

**AKILLI ANTENLERİN İNCELENMESİ VE MUSIC
ALGORİTMASIYLA GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ**

Kürşat KARABULUTLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2006

ANKARA

Kürşat KARABULUTLU tarafından hazırlanan AKILLI ANTENLERİN İNCELENMESİ VE MUSIC ALGORİTMASIYLA GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Y.Doç.Dr. Cem NAKİBOĞLU
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Doç.Dr. Osman GÜRDAL

Üye : Y.Doç.Dr. Cem NAKİBOĞLU

Üye : Y.Doç.Dr. M. Timur AYDEMİR

Tarih : 27/04/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kürşat Karabulutlu

AKILLI ANTENLERİN İNCELENMESİ VE MUSIC ALGORİTMASIYLA GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kürşat KARABULUTLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Nisan 2006

ÖZET

Bu çalışmada, haberleşme bant genişliğinin verimli bir şekilde kullanılabildiği akıllı anten sistemlerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, temel anten parametreleri verilmiş ve bu konudaki önemli detaylar belirtilmiştir. Üçüncü bölümde, ses, video, data vb.. haberleşmelerin temelini, oluşturan Maxwell denklemleri verilmiş ve çözümleri sunulmuştur. Dördüncü bölümde, akıllı anten sistemlerine giriş yapılmış ve akıllı anten çeşitleri bunların faydaları hakkında detaylar belirtilmiştir. Daha sonra akıllı anten sistem elemanlarına (alıcı, verici) değinilmiştir. Ayrıca dizi temelleri, doğrusal anten dizileri ve düzlemsel anten dizilerinden bahsedilmiştir ve en son anten dizileri için kurumsal modeller verilmiştir. Beşinci bölümde, ışın şekillendirme ve uzaysal süzgeçlemenin ne olduğundan söz edilmiş ve ağırlık vektörlerinin hesaplanması yapılmıştır. Daha sonra bazı ışın şekillendirme algoritmaları ve hesaplama yöntemleri verilmiştir. Bu algoritmalar kullanılarak daha önce yapılmış olan benzetimler sunulmuştur. Son bölümde, tezimizin asıl başlığını oluşturan geliş açısı kestiriminin ne olduğu ve bunlar için kullanılan algoritmaların neler olduğu, en çok kullanılan algoritmalarından olan en büyük olabilirlik yönteminde daha önce yapılmış olan benzetim sunulmuştur. Ve nihayet MUSIC algoritmasının yapısından bahsedilmiş ve gerekli matematiksel çözümler yapılmıştır. Elde edilen formüller kullanılarak Matlab ile benzetim yapılmış ve yazılan program EK-1' de sunulmuştur. Yapılan benzetim için çeşitli

parametreler kullanılarak ve bu parametrelerin farklı değerleri için kestirim spektrumları ve zdeğer grafikleri çizdirilmiştir. ıkan sonuçlar ayrı ayrı yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 905.1.053
Anahtar Kelimeler : Akıllı antenler, MUSIC algoritması, Geliş açısı
Sayfa Adedi : 90
Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr Cem NAKİBOğLU

**SMART ANTENNA RESEARCH AND DIRECTION OF ARRIVAL
ESTIMATION WITH MUSIC ALGORITHM**

(M.Sc. Thesis)

Kürşat KARABULUTLU

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

April 2006

ABSTRACT

In this study; smart antennas in which communication belt width can be used efficiently is referred. In the second part; basic antenna parameters are given and essential details are put forward about the issue. In the third part; Maxwell equation which is the basis of the voice, video, data and etc. is mentioned and the solutions are given. Forth part emphasizes the introduction of the smart antennas and all the details about smart antennas including the kinds of the antennas are referred. After; system elements (buyer-donor) of the smart antennas are recounted briefly. In addition to these; the base of series, linear antenna series and planar antennas series are told and institutionalism models are proposed for the latest antennas series. In the fifth part; the meaning of ray shaping and space percolating are mentioned and the calculation of weight vectors are done. Furthermore; some of the ray shaping algorithms and calculation methods are emphasized. Using these algorithms, the examples given before are presented. In the last part; direction of arrival estimation that covers the title of this study is given including the main aspects of the subject and the kinds of algorithms which are used for them and the possibility of the algorithms using the examples are given. Finally; the structure of Music algorithm is mentioned and essential mathematical solutions are emphasized. Acquired formulas are used in the Matlab assimilation and written program is given in annex 1. For the assimilations which are done; various parameters are

used and for the different values of these parameters; prediction spectrums and main values graphics are drawn. All results are evaluated specifically.

Science Code : 905.1.053

Key Words : Smart antennas, MUSIC algorithm, Direction of Arrival

Page Number: 90

Adviser : Yrd.Doç.Dr Cem NAKİBOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd. Doç.Dr. Cem NAKİBOĞLU'na, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli eşime ve varlığıyla bana huzur veren kızıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL BAĞINTILAR.....	3
2.1. Temel Anten Parametreleri	3
2.2. Işıma Güç Yoğunluğu (Radiation Power Density)	4
2.2.1. Kapalı bir yüzeyden geçen toplam anlık güç	5
2.2.2. İzotropik antenin ışıdığı toplam güç	6
2.3. Işıma Şiddeti (Radiation intensity).....	6
2.3.1. Antenin ışıdığı toplam güç	7
2.4. Yönelim (Directivity).....	7
2.5. Anten Kazancı	8
3. MAXWELL DENKLEMLERİ.....	10
3.1. Maxwell Denklemlerinin İfadesi.....	10
3.2. Maxwell Denklemlerinin Çözümü.....	11
4. AKILLI ANTEN SİSTEMLERİ.....	14
4.1. Akıllı Anten Çeşitleri	14

Sayfa

4.1.1. Anahtarlanmış ışıma demeti antenleri.....	15
4.1.2. Uyarlamalı anten dizileri.....	15
4.2. Anahtarlanmış ve Uyarlamalı Dizi Sistemlerinin Faydaları/Sakıncaları	16
4.3. Uyarlamalı Algoritmanın Anatomisi.....	19
4.4. Akıllı Antenlerin Sistem Elemanları	21
4.4.1. Akıllı anten alıcısı	23
4.4.2. Akıllı anten vericileri	25
4.5. Anten dizilerinin temelleri	27
4.6. Anten Dizi Yapısı.....	28
4.6.1. Doğrusal anten dizileri	28
4.6.2. Düzlemsel anten dizileri.....	29
4.7. Bir anten dizisi için kuramsal model.....	29
4.8. Dizi geometrisi ve eleman boşluğu	31
5. IŞIN ŞEKİLLENDİRME VE UZAYSAL SÜZGEÇLEME.....	32
5.1. Ağırlık Vektörünün Bulunması.....	33
5.1.1. LMS ve DLMS Algoritması	35
5.1.2. Özyineli en küçük kareler yöntemi (RLS)	40
5.2. Uzaysal Süzgeçleme Teknikleri	40
5.2.1. Genel ışın şekillendirme eşitlikleri.....	41
5.2.2. Doğrusal dizilimli benzetim.....	41
6. GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ.....	44
6.1. En Büyük Olabilirlik Yöntemi (Maximum Likelihood Method).....	44
6.1.1. Açısal yoğunluk fonksiyonları	45

Sayfa

6.1.2. En büyük olabilirlik yöntemi için benzetim.....	47
6.2. MUSIC (Multiple Signal Classification) Algoritması	50
6.2.1. Kovaryans matrisi (covariance matrix).....	52
6.2.2. Algoritmanın oluşturulması	53
6.2.3. Matlab ile benzetim.....	54
6.3. MUSIC Algoritması ile En Büyük Olabilirlik yönteminin Karşılaştırılması..	74
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
EKLER.....	83
EK-1 Matlab programı	84
ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. SDMA şekli	1
Şekil 2.1. Anten analizi için koordinat sistemi	3
Şekil 2.2. Anten alan bölgeleri	4
Şekil 4.1. a) Anahtarlanmış hüzmeye sistemi patterni b) uyarlamalı dizi patterni	14
Şekil 4.2. Anahtarlanmış ışın demeti(kırmızı) ve uyarlamalı dizi(mavi) sistemlerin kullanıcı sinyaller(yeşil çizgi) ve ortak kanal girişimcileri(sarı çizgiler) için seçmesi gereken ışın şekillendirme lobları ve noktaları.....	17
Şekil 4.3. Anahtarlanmış ışın demeti ve uyarlamalı dizi antenleri için kapsama alanı patterni	18
Şekil 4.4. Aynı sıradan kanalda hatta aynı hücredeki 2 kullanıcıyı destekleyen tam uyarlamalı fiziksel işlem	19
Şekil 4.5. Uyarlamalı algoritmanın anatomisi.....	20
Şekil 4.6. Uyarlamalı akıllı anten sistemlerinin blok diyagramı.....	22
Şekil 4.7. Akıllı antenin alıcı kısmı.....	24
Şekil 4.8. Akıllı antenler için farklı dizi geometrileri	25
Şekil 4.9. Akıllı antenin verici kısmı.....	26
Şekil 4.10. Δx aralıklarla yerleştirilmiş uniform doğrusal bir dizide ϕ açısıyla gelen düzlemsel dalga gösterimi	28
Şekil 4.11. Doğrusal anten dizisi.....	28
Şekil 4.12. Düzlemsel anten dizisi	29
Şekil 4.13. Gelen dalga yüzeyini gösteren düzgün dağılımlı doğrusal anten dizilimi.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Işın yönlendirme.....	32
Şekil 5.2. Adaptif ışın demeti oluşturma sistemi	34
Şekil 5.3. LMS ve DLMS'in oluşturduğu ışın demeti	36
Şekil 5.4. a) LMS ve DLMS algoritmasının adım sayısına göre karesel hata değişimi b) LMS ve DLMS algoritmasının adım sayısına göre birinci anten elemanındaki ağırlığın değişimi.....	37
Şekil 5.5. LMS algoritmasının farklı SIR değerlerinde SNR' ye göre BER değişimi	38
Şekil 5.6. DLMS algoritmasının farklı SIR değerlerinde SNR' ye göre BER değişimi	38
Şekil 5.7. R matrisinin Öz değer yayılımının SNR ile değişimi	39
Şekil 5.8. Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü.....	42
Şekil 5.9. Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü.....	42
Şekil 5.10. Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüleri	43
Şekil 6.1. Olasılık yoğunluk fonksiyonları ve x ölçümüne göre aldıkları değerler	45
Şekil 6.2. Düzgün doğrusal anten dizisi.....	46
Şekil 6.3. Tek Kullanıcı için 5, 10 ve 20 antenle yapılan benzetim (Antenler yarım dalga boyu aralıklıdır)	48
Şekil 6.4. Kaynak sayısı dört olduğunda 20, 50 ve 100 anten sayılarıyla yapılan modelleme sonuçları (Siyah yuvarlaklı çizgiler 100 anten, kareli çizgiler 50 anten, düz çizgi ise 20 anten ile yapılan benzetimdir).....	48
Şekil 6.5. İki Kaynak 1 derece aralıklarla yerleştirildikleri zaman 20, 50, 100 ve 150 antenle yapılan benzetim sonuçları	49
Şekil 6.6. Anten elemanları ve gelen işaretler	50

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	55
Şekil 6.8. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	56
Şekil 6.9. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, ... örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	56
Şekil 6.10. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	57
Şekil 6.11. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	57
Şekil 6.12. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	58
Şekil 6.13. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (20, 30, 40, 50), anten sayısı 8, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	58
Şekil 6.14. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (20, 30, 40, 50), anten sayısı 8, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	59
Şekil 6.15. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (20, 21, 22, 23), anten sayısı 50, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	59
Şekil 6.16. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (21, 22, 23, 24), anten sayısı 50, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	60
Şekil 6.17. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu	60

Şekil	Sayfa
Şekil 6.18. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği.....	61
Şekil 6.19. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 30, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	61
Şekil 6.20. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 30, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği.....	62
Şekil 6.21. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 37, 38, 39), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	62
Şekil 6.22. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 38, 39), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	63
Şekil 6.23. SNR=20, sinyal sayısı 15, açıları (30, 31, 32, ... , 42, 43, 44), anten sayısı 150, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu	63
Şekil 6.24. SNR=20, sinyal sayısı 33, açıları (-80, -75, -70, ... , 70, 75, 80), anten sayısı 60, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu	64
Şekil 6.25. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 52, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	65
Şekil 6.26. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 52, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	65
Şekil 6.27. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	66
Şekil 6.28. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	66

Şekil	Sayfa
Şekil 6.29. SNR=100, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 3, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	67
Şekil 6.30. SNR=100, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 3, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	67
Şekil 6.31. SNR=100, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 38, 39), anten sayısı 45, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu	68
Şekil 6.32. SNR=100, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 38, 39), anten sayısı 45, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	68
Şekil 6.33. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0 20 40 60 65 70 80), frekanslar (0,1 0,1 0,1 0,1 0,3 0,35 0,4 0,45 0,32 0,42), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için açı tahmin spektrumu	69
Şekil 6.34. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0 20 40 60 65 70 80), frekanslar (0,1 0,1 0,1 0,1 0,3 0,35 0,4 0,45 0,32 0,42), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	70
Şekil 6.35. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), frekanslar (0,2 0,2), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için açı tahmin spektrumu	70
Şekil 6.36. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), frekanslar (0,2 0,2), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği	71
Şekil 6.37. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), frekanslar (0,2 0,2), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için açı tahmin spektrumu	71
Şekil 6.38. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 10 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	72
Şekil 6.39. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 100 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 6.40. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), olduğu durum için katlanmanın gösterilmesi	74
Şekil 6.41. En büyük olabilirlik yöntemiyle yapılan benzetim	75
Şekil 6.42. MUSIC algoritmasıyla yapılan benzetim.....	76
Şekil 6.43. En büyük olabilirlik yöntemiyle yapılan benzetim	77
Şekil 6.44. MUSIC algoritmasıyla yapılan benzetim.....	77
Şekil 6.45 En büyük olabilirlik yöntemiyle yapılan benzetim.....	78
Şekil 6.46. MUSIC algoritmasıyla yapılan benzetim.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

 $\vec{E}$

Elektrik alan vektörü

 $\vec{H}$

Manyetik alan vektörü

 $\vec{B}$

Manyetik akı yoğunluğu

 ϵ

Dielektrik sabiti

Manyetik geçirgenlik katsayısı

 $\vec{J}$

Akım yoğunluğu

 $\vec{D}$

Deplasman vektörü

 ρ

Yük yoğunluğu

 λ

Dalga boyu

Kısaltmalar

Açıklama

EBOY

En Büyük Olabilirlik Yöntemi

UMTS

Uluslararası gezgin haberleşme sistemleri

CDMA

Kod bölmeli çoklu erişim

FDMA

Frekans bölmeli çoklu erişim

SDMA

Uzay bölmeli çoklu erişim

TDMA

Zaman bölmeli çoklu erişim

MUSIC

Çoklu sinyal sınıflandırma

SNR

Sinyal gürültü oranı

SIR

Sinyal girişim oranı

LMS

En Küçük Ortalama Kareler

Kısaltmalar**Açıklama****RLS**

Özyinelemeli En Küçük Kareler

SMI

Örneklenmiş Matris Tersİ

DSP

Sayısal işaret işleme

RF

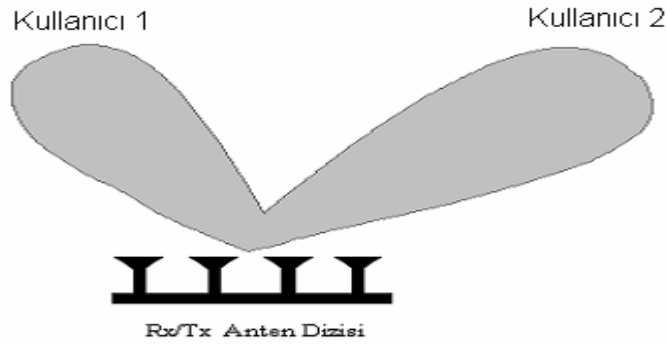
Radyo frekansı

IF

Orta frekans

1. GİRİŞ

Günümüzde ses, veri ve görüntü hizmetlerine olan talep oldukça artmış durumdadır. Bu nedenle kapasite çok büyük önem taşımaktadır. Haberleşme sistemlerinde kapasitenin en verimli şekilde nasıl kullanılacağı yıllardır araştırılmaktadır ve bu araştırmaların sonucunda değişik yöntemler geliştirilmiştir. temelle bunlar kod bölmeli çoklu erişim (CDMA), zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA), frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) ve en son uzay bölmeli çoklu erişim (SDMA) yöntemlerinden ibarettir. Şekil 1.1'de aynı hücrede, aynı frekans ve zaman dilimlerinde 2 farklı kullanıcı gösterilmektedir.



Şekil 1.1. SDMA şekli

SDMA yöntemi akıllı antenler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu antenler zaman ve frekans cevabını değiştirme yeteneğine sahip antenlerdir. Akıllı anten sistemleriyle uzaysal domenin kullanılmasının şebeke operatörüne sağladığı faydalar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

i) Kapasite artışı: Akıllı antenlerde baz istasyonu akıllı anten ışın demetleri, aynı frekansta, ayrı demetlerde farklı kullanıcıları tutmak için birbirleriyle girişim olmaksızın aynı frekansları kullanabilir.

ii) Kapsama alanı genişliği: Kapsama alanındaki artış daha büyük anten kazancına bağlıdır. bu da, daha az baz istasyonunun daha uzun pil ömrü ile özel bir bölgeyi kapsayabilmesi demektir.

- iii) Yüksek veri hızları.
- iv) Uzaklık probleminde artan bağışıklık.

Kapasitenin ne kadar büyük önem taşıdığı yukarıda kısaca açıklanmıştır. Bu bağlamda bu tezde akıllı anten sistemleri incelenmiş ve kullanıcının konumunun tespiti ile ilgili olarak uygulama gerçekleştirilmiştir.

Tezde ilk olarak temel anten parametrelerinden bahsedilmiş daha sonra maxwell denklemleri verilmiştir. Dördüncü bölümde, [1-3] kaynaklarından faydalanılarak akıllı anten sistemleri detaylı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölümde, [4-5, 6-8] kaynakları kullanılarak ışın şekillendirme ve uzaysal süzgeçleme tekniklerinden bahsedilmiş ve kaynak [4] 'de yapılmış olan benzetim metodu ile kaynak [8]' da yapılmış olan benzetim metodu verilmiştir. Altıncı bölümde, ilk olarak geliş açısı kestiriminin ne demek olduğu ve nasıl gerçekleştirildiğinden bahsedilmiş olup daha sonra kaynak [9]'dan faydalanılarak geliş açısı tahmin algoritmalarından biri olan "En büyük olabilirlik yöntemi" nden (EBOY) bahsedilmiş ve yapılan benzetim sunulmuştur. Altıncı bölümün ikinci kısmında ise teze adını veren MUSIC algoritmasından bahsedilmiş ve kaynak [10-11] kullanılarak gerekli formüllerin çıkarımı yapılmıştır. Daha sonra çıkarılan formüller kullanılarak Matab da MUSIC algoritmasıyla geliş açısının tahmin edildiği program yazılmış ve bu program kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Programda kullanılan bazı parametrelerde değişiklik yapılarak sonuçlar grafik olarak gösterilmiş ve yorumlanmıştır. En son tezde yer verilen geliş açısı kestirim algoritması EBOY ile benzetimi Matlab'da yapılan MUSIC algoritması karşılaştırılmış ve yöntemlerin eksiklikleri ve üstünlükleri saptanmıştır.

Bu çalışmada yapılanları özetleyecek olursak ikincibirinci bölümde temel anten parametreleri, üçüncü bölümde maxwell denklemleri, dördüncü bölümde akıllı anten sistemleri, beşinci bölümde ışın şekillendirme ve uzaysal süzgeçleme teknikleri verilmiştir. Son bölümde ise geliş açısı kestirim algoritmalarından bahsedilmiş ve bu algoritmalarından biri olan music algoritmasıyla ile benzetim gerçekleştirilmiştir.

2. TEMEL BAĞINTILAR

2.1. Temel Anten Parametreleri

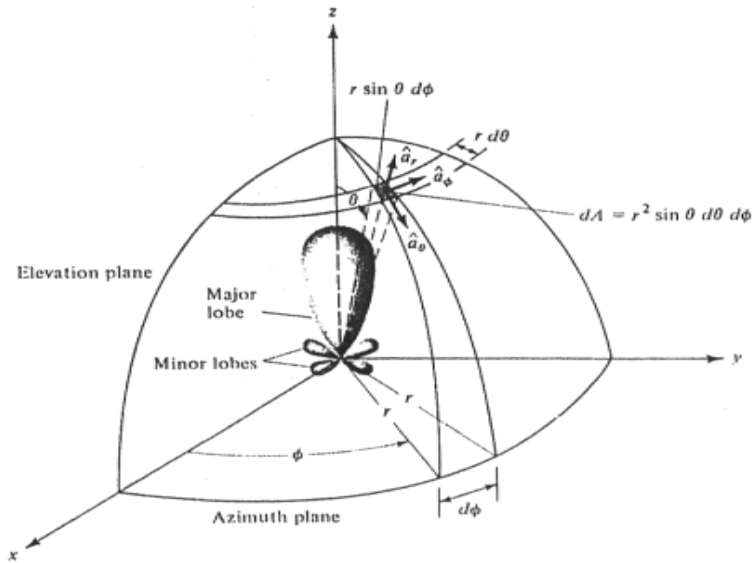
Akıllı antenlerden bahsetmeden önce temel anten parametrelerinden biraz bahsetmek gerekmektedir.

Anten: Radyo dalgalarını göndermek ya da almak için kullanılan araçtır.

Işıma örüntüsü: Antenlerin ışıma özelliklerinin uzay koordinatlarının fonksiyonu olarak grafiksel gösterimine denir.

İzotropik anten: Bütün yönlerde eşit ışıma yapan varsayımsal antendir.

Omnidireksiyonel anten: Bu anten azimut düzleminde ($\theta = \text{sbt}$) yönsüz, yükselme ($\phi = \text{sbt}$) düzleminde yönlüdür.



Şekil 2.1. Anten analizi için koordinat sistemi

Alan bölgeleri: Üç kısımda incelenmektedir.

a) Reaktif yakın alan: Yayılmanın olmadığı bölgedir. Reaktif alan bileşenlerinin baskın olduğu antenin çok yakınındaki bölgedir. Bu bölgede enerji depolanır.

$$R < 0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (2.1)$$

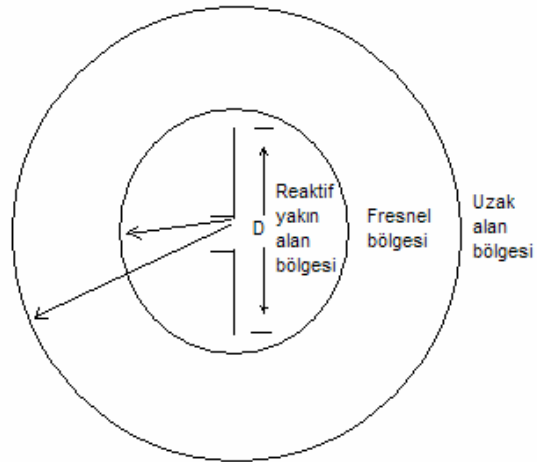
λ : Dalga boyu D : Antenin en büyük boyutu R : Antenin yüzeyinin alan uzaklığı

b) Frensel bölgesi(Yakın ışıma alan bölgesi): Bu bölgede ışıma alanı bileşenleri baskın ve açısal alan dağılımı anten alan uzaklığına bağlıdır.

$$0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < R < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

c) Uzak alan bölgesi: Açısal alan dağılımının esas olarak uzaklıktan bağımsız olduğu bölgedir.

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.3)$$



Şekil 2.2. Anten alan bölgeleri

2.2. Işıma Güç Yoğunluğu (Radiation Power Density)

$$\omega = E \times H \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.4)$$

ω : Bir elektromanyetik dalganın güç yoğunluğu

E : Anlık elektrik alan şiddeti

H : Anlık manyetik alan şiddeti

2.2.1. Kapalı bir yüzeyden geçen toplam anlık güç

$$P = \oint_S \omega \cdot d\vec{s} = \oint_S \omega \cdot \hat{n} \cdot da \quad (2.5)$$

P : Anlık toplam güç

da : Kapalı yüzeyin diferansiyel alanı

Zamanla sinüsel değişen alanlar için (Time harmonic);

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= \text{Re}[\bar{E}(x, y, z) \cdot e^{j\omega t}] \\ H(x, y, z, t) &= \text{Re}[\bar{H}(x, y, z) \cdot e^{j\omega t}] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\omega = \text{Re}[\bar{E}(x, y, z) \cdot e^{j\omega t}] \times \text{Re}[\bar{H}(x, y, z) \cdot e^{j\omega t}] \Rightarrow$$

$$\omega = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H} \cdot e^{j2\omega t}] + \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] \quad (2.7)$$

Birinci kısmın ortalaması sıfır olduğundan,

$$\omega = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] \quad (2.8)$$

Poynting vektörünün zaman ortalaması (ortalama güç yoğunluğu):

$$\omega_{art}(x, y, z) = \omega_{rad} = [\omega(x, y, z, t)]_{ort} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] \quad (2.9)$$

Bir antenin ııııdığı ortalama güç (radiated power):

$$P_{rad} = P_{ort} = \oint\oint_s \mathcal{W}_{ort} . d\bar{s} = \frac{1}{2} \oint\oint_s \text{Re}[\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*] . d\bar{s} \quad (2.10)$$

2.2.2. İzotropik antenin ısıdığı toplam güç

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \oint\oint_s \mathcal{W}_{ro} . d\bar{s} \quad \mathcal{W}_{ro} = \hat{a}_r . \omega_{ro}, \quad d\bar{s} = \hat{a}_r r^2 . \sin \theta . d\theta . d\varphi \\ P_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\hat{a}_r . \omega_{ro}] [\hat{a}_r . r^2 . \sin \theta . d\theta . d\varphi] \\ P_{rad} &= 4 . \pi . r^2 . \omega_{ro} \quad [\text{w}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

İzotropik antenin güç yoğunluğu,

$$\mathcal{W}_{ro} = \hat{a}_r \left(\frac{P_{rad}}{4 . \pi . r^2} \right) \quad [\text{w/m}^2] \quad (2.12)$$

2.3. Işıma Şiddeti (Radiation intensity)

Verilen bir yön için birim katı açı başına antenin ısıdığı güçtür. Işıma şiddeti bir uzak alan parametresidir.

$$U = r^2 \mathcal{W}_{rad} \quad (2.13)$$

U : ışıma şiddeti $[\text{w/birim katı açı}]$

$\mathcal{W}_{rad}$: Işıma yoğunluğu $[\text{w} / \text{m}^2]$

Işıma şiddeti bir antenin uzak bölge elektrik alanına aşağıdaki şekilde bağlıdır.

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |\bar{\mathbf{E}}(r, \theta, \phi)|^2 \cong \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right]$$

$$U(\theta, \phi) \cong \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.14)$$

$\bar{E}$: Antenin uzak bölge elektrik alan şiddeti.

E_θ, E_ϕ : Antenin uzak alan elektrik alan bileşenleri.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad \text{Ortamın karakteristik empedansı.}$$

2.3.1. Antenin ııııdığı toplam güç

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} \bar{\omega}_{rad} . d\bar{s} = \iint_{\Omega} \frac{U}{r^2} . (r^2 . \sin \theta . d\theta . d\phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U . \sin \theta . d\theta . d\phi = \iint_{\Omega} U . d\Omega$$

Burada $d\bar{s} = r^2 . \sin \theta . d\theta . d\phi$ ve $d\Omega = \frac{d\bar{s}}{r^2}$ den $d\Omega = \sin \theta . d\theta . d\phi$

$d\Omega$: Diferansiyel katı açısı.

İzotropik anten için ışıma şiddeti θ, ϕ den bağımsızdır.

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U . d\Omega = U_0 . \iint_{\Omega} d\Omega = U_0 . 4\pi \quad \text{buradan,} \quad (2.15)$$

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad \text{İzotropik antenin ışıma şiddetini verir.} \quad (2.16)$$

2.4. Yöneltilim (Directivity)

Bir antenin belirli bir yönde, bir noktada meydana getirdiği güç yoğunluğunun referans antenin aynı noktada meydana getirdiği güç yoğunluğuna oranına yönlendirme kazancı denir. Her iki anteninde aynı gücü yaydığı varsayılmaktadır. Referans anten olarak yönsümesiz anten kullanılır.

