekil 0-34: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

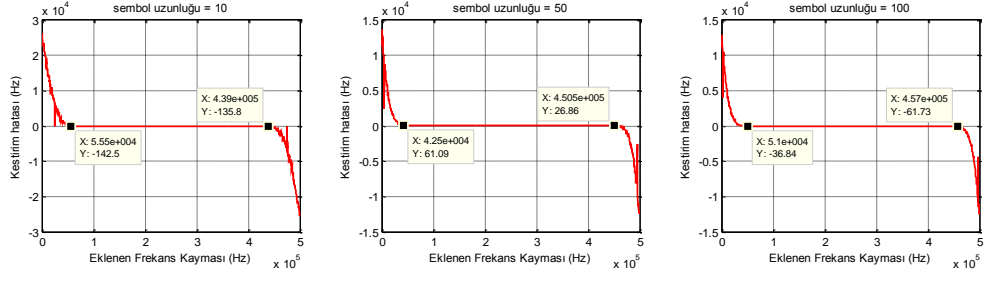


Şekil 0-35: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

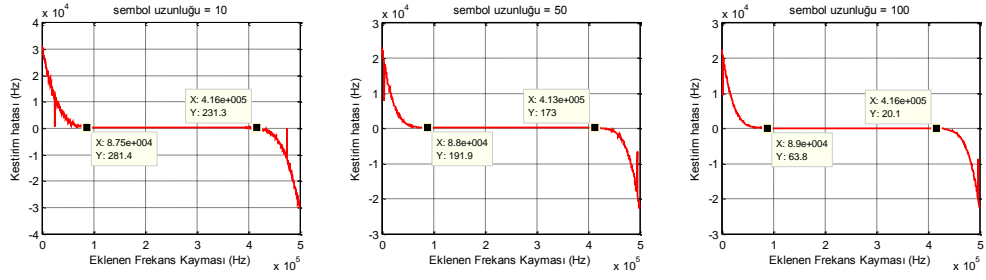
EK 1.1.8: MSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



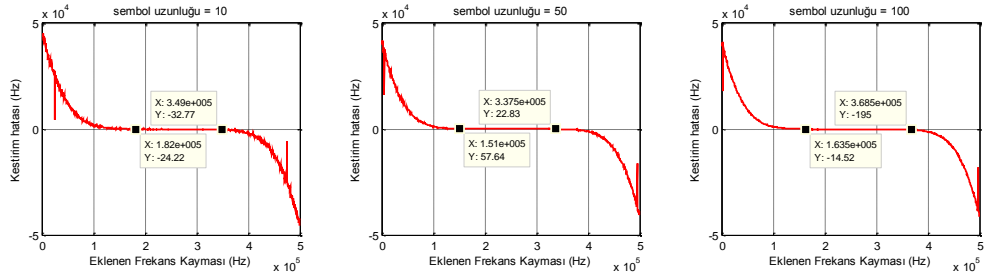
Şekil 0-36: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



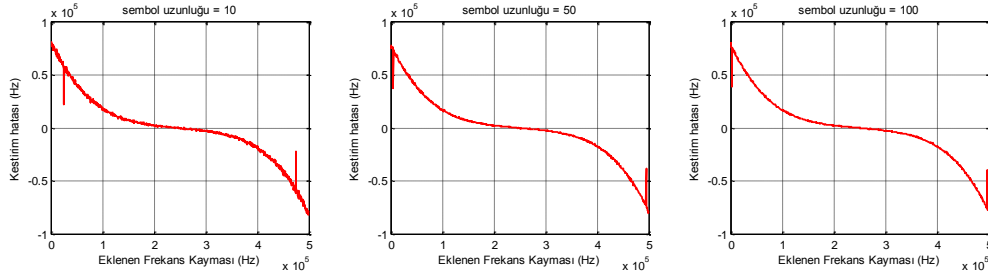
Şekil 0-37: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-38: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



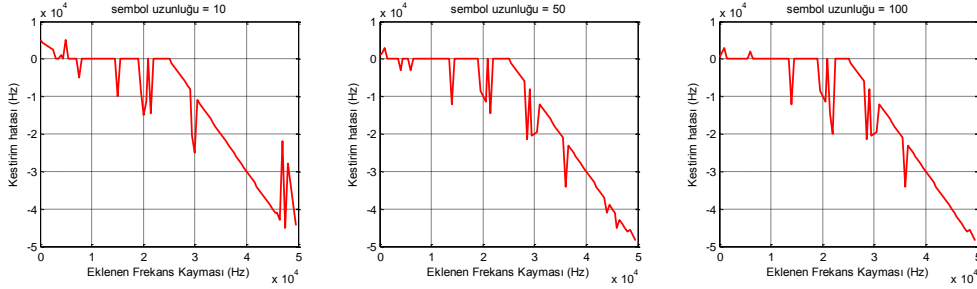
Şekil 0-39: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



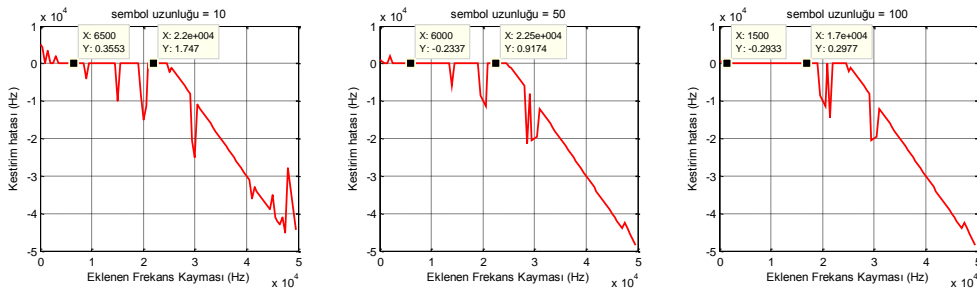
Şekil 0-40: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

EK 1.2: Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemi ile Frekans Kestirimi

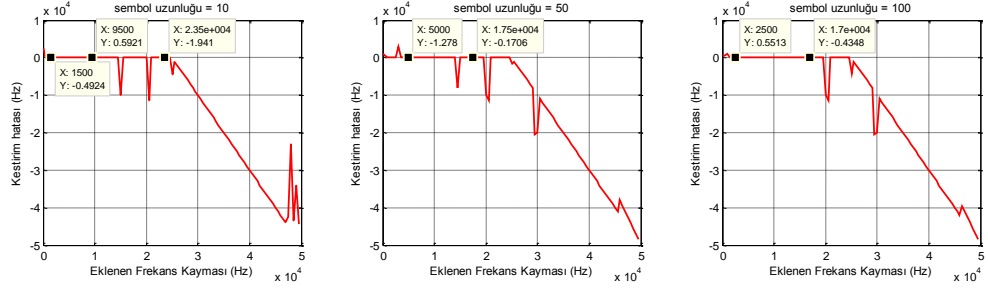
EK 1.2.1: BPSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



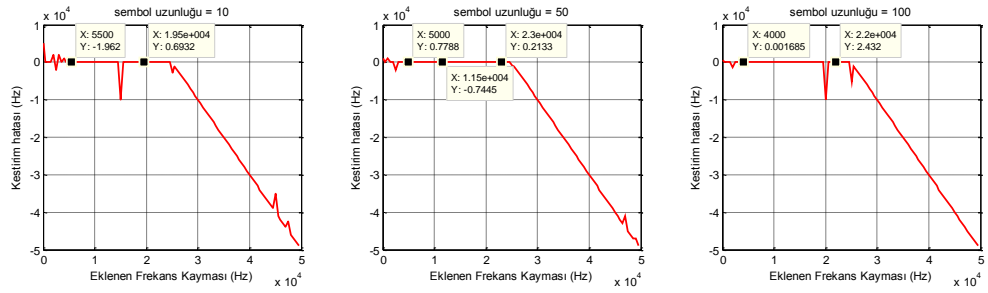
Şekil 0-41: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



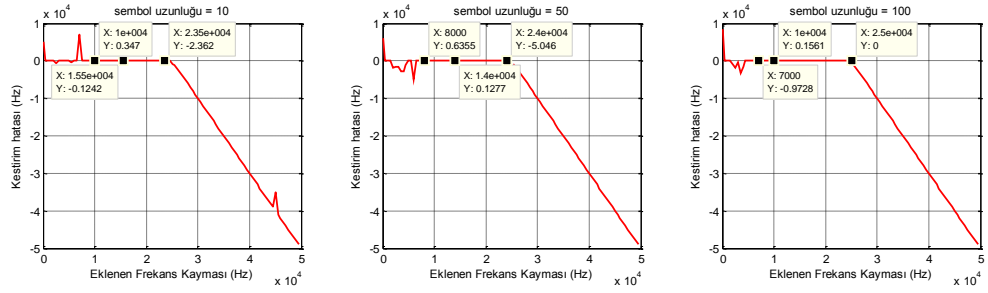
Şekil 0-42: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-43: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

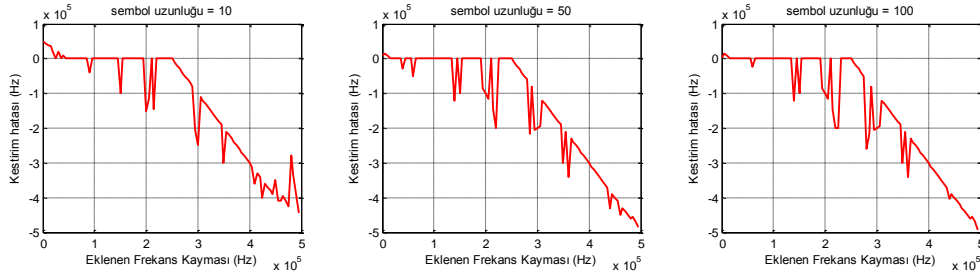


Şekil 0-44: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

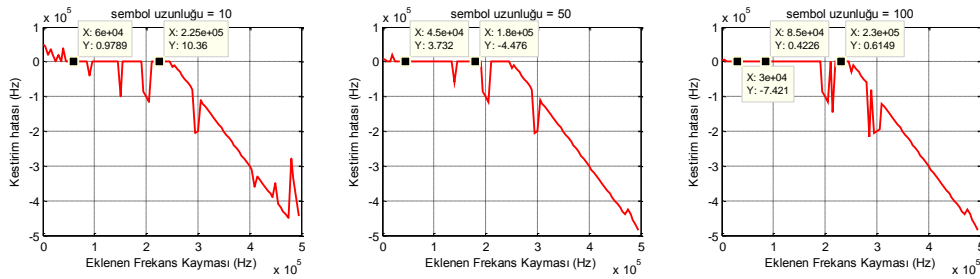


Şekil 0-45: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

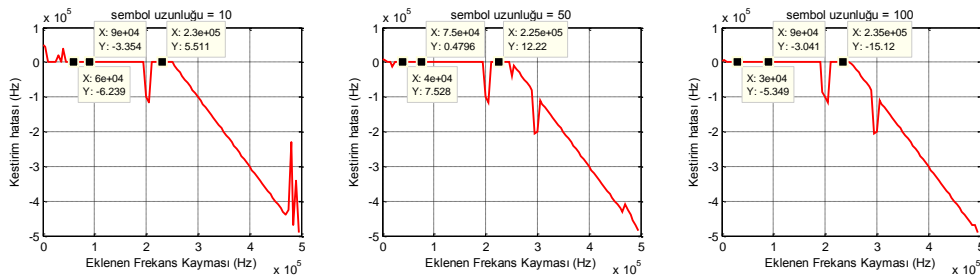
EK 1.2.2: BPSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



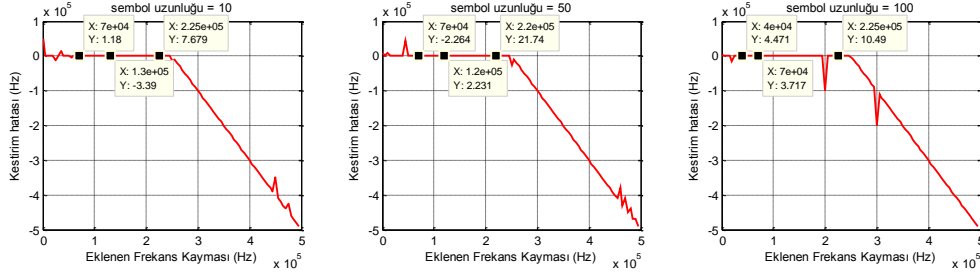
Şekil 0-46: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



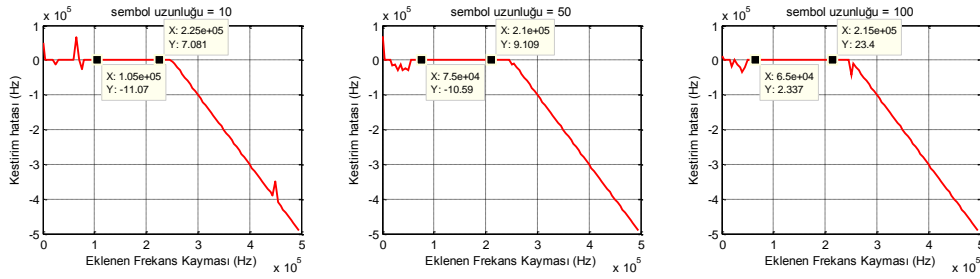
Şekil 0-47: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-48: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

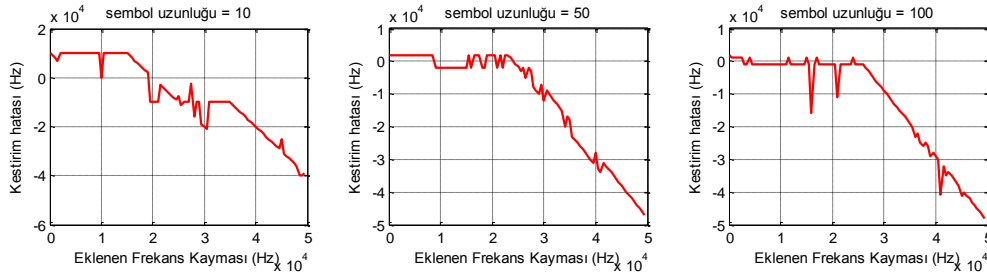


Şekil 0-49: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

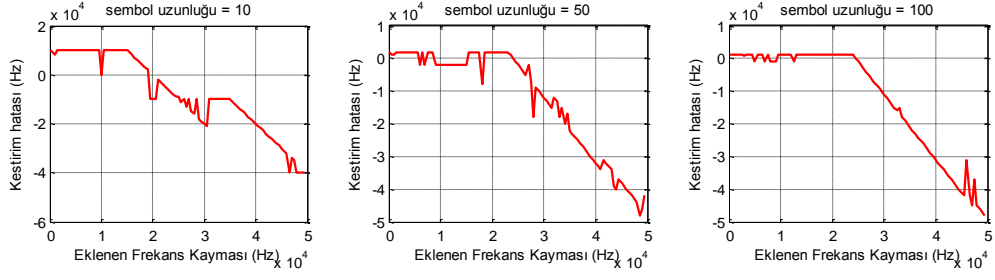


Şekil 0-50: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

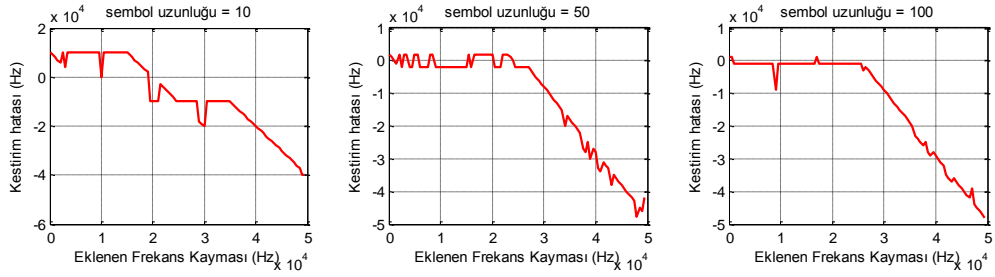
EK 1.2.3: BFSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



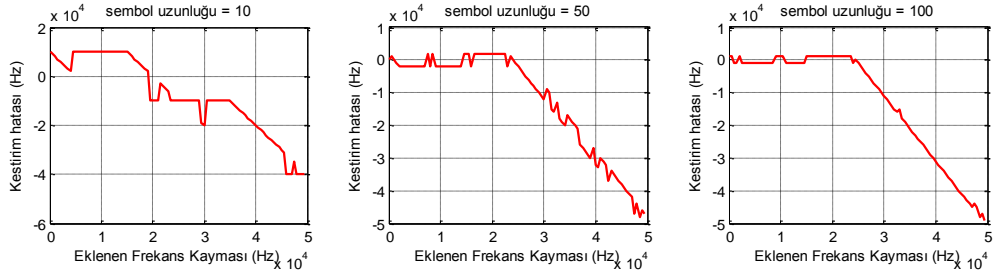
Şekil 0-51: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



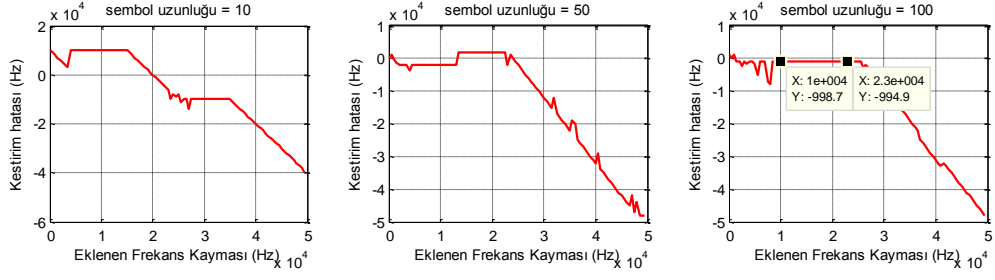
Şekil 0-52: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-53: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

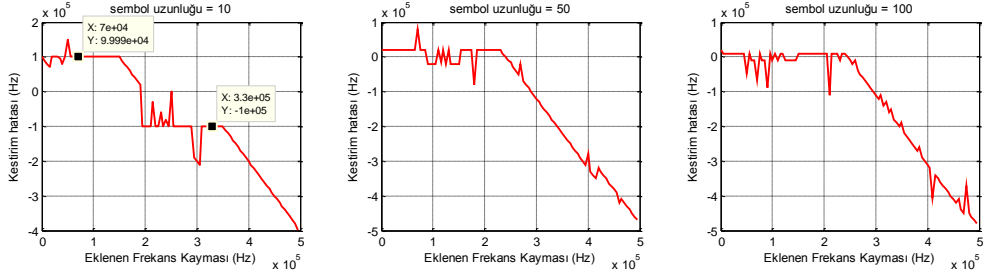


Şekil 0-54: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

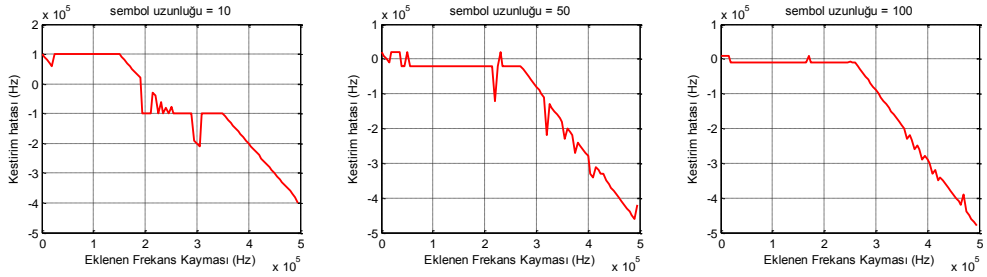


Şekil 0-55: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

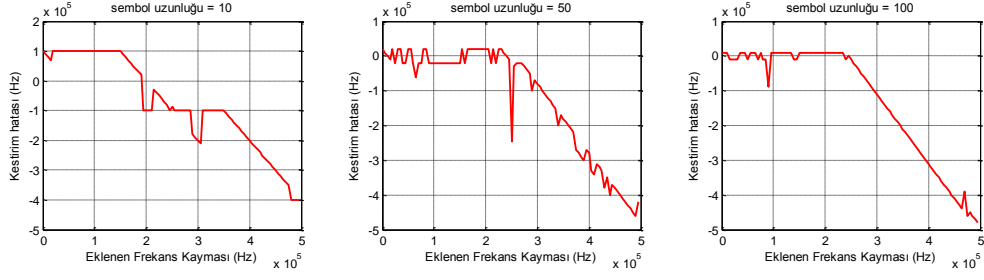
EK 1.2.4: BFSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