Yönlendirme kazancı;

D_g = Birim katı açıdan ışıyan toplam güç / birim katı açıdan ışıyan ortalama güç

$$D_g = \frac{\frac{d}{d\Omega} P_{rad}}{\frac{P_{rad}}{4\pi}} \quad \text{buradan,} \quad (2.17)$$

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega \Rightarrow \frac{d}{d\Omega} P_{rad} = \frac{d}{d\Omega} \oint_{\Omega} U d\Omega = U \quad (2.18)$$

$$D_g = \frac{U}{U_0} \quad (2.19)$$

Yönlendirme kazancının maksimum olduğu doğrultudaki yönlendirme kazancına yöneltim denir.

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} \quad (2.20)$$

2.5. Anten Kazancı

Anten kazancı yönlendirme kazancıyla ilgilidir. Anten Kaancı antenin verimini ve antenin yönlendirme yeteneğini göz önüne alır. Yöneltimle anten veriminin çarpımına Anten Kazancı denir.

$$G_g = v.D_g = v.\frac{U}{U_0} \quad (2.21)$$

Burada v antenin verimini göstermektedir. Yön belirtilmediği zaman maksimum ışımanın olduğu yön kastedilir. Maksimum kazanç değeri yöneltimle bağlantılıdır. Maksimum kazanca antenin (güç) kazancı denir.

$$G_1 = G_g(\theta, \phi) = v \cdot \frac{U_{\max}}{U_0} \quad (2.22)$$

Anten kazancı genelde dB cinsinden verilir.

$$G(dB) = 10 \cdot \text{Log} G_1 \quad (2.23)$$

3. MAXWELL DENKLEMLERİ

Elektromanyetik alanların ifadesinin çözümü için gerekli olan denklemler maxwell denklemleridir. Maxwell denklemleri, manyetiğin temelini oluşturmaktadır. Öyle ki maxwell denklemleri bulunmamış olsaydı şu anda ses,görüntü ve data haberleşmesinden söz etmek mümkün olmayacaktı. Bu önemli denklemler incelenecek olursa,

3.1. Maxwell Denklemlerinin İfadesi

$\vec{E}$: Elektrik alan vektörü

$\vec{H}$: Manyetik alan vektörü

$\vec{B}$: Manyetik aki yoğunluğu

ϵ : Dielektrik sabiti

μ : Manyetik geçirgenlik katsayısı

$\vec{J}$: Akım yoğunluğu

$\vec{D}$: Deplasman vektörü

$$1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho ; \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\rho : \text{yük yoğunluğu}) \quad (3.1)$$

Bir yükün çevresinde mutlaka bir elektrik alan vardır. Elektrik alan çizgileri elektrik yükünde son bulur.

$$2) \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} ; \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.2)$$

Bir yükün çevresindeki manyetik akı yoğunluğunu değiştirirseniz buna karşı koyacak yönde bir E.M.K oluşur.

$$3) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

Kapalı yüzeydeki toplam manyetik akı sıfırdır.

$$4) \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (3.4)$$

Değişen elektrik alan bir manyetik akı üretir. Bir akım çevresinde daima bir manyetik alan doğurur.

Integral formda maxwell denklemlerinin gösterimi;

$$1) \quad \oint_s \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_v \rho \cdot dv \quad (3.5)$$

$$2) \quad \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \cdot \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.6)$$

$$3) \quad \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.7)$$

$$4) \quad \oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \cdot \left[\int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_s \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} \cdot d\vec{s} \right] \quad (3.8)$$

3.2. Maxwell Denklemlerinin Çözümü

Lineer, kaynaksız, homojen ortamda ($\epsilon, \mu = \text{sbt}$, $J_k = 0$) için maxwell denklemleri tekrar yazılacak olursa,

$$1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \quad (3.9)$$

$$2) \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} ; \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.10)$$

$$3) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.11)$$

$$4) \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.12)$$

Not: Matematikte $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ şeklinde ifade edildiğinden.

Eş 3.10 ve Eş 3.12 denklemlerini birlikte çözersek,

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \quad \text{Buradan,}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

vektörel dalga denklemini ifadesi elde edilir. Aynı şekilde,

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = -\epsilon \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \quad \text{buradan}$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (3.14)$$

Bu denklemlerden üçer tane skaler dalga denklemini yazılabilir.

$$\nabla^2 E_x = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

$$\nabla^2 E_y = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

$$\nabla^2 E_z = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \quad (3.17)$$

$$\nabla^2 H_x = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H_x}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

$$\nabla^2 H_y = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} \quad (3.19)$$

$$\nabla^2 H_z = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} \quad (3.20)$$

Hava içi ϵ, μ $\mu_0 \cdot \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$

Düzlem E.M.D çözümünde $E_y=E_z=0$ alınır. Yayılma $-z$ - doğrultusunda olsun,

$$\frac{\partial^2 E_x(z,t)}{\partial t^2} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 E_x(z,t)}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

tek boyutlu düzlem dalga denklemi elde edilir. Aynı şekilde,

$$\frac{\partial^2 H_x(z,t)}{\partial t^2} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 H_x(z,t)}{\partial t^2} \quad (3.22)$$

4.1.1. Anahtarlanmış ışıma demeti antenleri

Anahtarlanmış Işıma Demeti veya Anahtarlanmış lop antenler, hattın baz istasyonuna yerleştirilmiş yönlü antenlerdir. Bir dizinin, yönlendirici antenleri ayırmada veya önceden tanımlanmış ışıma demetlerini ayırmada temel bir anahtarlama fonksiyonu vardır. Genellikle alışı gücü bakımından en iyi performansı veren yer seçilir. Çeşitli elemanların verimliliği, hangisinin en iyi alışı ışıma demetine sahip olduğunu saptamak için periyodik olarak denir. Sıradan antenlerle karşılaştırıldığında, daha yüksek yönlendiriciliğinden dolayı, bir miktar kazanç sağlar. Bu tür bir anten, var olan hücre yapılarını geliştirmek için daha karmaşık uyarlamalı dizilerden daha kolaydır, ama bu sınırlı gelişme sağlar [1].

4.1.2. Uyarlamalı anten dizileri

Uyarlamalı anten dizileri, içlerinde en akıllısı olarak düşünülebilir. Bir uyarlamalı anten dizisi anten patternlerini çevresindeki değişikliklerle uyumlandırabilen anten elemanlarının bir kurulmasıdır. Dizinin her anteni uyumlu şekilde yenilenen bir ağırlık ile bağdaştırılır. Bu nedenle belirli bir bakma yönünde kazancı, girişen sinyallere karşılık gelen bir yönde minimize iken, maksimizedir. Diğer bir deyişle, istenen bir sinyalin sinyal gürültü oranını (SNR) geliştirmek amacıyla kanal gürültü ve girişimindeki farklılıkları ayarlamak için anten yayılım ve alışı patternini dinamik olarak değiştirirler. Bu işlem uyarlamalı hüzmeye şekillendirme veya sayısal hüzmeye şekillendirme olarak bilinir. Sıradan mobil sistemler, genellikle anten çeşitliliği/farklılığını kullanırlar.(örneğin, Uzay polarizasyon veya açı çeşitliliği) Uyarlamalı antenler 2'den fazla çeşitlilik dalı olan, genişletilmiş bir çeşitlilik sistemi olarak kabul edilebilir. Bu bağlamda, bütün elemanlar farklılık birleştirmek için kullanılabildiğinden dolayı faz dizileri anahtarlanmış lob antenlerden daha büyük bir kazanç potansiyeline sahip olacaktır [1].

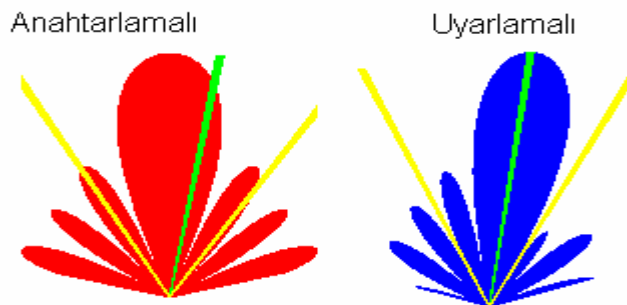
4.2. Anahtarlanmış ve Uyarlamalı Dizi Sistemlerinin Faydaları/Sakıncaları

Yayılım patterni açısından, anahtarlanmış ışımaya demeti; tipik bir sektör hücresinin 3 tane 1208 lik dilimi olan hücresel sektörizasyon metodunun bir iç hattıdır. Anahtarlanmış Işıma Demeti yaklaşımı; dağılım ve kapasiteyi geliştirmek için makro-dilimleri daha fazla mikro-dilimlere böler. Her mikro-dilim, ışımının merkezinde maksimum duyarlılıkta, diğer yerlerde daha az duyarlılıkta belirlenmiş sabit bir ışımaya patterni içerir. Böyle sistemlerin tasarımı yüksek kazançlı, dar azimuth ışın demeti genişlikli anten elemanları içerir.

Anahtarlanmış Işıma Demeti sistemleri birçok belirlenmiş sabit ışın demeti patterninden maksimum çıkış gücünde olanlardan birini seçer. RF veya temel bant DSP donanım ve yazılım bu seçimleri yapar. Sistem, ışımasını, anten elemanlarını besleyen faz farklılıklarını değiştirerek farklı yönlerde anahtarlar. Mobil kullanıcı belirli bir makro dilime girdiğinde anahtarlanmış ışımaya demeti sistemi en güçlü sinyali içeren mikro-dilimi seçer. Arama boyunca sistem, sinyal dayanıklılığını görüntüler ve diğer mikro dilimleri istendiği gibi değiştirir. Çeşitli sistemler farklı donanım ve yazılım tasarımları kullanmasına rağmen, bütün anahtarlanmış ışımaya demeti sistemleri benzer faydalar sağlarlar. Sıradan sektörlize edilmiş hücrelerle karşılaştırıldığında anahtarlanmış hücre sistemleri, baz istasyonunun menzilini maddi duruma bağlı olarak %20 'den %200'e çıkarabilir. Artan kapsama alanı bir operatörü yüksek altyapı maliyetlerinden kurtarabilir ve kar sağlarken tüketicilere daha ucuz hizmet sağlayabilir. Fakat anahtarlanmış ışımaya demeti sistemlerinin bazı sınırlamaları vardır. Işıma demetleri belirlendiğinden, kullanıcı sektör boyunca hareket ettikçe sinyal gücü değişir. Mobil ünite bir ışımaya demetinin uzak azimuth kenarlarına doğru hareket ettikçe, kullanıcının yönü diğer mikro-dilime değiştirilmeden önce sinyal gücü hızla azalır. Diğer bir sınırlama; bir anahtarlanmış ışımaya demeti sisteminin istenen sinyal ile girişim sinyallerini ayıramamasından kaynaklanır. Eğer girişim sinyali, seçilen ışın demetinin yaklaşık olarak merkezinde ise ve kullanıcı seçilen ışın demetinin merkezinden uzakta, girişen sinyal istenen sinyalden daha fazla oluşabilir. Bu durumlarda kullanıcı için kalite azalır. Uyarlamalı anten sistemleri farklı bir yaklaşımdadır. RF çevresi (veya sinyallerin fiziksel

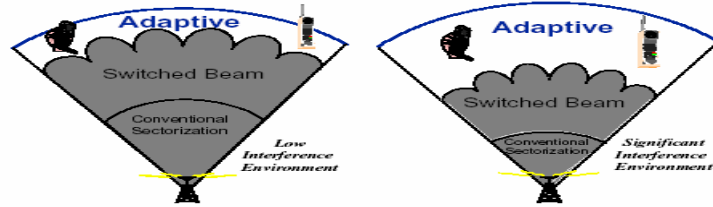
merkezi) değiştikçe, uyarlamalı anten teknolojisi ayarlanarak kablosuz sistemin performansını optimize etmek için sinyal patternini değiştirir. Uyarlamalı yaklaşım, istenen sinyalleri, çok yollu ve girişen(interfering-engelleyici) sinyallerin geliş yönlerini hesaplayacak kadar iyi bir şekilde, sürekli olarak ayırt etmek için karmaşık sinyal işleme algoritmaları kullanır. Bu yaklaşım, hem istenen hem de girişen sinyal konumlarını değiştirerek ışıma demeti patternini sürekli olarak yenilemektedir. Bu etki bir kişinin duymasına benzer. Bir insan diğerini dinlerken, dinleyicinin beyni 2 kulağıyla sesleri toplar, daha iyi duymak için birleştirir ve konuşanın konuşma yönünü belirler. Eğer konuşan hareket ederse dinleyici, eğer gözleri kapalıysa, sadece duyduklarına göre açısıl pozisyonu yenilemeye devam eder. Dinleyici istenmeyen sesleri, girişimleri atabilir ve o anki konuşmaya odaklanır.

şekil 4.2 her sistemin ilgilenilen sinyal yönünde seçmesi gereken ışıma demetlerini ve 2 ortak kanal girişimcisini göstermektedir. Anahtarlanmış ışıma demeti sistemi solda, uyarlamalı sistem sağda gösterilmiştir. Sarı çizgiler ortak kanalda girişen sinyallerin yönlerini gösterirken yeşil çizgiler ilgilenilen sinyali göstermektedir. Uyarlamalı sistem daha büyük sinyal ekleme sağlayacak şekilde seçilmesine rağmen, her iki sistem ilgilenilen sinyalin genel yönündeki en yüksek kazançlı loba doğru yönelmişlerdir. Benzer şekilde, girişen sinyaller ana lobun dışında en düşük kazanç yerlerine gelirler, ama girişen sinyaller maksimum bastırılırken uyarlamalı sistem ana sinyal maksimum katkı alacak şekilde bu sinyalleri tekrar mümkün olan en düşük kazanç noktalarına yerleşirmiştir.



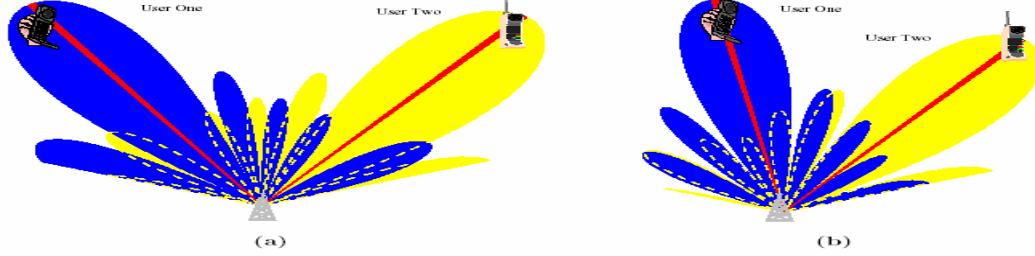
şekil 4.2. Anahtarlanmış ışıma demeti(kırmızı) ve uyarlamalı dizi(mavi) sistemlerin kullanıcı sinyaller(yeşil çizgi) ve ortak kanal girişimcileri(sarı çizgiler) için seçmesi gereken ışıma şekillendirme lobları ve noktaları

Şekil 4.3, sıradan sektörizeli, anahtarlanmış ışıma demeti ve uyarlamalı anten sistemleri için ilgili kapsama alanını göstermektedir. Akıllı anten sistemlerinin her tipi sıradan sektörizeli sisteme önemli kazançlar sağlar. Soldaki girişimin düşük seviyesi, daha düşük sızma seviyeli yeni bir kablosuz sistemi göstermektedir. Sağdaki girişimin baskın seviyesi ya çok kullanıcı kablosuz sistemi yada daha baskın frekans patternini kullanan bir kullanıcıyı göstermektedir. Bu senaryoda uyarlamalı sistemin, girişimi geri çevirme kabiliyeti sıradan ya da anahtarlanmış ışıma demeti sistemlerinkinden daha fazla kapsama alanı sağlar. Uyarlamalı anten sisteminin diğer bir önemli avantajı spektrum oluşturma özelliğidir.



Şekil 4.3. Anahtarlanmış ışıma demeti ve uyarlamalı dizi antenleri için kapsama alanı patterni

Tam izleme ve sağlıklı girişim geri çevirme yeterliliğinden dolayı, çoklu kullanıcılar aynı hücre içindeki aynı sıradan kanalı kullanabilirler. Sistem kapasitesi daha düşük *intra-cell* frekans tekrar kullanımı artar. Şekil 4.4 uyarlamalı anten yaklaşımının aynı hattaki aynı sıradan kanalda aynı andaki 2 kullanıcıyı desteklemek için nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Mavi ışın demeti patterni soldaki kullanıcı ile iletişim kurmak için kullanılır. Sarı pattern sağdaki kullanıcı ile konuşmak için kullanılır. Kırmızı çizgiler her sinyalin tam yönünü göstermektedir. Sinyaller baz istasyonuna doğru kırmızı çizgide giderken, sarı sinyal mavi null'a veya minimum kazanç noktasına ulaşır ve tersi de geçerli. Kullanıcı hareket ettiğinden, ışıma demeti patternleri bu pozisyonları sağlamak için durmadan yenilenir. Sağ çizim bir kullanıcı diğerine doğru hareket ettikçe ışın demetinin maksimum sinyal kalitesini sağlamak için dinamik olarak nasıl değiştiğini göstermektedir.

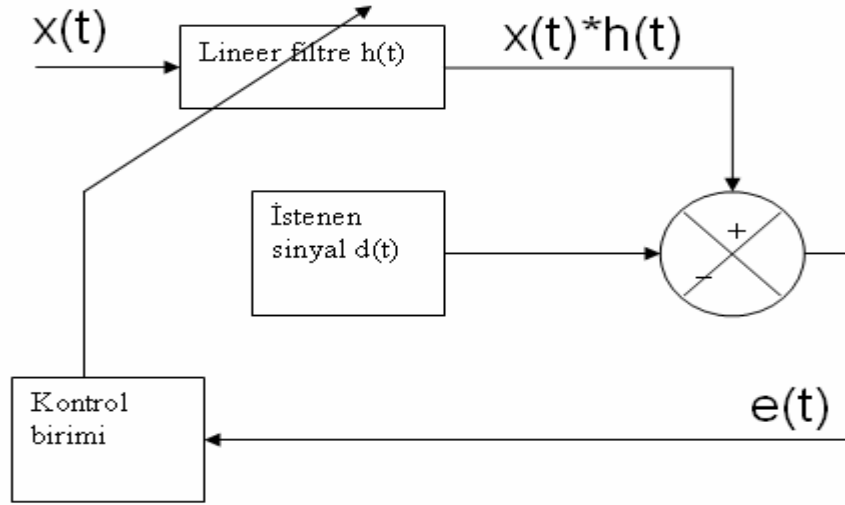


Şekil 4.4. Aynı sıradan kanalda hatta aynı hücredeki 2 kullanıcıyı destekleyen tam uyarlamalı fiziksel işlem

Işın demeti patternini hem loblar hem de null larla ilgili olarak sürekli değiştirme özelliği, uyarlamalı yaklaşımı anahtarlanmış tipten ayırmaktadır. Girişen sinyaller sektör boyunca hareket ettikçe anahtarlanmış ışın demeti patterni değiştirilmez. Çünkü o sadece ilgilenilen sinyaldeki hareketlere karşılık verir. Aslında bir girişen sinyal ilgilenilen sinyale yaklaşmaya başladığında ve ana lobun kazancına girdiğinde, girişim sinyali istenen sinyalle aynı işleyecek ve sinyal girişim oranı ona göre azalacak. Aksine, uyarlamalı sistem sinyal ve girişimi ayırmaya devam etme özelliğindedir ve sinyal girişim oranı seviyelerini artırmaya devam ederken onların anahtarlanmış ışın demeti sistemindekinden daha yakın olmalarına izin verir. En karmaşık uyarlamalı akıllı anten sistemleri, herhangi iki ortak kanal kullanıcıya ister *inter-cell* ister *intra-cell* olsunlar, çok yakınlaşmadan ve birbirlerini etkilemeye başlamadan önce *hand-over* edecektir [1].

4.3. Uyarlamalı Algoritmanın Anatomisi

Temel olarak uyarlamalı bir yöntem biliminde, amaç bir transfer fonksiyonu kullanarak arzu edilen yanıtı uyarlamalı olarak kestirmektir. Tarihte geliştirilmiş ilk metot wiener filtresiydi. Şimdi bu yöntemin yıllar geçtikçe nasıl geliştiği anlatılırsa [2].



Şekil 4.5. Uyarlamalı algoritmanın anatomisi

$x(t)$ giriş sinyali istenen sinyal $d(t)$ yi izlemek için kullanılır. Burada $d(t)$, dürtü yanıtı $h(t)$ olan bir filtre boyunca ilerleyen işarettir. Lineer filtrenin karakteristiği bir kontrol birimi tarafından değiştirilir. Kontrol birimi sırasıyla lineer filtreden geçen $d(t)$ sinyali ve $y(t)$ çıkış sinyali arasında anlık fark olarak üretilen hata sinyali $e(t)$ tarafından etkilenir. Lineer filtredeki bu hata, Kolmogorov tarafından durağan zaman serileri analizi ile ve eş zamanlı olarak Wiener tarafından uçaksavar silahların kontrolünde çözülmüştür [2].

Kolmogorov ve Wiener tarafından geliştirilen yöntemler benzerdir. Yönteme hata sinyali $e(t)$ tanımlanarak başlanır.

$$e(t)=d(t)-y(t) \Rightarrow e(t)=d(t)-x(t)*h(t) \quad (4.1)$$

buradan,

$$e(t) = d(t) - \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \Omega).h(\Omega).d\Omega \quad (4.2)$$

Daha sonra, karesel hatanın beklenen değeri;

$$\mathcal{E} = \mathbb{E} [e(t).e^*(t)] = \mathbb{E} [|e(t)|^2] \quad (4.3)$$

Burada $\mathbb{E} [\cdot]$ beklenti operatörü.

Optimum $h(t)$ yi bulmak için hata $\mathcal{E}$ “h” den ayrılmalıdır. Bir başka deyişle,

$$\mathbb{E} [x(t).e^*(t)] = 0 \quad (4.4)$$

olmalıdır. Eğer

$$R_{xd}(t) = \mathbb{E} [x(t).d^*(t)] \text{ ve } R_{xx}(t) = \mathbb{E} [x(t).x^*(t)]$$

şeklinde ifade edilirse,

$$R_{xd} = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(t - \Omega).h(\Omega).d\Omega \quad (4.5)$$

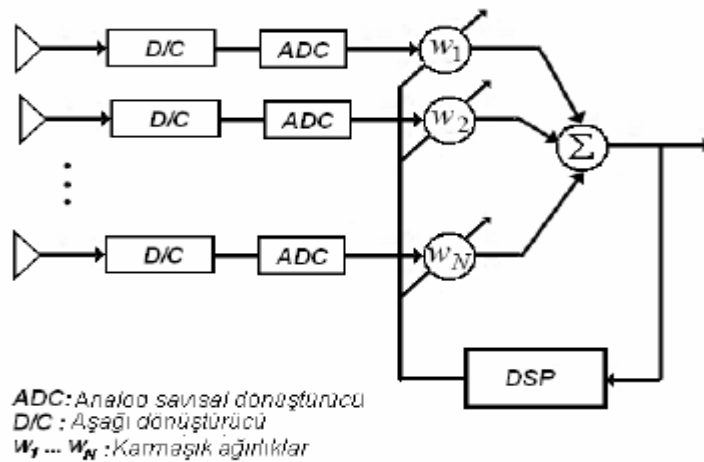
Bu integral verilen $x(t)$ girişi için $d(t)$ ye eşlenecek olan $h(t)$ filtresi için çözüm sağlar [2].

4.4. Akıllı Antenlerin Sistem Elemanları

Akıllı anten sistemleri SDMA yaklaşımının en önemli parçasını oluşturmaktadır. Bir akıllı anten sistemi; en genel yapısı ile ışıma örüntüsünü gelen işaretlere göre ayarlayabilen anten dizilerinden ve ışımların hangi kullanıcılara doğrultulacağını yönlendiren bir denetleyiciden oluşmaktadır. Anten dizilerinin ışıma örüntüleri ayarlanabilmesi antenlerin her birine gelen faz ve genlik bilgilerinin ayarlanmasıyla mümkün olmaktadır. Akıllı anten sistemlerinde faz ve genlik bilgileri denetleyiciden gelen işaretlerle ayarlanmaktadır. Akıllı antenlerin başarımını etkileyen en önemli faktör işlemler sırasında harcadığı zaman ve ayarlanabilir antenin çözünürlüğüdür. Antenin işlem süresi geliş açısı kestiriminde ve ışıma örüntüsü ayarlama harcadığı

zaman ile ilişkilidir. Çözünürlük ise antenin dizi yapısı ile olduğu kadar yine algoritmalar ile ilgili bir durumdur.

Akıllı antenler, girişim işaretleri de dahil olmak üzere diziye gelen tüm işaretlerin geliş yönlerini (direction of arrivals) geliş yönü tahmin algoritmalarını kullanarak kestirebilir. Daha sonra istenen işaret saptanır ve istenmeyen işaretlerden ayrılır. Son olarak antenin ışıma örüntüsü istenen işaret doğrultusunda yönlendirilir. Genel bir uyarlamalı anten sistemi Şekil 4.6'de görülmektedir. Uyarlamalı bir anten sistemi dört ana kısımdan meydana gelir. Bunlar antenler, radyo arabirimi, huzme şekillendirici ve işaret işleyicilerdir. Anten dizisi N adet antenden oluşmaktadır. Her bir anten elemanına gelen işaretler bir araya getirilerek tek bir çıkış işareti elde edilir. İşaret önce temel banda çevrilir. Analog-sayısal dönüştürücüler yardımıyla işaret sayısal formata dönüştürülür. İşaret işleyici birim ise karmaşık ağırlık vektörlerini belirler ve her bir anten elemanından gelen işaretle ağırlıkları çarpar. Anten ışıma örüntüsünü şekillendirir. Ağırlıklar iki ölçüte göre optimize edilir. Bunlar istenen kullanıcıdan gelen işaretin en büyük yapılması veya işaret girişim oranı (SIR) en büyük olacak şekilde diğer kullanıcılarından gelen işaretin bastırılmasıdır. Sistem en fazla $N-1$ adet işareti ayırt edebilir. Ancak çok yollu işaretlerden ötürü bazı sınırlamalar söz konusudur. Huzme şekillendirme sayısal olarak yapıldığı için sayısal işaret işleyici birimde gerçekleştirilir [1].



Şekil 4.6. Uyarlamalı akıllı anten sistemlerinin blok diyagramı

4.4.1. Akıllı anten alıcısı

Şekil 4.7 'de bir akıllı antenin alıcı kısmının elemanları şematik olarak gösterilmektedir. Anten dizisi M tane elemandan oluşmaktadır. M tane sinyal bir tek sinyale dönüştürülüp alıcının geri kalan kısmına (kanal çözümlemesi, vb.) giriş olarak verilmektedir. Şekilde gösterdiği gibi, akıllı antenin alıcı kısmı 4 birimden oluşmaktadır. Alıcı kısım, antenin kendisine ek olarak bir yayın birimini, bir radyo ışını oluşturma birimini ve bir sinyal işleme birimini içermektedir.