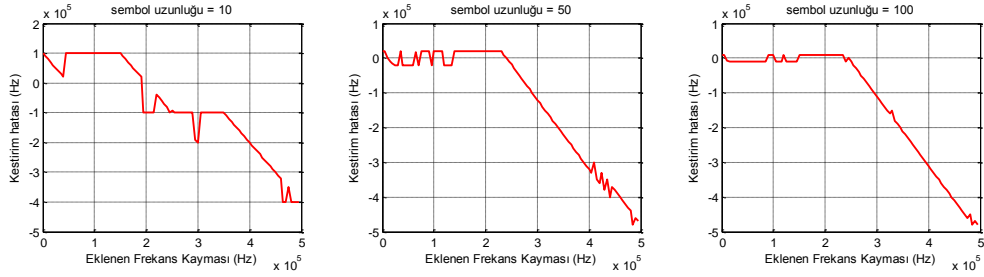
Şekil 0-56: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



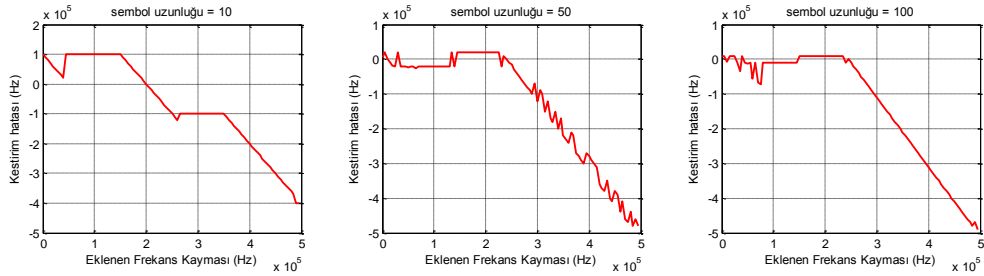
Şekil 0-57: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-58: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

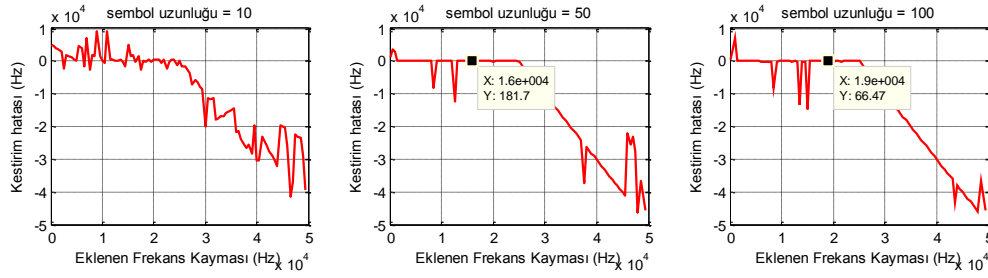


Şekil 0-59: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

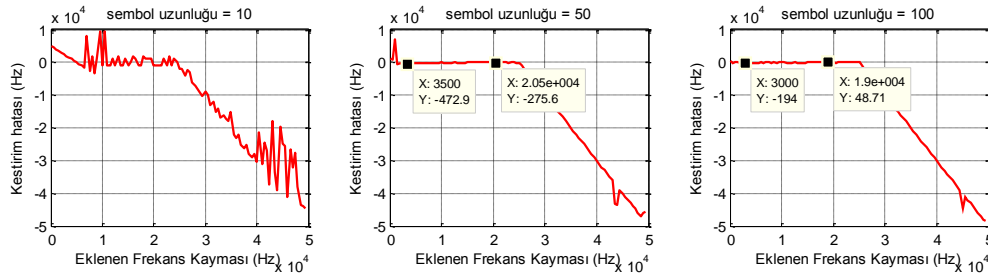


Şekil 0-60: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

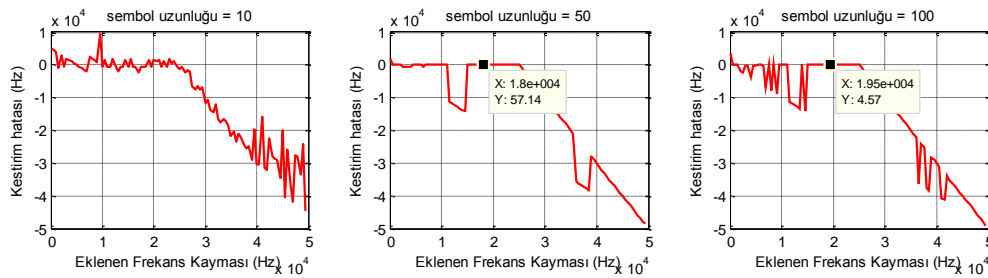
EK 1.2.5: 16 QAM sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



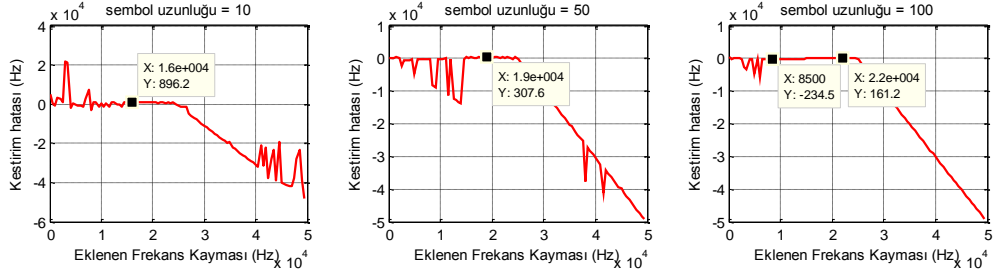
Şekil 0-61: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



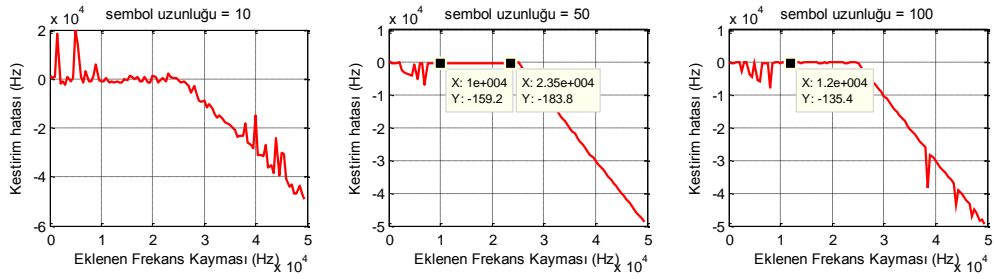
Şekil 0-62: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-63: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

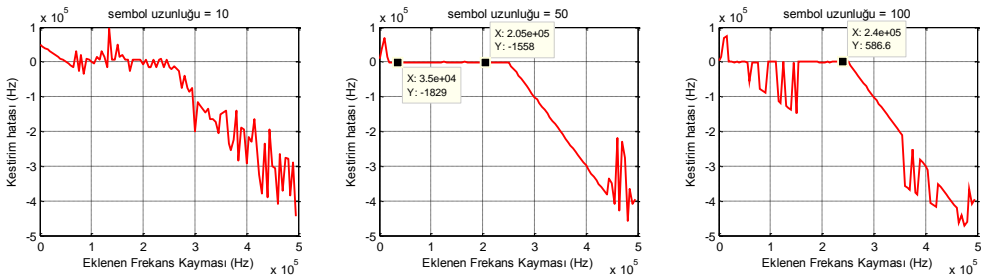


Şekil 0-64: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

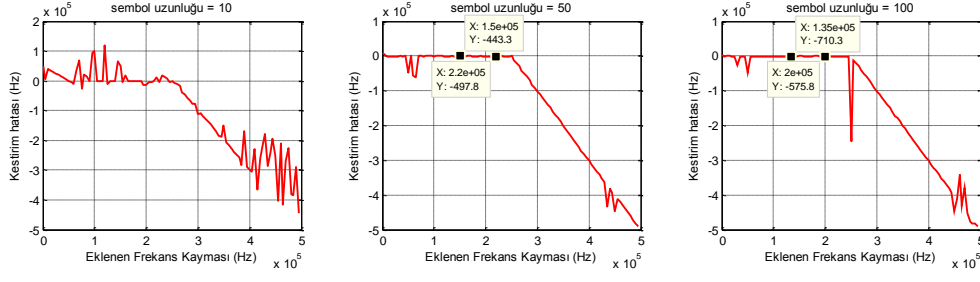


Şekil 0-65: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

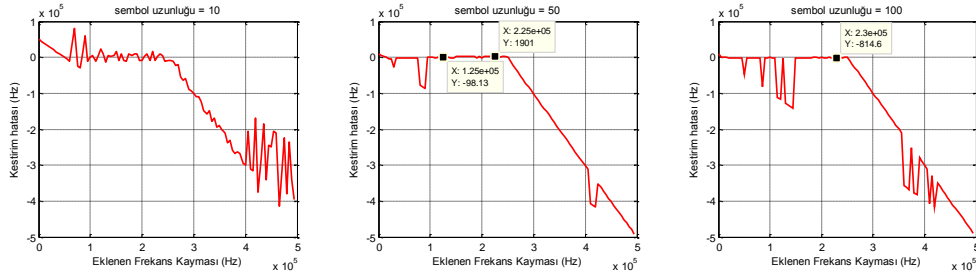
EK 1.2.6: 16 QAM sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



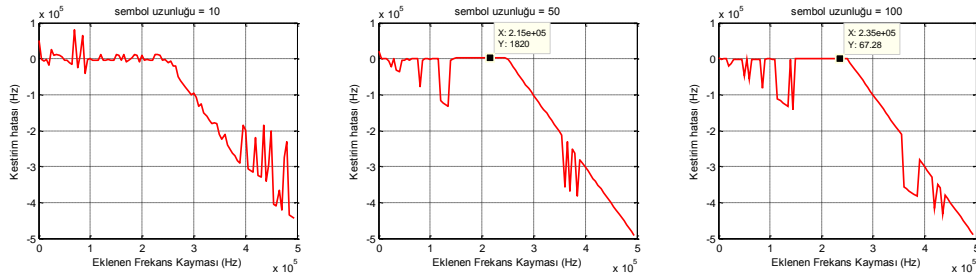
Şekil 0-66: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



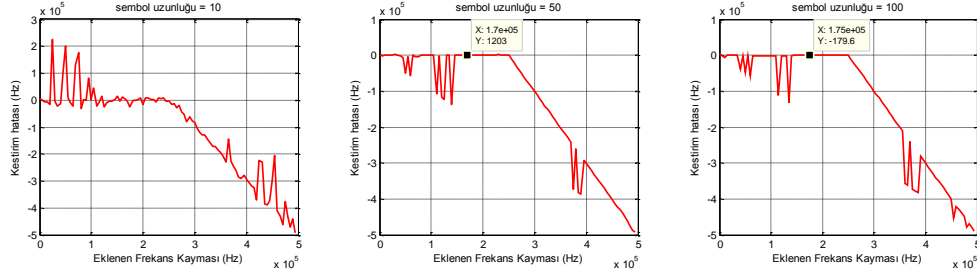
Şekil 0-67: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-68: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

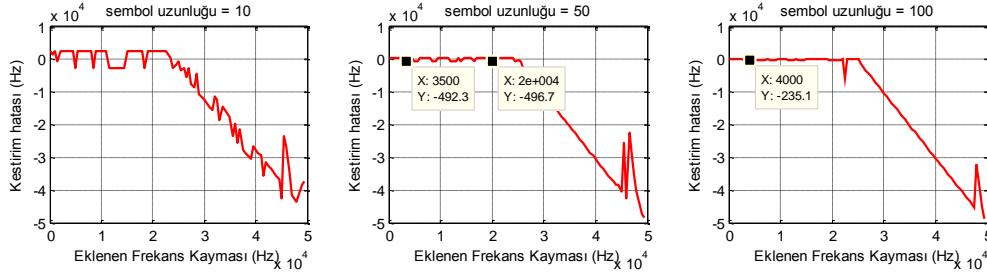


Şekil 0-69: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

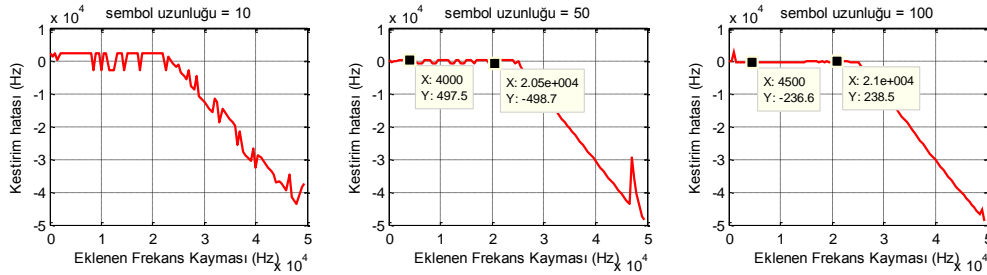


Şekil 0-70: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

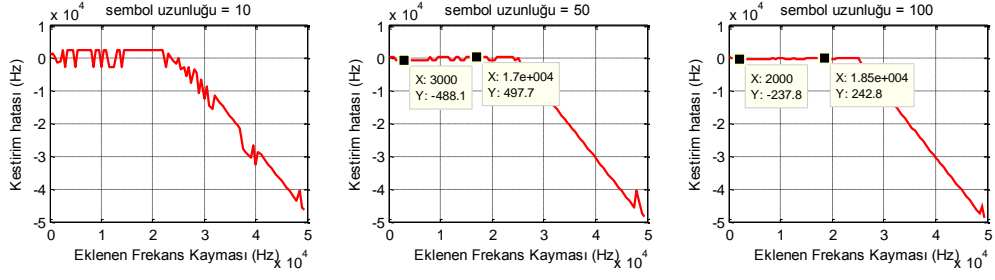
EK 1.2.7: MSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



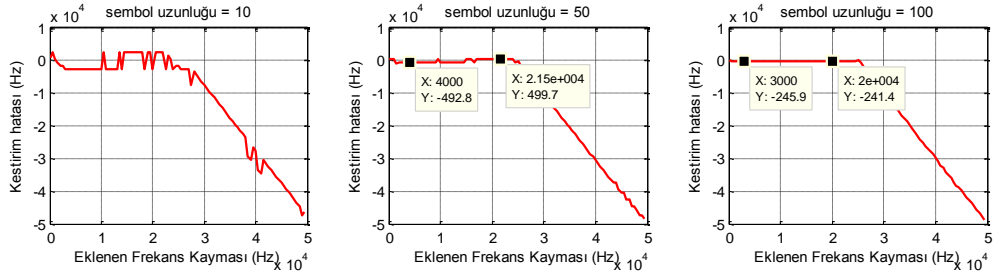
Şekil 0-71: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



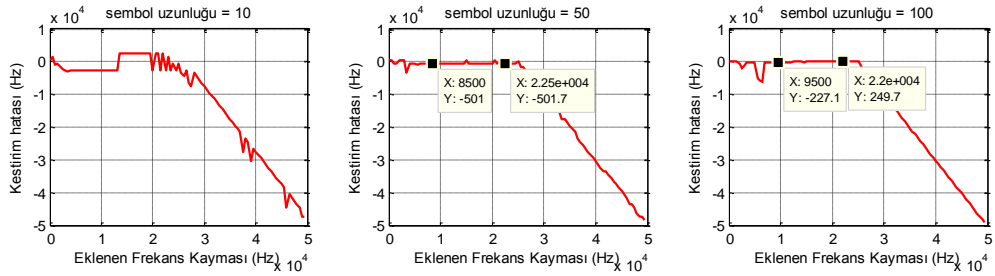
Şekil 0-72: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-73: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

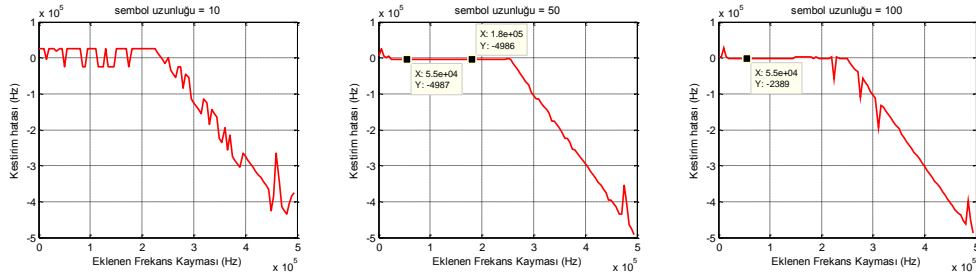


Şekil 0-74: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

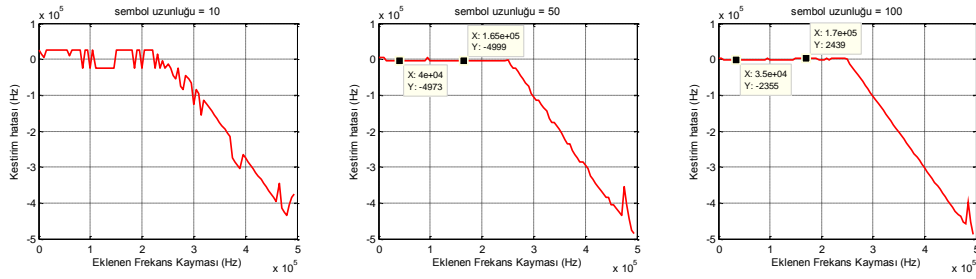


Şekil 0-75: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

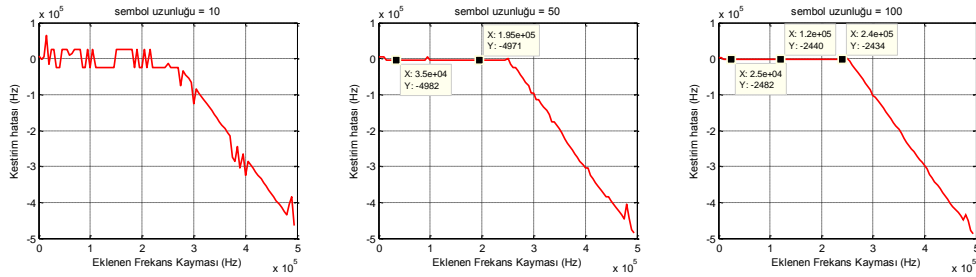
EK 1.2.8: MSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