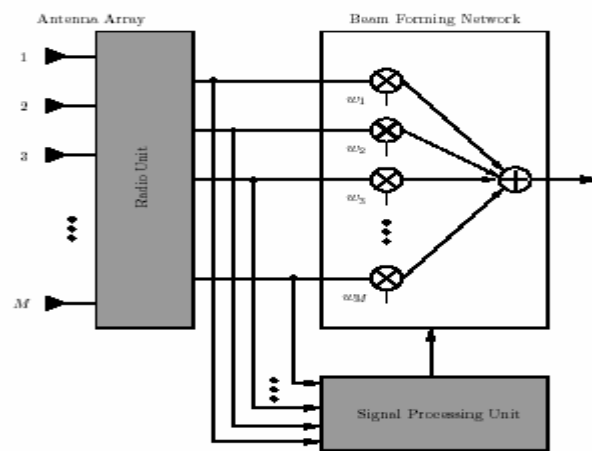
Dizi, sinyal işlemedeki gereksiz büyük oranda karmaşıklığı önlemek için oldukça düşük sayıda elemandan oluşmalıdır. Şekil 4.8'de 4 farklı dizi geometrisi örneğini göstermektedir. İlk iki yapı sadece yatay yüzeydeki (azimut) radyo ışını oluşumu için kullanılmıştır. Bu normal olarak uzak yerler, en azından büyük hücreler için verimli olacaktır. İlk örnek (a), Δx aralıklı benzer elemanlı tek boyutlu doğrusal bir diziyi göstermektedir. Bu yapı, köşeli bir bölge içinde yatay açıyla radyo ışını oluşturma işlemini gerçekleştirebilir. Bu, düşük karmaşıklığa sahip olmasından dolayı en çok kullanılan yapıdır. İkinci örnek (b), $\Delta\Phi=2\pi / M$ aralığında açısal elemanlı dairesel bir dizinin üstten görüntüsünü göstermektedir. Bu yapı bütün yatay açılarla radyo ışını oluşturma işlemini gerçekleştirebilir. Son iki yapı, yatay ve dikey açılarla iki boyutlu radyo ışını oluşturma işlemi için kullanılır. Bu durum yakın ya da daha yoğun şehirleşmiş bölgeler için istenebilir. Yatay Δx eleman aralıklı ve dikey Δy eleman aralıklı iki boyutlu doğrusal bir sıralamanın önden görünüşü örnek (c)'de gösterilmektedir. Bütün açılarının içinde bütün boşluğa radyo yayını yapmak, bir çeşit kübik veya küresel yapı gerektirir. Dördüncü örnek (d) Δx , Δy , Δz eleman dağılımlı kübik bir yapıyı göstermektedir.

Radyo ünitesi, alt-çeviri zinciri ve (karmaşık) analog-dijital çeviriciler (A/D) den oluşur. Dizi elemanlarının her biri için bir M alt-çevrim zinciri bulunmalıdır.

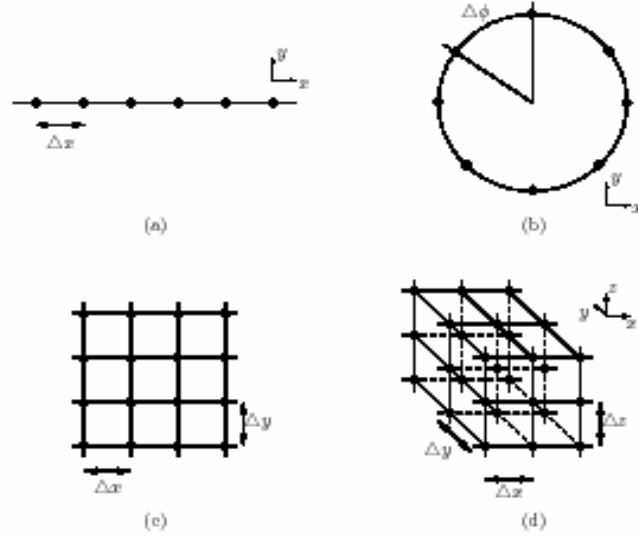
Sinyal işleme ünitesi, kompleks ağırlıklar ($W_1..W_m$) hesaplayacaktır. Bu değerlerle her bir dizi elemanından alınan sinyaller belirlenir. Bu değerler uplink yönündeki anten örüntüsünü belirleyecektir. Değerler, iki ana kriter yardımıyla en uygun şekle getirilebilir: bunlar istenilen kullanıcıdan (yani yön değiştirmiş ışın veya hazır dizi)

alınan sinyalin maksimize edilmesi ya da girişim kaynaklarından (uyarlanmış dizi) gelen sinyali durdurarak SIR'ın maksimize edilmesidir. Teorik olarak, M anten parçalarından biri $M-1$ girişim kaynaklarını etkisiz kılabilir. Fakat çok yollu yayılma sayesinde bu rakam normal olarak daha düşük olacaktır. Değerleri hesaplamak için kullanılan metot, optimize edilmiş kriterlerin tipine bağlı olarak değişecektir. SB (switched beam) kullanıldığı zaman, alıcı daha önce tanımlanmış vektör değerlerinin hepsini test edecektir ve bunların içinde en güçlü olan dalgayı seçecektir. Eğer en güçlü sinyale doğru maksimum kazanılmış ışın yönlendirmeyi içeren fazlı dizi (PA) yaklaşımı kullanılırsa, ilk olarak varış yönü (DoA) tespit edilir. Daha sonra ise değerler hesaplanır. Varış yönünü (DoA) hesaplamak için belirli sayıda ispat edilmiş metod vardır ve bunlar sırası geldiğinde açıklanacaktır.

Eğer SIR maksimum hale getirilirse, en uygun vektör değeri (M boyutunun), daha sonra gösterilecek olan uygun bileşimler ve diğer bileşimler gibi belirli bir sayıda algoritma kullanılarak hesap edilebilir. Işın oluşumu dijital olarak yapıldığında (A/D den sonra), ışın oluşumu ve sinyal işleme üniteleri aynı ünitenin (DSP) içine ilave edilebilir. Şekil 4.7 deki ayıklama işlemi işlevselliği sade bir hale getirmek için yapılır. Işın oluşumunu radyo frekansında (RF) ya da orta frekansta (IF) da gerçekleştirmek mümkündür [1].



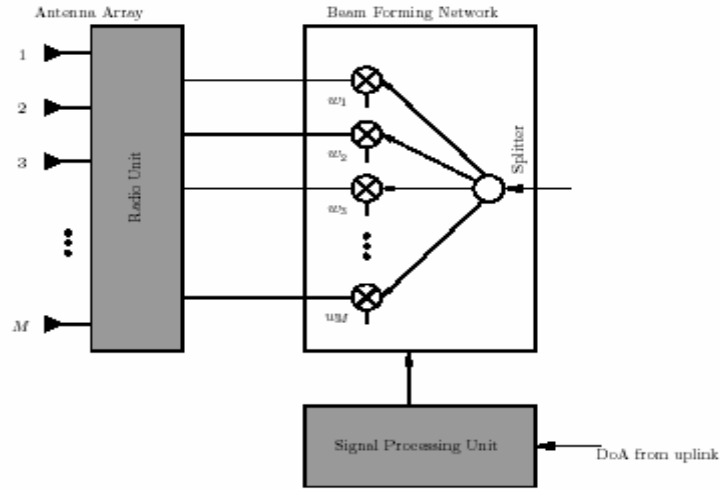
Şekil 4.7. Akıllı antenin alıcı kısmı



Şekil 4.8. Akıllı antenler için farklı dizi geometrileri a) Uniform liner dizi, b) Dairesel dizi, c) 2 boyutlu kesişen dizi d) 3 boyutlu kesişen dizi

4.4.2. Akıllı anten vericileri

Akıllı antenin verici kısmı şematik olarak alıcı kısmına çok benzemektedir. Şeması Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Sinyal, ışın oluşum ünitesinde $W_1..W_m$ kompleks değerleri tarafından hesaplanan M bölüme ayrılmıştır. Downlink yönündeki ışına örüntüsüne karar veren değerler sinyal oluşturma biriminden önce hesaplanır. Radyo ünitesi, D/A dönüştürücüler ve üst dönüştürme zincirlerini kapsar. Pratikte, DSP ve antenin kendisi gibi bazı parçaların takibi de alma işlemindeki gibi olacaktır.



Şekil 4.9. Akıllı antenin verici kısmı

Uplink ve downlink arasındaki temel fark hiçbir uzaysal kanal tepkisinin downlink yönünde mevcut olamamasıdır. Zaman bölmeli çoklama Sisteminde (TDD), mobil istasyon ve (sabit) baz istasyon sadece zaman içinde ayrıldığında aynı taşıyıcı frekansı kullanırlar. Bu durumda uplink yönünde ölçülmüş değerler eğer kanal, uplinkten downlinke iletim sırasında değişmezse, downlink yönünde en uygun olacaktır. Buna rağmen bu genelde gerçekleşen bir durum olarak kabul edilemez. En azından kullanıcıların yüksek hızda hareket etmelerinin beklendiği sistemlerde olmaz. Eğer frekans bölmeli çoklama (FDD) kullanılırsa, uplink ve downlink frekansta ayrılırlar. Bu durumda uygun değerler, frekanstaki kanal tepki bağılılığı yüzünden genellikle aynı olmayacaktır. Böylece downlink yönündeki uygun ışın oluşumu (yani ,AA) zordur ve en sık önerilen teknik varış yönünün (DoA) ölçümünün geometrik yaklaşımıdır. Tahmin yöne dayalı karşılıklı ilişkidir, yani uplink yönünde varan sinyalden gelen yön, downlink yönünde kullanıcıya ulaşmak için gönderildiği yöndür. Sabit istasyon tarafından kullanılan strateji sinyalin alındığı ana kısımdan gelen varış yönünü ölçmek içindir. Bu yön, ışıma örüntüsü istenilen kullanıcıya doğru yönlendirilmiş bir lobe ya da lobe'ler olduğu için $W_1..W_m$ değerlerini seçerek downlink yönünde kullanılır. Bu fazlı dizi sistemine uygundur. Buna ek olarak bu kullanıcılar tarafından minimize edilen radyo girişimleri en aza indirilebilsin diye diğer kullanıcılar yönünde başlangıç noktaları yerleştirmek mümkündür.

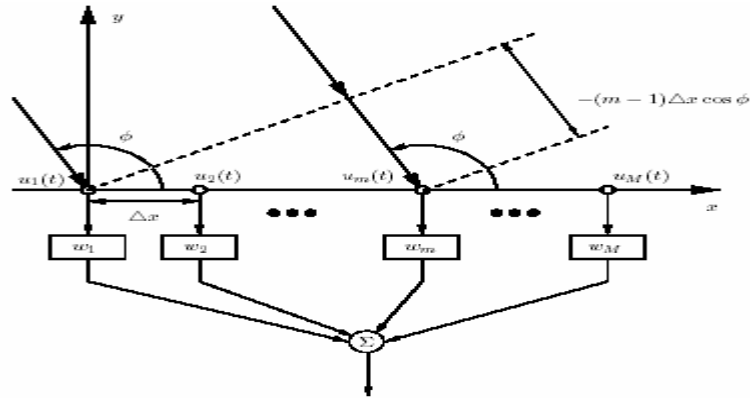
Farklı sinyal yollarındaki bozulmalara bağılı olarak downlink yönünün, uplink kanalının belli bir süre içindeki ortalaması baz alınarak seçilmesi tavsiye edilmektedir. Bununla beraber, anlık radyo kanalına erişilebilen bilginin mümkün olduğu uplink durumuyla karşılaştırıldığında, bu durum düşük verimli olacaktır. Şu da vurgulanmalı ki, yukarıdaki tartışmada baz istasyonları tarafından gözlenen karıştırıcıların mobil istasyon olduğu; mobil istasyonlar tarafından gözlenen karıştırıcıların da baz istasyonu olduğu farz edilmektedir. Bunun anlamı şu: iletim konumundaki baz istasyonu istenenin dışındaki mobil istasyonlara karşı sıfırlandığı zaman, bu mobillerden kaynaklanan girişim düşecek. Bununla beraber, eğer mobillerin gözlediği karıştırıcılar diğer mobillerse, mobildeki girişimin düşüşünün olasılığında çok daha temel sınırlamalar olacaktır [1].

4.5. Anten dizilerinin temelleri

Bir anten dizisi hacimsel olarak ayrılmış bir ağırlık ağını ya da radyo ışını oluşum ağını besleyen çıkışları olan sensörlere sahiptir. Anten dizisi verici ya da alıcı dizisi olarak oluşturulabilir. Bir anten dizisini analiz ederken birçok varsayım yapılır.

Bunlar: [3]

- i) Alıcı anten dizisine gelen bütün sinyaller, sonlu sayıda düzlemsel dalgalardan oluşurlar. Bu düzlem dalgaları çok yollu bileşenlerden kaynaklanır.
- ii) Vericiler ve çoklu yollara sebep olan nesneler, anten dizisinin uzak alanındadır.
- iii) Sensörler birbirine yakın yerleştirilir. Böylece anten dizisinin herhangi iki elemanı tarafından alınan sinyallerin genlikleri önemli oranda değişmez.
- iv) Her sensörün aynı ışınma örüntüsüne ve aynı yönelmeye sahip olduğu kabul edilmektedir.
- v) Anten elemanları arasındaki karşılıklı birleşme önemsiz olmaya değer olarak kabul edilir. Koordinatları ile bir anten dizisi için bkz. Şekil 4.10 .



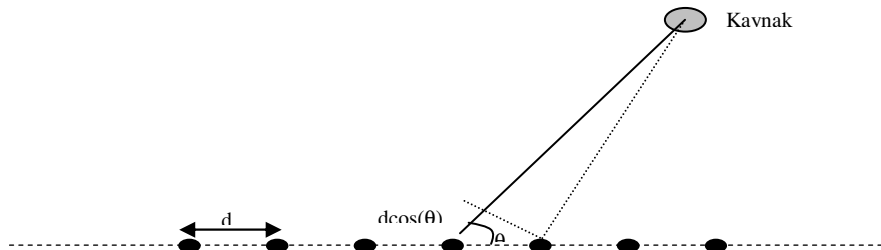
Şekil 4.10. Δx aralıklarla yerleştirilmiş uniform doğrusal bir dizide ϕ açısıyla gelen düzlemsel dalga gösterimi

4.6. Anten Dizi Yapısı

Anten dizi yapısı akıllı anten başarımını etkileyen önemli etkenlerden biridir. Dizi elemanlarının geometrik yapısı hüzmeye genişliği ve çeşitli açılardaki çözünürlüğü dahil bir çok konuyu etkiler ve dizi yönlendirme vektörünü belirler.

4.6.1. Doğrusal anten dizileri

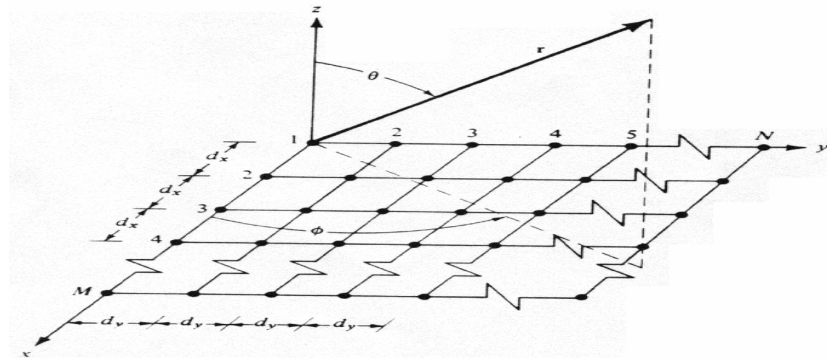
Doğrusal anten dizileri, doğrusal bir hat üzerine yerleştirilmiş antenlerden oluşan dizilerdir. En yaygın kullanılanı düzgün doğrusal anten dizisidir. Düzgün, dizi elemanlarını düzgün aralıklarla dağıtıldığı anlamında kullanılmaktadır. Bununla beraber uygulamaya göre dizi elemanları çeşitli aralıklarla yerleştirilerek ışıma örüntüsünün çeşitli açılarda ortam şartlarına göre tepki vermesi sağlanabilir. Dizi elemanlarının dağıtım şekli anten yönlendirme vektörünü belirler bu da dizi eleman ağırlıklarının oluştururken denetleyici tarafından başvuru bir bilgidir.



Şekil 4.11. Doğrusal anten dizisi

4.6.2. Düzlemsel anten dizileri

Düzlemsel anten dizileri adından da anlaşılacağı üzere, antenlerin iki boyutlu bir düzlem üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulur. Şekil 4.12' de bir düzlemsel anten dizisi görülmektedir. Düzlemsel anten dizilerinin, doğrusal dizilere göre avantajı ışıma örüntüsünün küresel koordinat sisteminde iki boyutu temsil eden θ ve ϕ açısal eksenleri ile tanımlanabilmesidir. Yani doğrusal dizilerde ışıma örüntüsü sadece dizi ekseninin bulunduğu düzlemde tek bir boyut taranabilirken, Düzlemsel diziler de iki boyut birden taranabilmektedir. Bu bize sadece yatayda değil dikey ekseninde de kullanıcıların konumlarına göre hüzmeye şekillendirebilme imkânı sunmaktadır. Fakat anten sayısının artışı işlemsel yoğunluğu da artırmakta ve zaman kaybına neden olabilmektedir. Bu yüzden doğrusal dizilere eklenecek bir kaç anten ile dikeyde hüzmeye şekillendirilme yapılmaya çalışılmaktadır.



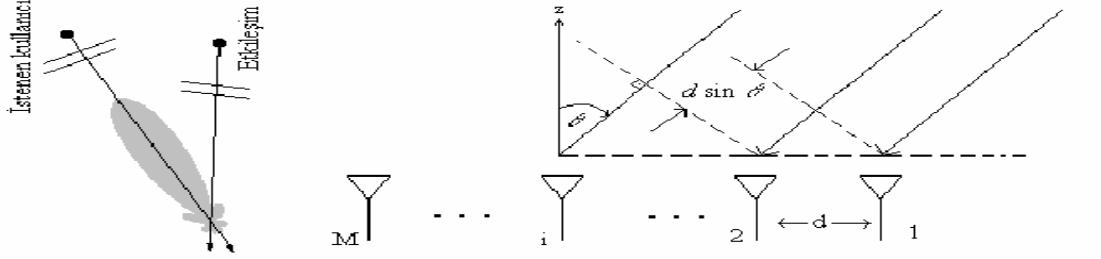
Şekil 4.12. Düzlemsel anten dizisi

Hücreli haberleşme sistemlerinde geliş açıları yatay ekseninde dikey eksene göre çok daha fazla dağılırlar. Bu nedenle düzlemsel diziler yerine dikeyde daha az ayarlamaya veren dizi yapıları tercih edilmektedir.

4.7. Bir anten dizisi için kuramsal model

Şekil 4.13, dizilim boyunca θ doğrultusundan işaretleri alan M elementli düzgün dağılımlı doğrusal anten dizilimini göstermektedir. Burada ilk (referans) elemanında

alınan işarete dayanarak her bir elemanda alınan işaretin ifadesi elde edilmektedir. Herhangi bir elemandaki işaret, referans elemanındaki işaretin zaman ilerlemeli veya zaman gecikmeli bir versiyonu olarak açıklanabilmektedir.



Şekil 4.13. Gelen dalga yüzeyini gösteren düzgün dağılımlı doğrusal anten dizilimi

Şekil 4.13'ten referans elemanındaki işaret ikinci elemana ulaşmak için $d \sin \theta$ mesafesi kadar daha fazla yol alacaktır. Buna karşılık zamandaki gecikme,

$$\Omega = \frac{d \sin \theta}{v} \quad (4.6)$$

şeklinde verilebilir. Buna göre dizilimdeki herhangi i. element için alınan işaret referans elemanında alınan işaret cinsinden,

$$x_i(t) = x_1(t) \cdot \exp(-j2\pi(i-1) \frac{d \sin \theta}{\lambda}) \quad i=1,2,\dots,m \quad (4.7)$$

şeklinde yazılabilir.

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]^T \quad (4.8)$$

$$a(\theta) = \left[1, \exp\left(\frac{j2\pi \cdot d \sin \theta}{\lambda}\right), \dots, \exp\left(\frac{j2\pi(m-1) \cdot d \sin \theta}{\lambda}\right) \right] \quad (4.9)$$

eşitlikleri tanımlanırsa $y(t)$ anten elemanlarındaki alınan işareti göstermek üzere, dizilimde alınan işaretin karmaşık zarfı,

$$y(t) = a(\theta).x_1(t) \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilebilir.

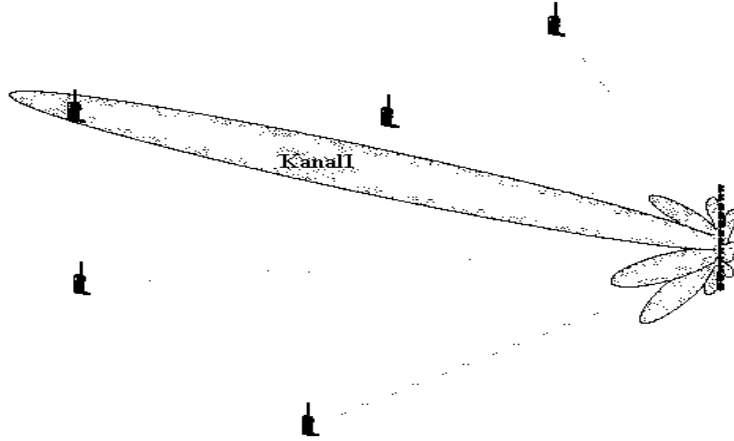
$a(\theta)$ vektörü yönlendirme vektörü veya dizilim cevap vektörü olarak isimlendirilir. Yukarıdaki düşündüğümüz durumda, dizilim yönlendirme vektörü sadece geliş açısının bir fonksiyonudur. Genellikle yönlendirme vektörü dizilim geometrisi, işaret frekansı ve teker teker eleman cevabının bir fonksiyonudur. Bütün açılar ve frekanslar için yönlendirme vektörünün toplamı, dizilim etkeni olarak isimlendirilir.

4.8. Dizi geometrisi ve eleman boşluğu

Anten elemanları arasındaki eleman boşluğu bir anten dizisinin tasarımındaki en önemli faktördür. Eğer elemanlar $\lambda/2$ den daha fazla ayrılırsa dizi performansını düşüren katlanmalar ortaya çıkar. Karşılıklı bağlamanın bir etkisi dizinin ara eleman boşluğunu sınırlamasıdır. Eğer elemanlar çok yakın yerleştirilirse ($\lambda/2$ den daha yakın) ana kulakçık ve yan kulakçıkların genişliği artmaktadır. Bu yüzden elemanlar yeterli uzaklıkta olmalı ve katlanmaları engellemek için $\lambda/2$ den daha küçük olmalıdır. Bütün pratik çalışmalarda $\lambda/2$ oranında bir boşluk tercih edilir.

5. IŞIN ŞEKİLLENDİRME VE UZAYSAL SÜZGEÇLEME

Işın yönlendirme denetleyicinin geliş açılarına göre oluşturacağı faz ve genlik bilgilerini içeren ağırlık vektörünün anten dizisine uygulanması işlemidir. Temel olarak gelen tek bir işaret için ışına örüntüsünün kullanıcıya yönlendirilmesi dizi elemanlarının fazlarını dizi faktörü uyarınca değiştirmekle mümkündür [4]. Fakat birden çok işareti ayırtırmak için matematiksel olarak ağırlıkları hesaplamak zaman alıcı olduğu kadar her zaman doğru sonucu vermeyebilir. Bu nedenle ağırlık hesaplamasında özyineli (iterative) yöntemler kullanmak çok daha verimli sonuçlar vermektedir. Özyineli yöntemler belli bir başlangıç ağırlık vektörünü (genelde tamamen sıfırlardan oluşan) temel alırlar ve belli bir algoritmayı yineleyerek istenen işareti elde etmeye çalışırlar. İstenen işaretin elde edilmesi durumunda oluşan ağırlık vektörü anten dizisine uygulanarak, ışına örüntüsünün gelen işaretleri ayırtıracak şekilde oluşması sağlanır.



Şekil 5.1. Işın yönlendirme

Işın şekillendirme algoritmaları da dizi eleman sayısına bağımlı olarak çalışırlar. Dizi eleman sayısının, gelen işaret sayısından az olması durumunda geleneksel algoritmalar yeterli çözünürlüğe ulaşamazlar bu durumda süper çözünürlük algoritmalar kullanılmalıdır. İşlem yoğunluğu çok daha yüksek olmasına rağmen bu algoritmaların özellikle yansıma yolu ile yoğun bir işaret trafiğinin yaşanması muhtemel yoğun şehirleşme bulunan ortamlarda daha yüksek başarımlar sergilemesi

olasıdır. En temel özyineleme algoritmalarından olan LMS (Least Mean Squares) ve RLS (Recursive Least Squares) algoritmaları ve bu algoritmaların değişik türevleri oldukça yaygın bir şekilde hüzme şekillendirmede kullanılmaktadır. LMS işlem yoğunluğu olarak daha az yüklü olsa da RLS ile karşılaştırıldığında çok daha fazla özyineleme ile ağırlıkları hesaplamaktadır. Bu nedenle son yıllarda işlem yükünü kaldırabilecek hızda denetleyicilerin de çıkmasıyla RLS daha çok tercih edilir hale gelmiştir [5].

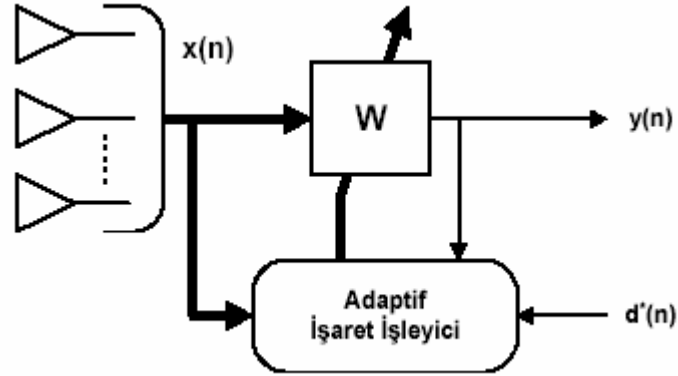
5.1. Ağırlık Vektörünün Bulunması

Uyarlanabilir algoritmalar kör algoritmalar ve kör olmayan algoritmalar olarak iki grupta toplamak mümkündür. Kör olmayan algoritmalarda alıcı ve verici tarafından bilinen bir eğitim işareti kullanılarak optimum ağırlık vektörleri hesaplanır. Kör algoritmalar, eğitim işaretine gerek duymazlar. Bunun yerine istenen işaretin bazı özelliklerinden (geliş açısı, işaretin modülü, işaretin zarfı vb.) faydalanmak suretiyle optimum ağırlık vektörlerini hesaplarlar [6].

Adaptif anten sistemlerinde, en uygun ağırlık vektörünü bulmak için çoğunlukla kör olmayan algoritmalar sınıfına giren LMS(En Küçük Ortalama Kareler), RLS (Özyinelemeli En Küçük Kareler) ve SMI(Örneklenmiş Matris Tersi) algoritmaları kullanılır. M anten elemanından oluşan bir adaptif anten dizisinin, n anındaki $y(n)$ çıkışı,

$$y(n) = \sum_{i=1}^M w_i^* . x_i(n) \quad (5.1)$$

olarak verilir. Bir çok uygulamalarda hem faz hem de dördün veriyi işlemek için genelde dördün evreli alıcılar kullanıldığından, hem işaret hem de ağırlıklar karmaşık büyüklüklerdir.



Şekil 5.2. Adaptif ışın demeti oluşturma sistemi

Şekilde görüldüğü gibi antenlerde w karmaşık ağırlıklar, adaptif kontrol işlemcisi tarafından ayarlanır. Burada $d(n)$ referans işaretine göre ışın demeti oluşturulmaktadır. Eğer istenen işaret (eğitim işareti) biliniyorsa, dizi çıkışı ile $d(n)$ referans işareti arasındaki ortalama karesel hatayı (MSE) en küçük yapacak şekilde ağırlıklar belirlenir.

İstatistiğe dayalı adaptif algoritmalarda en uygun ağırlık vektörü aşağıdaki denklemle bulunur.

$$\hat{w} = \hat{R}^{-1} \cdot \hat{p} \quad (5.2)$$

Bu çözüme Wiener çözümü denir. Bu denklemde, R giriş öz-ilişki matrisi, p çapraz-ilişki vektörü olup aşağıda verilen bağıntılarla hesaplanırlar.

$$\hat{R} = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot x^H(n) \quad (5.3)$$

$$\hat{p} = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot d^*(n) \quad (5.4)$$

Bu yöntem, çok-yollu ortamda istenen işaretin bastırılma olasılığını ortadan kaldırmakta, istenen işaret ile girişim işaretlerinin anten dizisine geliş açılarının

bilinmesine gerek duymamaktadır. Bu yöntemin olumsuz yanı, ağırlıkların belirlenmesi için eğitim işaretine gereksinim duyulmasıdır [7].