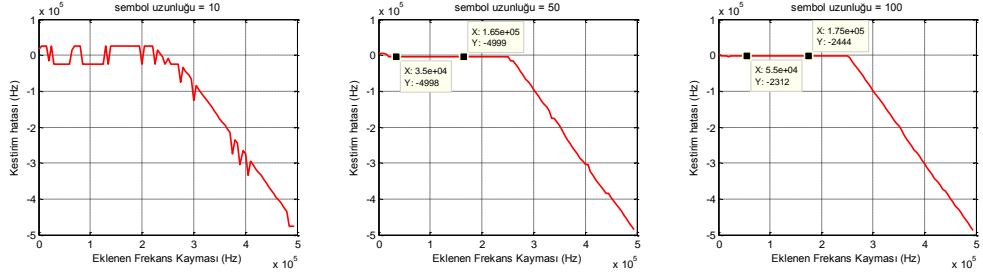
Şekil 0-76: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



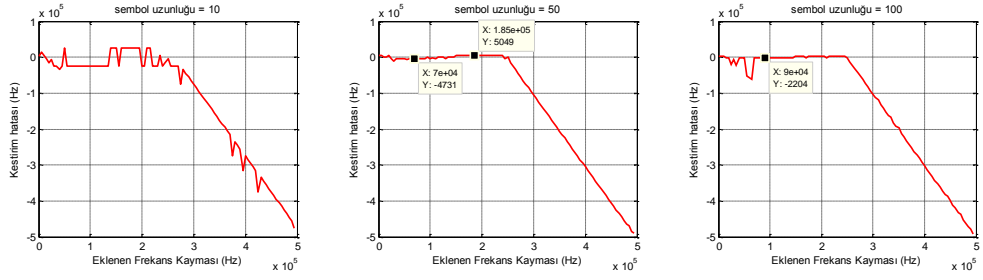
Şekil 0-77: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-78: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



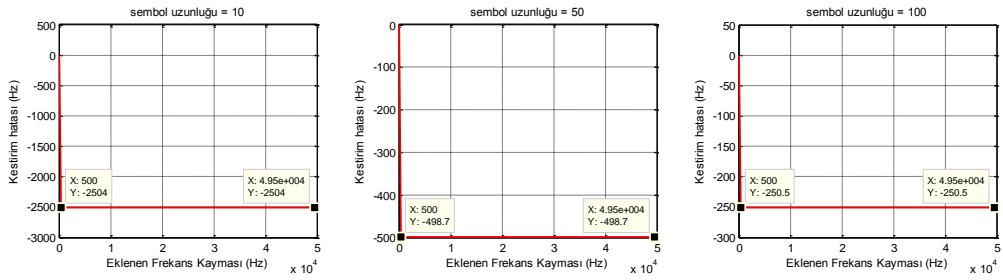
Şekil 0-79: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



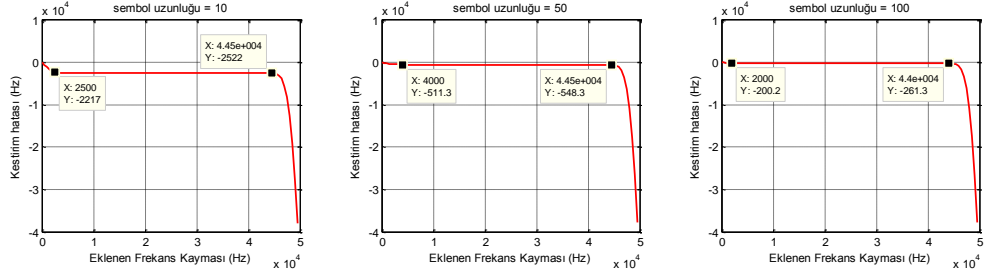
Şekil 0-80: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Frekans Alanında Sıfır Kesim Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

EK 1.3: Kay'ın Yöntemi

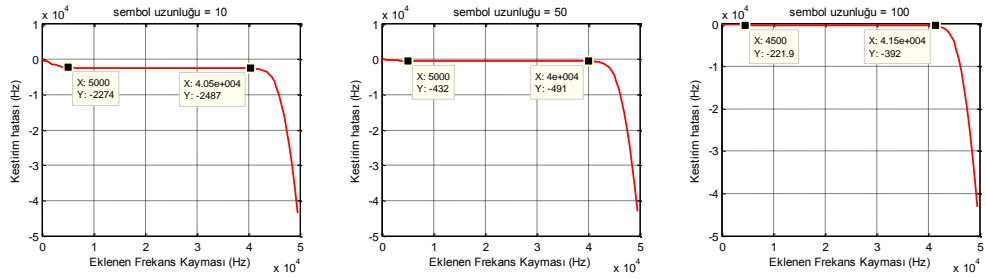
EK 1.3.1: BPSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



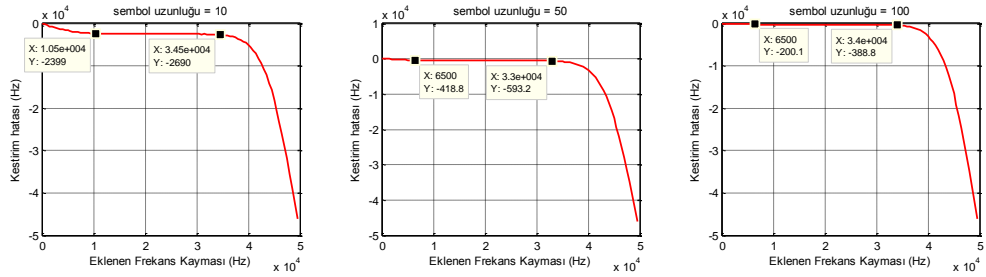
Şekil 0-81: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



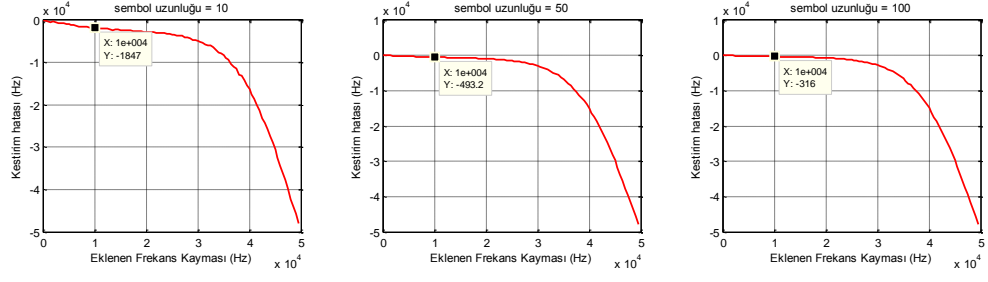
Şekil 0-82: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-83: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

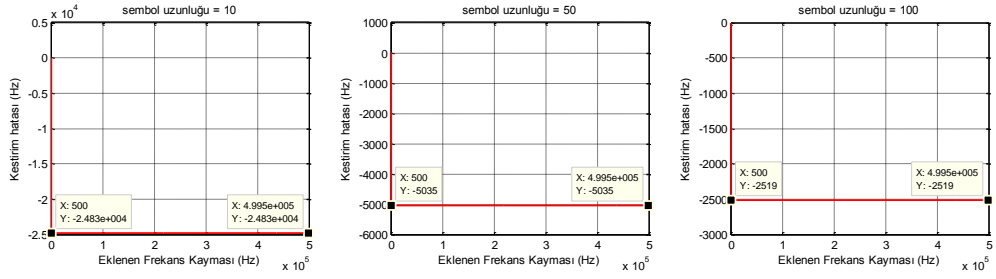


Şekil 0-84: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

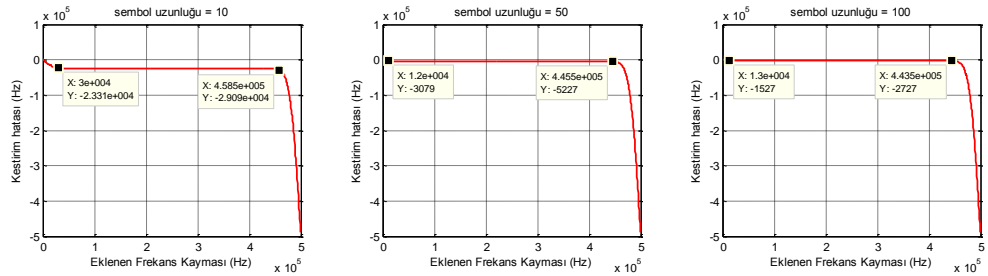


Şekil 0-85: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

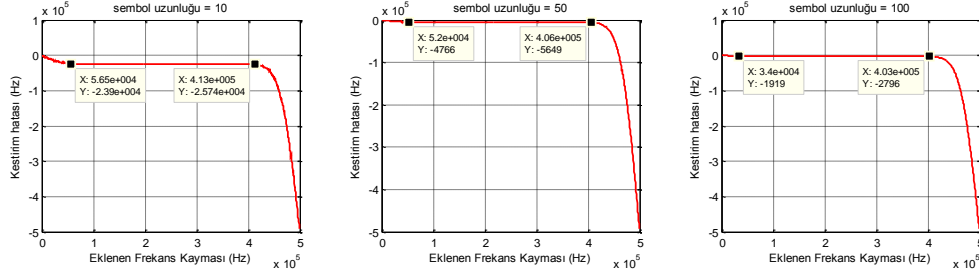
EK 1.3.2: BPSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



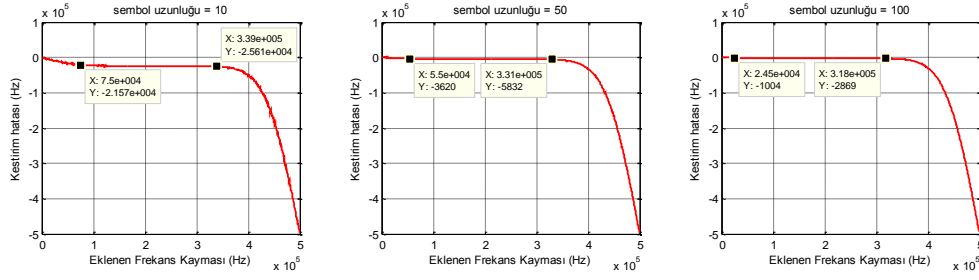
Şekil 0-86: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



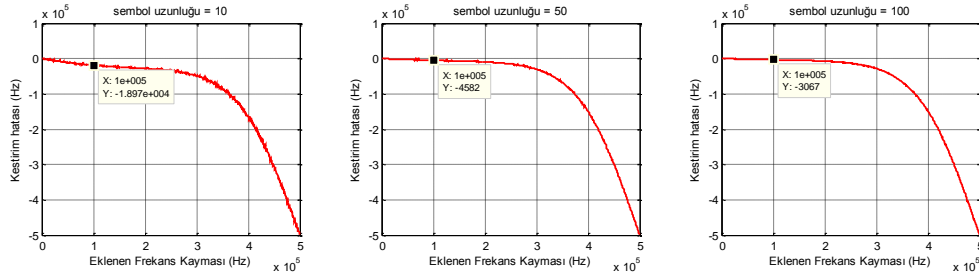
Şekil 0-87: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-88: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

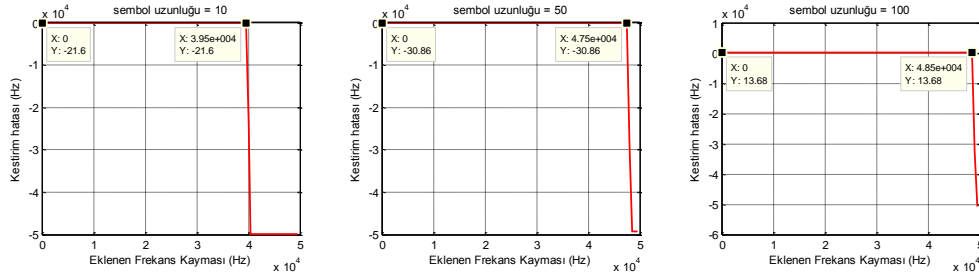


Şekil 0-89: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

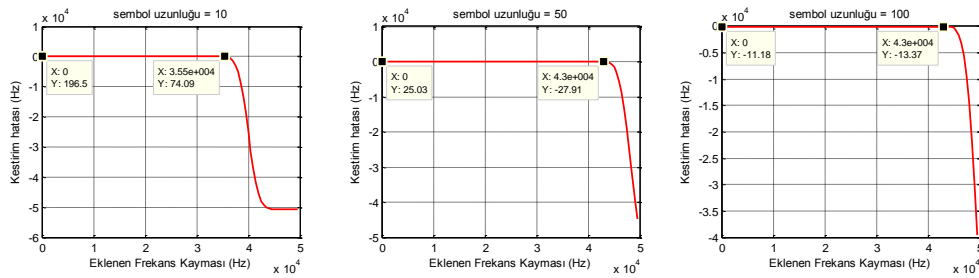


Şekil 0-90: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BPSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

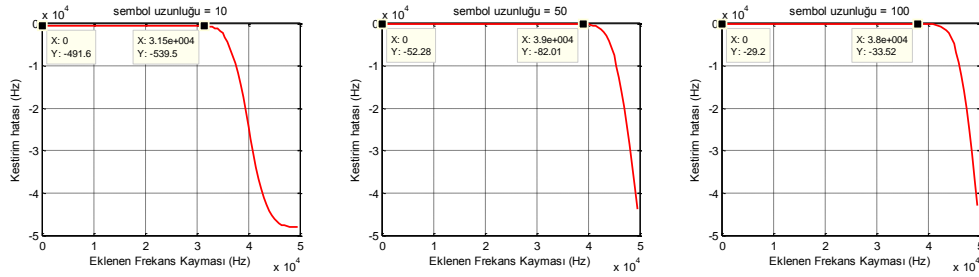
EK 1.3.3: BFSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



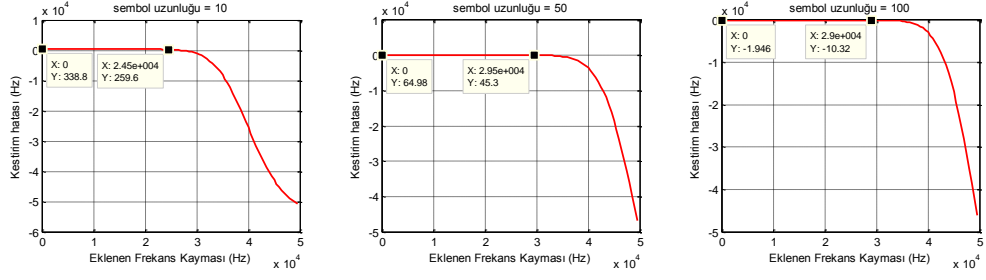
Şekil 0-91: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



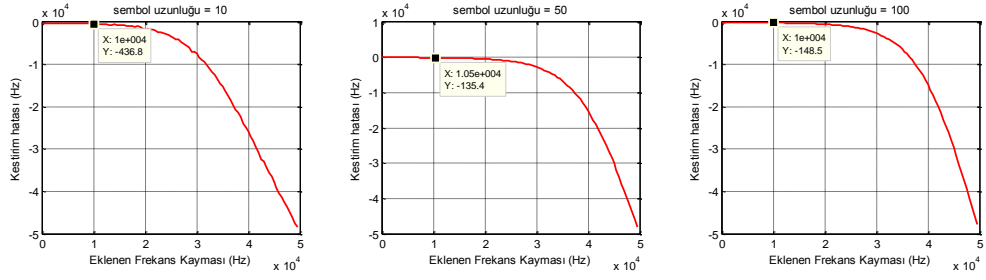
Şekil 0-92: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-93: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

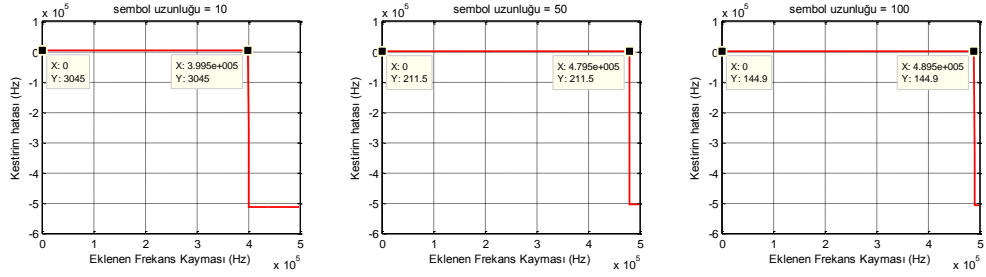


Şekil 0-94: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

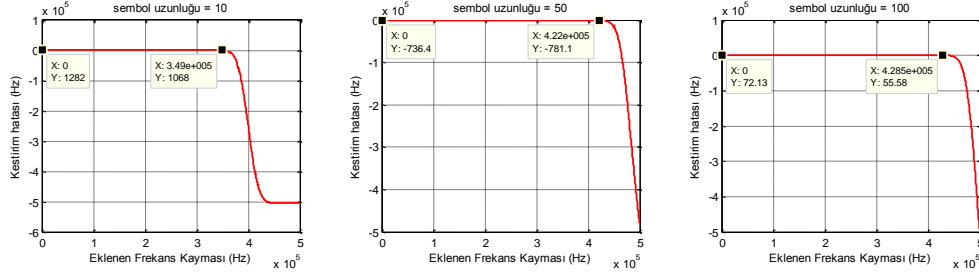


Şekil 0-95: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

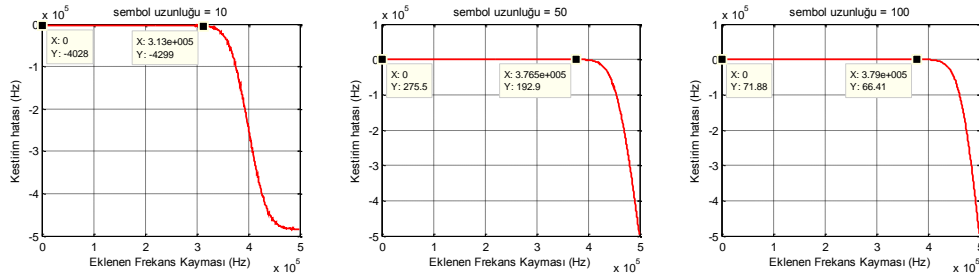
EK 1.3.4: BFSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



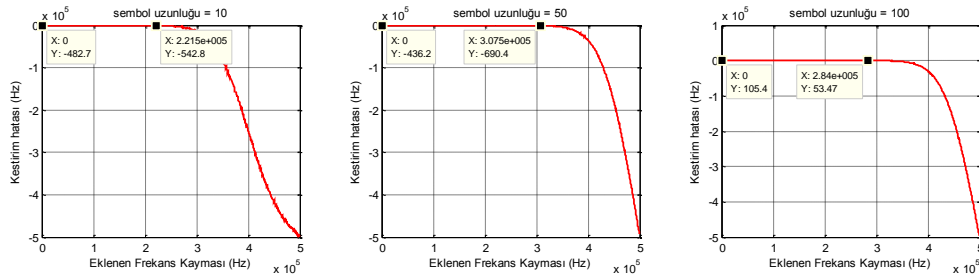
Şekil 0-96: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



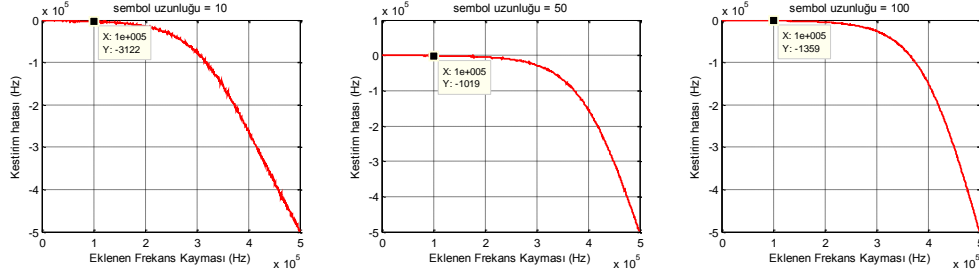
Şekil 0-97: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-98: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