5.1.1. LMS ve DLMS Algoritması

En küçük karesel ortalama (LMS) algoritması Widrow&Hoff tarafından 1959 yılında sunulmuştur. En yaygın kullanıma sahip kör olmayan algoritmalar sınıfındadır. Optimum ağırlık vektörlerini hesaplamak için referans işaretine yani, istenen işaret bilgisine ihtiyaç vardır. LMS algoritmasında matris ters alma veya ilinti matrislerini hesabı gerekmediğinden basit bir algoritmadır [7].

LMS algoritmasında kullanılan μ adım büyüklüğü $w(n)$ dizisinin yakınsama karakteristiğini kontrol etmektedir. Bu algoritma sürekli bir adaptif yaklaşım olup, ağırlıklar her örneklenen verinin ardından güncellenir. İşaret ortamıyla ilişkili istatistik durağan ise, bu sürekli adaptasyon işlemi uygun sonuçlar vermektedir. LMS algoritmasının başlıca üstünlüğü basit olmasıdır. Çünkü bu algoritma, öz ilişki fonksiyonlarının ölçümünü ve matris tersini gerektirmez. LMS algoritması aşağıdaki üç denklemle tanımlanabilir [7].

$$y(n) = w^H(n).x(n) \quad \text{süzgeç çıkışı} \quad (5.5)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad \text{kestirim hatası} \quad (5.6)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu.x(n)e^*(n) \quad \text{ağırlık adaptasyonu} \quad (5.7)$$

$$X_R = \lambda_{\max} / \lambda_{\min} \quad \text{özdeğer yayılımı} \quad (5.8)$$

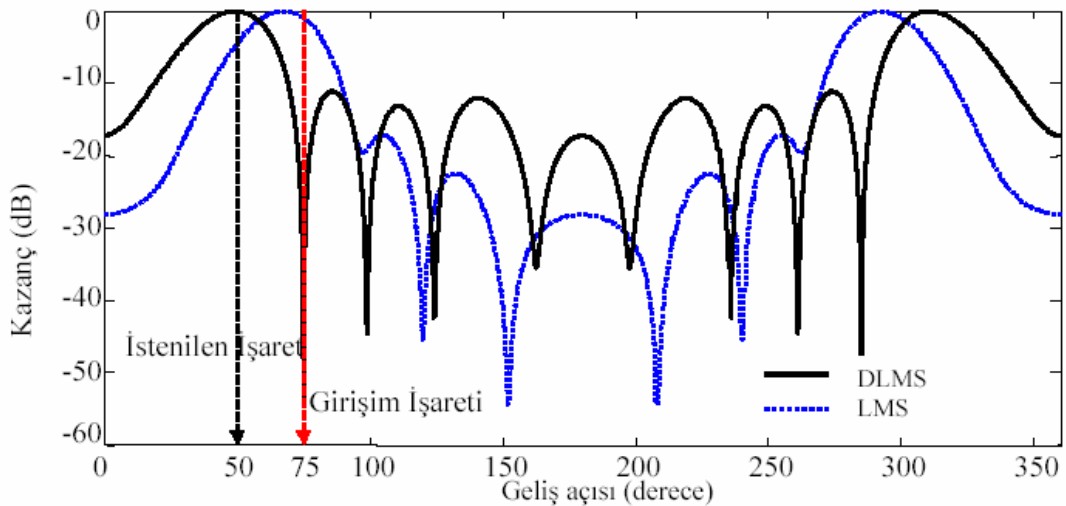
Bunun yanında bu algoritmanın yakınsama karakteristiği R öz-ilişki matrisinin öz değer yayılımına (eigenvalue spread) bağlıdır. Öz değer yayılımı arttıkça yakınsama hızını belirleyen optimum μ adım büyüklüğü azalır. Ayrıca anten eleman sayısı(M) arttıkça R öz-ilişki matrisinin öz değer yayılımı artar. Gerçekte, anten eleman sayısını sabit tutmak koşuluyla R öz-ilişki matrisinin öz değer yayılımının değişimi, antene gelen işaretlerin mutlak güçlerinin değişiminden kaynaklanır. Bu durum LMS'in çalışma bölgesini sınırlamaktadır. Bu sorundan kurtulmak için örneklenen

her veriden sonra adım büyüklüğü en uygun olacak şekilde dinamik olarak güncelleştirilir. Bu işlemde

$$\mu_i = \alpha \cdot \left(\frac{1}{M} \sum_{n=0}^i x(n) \cdot x^H(n) \right)^{-1} \quad (5.9)$$

denklemini kullanılır. Bu denklemde α katsayısı 1'den küçük bir sabittir. Bu yolla oluşturulan algoritma “Dinamik LMS” algoritması (DLMS) olarak tanımlanmıştır.

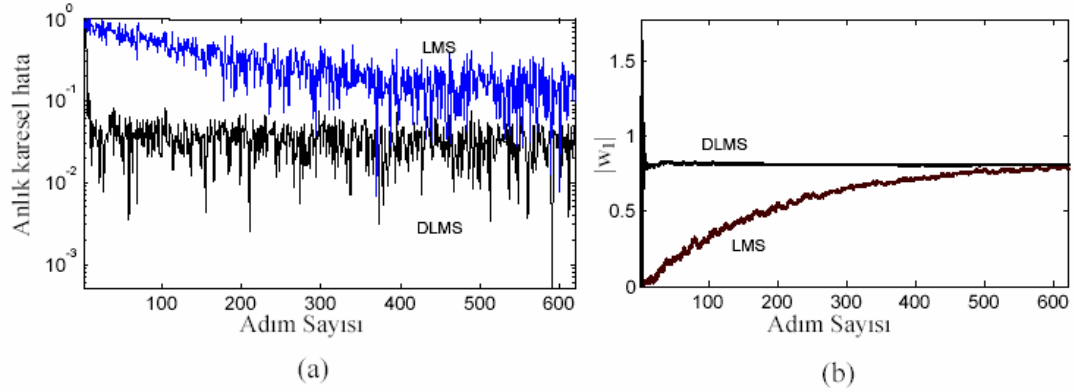
Şekil 5.3’de LMS ve DLMS algoritmasının oluşturduğu ışın demetleri görülmektedir. Burada kritik bir çalışma bölgesi seçilmiş olup LMS algoritmasının adım büyüklüğü ($\mu=0.01$) gereğinden fazla büyük olduğu için sistem kararsız hale gelmiş ve sonuçta girişim işaretini bulamamıştır. Ancak DLMS, dinamik adım büyüklüğü yaklaşımını kullanarak girişim işaretini bulmuş ve girişimi yaklaşık -50 dB zayıflatmıştır. Burada istenen işaretin gürültüye oranı (SNR) 12 dB, geliş açısı 50° , istenen işaretin girişim işaretine oranı (SIR) -22 dB olup girişim işaretinin antene geliş açısı ise 75° ’dir. Adaptif anten sistemi 5 elemanlı düzgün doğrusal bir dizidir [7].



Şekil 5.3. LMS ve DLMS'in oluşturduğu ışın demeti [7]

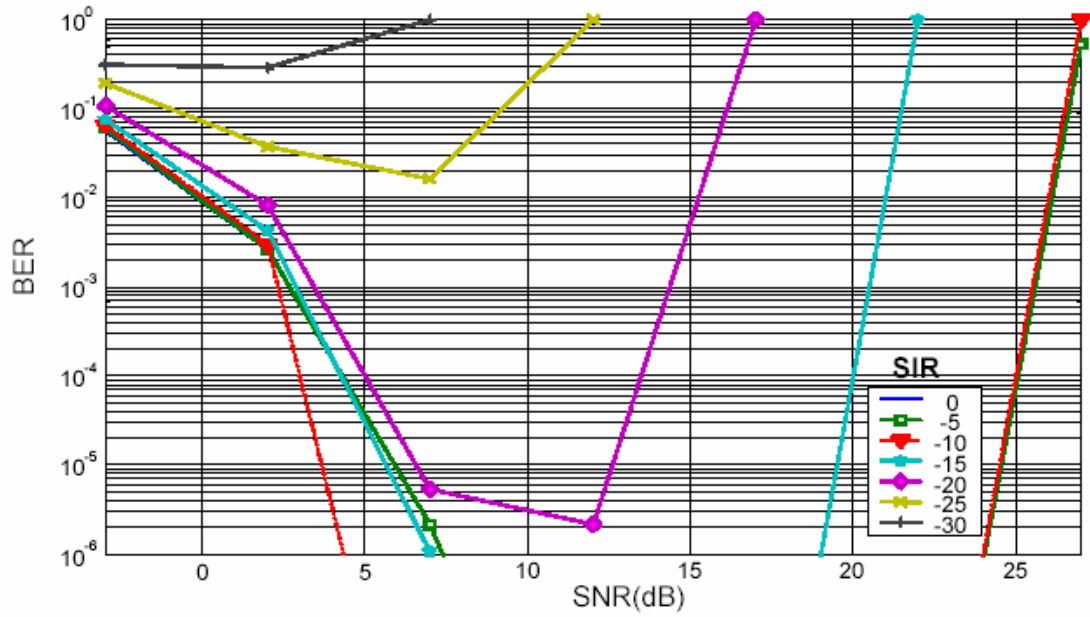
Şekil 5.4’de ise LMS ve DLMS algoritmasının adım sayısına göre anlık karesel hataları ve birinci anten elemanındaki ağırlığın değişimi verilmiştir. Burada istenen

işaretin gürültüye oranı (SNR) 7 dB, istenen işaretin girişim işaretine oranı (SIR) -20 dB'dir. Şekilden de görüldüğü gibi LMS algoritmasının yakınsama hızı DLMS'e göre daha yavaş kalmaktadır. DLMS ise giriş koşullarına göre adım büyüklüğünü değiştirerek daha hızlı bir yakınsama sağlamıştır [7].



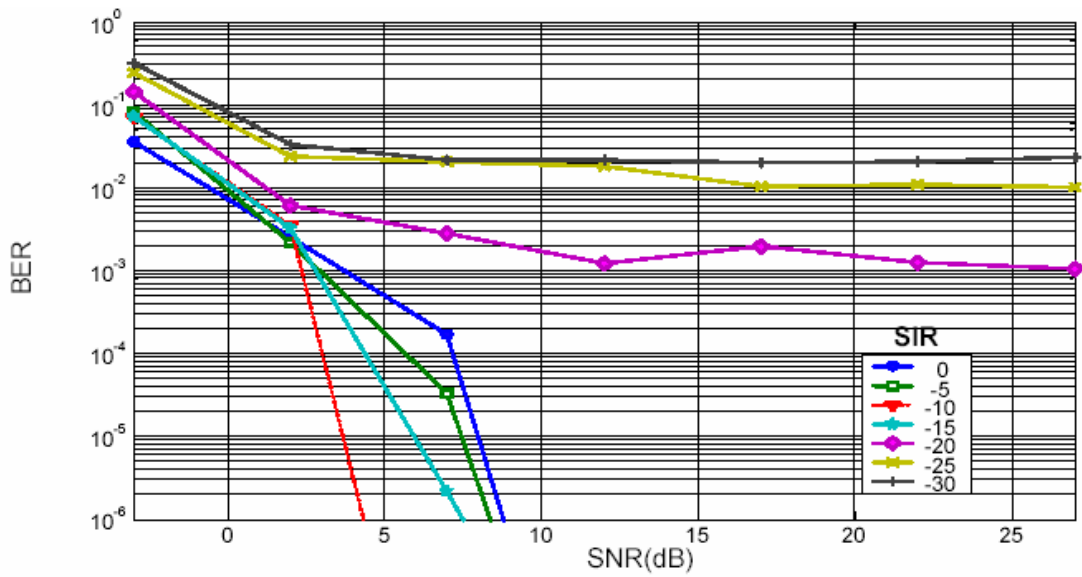
Şekil 5.4. a) LMS ve DLMS algoritmasının adım sayısına göre karesel hata değişimi b) LMS ve DLMS algoritmasının adım sayısına göre birinci anten elemanındaki ağırlığın değişimi [7]

Şekil 5.5'de LMS algoritmasının farklı işaret/girişim oranlarında (SIR) giriş SNR' sine göre bit hata oranları (BER) hesaplanmıştır. Bu bilgisayar benzetiminde her noktayı bulmak için kanal katsayıları 1000 kere değiştirilmiş ve her kanal için 10000 bit veri gönderilmiştir. Hesaplama adım sayısı 620 olarak alınmıştır. Şekilden de görüldüğü SNR arttığında LMS algoritması belli noktalardan sonra kararsız duruma gelmektedir. Bu nedenle, bazı noktalardan sonra BER çok yüksek çıkmaktadır [7].



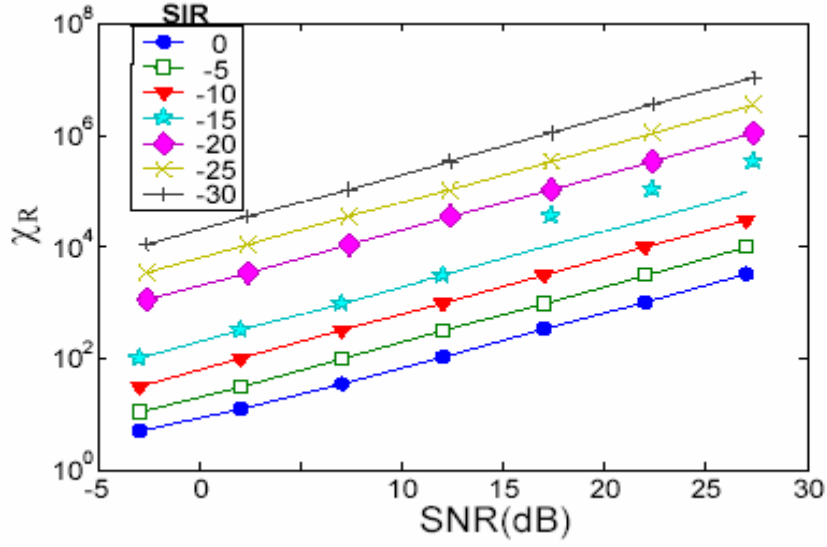
Şekil 5.5. LMS algoritmasının farklı SIR değerlerinde SNR' ye göre BER değişimi[7]

Şekil 5.6' de DLMS algoritmasının farklı işaret/girişim oranlarında (SIR) giriş SNR' sine göre bit hata oranları (BER) hesaplanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi DLMS algoritması, LMS algoritmasının kararsız olduğu bölgelerde kararlılığını korumaktadır.



Şekil 5.6. DLMS algoritmasının farklı SIR değerlerinde SNR' ye göre BER değişimi [7]

R öz-ilişki matrisinin öz değer yayılımı (x_R) antene gelen işaretlerin güçlerine bağlıdır. Şekil 5.7’ de R matrisinin farklı SIR değerlerinde SNR ile değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi SNR arttıkça R matrisinin öz değer yayılımı üstel olarak artmaktadır.



Şekil 5.7. R matrisinin Öz değer yayılımının SNR ile değişimi [7]

Sonuç olarak adaptif anten sistemlerinde girişim işaretlerini bastırmak için kullanılan adaptif algoritmalarından biri olan LMS algoritmasında adım büyüklüğü sabit alındığından dolayı çalışma bölgesi sınırlanmaktadır. Bu sınırlamayı azaltmak için yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen DLMS algoritması LMS’ e göre daha geniş bir çalışma bölgesi sağlamaktadır. Ayrıca normal çalışma koşullarında DLMS’ in yakınsaması, LMS’ e göre daha hızlıdır. Gürültüyü bastırmak için ek teknikler kullanmadan DLMS algoritması 5-7 dB’ lik bir SNR kazancı sağlamaktadır. SIR -30 dB’ nin altına düştüğünde, DLMS algoritmasının kanalı daha iyi öğrenebilmesi için adım sayısının artırılması gerekmektedir [7].

5.1.2. Özyineli en küçük kareler yöntemi (RLS)

RLS algoritması aşağıdaki eşitliklerle verilen R_{xx} ve r_{xd} yaklaşımı için ağırlıklandırılmış toplamları kullanır ve matrisin tersi yinelemeli bir şekilde elde edilir ve ağırlık güncelleme eşitliği aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$w(n) = w(n-1) + q(n)[d(n) - w^H(n-1).x(n)] \quad (5.10)$$

Burada,

$$q(n) = \frac{\gamma^{-1}.R_{xx}^{-1}(n-1).x(n)}{1 + \gamma^{-1}x^H(n).R_{xx}^{-1}(n-1).x(n)} \quad (5.11)$$

$$R_{xx}^{-1}(n) = \gamma^{-1}[R_{xx}^{-1}(n-1) - q(n)x(n)R_{xx}^{-1}(n-1)] \quad (5.12)$$

şeklindedir [8].

5.2. Uzaysal Süzgeçleme Teknikleri

Akıllı antenlerin uzamsal boyutu kullanma yeteneği adaptif dizilerin performans kazanımlarını sağlayan temel faktördür. Dizilime gelen işaretlerin geliş açısı doğrultularının (DOA) yaklaşık değerleri doğru olarak hesaplandığında; istenen işaretler, etkileşim işaretleri zayıflatılırken doğruluğu daha da iyileştirmek için, demodülatöre geçirilir. Bu süreç etkin bir biçimde anten örüntüsü doğrultusunu tüm yönlüden doğrusala değiştirir, bu da uzamsal bölmeli çoklu erişim (SDMA) düşüncesine temel teşkil eder ve BER performansını artırır. Bu bölümde, zaman domeninde ışın şekillendirmeye bir giriş kullanılarak uzamsal olarak süzgeçlemeyi yani istenilen doğrultulardan gelen işaretlere duyarlı iken diğer doğrultulardan gelen işaretleri zayıflatılan dizilim cevabı incelenmektedir [8].

5.2.1. Genel ışıın şekillendirme eşitlikleri

Dizilimdeki M alıcının çıkışlarının toplanması uzamsal süzgecin karakteristiğini vermektedir. Daha genel bir durumda, uzamsal süzgeçleme işlemi çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanan kayar ortalama veya FIR süzgece eşdeğerdir.

$$y(t) = a.X(t) = x(t).a.\exp(jkR) \quad (5.13)$$

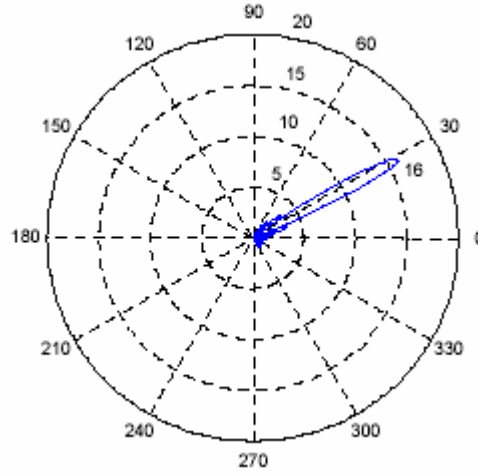
Burada a pencere (window) fonksiyonunu, $X(t)$ bütün alıcıların çıkışlarını ve R her alıcının kendisine ait olan faz gecikmesini tanımlamaktadır. Bu ifadeler, matris formunda aşağıdaki gibi verilebilmektedir.

$$\begin{aligned} a &= [a_0, \dots, a_{m-1}] \\ X(t) &= [x_0(t), \dots, x_{m-1}(t)]^T = x(t).\exp(jkR) \\ R &= [r_0, \dots, r_{m-1}]^T \end{aligned} \quad (5.14)$$

Süzgeç katsayıları tarafından belirlenen a pencere fonksiyonu, bu noktada rasgele düşünülmesine rağmen, genelde ana demetin genişliğini ve yan kulakçıkların yüksekliğini kontrol etmek için kullanılan dikdörtgen, Blackman, Hamming ve Barlett tipi fonksiyonlar şeklindedir [8].

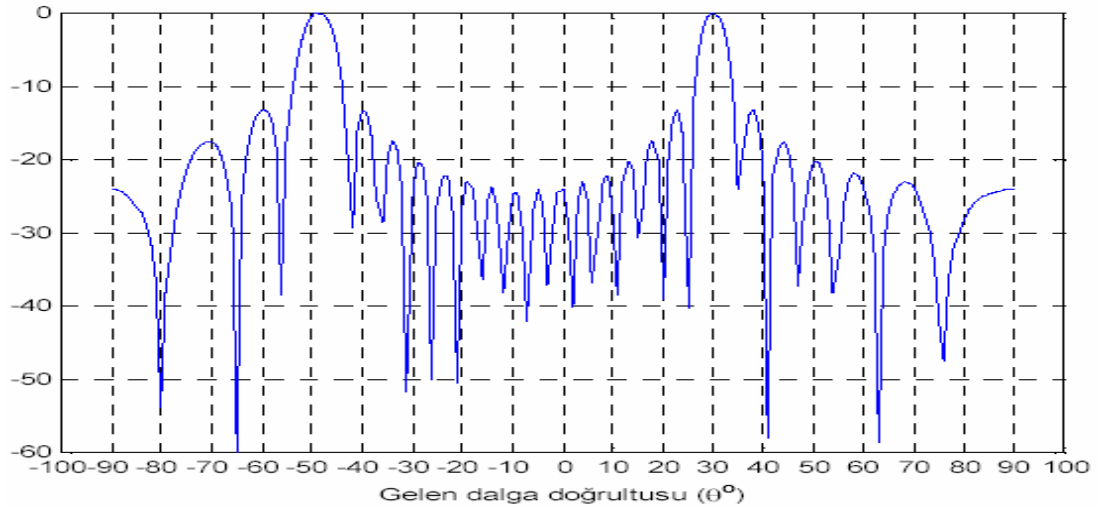
5.2.2. Doğrusal dizilimli benzetim

Matlab kullanılarak doğrusal dizilimin ışıınım örüntülerini analiz etmek ve parametrelerle değişiklikleri gözlemek mümkündür. Burada ışıınım örüntüsü hesaplanabilmekte ve çok sayıda giriş doğrultusu olmasına rağmen belirli bir doğrultuda yönlendirme yapılmaktadır. Işıınım örüntüsü ve gücü grafiksel olarak verilebilmektedir [8].

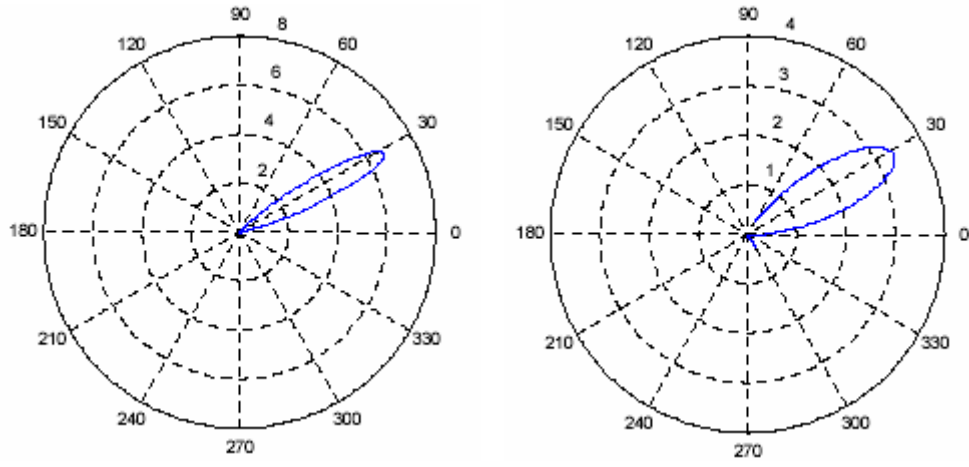


Şekil 5.8. Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınlım örüntüsü [8]
($M = 16$ $d = 0,5\lambda$)

Şekil 5.8 ve 5.9’ de dikdörtgen pencere fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. Bu şekillerde, düzgün dağılımlı doğrusal dizilim düşünülmüş ve dizilime 30° ’lik açıyla gelen işaretin sonuçları verilmiştir. Şekil 5.9’da elemanlar arası mesafenin yarım dalga boyundan büyük olması nedeniyle katlanmanın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9. Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınlım örüntüsü [8]
($M = 16$ $d = 0,8\lambda$)



Şekil 5.10. Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınlım örüntüleri [8]

Blackman pencereleme fonksiyonlara kullanıldığında, dikdörtgen fonksiyonunda belirgin bir şekilde ortaya çıkan yan kulakçıkların etkisi çok önemli miktarda azaltılabilmektedir [8].

6. GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ

Anten dizisine tek bir kullanıcıdan işaret gelmesi durumunda, dizi elemanları arasında oluşan faz farkını belirleyerek işaretin geliş açısını bulabiliriz. Bu durumda antenler, işaretin $d\cos\theta$ kadar mesafeyi aldığı süre kadar zaman farkıyla işareti algılayacaktır. Bu sürenin çalışma frekansında yaratacağı faz farkı bizim geliş açısını hesaplamamızı sağlar.

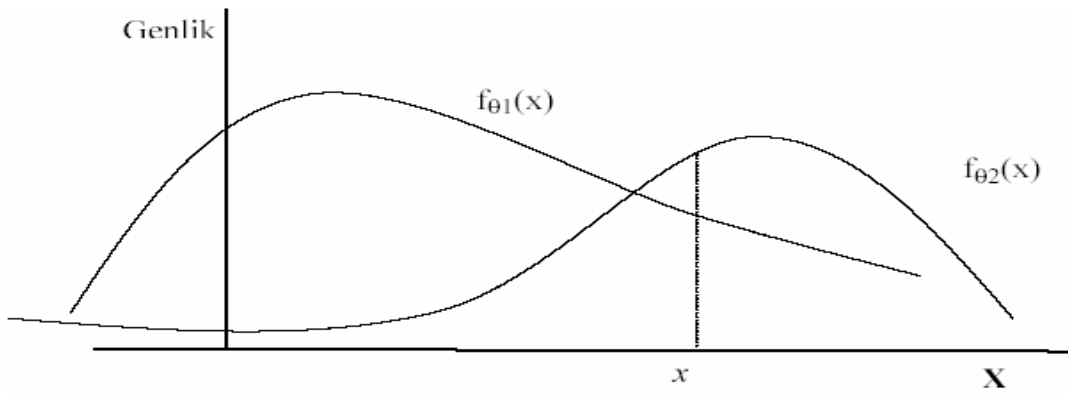
Fakat birden fazla kullanıcının antenler üzerinde değişik fazlarda oluşturduğu toplam işaret, tek kullanıcıdaki gibi elemanlar arasında düzenli bir faz farkı yaratmayacaktır. Bu nedenle geliş açısı kestirimi algoritmaları kullanılmaktadır. Geliş açısı kestirim algoritmaları anten dizisi yönlendirme vektörü, ortam bilgisi ve dizi elemanlarının ışıma bilgisini kullanarak anten dizisinden gelen işaretleri işler ve geliş açılarını tahmin eder. Geliş açılarını doğru tahmin edebilmek için gelen işaret sayısından en az 1 fazla antene ihtiyaç vardır. Fakat anten sayısının artırılması işlenecek işaret sayısını artırmaktadır. Bu işlemlerin çoğunun matris işlemleri olduğu düşünülürse işlem yükünün aritmetik değil geometrik artacağı öngörülebilir. Bu nedenle geliş açısı algoritmalarının daha kısa sürede, daha yüksek çözünürlükte daha fazla kullanıcıdan gelen işareti algılayabilmesi halen üzerinde yoğun zaman harcanan bir konudur.

Yaygın olarak kullanılan geliş açısı kestirimi algoritmaları MUSIC ve En büyük olabilirlik yöntemi (Maximum Likelihood Method) algoritmalarıdır. En yaygın geliş açısı kestirimi algoritması MUSIC algoritmasıdır. Temel olarak alınan örnek işaret vektörünün özdeğer ayrıştırması uygulanarak sözdetyafının oluşturulmasına dayanır. Sözdetyafın tepe noktaları geliş açısı kestirimlerini vermektedir.