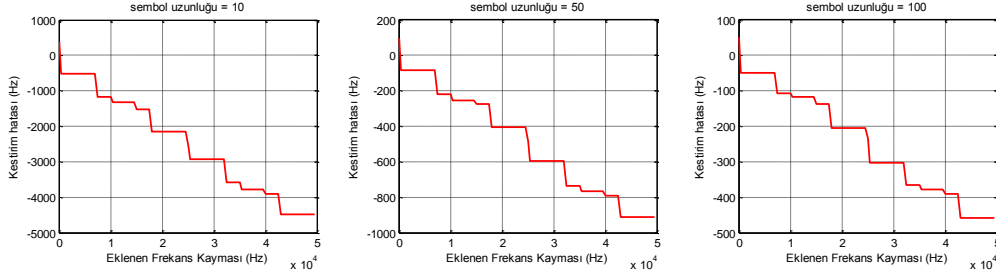


Şekil 0-99: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

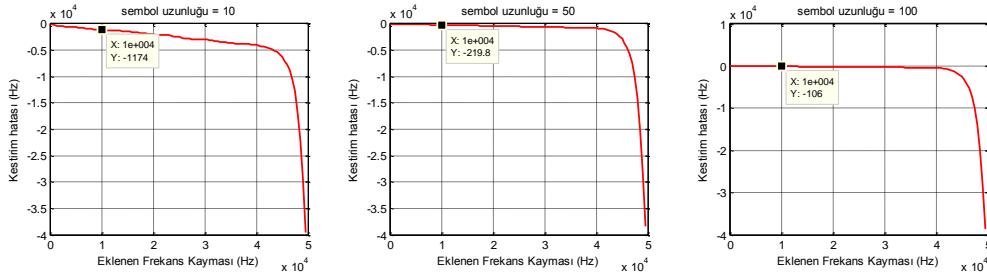


Şekil 0-100: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen BFSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

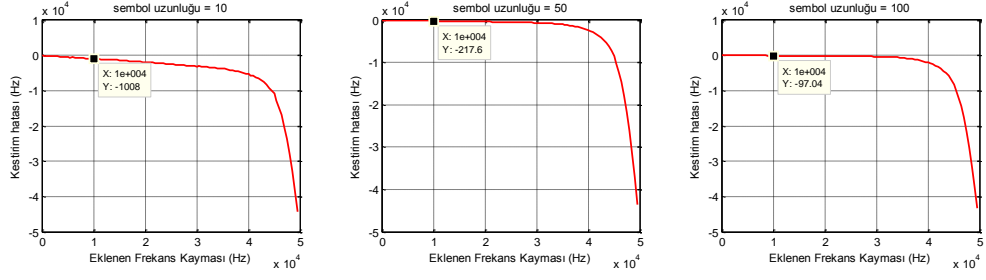
EK 1.3.5: 16 QAM sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



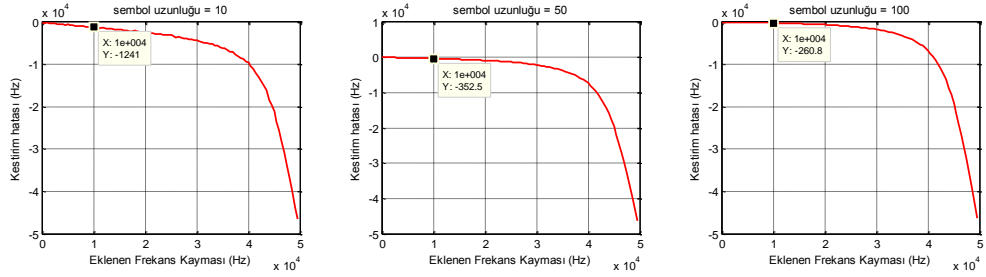
Şekil 0-101: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



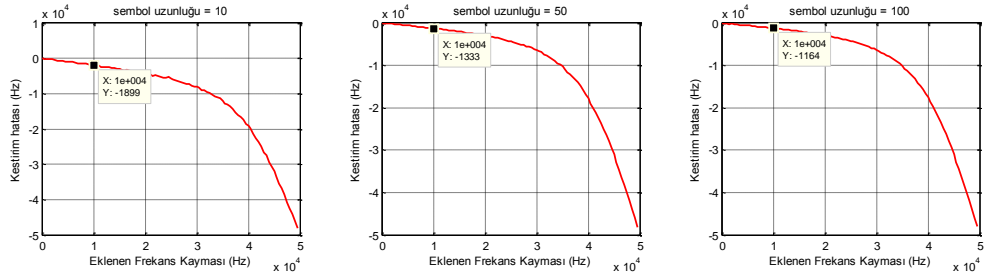
Şekil 0-102: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-103: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

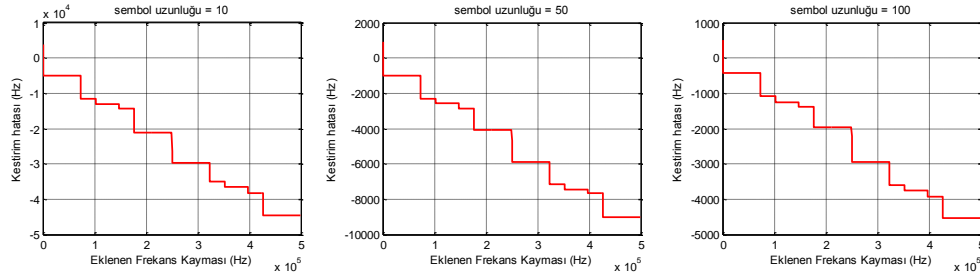


Şekil 0-104: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

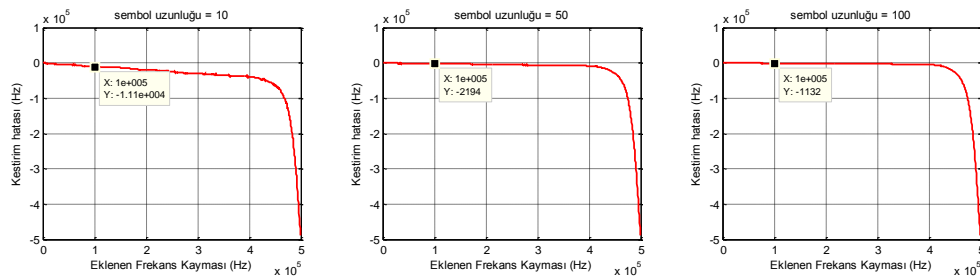


Şekil 0-105: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

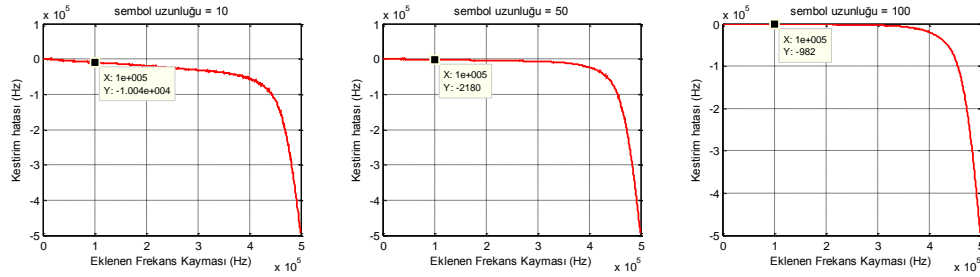
EK 1.3.6: 16 QAM sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



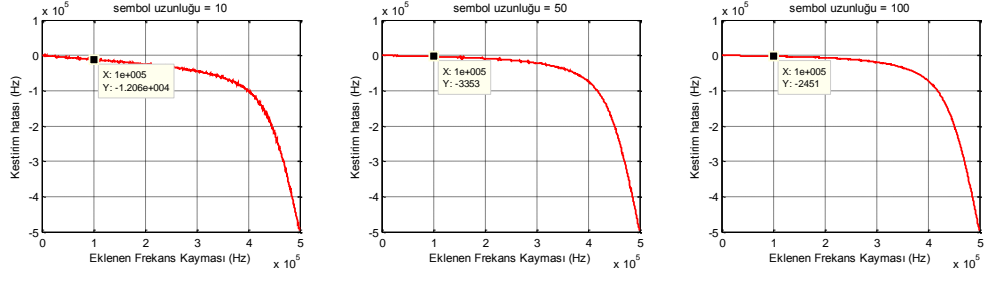
Şekil 0-106: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



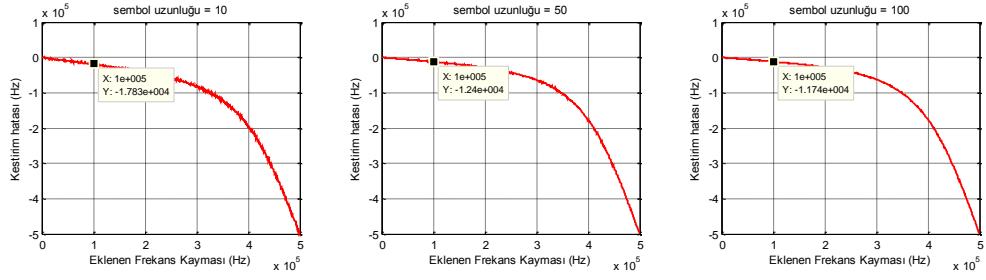
Şekil 0-107: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-108: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

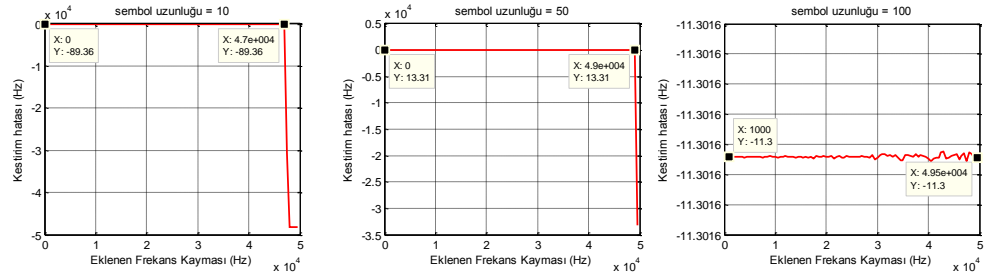


Şekil 0-109: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

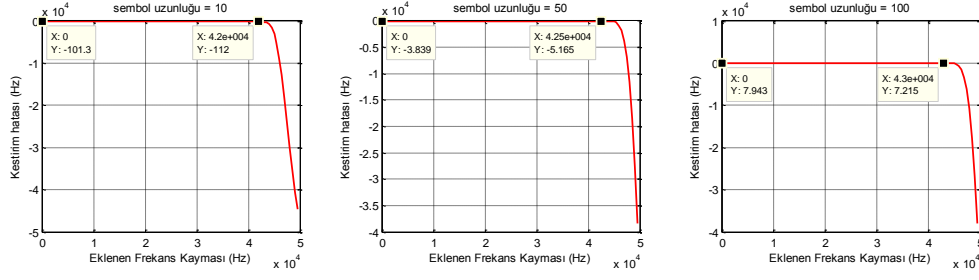


Şekil 0-110: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen 16QAM Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

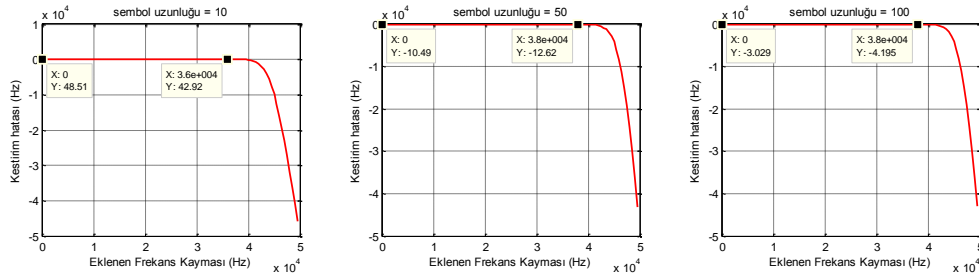
EK 1.3.7: MSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (100kHz örnekleme frekansı):



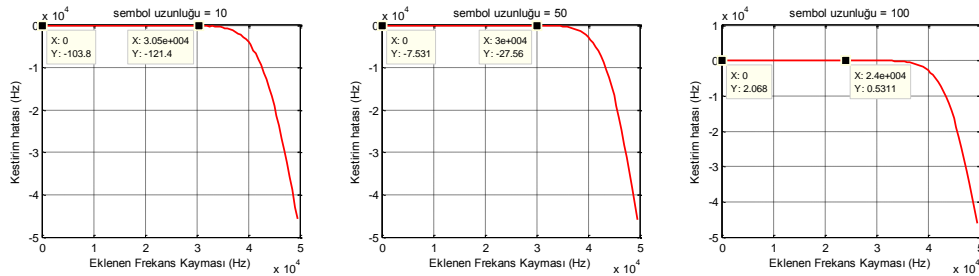
Şekil 0-111: Gürültüsüz Ortamda, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



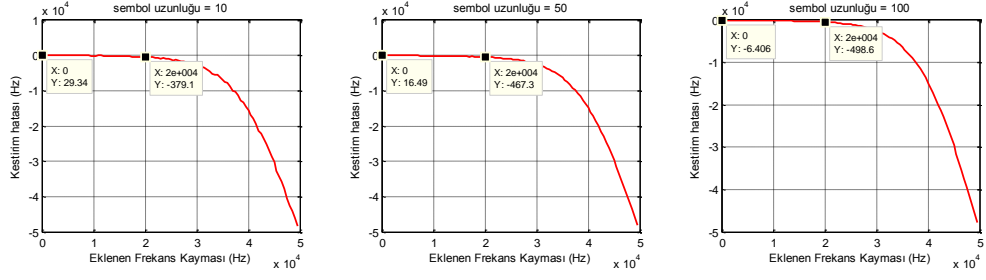
Şekil 0-112: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)



Şekil 0-113: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

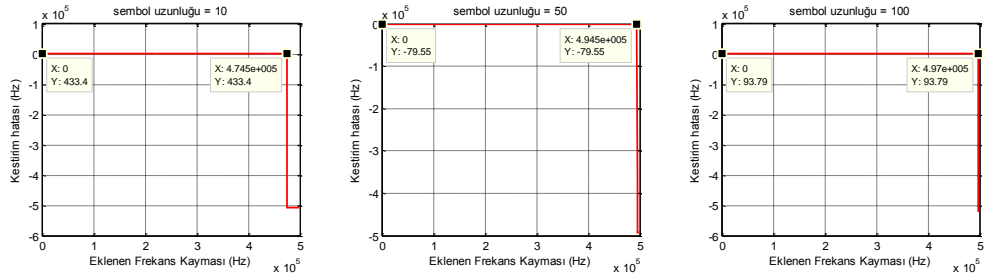


Şekil 0-114: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

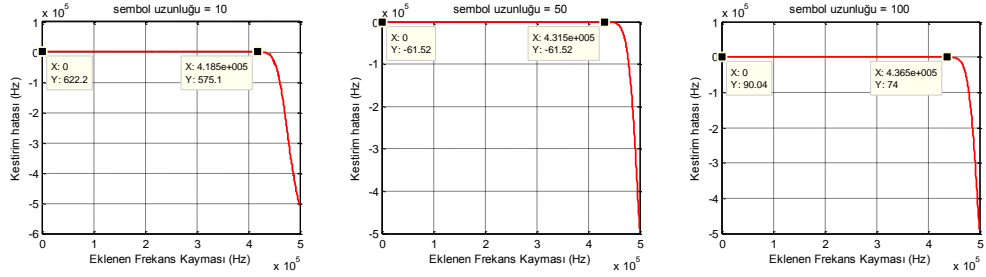


Şekil 0-115: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 100kHz)

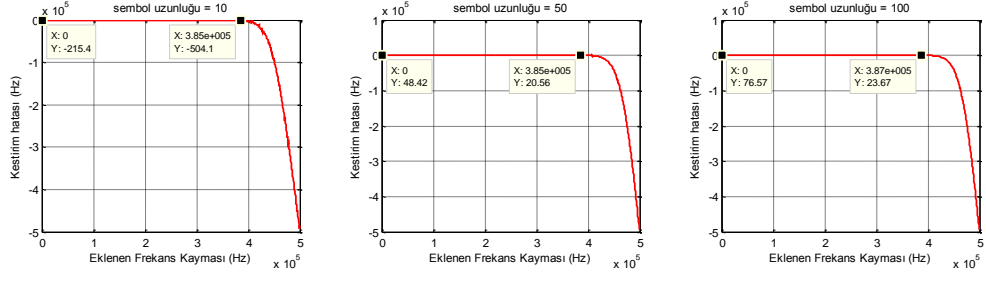
EK 1.3.8: MSK sinyali için Sıfır Kesim yöntemiyle frekans kestirimi (1MHz örnekleme frekansı):



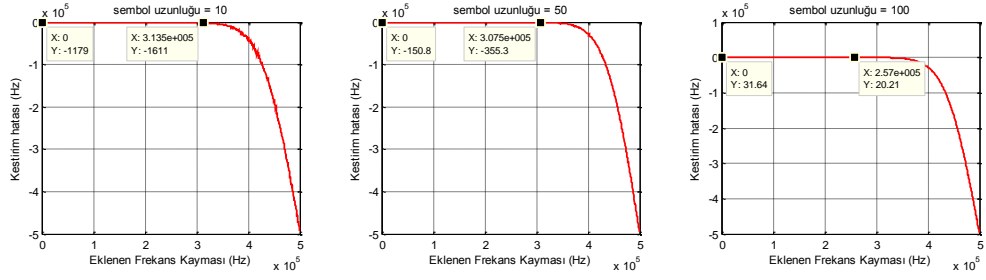
Şekil 0-116: Gürültüsüz Ortamda, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



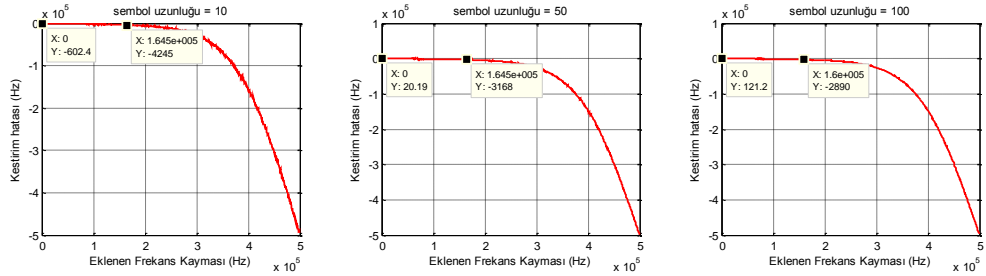
Şekil 0-117: 20dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Sembollerini 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-118: 15dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-119: 10dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)



Şekil 0-120: 5dB Sinyal Gürültü Oranında, Bir Semboller 10, 50 ve 100 Örnekle Gösterilen MSK Sinyalleri İçin Kay'ın Yöntemiyle Frekans Kestirimi (örnekleme frekansı: 1MHz)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Sema KÜSMEZ
Doğum Yeri : Çankırı
Medeni Hali : Bekar
E-posta : semakusmez@gmail.com
Adresi : Batıkent/ANK

Eğitim

Lise : Nermin Mehmet Çekiç Anadolu Lisesi, ANKARA (2001-2005)
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, ANKARA (2005-2011)
Yüksek Lisans :
Doktora :

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İleri
Almanca : Başlangıç

İş Deneyimi

AYESAŞ : Yazılım ve Test Mühendisi (2014-...)

Deneyim Alanları

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