6.1. En Büyük Olabilirlik Yöntemi (Maximum Likelihood Method)

En büyük olabilirlik yöntemi rastlantısal bir değişkenin (ölçülen değişken) bağlı olduğu bir başka değişkene göre olasılık dağılım fonksiyonu tanımlanması temeline dayanır. Olasılık dağılım fonksiyonu bize ölçülen değişkenin, hangi sıklıkta bağlı

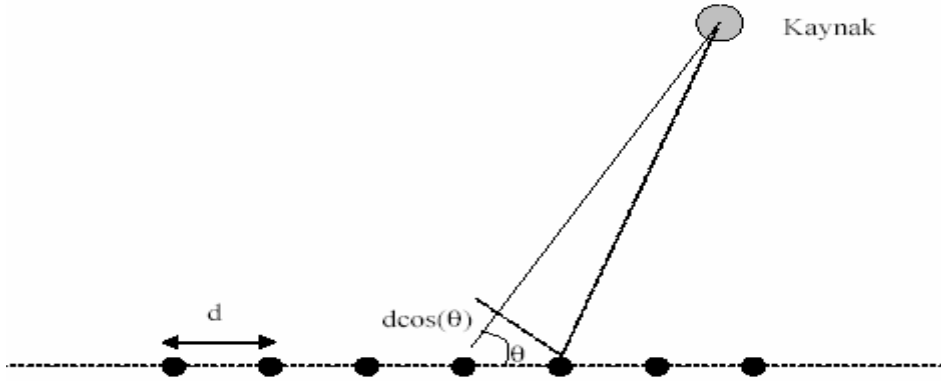
bulunduğu değişkeni tekrar ettiğini gösterir (Kay, 1993). x rastlantısal bir parametre, $f_{\theta}(x)$ ise x parametresinin θ 'ya bağlı olasılık dağılım fonksiyonu olsun. θ_1 ve θ_2 , θ parametresinin alabileceği iki olası değer olsun. Bu durumda yapılan bir x ölçümü için θ_1 ve θ_2 'ye bağlı olasılık dağılım fonksiyonları birer değer alacaktır. Her x ölçümü için $f_{\theta_1}(x)$ ve $f_{\theta_2}(x)$ farklı değerlere sahip olacaktır. Yapılan bir ölçümün tahmin edilen θ değeri, ölçüm sonucu olasılık dağılım fonksiyonlarına uygulandığında, daha büyük değer alan olasılık dağılım fonksiyonunun bağlı bulunduğu θ değeri olacaktır. Örnek olarak Şekil 6.1'de alınan x ölçümü için tahmini θ parametresi θ_2 'dir. Çünkü, olasılık dağılım fonksiyonu, karşılık gelen x ölçümünde daha büyüktür [9].



Şekil 6.1. Olasılık yoğunluk fonksiyonları ve x ölçümüne göre aldıkları değerler [9]

6.1.1. Açısal yoğunluk fonksiyonları

Geliş açısı kestirimini en büyük olabilirlik yöntemi ile yapılması durumunda geliş açısına parametrik bağlı açısal dağılım fonksiyonları tanımlanmalıdır. Daha sonra alınan her işaret için hangi dağılım fonksiyonunun daha büyük olduğuna bakıp geliş açısı tahmininde bulunulabilir. Geliş açısı fonksiyonlarının sayısı açısal çözünürlükle doğrudan ilgilidir. Ne kadar çok fonksiyon tanımlanırsa o kadar dar aralıklarda kullanıcılar ayrılabilir. Şekil 6.2'de bu durum görülmektedir [9].



Şekil 6.2. Düzgün doğrusal anten dizisi

Doğrusal anten dizilerinin yapısından ötürü tek boyutlu açı tahmini yapılabilmektedir. Bu durumda 180 derecelik bir bölge içinde 360 adet açısal yoğunluk fonksiyonunun tanımlanması kullanıcıya, 1'er derecelik bir çözünürlük sağlayacaktır ki, bu bir çok uygulama için beklenenden iyi bir durumdur (Jeng vd., 1998). Açısal olasılık fonksiyonlarını oluştururken dikkat edilecek durum alınan işaretlerin geliş açısına bağlı olarak ifade edilmesidir. Anten dizisindeki elemanların üzerinde, kaynakla arasındaki mesafe farkından ötürü farklı fazlar oluşacaktır (Lee, 1973). Her elemanın üzerinde oluşan elektrik alan faz bilgisi, geliş açısına bağlı olarak bu faz bilgisini taşıyan üstel fonksiyon hariç aynıdır [9].

$$y = e^{-jk d n \cos(\theta)} \quad (6.1)$$

Burada, k parametresi dalga numarasını, n anten numarasını, d antenler arasındaki uzaklığı temsil etmektedir. Üstel fonksiyon ise antenler arasında kaynağa olan uzaklıktan ötürü oluşan faz farkıdır. Dolayısıyla üstel fonksiyon, ölçülen parametre olarak tanımlandığında geliş açısını parametre olarak içeren bir fonksiyon bulunur. Bu adımdan sonra her açı için açısal yoğunluk fonksiyonları oluşturulmalıdır. Bu fonksiyonlar, ölçülen x değerine bağlı olmalıdır ve doğru açıdaki fonksiyonda, x değerini yerine koyduğumuzda genliği diğer açılardakine göre daha büyük olmalıdır. İletişimde sıkça kullanılan çapraz ilinti fonksiyonu, açısal dağılım fonksiyonu tanımlarken de kullanılabilir. Çapraz ilinti fonksiyonu, iletişim teorisinde alınan işaretin gürültüden arındırılması amacıyla kullanılmaktadır. Burada fonksiyon

çıktısının, girilen değerlerin benzerliğinin artmasıyla yükselmesi özelliğinden yararlanılır. Alınan işaret gelmesi muhtemel bir işaretle ilintilendirilmekte ve çıktının büyüklüğüne göre alınan işaretin ilintilendirilen işaretle aynı olup olmadığına karar verilmektedir. Bu çalışmada ise, her açı için atanan değerler alınan işaret ile ilintilendirilerek açısal dağılım fonksiyonları tanımlanmıştır. Böylece geliş açısına ait tanımlanan değerle alınan sinyal ilintilendirildiğinde çıkan sonuç diğer değerlere göre daha büyüktür ve geliş açısının tahmin edilebilmesini sağlar [9].

$$r = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-1) \quad (6.2)$$

Burada, ölçüm vektörü anten sayısı ile sınırlı olacağı için, ilinti sonsuzdan sonsuza değil 1'den anten sayısı N'e kadar alınır. Ölçülen işaretin her bir açısı için oluşturulacak benzeri fonksiyonlarla çapraz ilintisi alındığında, doğru açı değerinde $l=0$ ilintisi tepe değerine ulaşacaktır. Diğer açı değerlerinde ise ilinti değeri düşük kalacaktır. Böylece her bir açı için x 'e bağlı açısal yoğunluk fonksiyonu,

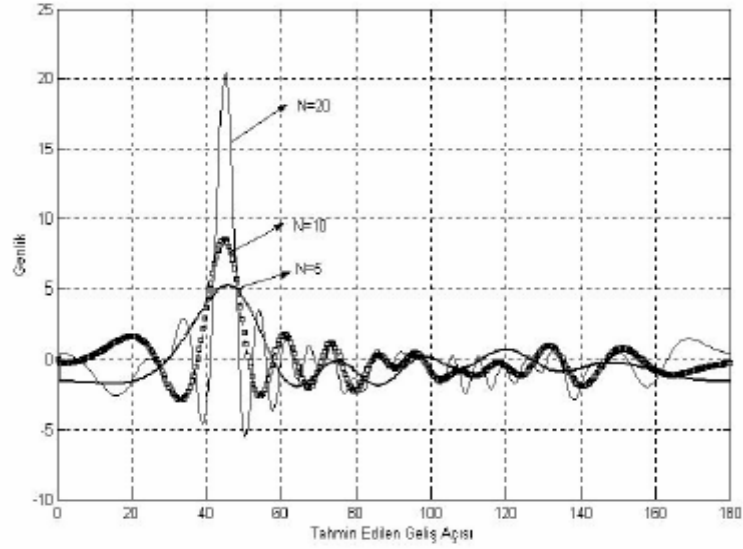
$$r = \sum_{n=1}^N x(n)y(n) \quad (6.3)$$

olarak belirlenir [9].

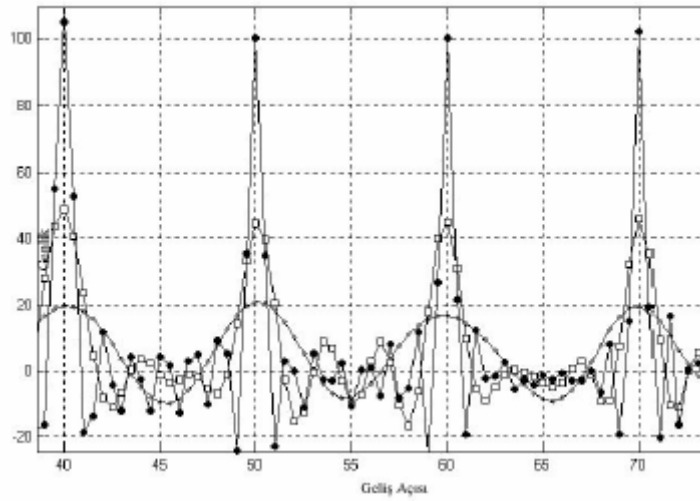
6.1.2. En büyük olabilirlik yöntemi için benzetim

Benzetim işlemi MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de çeşitli durumlar için benzetim programının sonuçları grafik halinde verilmiştir. Grafiğin tepe noktaları bize programın geliş açısı tahminlerini göstermektedir. Şekil 6.3, tek kullanıcı için değişik anten sayılarında programın performansını gösteren grafiklerdir. Anten sayısı arttıkça işaretin geliş açısı daha belirgin bir hale gelerek komşu değerlerden ayrılmaktadır. Anten sayısının artırılması işlenen vektörlerin boyutunu büyütmede ve ayrıca işlem zamanını da artırmaktadır. Dört kullanıcı için yapılan benzetim sonuçları Şekil 6.4'te verilmiştir. Şekilden de

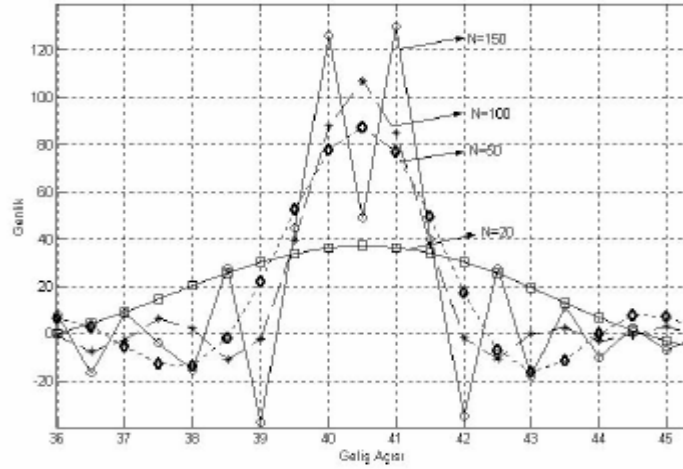
görülebileceği gibi anten sayısı arttıkça geliş açılarını belirten tepe noktaları daha da sivrilmiştir [9].



Şekil 6.3. Tek Kullanıcı için 5, 10 ve 20 antenle yapılan benzetim (Antenler yarım dalga boyu aralıklıdır) [9]



Şekil 6.4. Kaynak sayısı dört olduğunda 20, 50 ve 100 anten sayıları ile yapılan modelleme sonuçları (Siyah yuvarlaklı çizgiler 100 anten, kareli çizgiler 50 anten, düz çizgi ise 20 anten ile yapılan benzetimdir) [9]



Şekil 6.5. İki kaynak 1 derece aralıklarla yerleştirildikleri zaman 20, 50, 100 ve 150 antenle yapılan benzetim sonuçları [9]

Şekil 6.5 ise, yöntemin çözünürlüğünü gösteren bir grafikdir. İki kaynak, bir derece aralıkla konumlandığı zaman düşük anten sayılarında tek bir kullanıcı gibi görünmektedir. Anten sayısı 150 yapıldığında ise iki ayrı geliş açısı seçilebilmektedir[9].

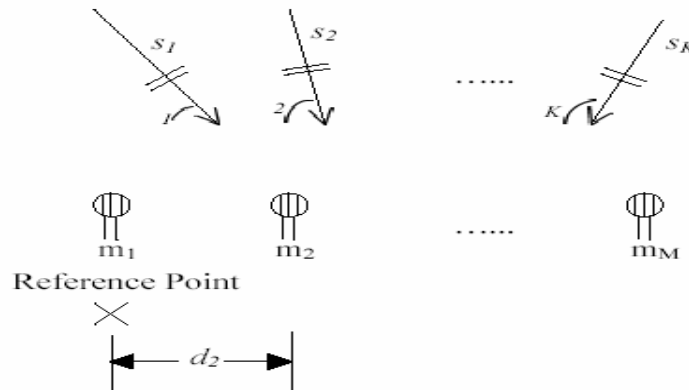
Sonuç olarak doğrusal anten dizilerinde en büyük olabilirlik yöntemi kullanılarak yapılan geliş açısı kestiriminde anten sayısı arttıkça, geliş açısını belirten tepe noktaları belirginleşmektedir. Bu durum ilinti fonksiyonunun beklenen bir durumudur. Fakat tek kaynaktan geliş açısı tahminlerinde az sayıda antenle de doğru sonuçlar elde etmek mümkündür. Çok kaynaktan gelen işaretlerin işlenmesinde ise geliş açılarının doğru algılanabilmesi için, tek kaynağa göre daha fazla sayıda antene ihtiyaç vardır. Bu da işlem zamanını dolayısıyla sistem performansını olumsuz yönde etkileyebilecek bir durumdur. Fakat yine de makul sayıda antenle (15-20) bir çok kullanıcının yerini ayırmak mümkündür. Yine çok kaynaklı sistemlerde sistem çözünürlüğü anten sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Kaynaklar arasında algılanması istenilen en dar açı azaldıkça daha fazla antene ihtiyaç duyulmaktadır. Bu açı eğer 1 derece ise yaklaşık 150 anten gerekmektedir. Fakat pratikte bu kadar yüksek çözünürlüğe ihtiyaç duyulmamaktadır. Sonuç olarak, 20 antenli bir dizi bize en az altışar derece aralıklarla konumlanmış 15 kullanıcıyı ayırma imkanı verecektir ki bu pratikte bir anten sistemi için yeterli olabilecek bir rakamdır. Bu tip bir algoritma ile

kullanıcı geliş açılarına göre sınıflandıran bir akıllı anten sistemi bir baz istasyonuna entegre edildiğinde kullanılan anten dizisi sayısına da bağlı olarak kapasiteyi 10 kat kadar artırabilecektir. Sistemi geliştirmek için artan anten sayısı ile birlikte artan işlem zamanını düşürmek gerekmektedir. Bu sayede daha fazla kullanıcı tek bir haberleşme hücresinde aynı iletişim kanalını kullanabilecek ve böylece kapasite artırma potansiyeli de istenen boyuta çıkarılmış olacaktır [9].

6.2. MUSIC (Multiple Signal Classification) Algoritması

Geliş açısı kestirimi için kullanılan en yaygın metot MUSIC algoritmasıdır. Standart MUSIC algoritması Schmidt tarafından geliştirilmiştir. En basit ifadeyle MUSIC, K adet dizi yönetim vektörünün oluşturulduğu korelasyon matrisini kullanarak uygun alt-uzayın kestirimini içermektedir. Bu yönetim vektörü ayrıca yön vektörleri olarak bilinir. Bu vektörler sinyal kaynaklarına ideal bir dizi yanıtını sunarlar.

Algoritma gerçek zamanlı bir sinyal modeli oluşturarak işe başlar. Eşit aralıklarla yerleştirilmiş M adet eleman veya sensörden oluşmuş üniform lineer bir diziye uygulanmış K adet farklı açıdan ($\Theta_i, i=1,2,\dots,K$) oluşan dar bantlı kaynaktan gelen düzlem dalga düşünün. Belli zaman aralıklarında ($t=1,2,3,\dots,N$), burada N toplam örnek sayısı, dizi çıkışı sinyal ve gürültü elemanlarının toplamından meydana gelecektir ($u(t)=x(t)+n(t)$).



Şekil 6.6. Anten elemanları ve gelen işaretler [10]

$$\tau_i = \frac{d_i \cos \theta_k}{v} \quad (6.4)$$

her bir anten elemanında oluşan gecikmeyi göstermek üzere,

$$X_i(t) = S_k(t - \tau_i) \quad (6.5)$$

şeklinde ifade edilebilir burada zaman gecikmesini faz çarpanı olarak gösterecek olursa,

$$X_i(t) = S_k(t) \cdot e^{-j\omega_0 \tau_i} \quad (6.6)$$

şekline dönüşmektedir buradan,

$$X_i(t) = S_k(t) \cdot e^{-j2\pi f_0 d_i \cos \theta_k / v} \quad (6.7)$$

$$\lambda = v / f_0 \quad \text{buradan,}$$

$$X_i(t) = S_k(t) \cdot e^{-j2\pi d_i \cos \theta_k / \lambda} \quad (6.8)$$

$$X_i(t) = \sum_{k=1}^K S_k(t) \cdot e^{-j2\pi d_i \cos \theta_k / \lambda} + n_i(t) \quad (6.9)$$

[10-11].

Burada $s(t)$, Θ yönünde özel bir kaynak için $K \times 1$ kaynak dalga formu vektörü $a(\Theta)$, dizinin bu kaynağa verdiği cevabı oluşturan $M \times K$ lik bir matris, ayrıca anten dizilerinin üzerinde bulunan gelen sinyalin yönünün bulunduğu dizi yönetim vektörünü de ifade eder. Ortamda oluşan gürültü de ekleyecek olursa genel ifade aşağıdaki şekilde olmaktadır.

Burada,

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}(t) &= [x_1(t), x_2(t), \dots, x_L(t)]^T \\
\mathbf{n}(t) &= [n_1(t), n_2(t), \dots, n_L(t)]^T \\
\mathbf{s}(t) &= [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T \\
\mathbf{A} &= [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]
\end{aligned}$$

olmak üzere genel ifademiz aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$\begin{aligned}
X_i(t) &= \sum_{k=1}^K A_k S_k(t) + n_i(t) \quad (6.10) \\
\mathbf{a}(\boldsymbol{\theta}) &= [1 \quad e^{-j2\pi d_1 \cos \theta / \lambda} \quad e^{-j2\pi d_2 \cos \theta / \lambda} \quad \dots \quad e^{-j2\pi d_M \cos \theta / \lambda}]^T
\end{aligned}$$

6.2.1. Kovaryans matrisi (covariance matrix)

Gelen işaretin kaynağının yönünü tespit etmek için MUSIC algoritmasında kovaryans matrisi kullanılmaktadır. Matrisin genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$R = E[\mathbf{x} \mathbf{x}^H] \quad (6.11)$$

$$R = E[\mathbf{x} \mathbf{x}^H] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots \\ r_{21} & r_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Burada “ H ” karmaşık eşleniği göstermektedir.

$$r_{ij} = E[x_{i,n} x_{j,n}^H] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{i,n} x_{j,n}^H \quad (6.12)$$

biçiminde ifade edilmektedir [10-11].

6.2.2. Algoritmanın oluşturulması

Her bir antene gelen toplam sinyal ifadesini $x(t)=A.s(t)+n(t)$ olarak bulunmuştu şimdi kovaryans matrisini kullanarak bu ifadenin MUSIC algoritma yapısı çıkarılacak olursa,

$$R_{xx} = E|x.x^H| = E|As.As^H| + E|n.n^H| \quad (6.13)$$

$$R_{xx} = AE|s.s^H|A^H + E|n.n^H|$$

$E|n.n^H| = \sigma^2 I$ biçimde ifade edebiliriz. Burada σ^2 her bir anten elemanındaki gürültü gücünü, I ise MxM boyutunda özdeşlik matrisini göstermektedir. Kovaryans matrisi pozitif tanımlı matris ve λ_i ile e_i kovaryans matrisini özdeğerleri olmak üzere, M sinyal sayısı ve K anten eleman sayısı.

$$R_{xx}.e_i = \lambda_i.e_i \quad i=M+1, \dots, K \quad (6.14)$$

biçiminde ifade edilebilir. Buradan $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{M+1} = \dots = \lambda_L = \sigma_n^2$ ifadesi ve R_{xx} ifadesi yerine yazılırsa,

$$R_{xx}.e_i = \sigma_n^2.e_i \Rightarrow (A.E|ss^H|A^H + \sigma_n^2 I).e_i = \sigma_n^2.e_i \quad (6.15)$$

$$A.E[ss^H]A^H.e_i = 0 \quad i=M+1, \dots, K \quad (6.16)$$

Burada A tam rank olduğundan ve $E[ss^H]$ pozitif tanımlı olduğundan,

$$A^H.e_i = 0 \quad i=M+1, \dots, K \quad (6.17)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadelerden,

$$P_{music}(\theta) = \frac{a^H(\theta).a(\theta)}{a^H(\theta).V_n V_n^H a(\theta)} \quad (6.18)$$

music algoritması ifadesi çıkarılır. Burada $V_n = (e_{M+1} \dots e_K)$ gürültü ifadesinin özdeğerlerini göstermektedir. Eşit olan öz değerlerin sayısı gelen işaret sayısının kestiriminde kullanılmaktadır [10-11].

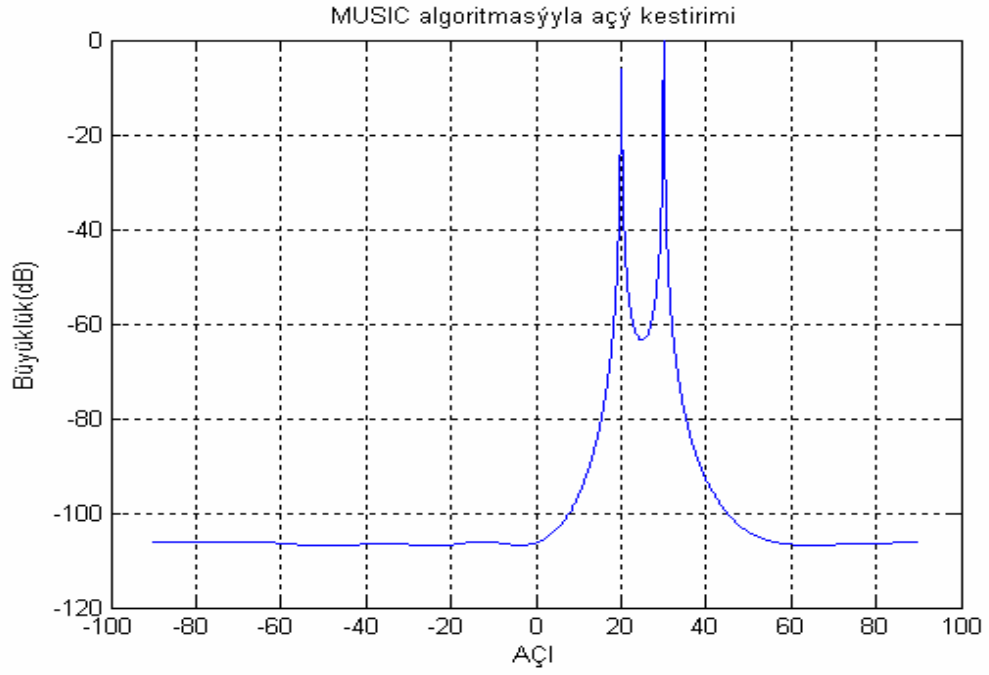
6.2.3. Matlab ile benzetim

Yapılan benzetimde incelenen parametreler, sinyal sayısı, geliş açısı, SNR, frekans ve örnek sayısı değerleridir. Belli bir SNR ve sinyal sayısı değerinde geliş açısının kestiriminin yapılabilmesi için en az kaç anten elemanına ihtiyaç olduğunu program sayesinde bulabiliyoruz. Bu minimum değerlerde kullanıcıların konumları doğru olarak kestirilebilmektedir. Daha keskin değerler anten sayısını artırarak elde edilmektedir. Benzetimde SNR değerleri 0, 20 ve 100 olarak alınmış olup, “20” pratikte yaklaşık gürültü miktarı için uygun rakamı, “0” maksimum gürültü miktarının olduğu varsayımı için, “100” ise gürültünün hemen hemen hiç olmadığı temiz bir iletim ortamını temsil etmektedir. Bu üç SNR değeri için çıkan sonuçlar değerlendirilecek olursa.

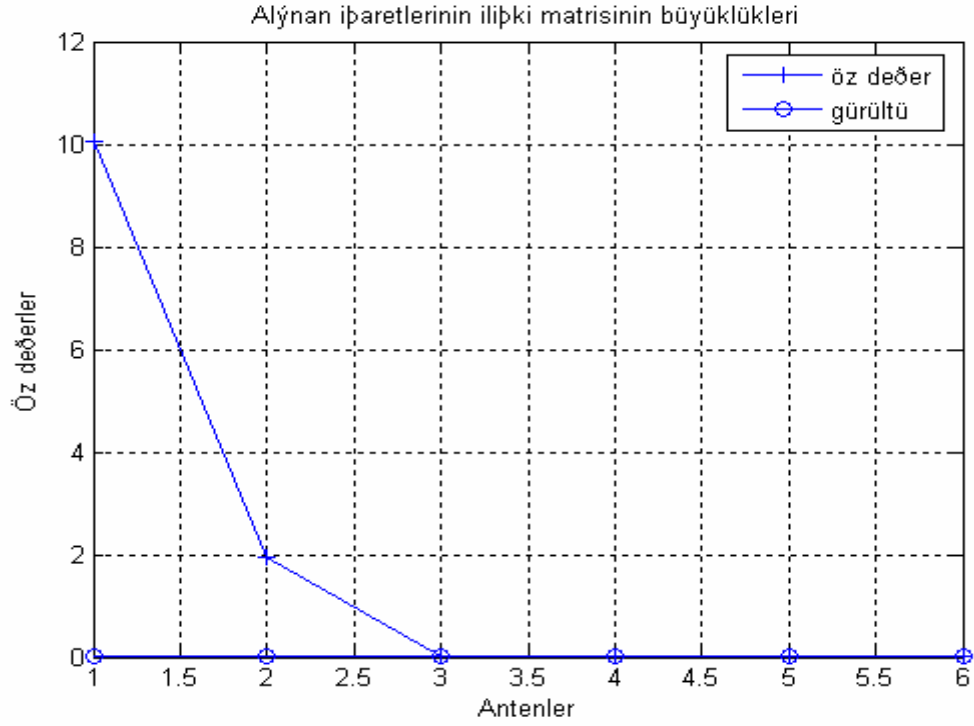
SNR=20 iken sinyal sayısı ve açı değerlendirmesi

Aşağıda sinyal sayısı ve açılar değiştirilerek çeşitli şekiller elde edilmiş olup, sinyal sayısı arttıkça anten sayısının da belli oranlarda artması gerektiği ortaya çıkmaktadır aksi takdirde işaretlerin geliş yönleri tahmin edilemeyebilmektedir. Benzer şekilde sinyal sayısını sabit tutup açılar aralıklarını küçülttüğümüz vakitte (örneğin 1’er derecelik farklar ile) anten sayısının oldukça fazla arttığı tespit edilmiştir. Derece farkları 10 iken 2 sinyal için 6 anten gerekirken, fark 1 dereceye düştüğünde 2 sinyal için en az 20 anten gerekmektedir. Hem sinyal sayısı artırıldığında hem de dereceler arasındaki fark azaltıldığında bunlarla orantılı olarak anten sayısı artmaktadır. Örneğin 15 sinyal için 1’er derece farkla benzetim yapıldığında şekil 6.23 deki grafik elde edilmektedir. Burada 150 adet anten elemanı kullanılmıştır. Açı kestirim grafiği

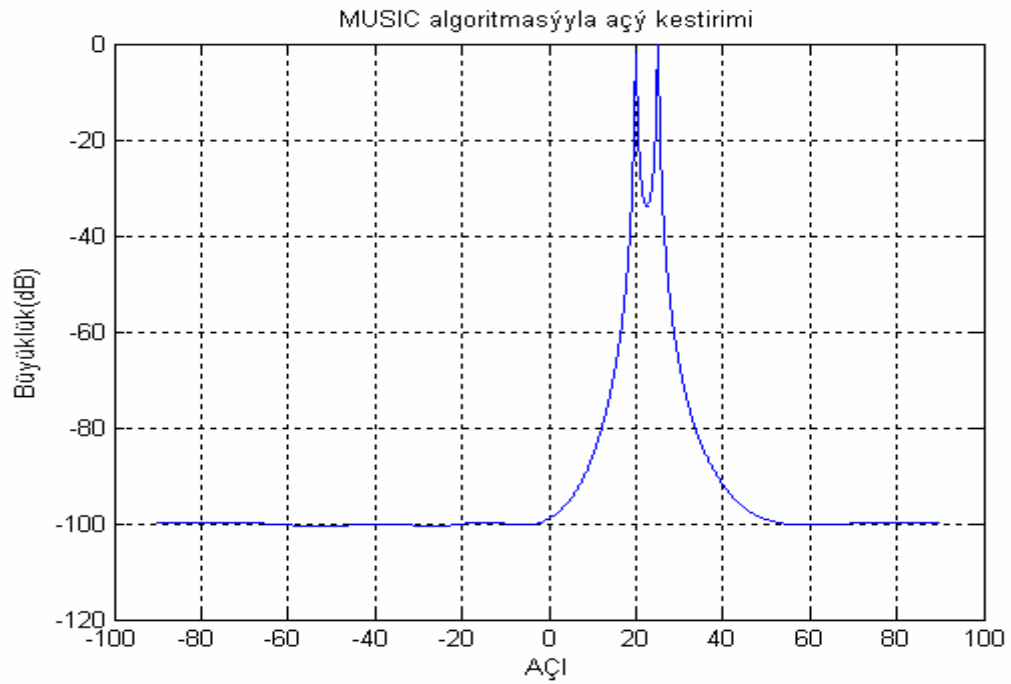
dışında özdeğer ve gürültü tabanı içinde grafikler elde edilmiştir. Şekillere bakılacak olursa sinyal sayısı kaç ise en az o kadar özdeğer'in gürültü tabanından yüksek olması gerekmektedir. Aksi durumda açılar kestirilememektedir.



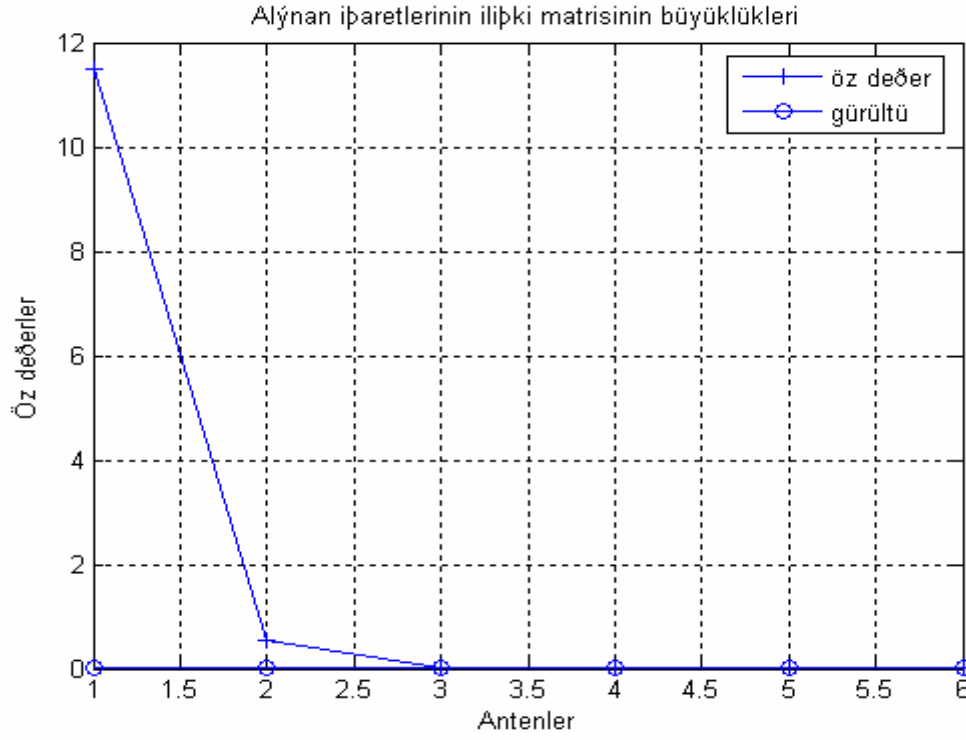
Şekil 6.7. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



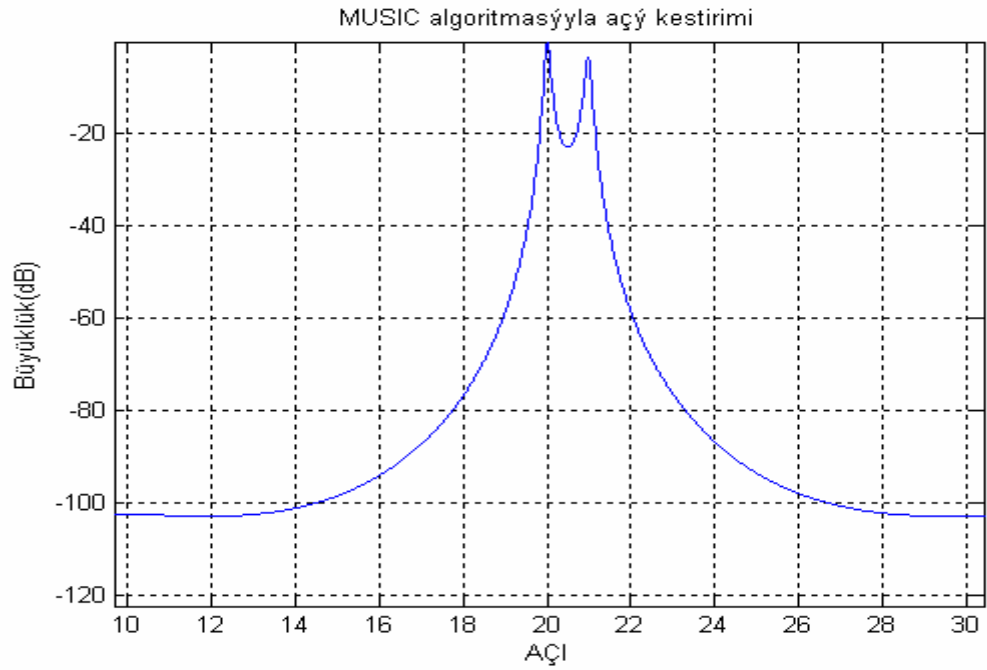
Şekil 6.8. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



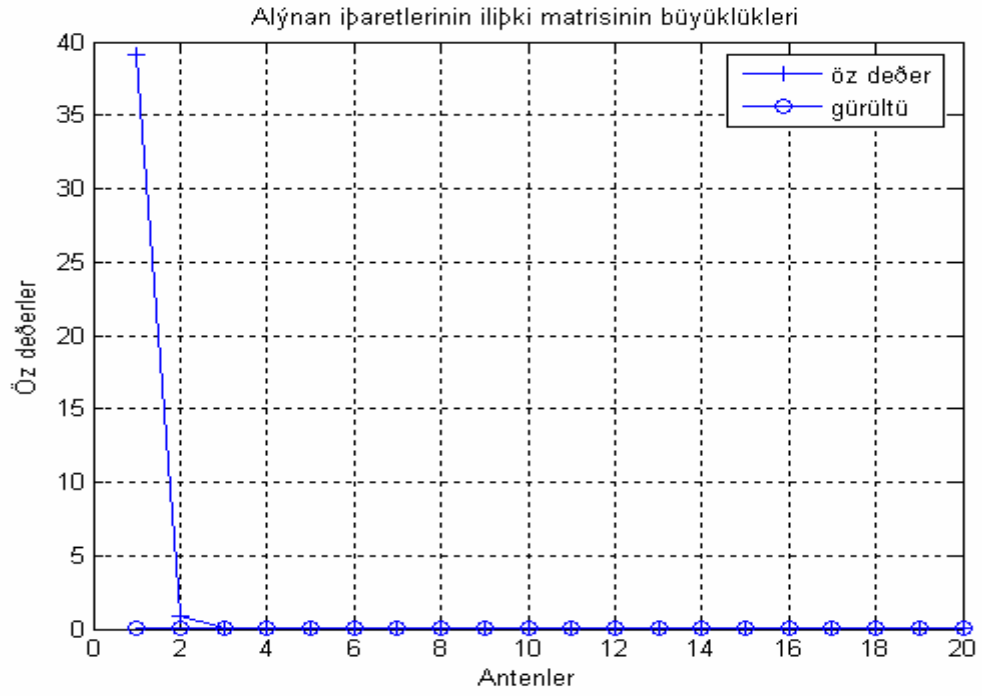
Şekil 6.9. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



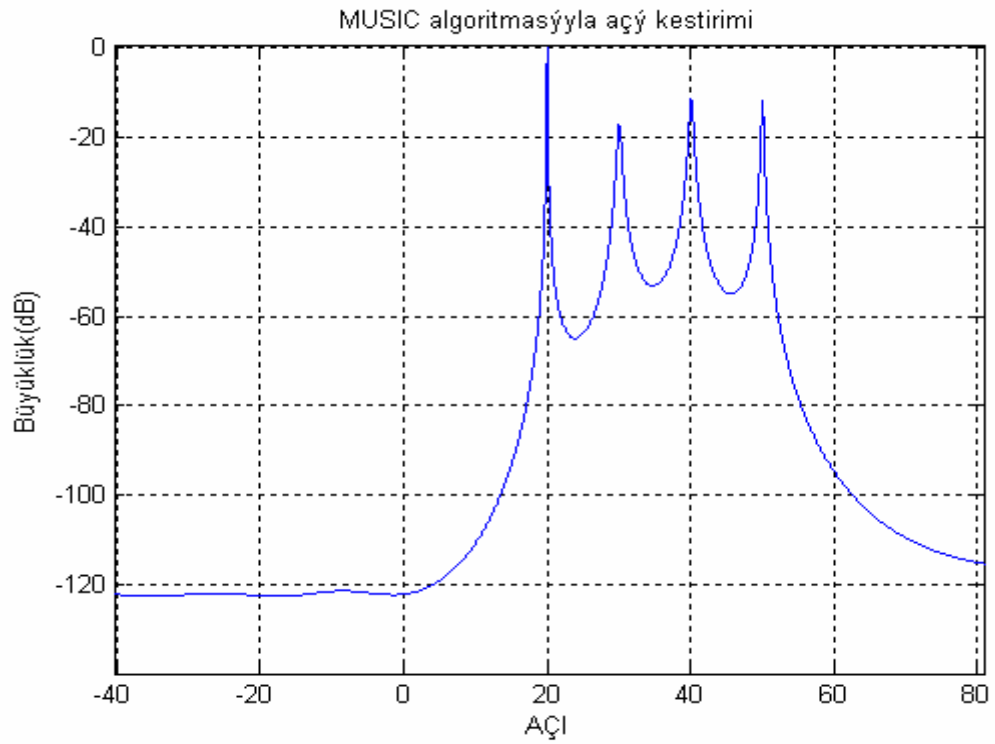
Şekil 6.10. SNR=20, sinyal sayısı 2, açılar (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



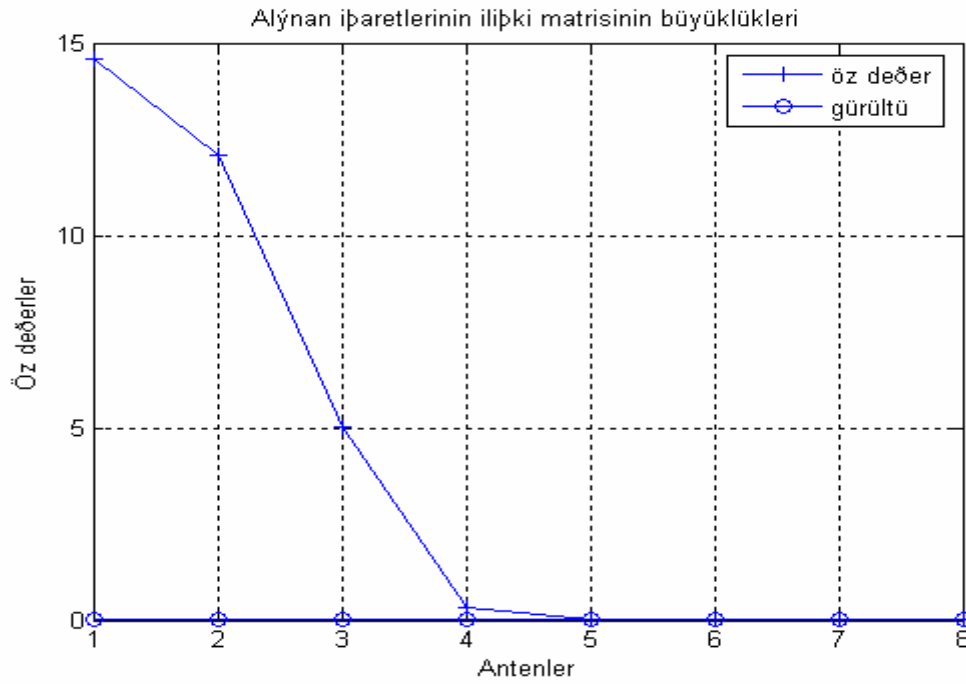
Şekil 6.11. SNR=20, sinyal sayısı 2, açılar (20, 21), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



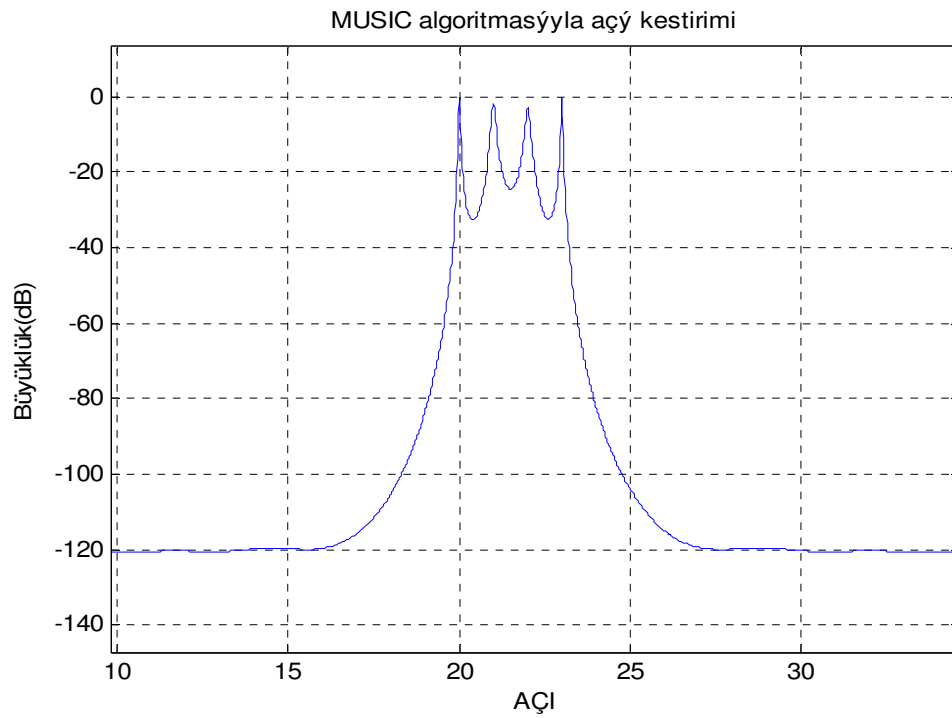
Şekil 6.12. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



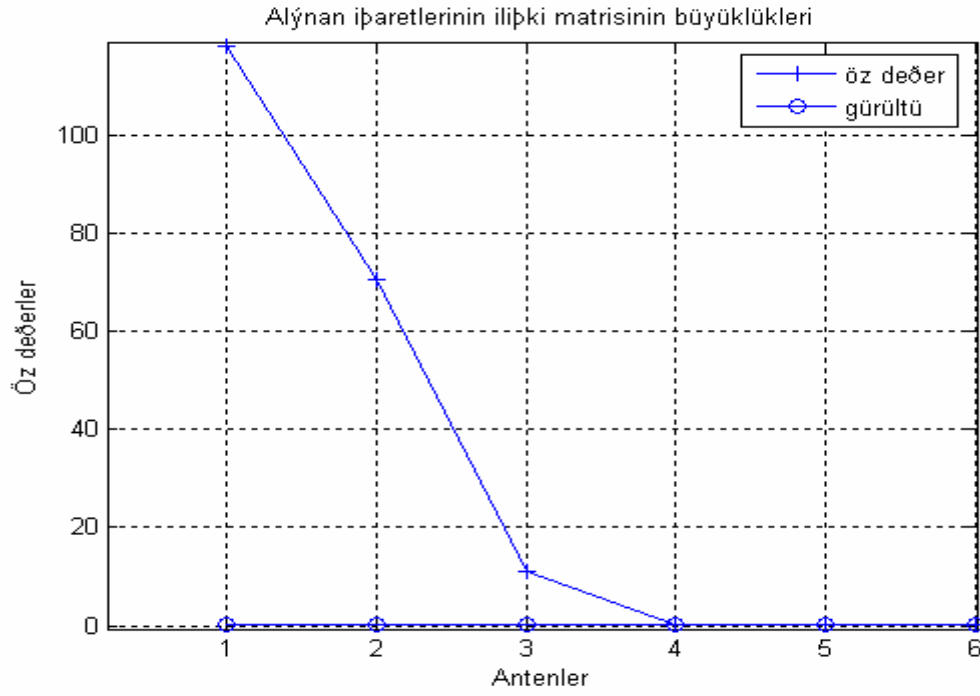
Şekil 6.13. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (20, 30, 40, 50), anten sayısı 8, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



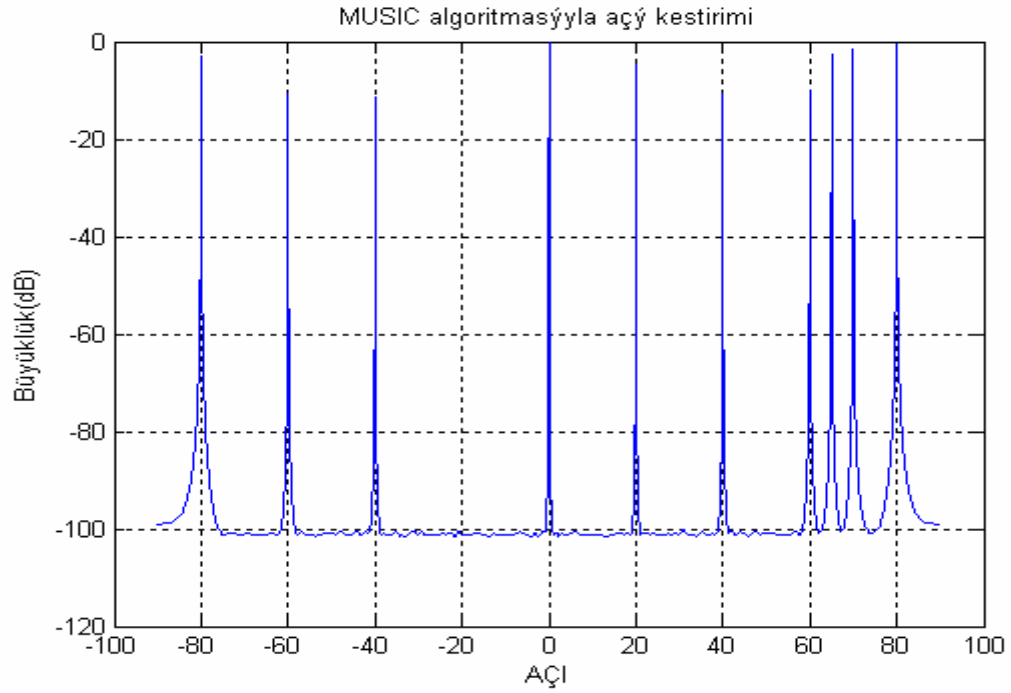
Şekil 6.14. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (20, 30, 40, 50), anten sayısı 8, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



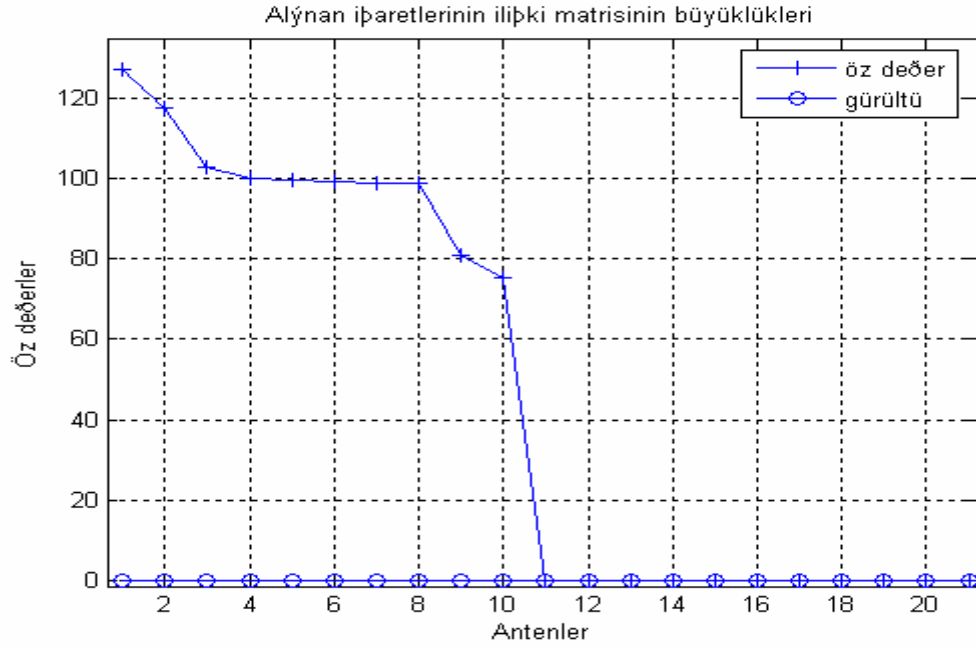
Şekil 6.15. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (20, 21, 22, 23), anten sayısı 50, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



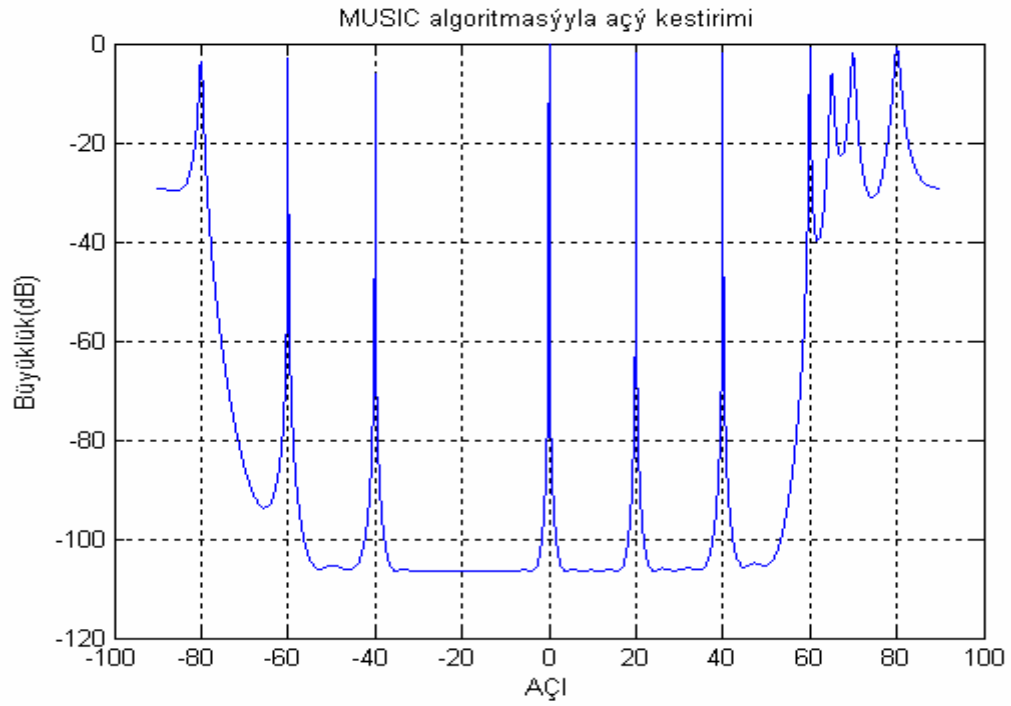
Şekil 6.16. SNR=20, sinyal sayısı 4, açıları (21, 22, 23, 24), anten sayısı 50, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



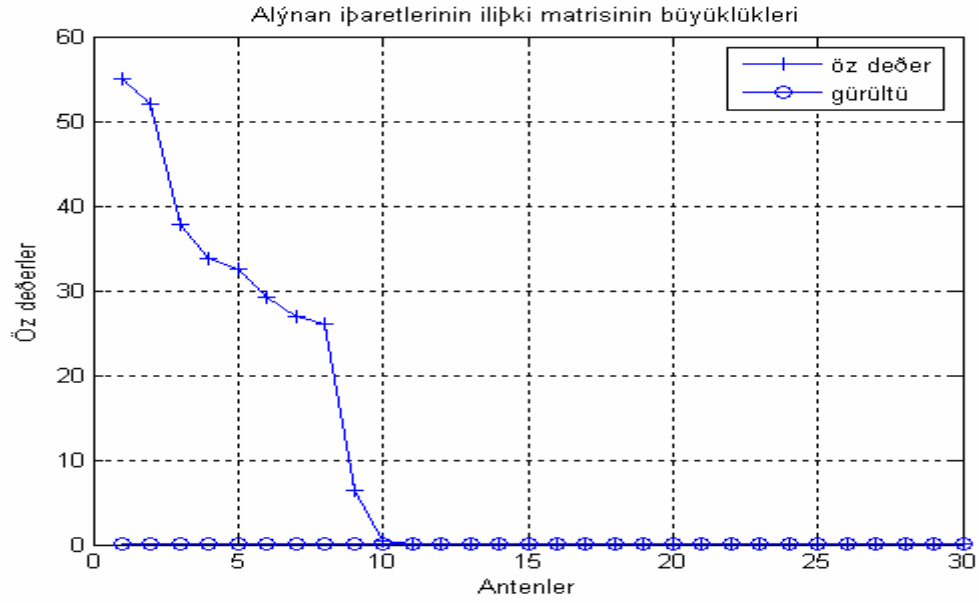
Şekil 6.17. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



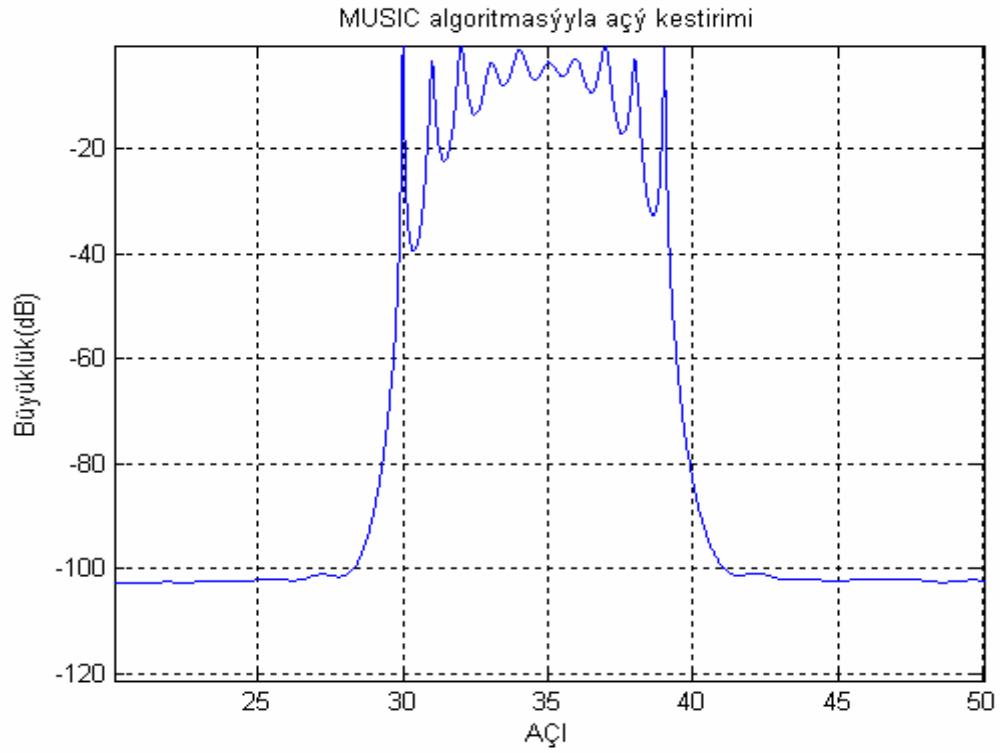
Şekil 6.18. SNR=20, sinyal sayısı 10, açılar (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



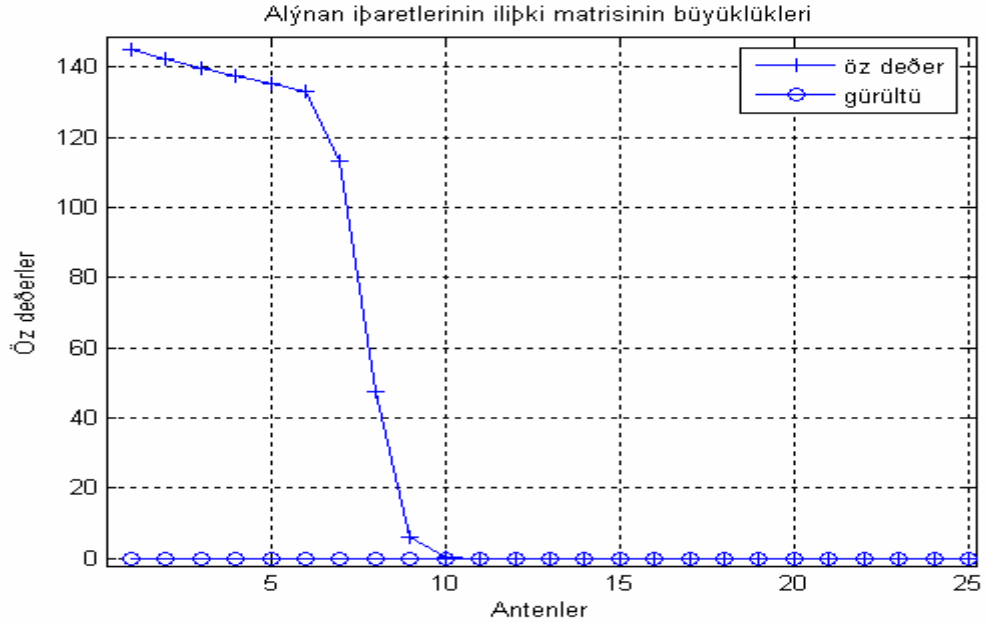
Şekil 6.19. SNR=20, sinyal sayısı 10, açılar (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 30, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



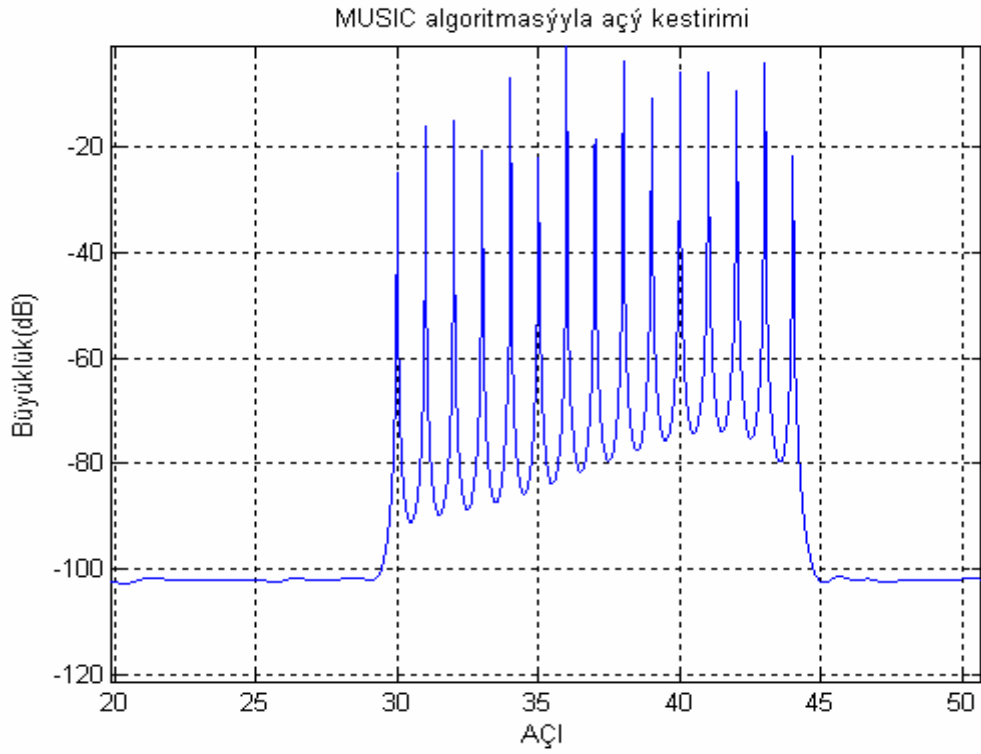
Şekil 6.20. SNR=20, sinyal sayısı 10, açılar (-80 -60 -40 0, 20, 40, 60, 65, 70, 80), anten sayısı 30, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



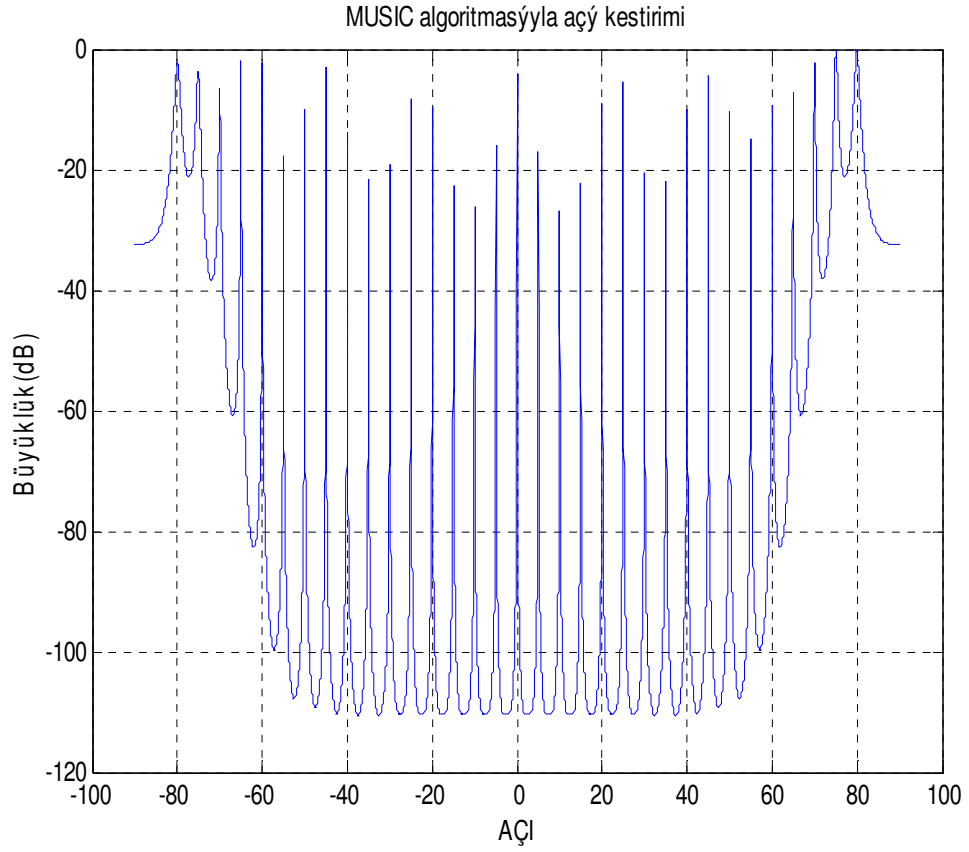
Şekil 6.21. SNR=20, sinyal sayısı 10, açılar (30, 31, ... , 37, 38, 39), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



Şekil 6.22. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 38, 39), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



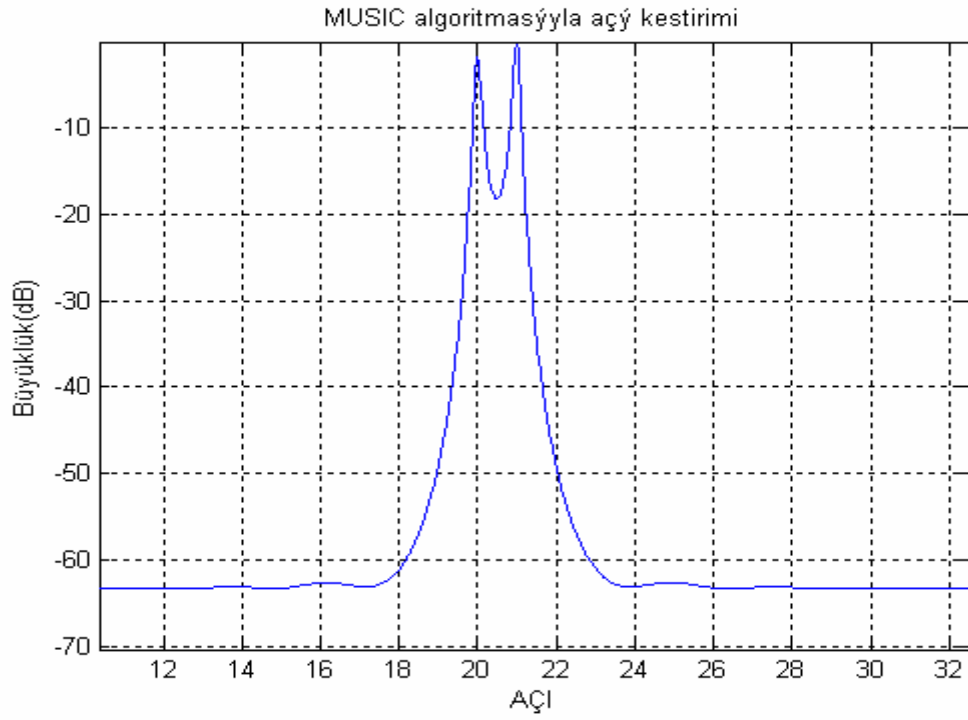
Şekil 6.23. SNR=20, sinyal sayısı 15, açıları (30, 31, 32, ... , 42, 43, 44), anten sayısı 150, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



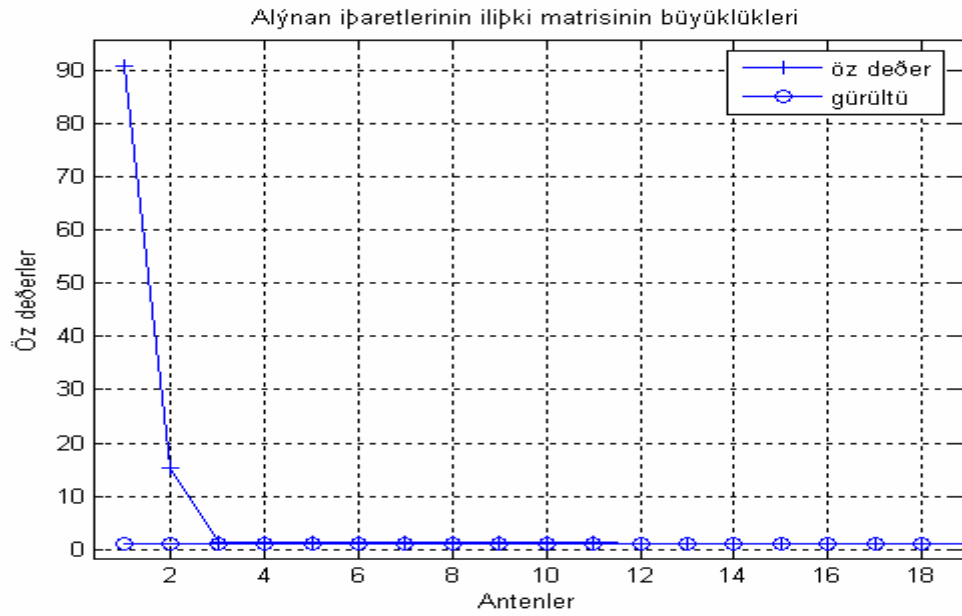
Şekil 6.24. SNR=20, sinyal sayısı 33, açıları (-80, -75, -70, ... , 70, 75, 80), anten sayısı 60, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu

SNR=0 iken açı değerlendirmesi

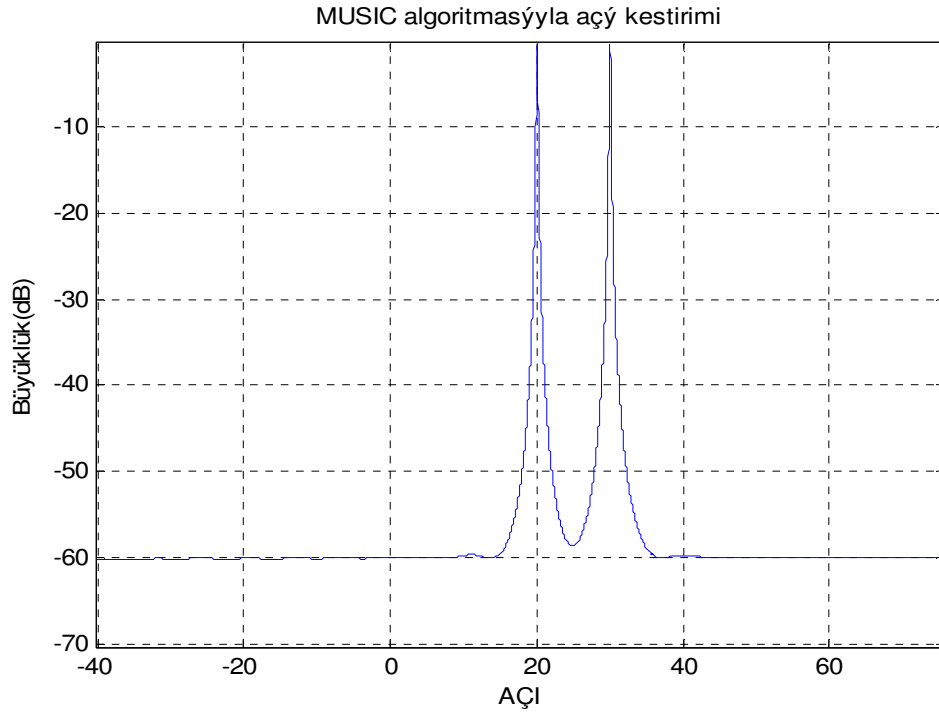
SNR değerini sıfır seçilirse bu durumda gürültü miktarı ile sinyalin ayırt edilmesi zorlaşacak olup, şekillerden de görüldüğü üzere geliş açısını tahmin etmek için anten sayısı oldukça artması gerekmektedir. Şekil 6.27’de görüldüğü üzere 2 sinyal için daha önce 6 anten elemanına ihtiyaç varken şimdi 20 anten elemanına ihtiyaç vardır.



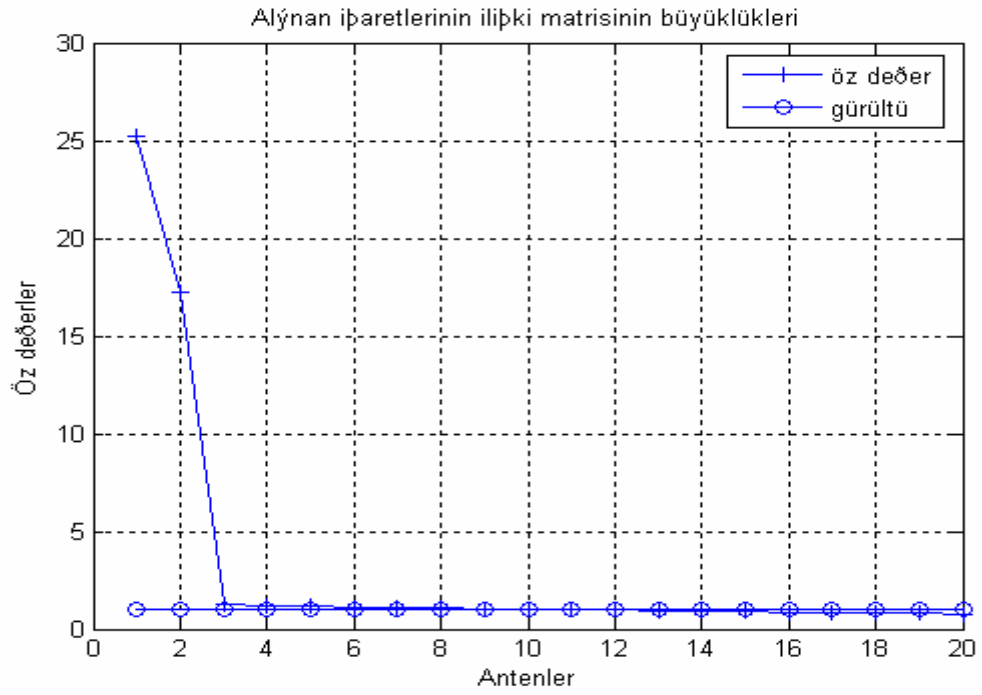
Şekil 6.25. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 52, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



Şekil 6.26. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 52, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



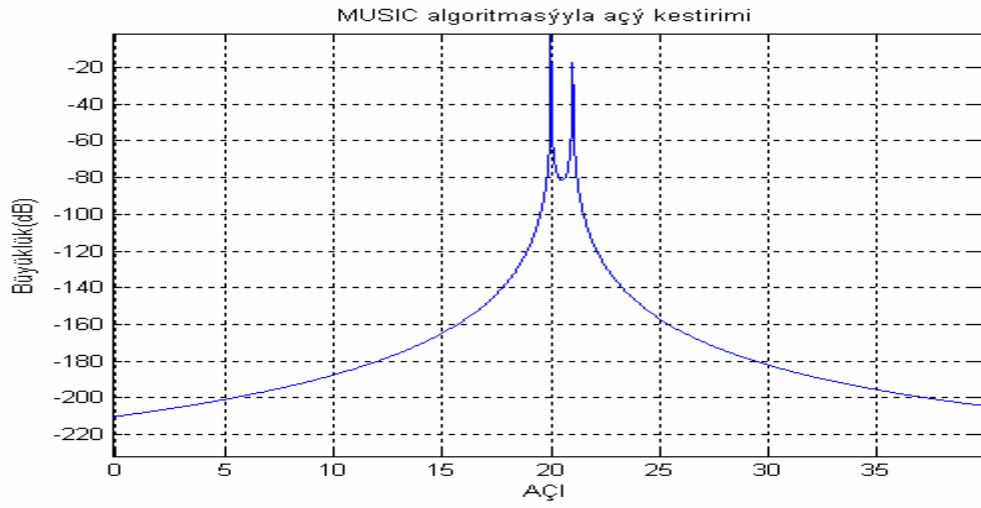
Şekil 6.27. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



Şekil 6.28. SNR=0, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), anten sayısı 20, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği

SNR=100 iken açı değeri

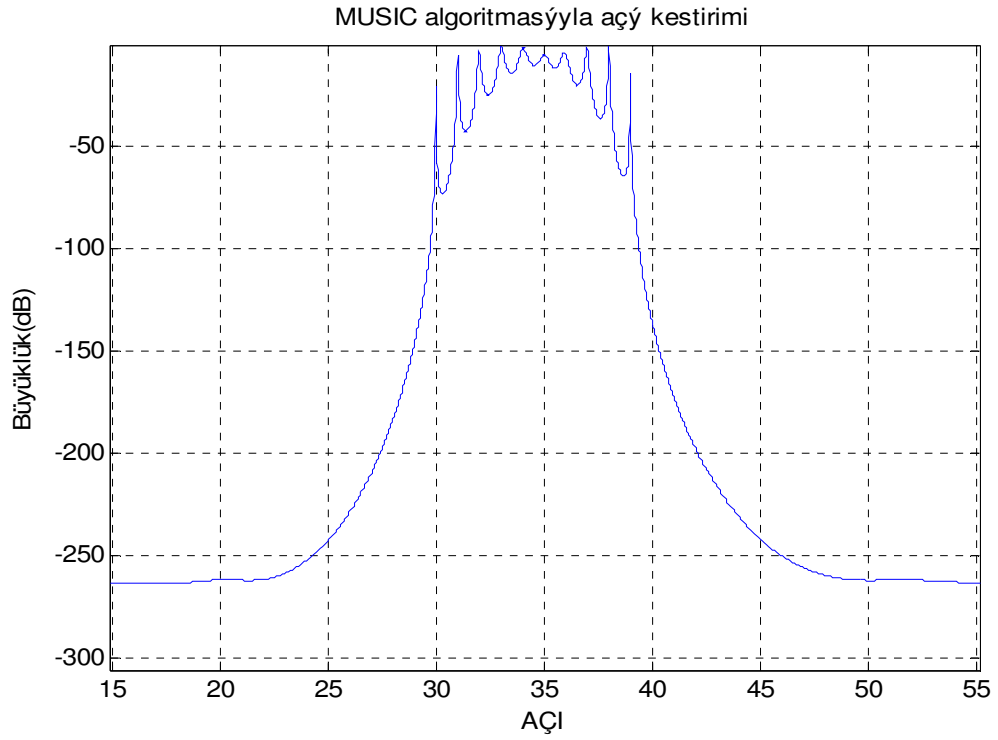
SNR değeri 100 yapılırsa bu durumda gürültü miktarı hemen hemen sıfır olur ve işaretlerde bozulmalar minimum olmaktadır, aşağıdaki şekillerden de görüldüğü üzere geliş açısını tahmin etmek için anten sayısı çok azalmaktadır. Şekil 6.31’de görüldüğü üzere 10 sinyal için daha önce 100 anten elemanına ihtiyaç varken şimdi 45 anten elemanı ile geliş açıları kestirilebilmektedir.



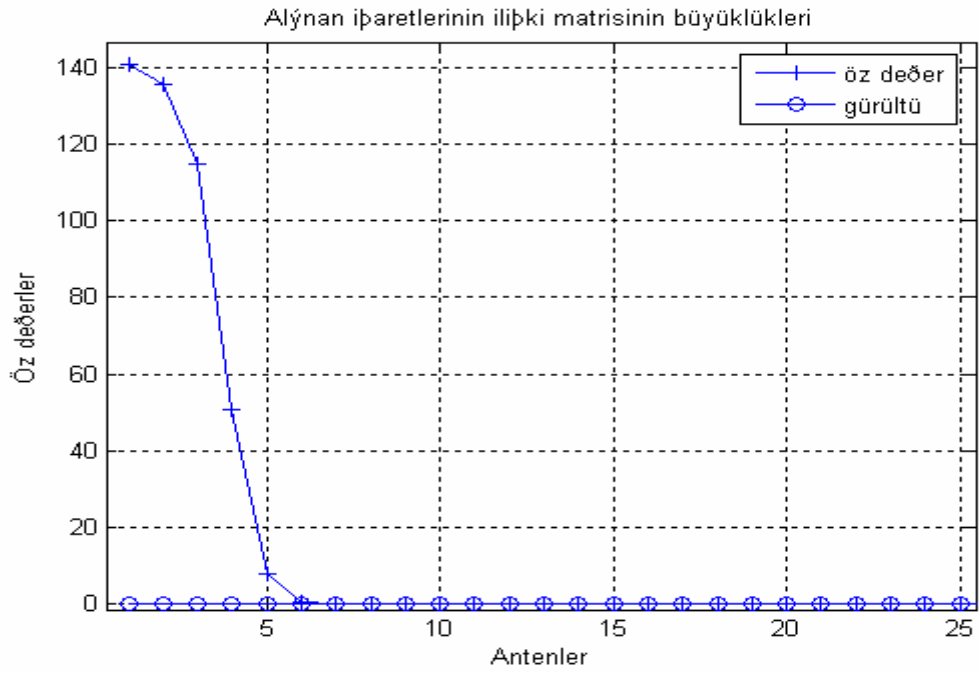
Şekil 6.29. SNR=100, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 3, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



Şekil 6.30. SNR=100, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), anten sayısı 3, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



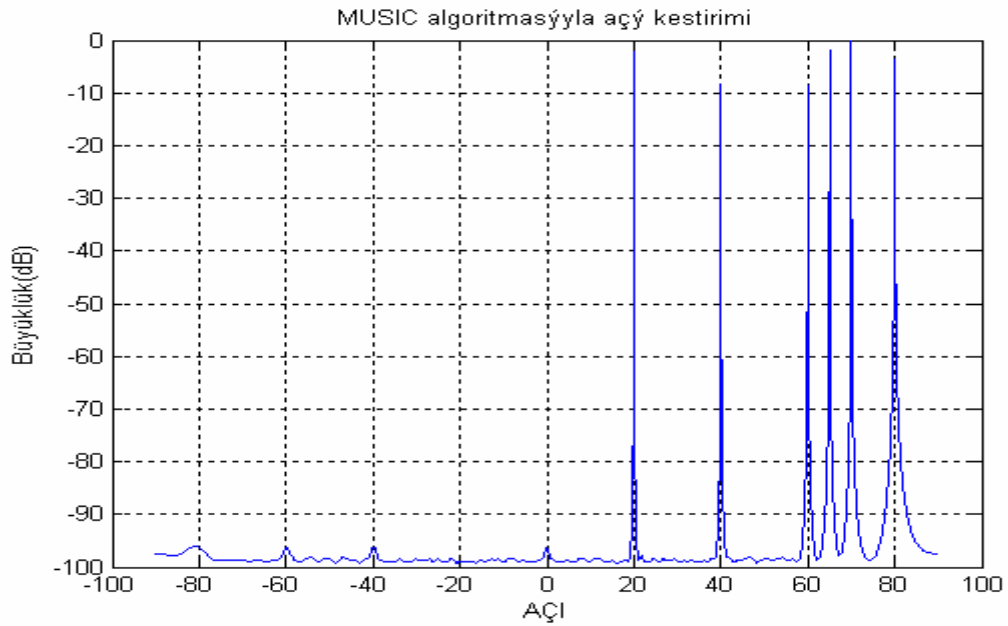
Şekil 6.31. SNR=100, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 38, 39), anten sayısı 45, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu



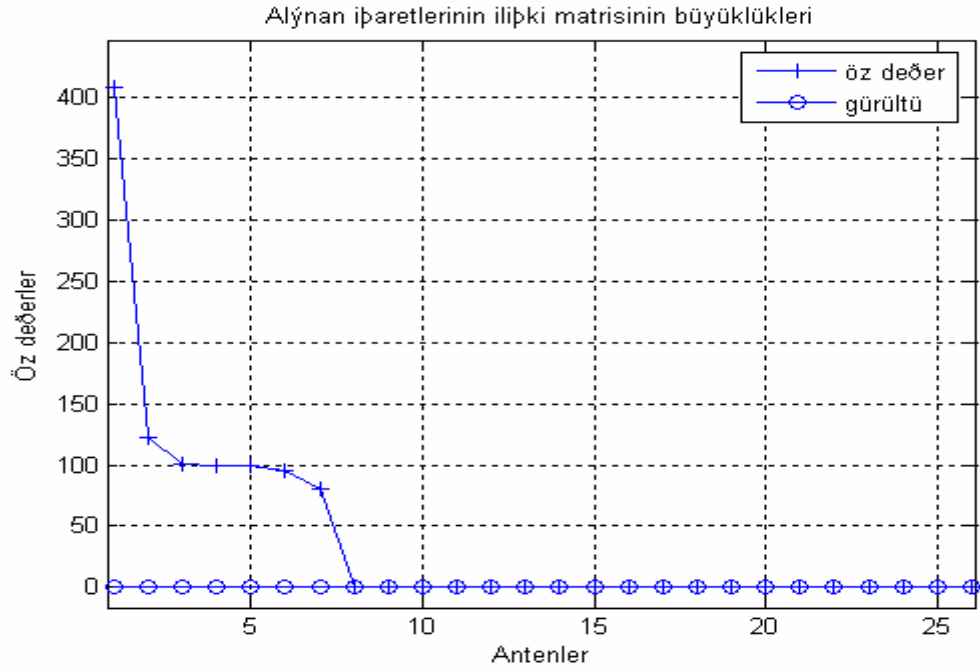
Şekil 6.32. SNR=100, sinyal sayısı 10, açıları (30, 31, ... , 38, 39), anten sayısı 45, örnek sayısı 1000 ve farklı frekans değerleri için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği

SNR=20 ve frekans eşitliği durumu

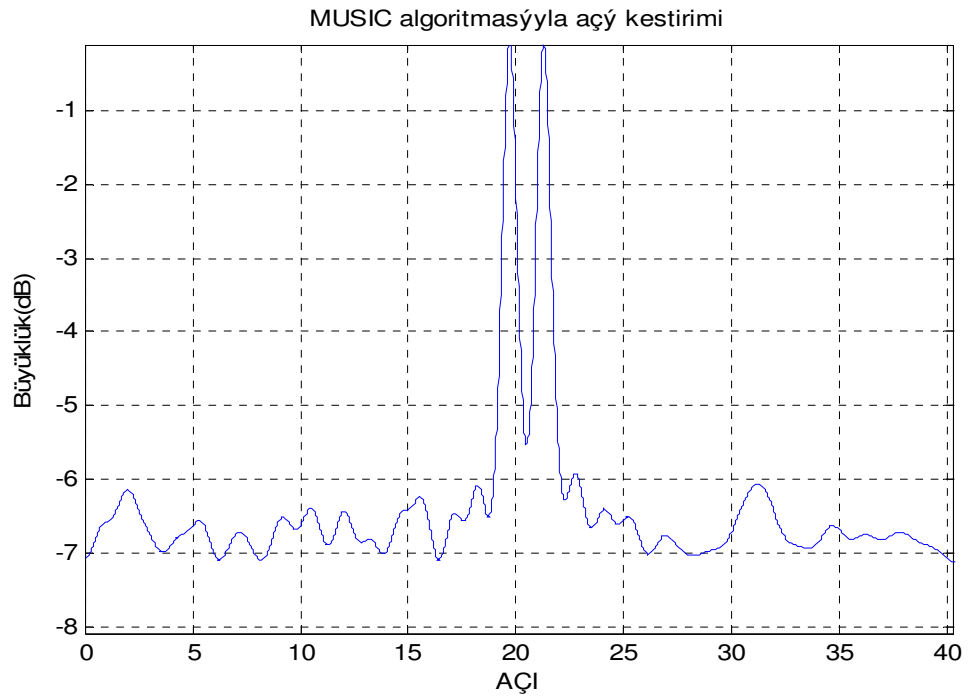
Şimdiye kadar SNR miktarının yani gürültü miktarının işlemlerimizi nasıl etkilediği üzerine incelemeler yapıldı. Bu bölümde SNR yi 20 kabul ederek gelen işaretlerin frekanslarının eşit olması durumu incelenecek olursa, Şekil 6.33’de gelen 10 sinyalin -80, -60, -40 ve 0 dereceli işaretlerinin frekanslarının eşit olduğu diğer açılardaki işaretlerin frekanslarının bundan ve birbirlerinden farklı olduğu durumu gözlemlenmiştir. Burada aynı frekanslı işaretlerin geliş açıları tahmin edilememektedir. Yani MUSIC algoritması ile aynı frekanslı işaretlerin birbirinden ayrılması mümkün değildir sonucu ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.35’ e bakıldığı zaman sadece aynı frekanslı işaretlerin bulunduğu bir benzetim yapılmış olup, bu durumda işaretlerin geliş açıları tahmin edilmiş gibi görünmesine rağmen gelen işaretlerin büyüklüklerine bakıldığında oldukça küçük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Farklı frekanslardaki işaretlerin büyüklükleri 100-120 dB civarında iken bunların sadece 6-7 dB oldukları görülmektedir. bu değerler oldukça küçük değerler olup sadece aynı frekanslı işaretlerin bulunduğu ortamlarda bir anlam ifade etmektedir.



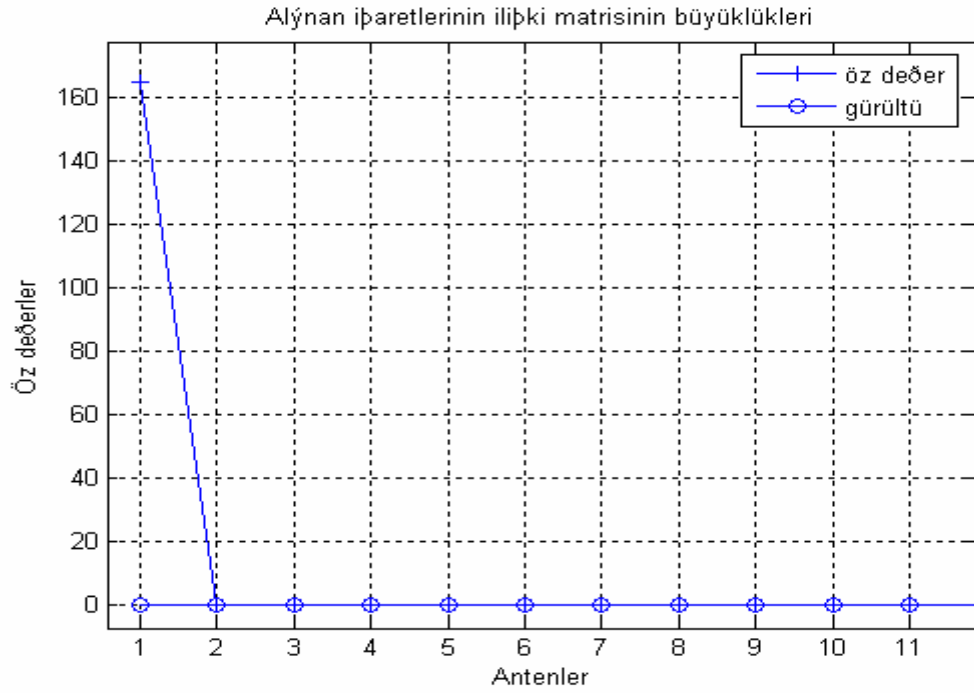
Şekil 6.33. SNR=20, sinyal sayısı 10, açıları (-80 -60 -40 0 20 40 60 65 70 80), frekanslar (0,1 0,1 0,1 0,1 0,3 0,35 0,4 0,45 0,32 0,42), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için açı tahmin spektrumu



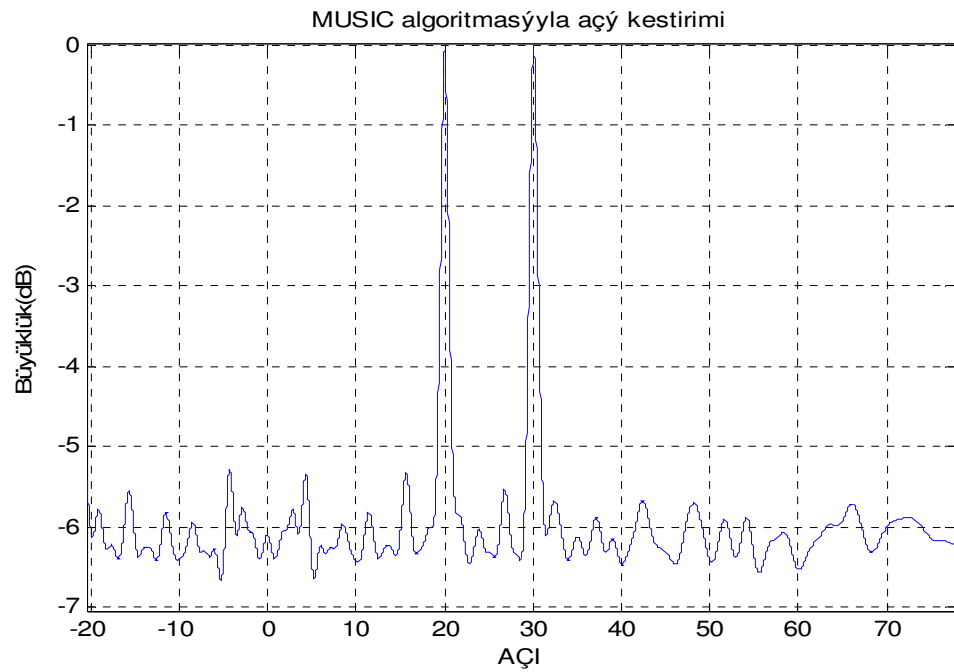
Şekil 6.34. SNR=20, sinyal sayısı 10, açılar $(-80 -60 -40 0 20 40 60 65 70 80)$, frekanslar $(0,1 0,1 0,1 0,1 0,3 0,35 0,4 0,45 0,32 0,42)$, anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



Şekil 6.35. SNR=20, sinyal sayısı 2, açılar $(20, 21)$, frekanslar $(0,2 0,2)$, anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için açı tahmin spektrumu



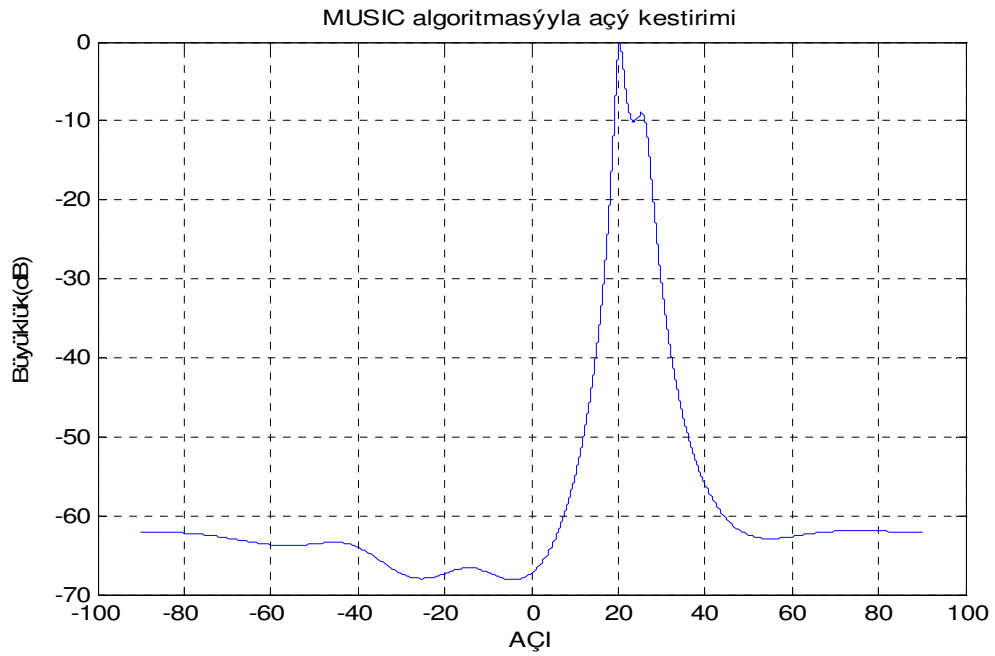
Şekil 6.36. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 21), frekanslar (0,2 0,2), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için özdeğer ve gürültü tabanı grafiği



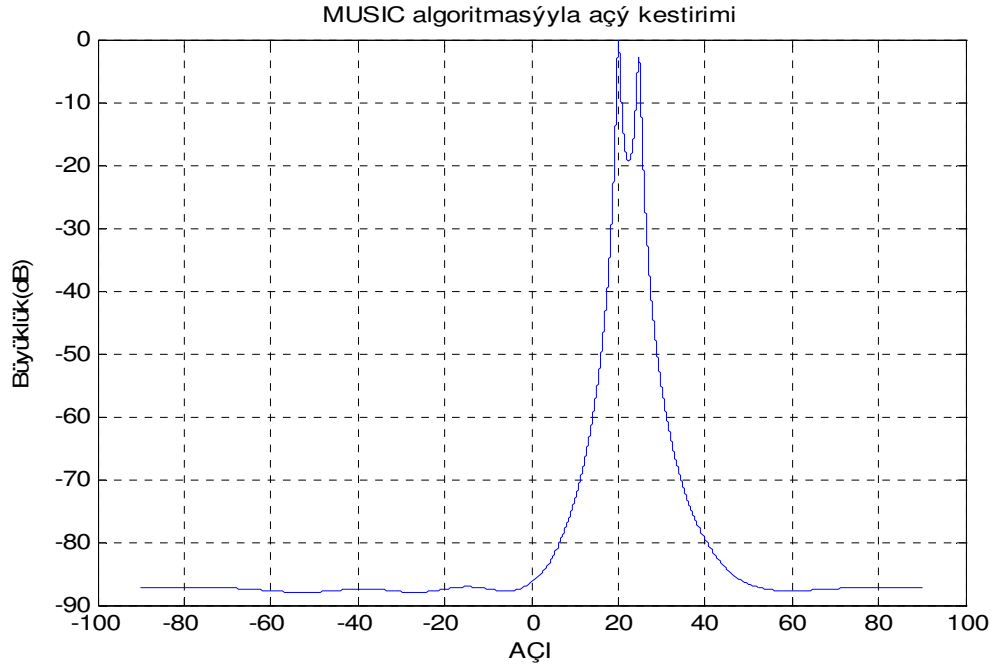
Şekil 6.37. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), frekanslar (0,2 0,2), anten sayısı 100, örnek sayısı 1000 için açı tahmin spektrumu

SNR=20 ve örnek sayısının etkisi

Son olarak işaretlerin örnek sayılarının değiştirilmesi durumunu incelendiğinde örnek sayısı ne kadar fazla olursa işaretlerin bir birlerin ayrılması o kadar keskin olmaktadır. Şekil 6.38 ve şekil 6.39 da 10 örnek ve 100 örnek için 2 sinyalin kestirim benzetimi yapılmış olup 100 örnekli benzetimde açı kestiriminin 10 örnekliye göre daha net bir şekilde görülmektedir. Bunun dışında işaretlerin büyüklüklerindeki farkta açıkça görülmektedir.



Şekil 6.38. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 10 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu

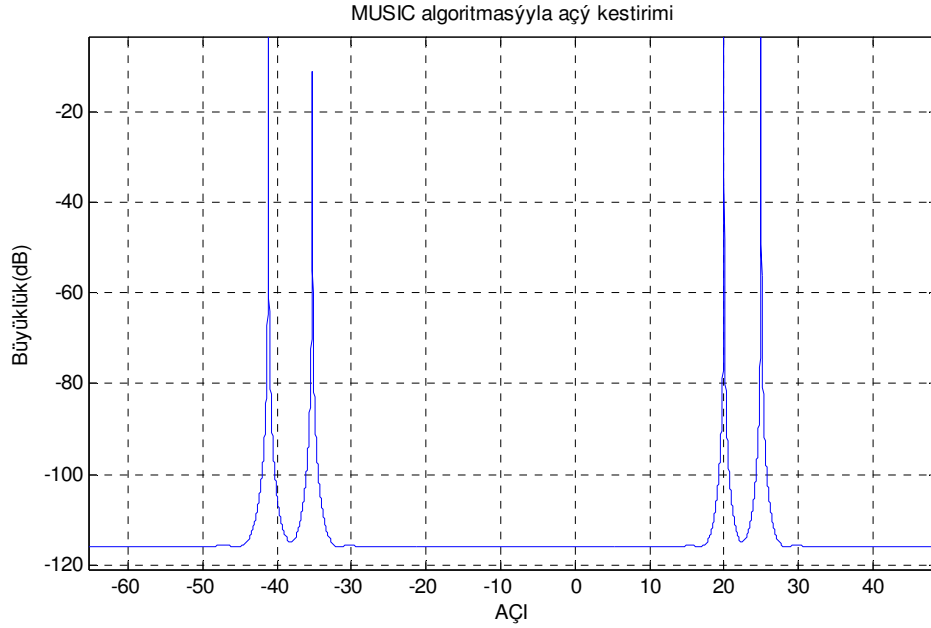


Şekil 6.39. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 25), anten sayısı 6, örnek sayısı 100 ve farklı frekans değerleri için açı tahmin spektrumu

Yukarıda yapılan tüm benzetimlerde $\lambda=1$ ve elemanlar arasındaki boşluk $\lambda/2$ olarak alınmıştır. Uygulamada elemanlar arasındaki boşluğun λ 'dan yarısı olması gerekmektedir. Aksi durumda ya işaretler bir birinden ayıramamakta ya da katlanmalar ortaya çıkmaktadır. Boşluk $\lambda/2$ den küçük seçilirse işaretlerin yan kulak genişliği artmakta ve belli bir değerden sonra işaretlerin bir birlerinden ayrılması zorlaşmakta, $\lambda/2$ den büyük seçilirse katlanmalar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca gürültü katsayısı olarak,

$$Gürültü_sabiti = \frac{1}{10^{SNR/10}} \text{ formülü kullanılmıştır.}$$

Aşağıdaki şekilde elemanlar arasındaki boşluğun λ 'daya eşit olduğu durumda yapılan benzetimde 20 ve 30 derecedeki iki sinyalin spektrumu verilmiştir. Burada 20 ve 30 derecede işaretler görülmektedir bunun dışında -40 ve -30 derece civarlarında katlanmalar olduğu tespit edilmiştir. Yani elemanlar arasındaki boşluğu pratikte $\lambda/2$ ye eşit olması gerektiği ispatlanmıştır.



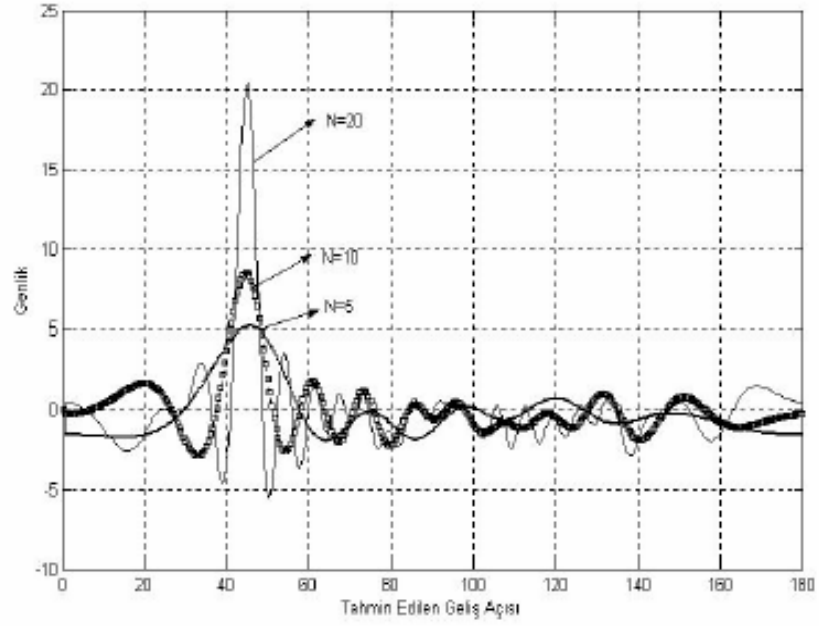
Şekil 6.40. SNR=20, sinyal sayısı 2, açıları (20, 30), olduğu durum için katlanmanın gösterilmesi

6.3. MUSIC Algoritması ile En Büyük Olabilirlik Yönteminin Karşılaştırılması

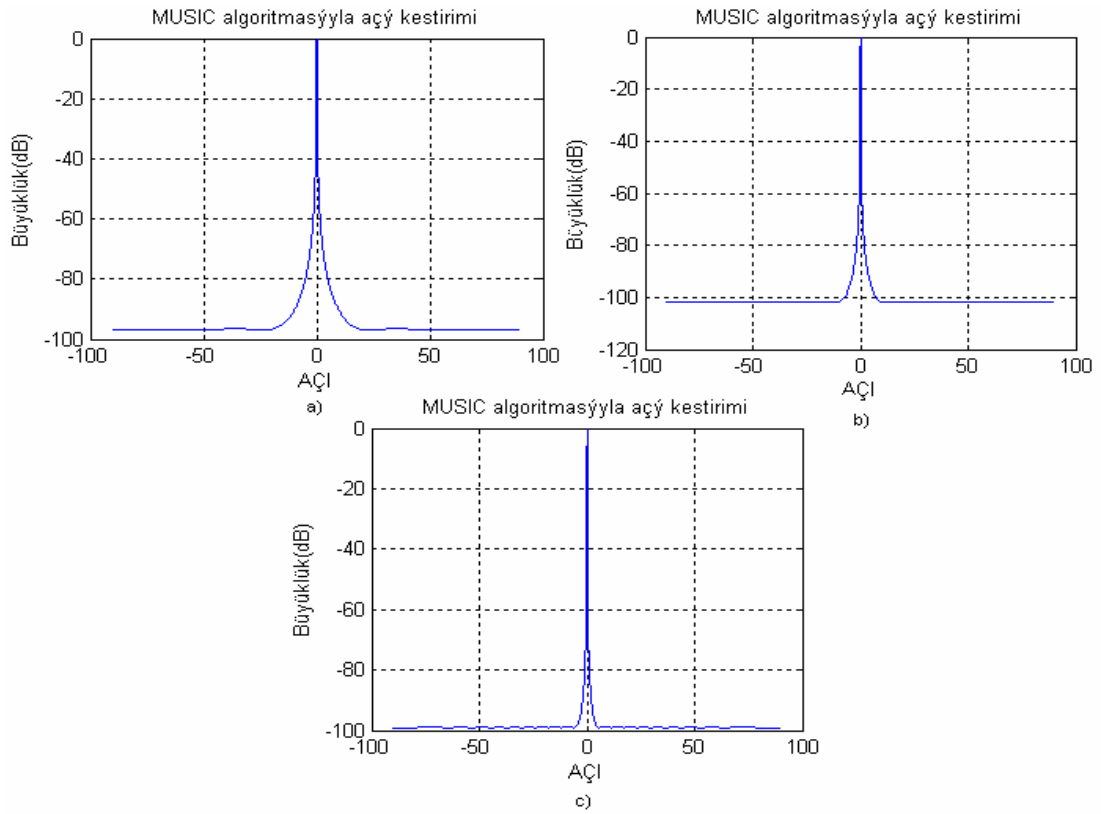
Aşağıda geliş açısı kestirim algoritmalarından tezde yer verilen EBOY ve benzetimi yapılan MUSIC algoritmasının karşılaştırması yapılmıştır.

i) Şekil 6.41 de tek bir kullanıcı için EBOY ile yapılmış olan tahmin grafik ve bu grafikte 5, 20 ,100 anten eleman sayısı ile yapılmış olan tahminler verilmiştir. Yine şekil 6.42 de tek bir kullanıcı için benzetimini MUSIC algoritmasıyla yapmış olduğum kestirim grafikleri verilmektedir. Burada “a)” 5 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim, “b)” 20 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim “c)” ise 100 anten elemanı ile yapılmış olan benzetimdir. Bu grafiklerden açıkça görülmektedir ki tek bir kullanıcı için EBOY ile yapılmış olan benzetimde eleman sayısı arttıkça keskinlikte buna paralel olarak artmakta ve tek bir kullanıcıyı ayırt etmek için en az 5 civarında anten elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun dışında 5 anten için büyüklük yaklaşık 5 civarında, 20 anten için 20 civarında, 100 anten için 100 civarındadır. Tek bir kullanıcı için MUSIC algoritması ile yapmış olduğum benzetimde 2 antenle geliş yönü çok rahatlıkla tespit edilmekte ve anten sayısı ne

olursa olsun büyüklükler çok değişmemektedir. Buradan çıkarabileceğimiz sonuç MUSIC algoritmasıyla işaret sayısından bir fazla antenle yani bir antenle geliş açısı tespit edilirken, EBOY ile yapılan benzetimde 2 antenle tahmin oldukça zor olmaktadır.

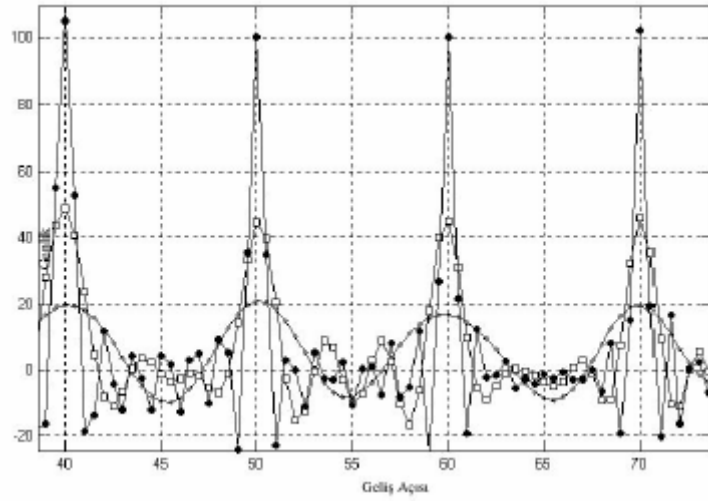


Şekil 6.41. En büyük olabilirlik yöntemiyle yapılan benzetim [9]

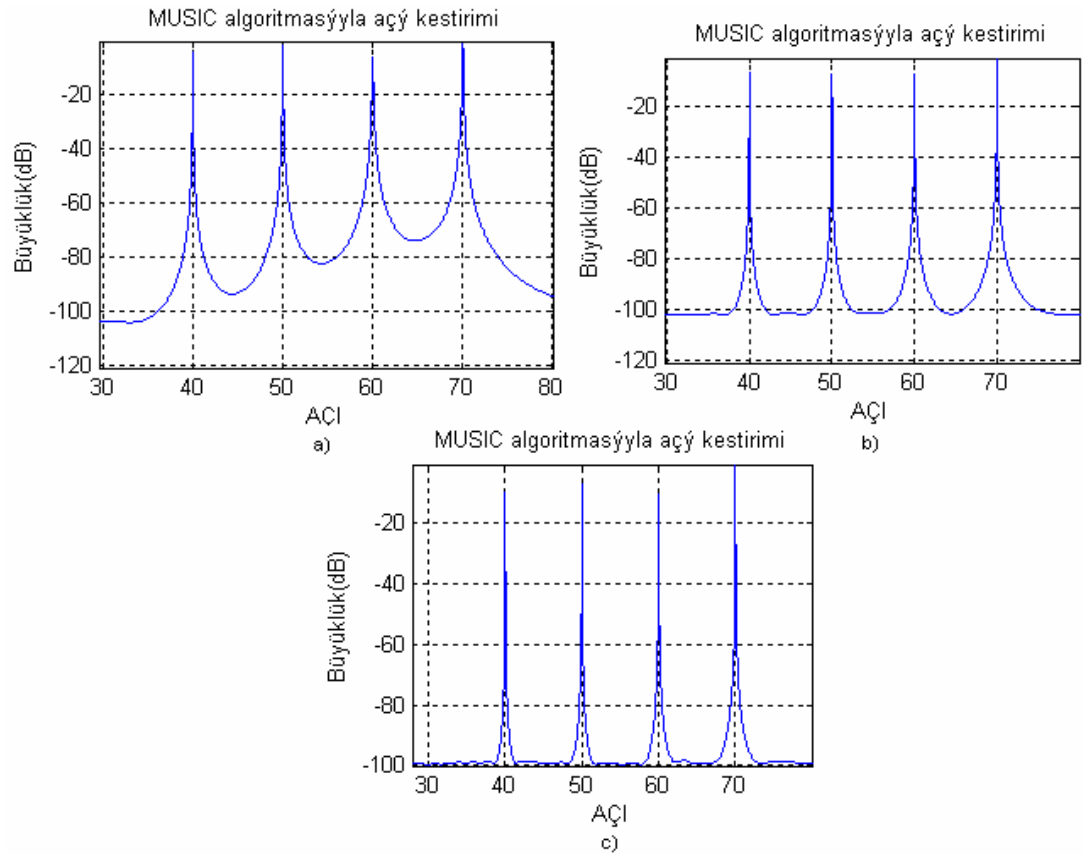


Şekil 6.42. MUSIC algoritmasıyla yapılan benzetim a) 20 anten b) 50 anten c) 100 anten

ii) Şekil 6.43 de dört kullanıcı için EBOY ile yapılmış olan tahmin grafik ve bu grafikte 20, 50, 100 anten eleman sayısı ile yapılmış olan tahminler verilmiştir. Yine şekil 6.44 de dört kullanıcı için benzetimini MUSIC algoritmasıyla yapmış olduğum kestirim grafikleri verilmektedir. Şekil 6.44.a. 20 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim, şekil 6.44.b. 50 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim, şekil 6.44.c. ise 100 anten elemanı ile yapılmış olan benzetimdir. Görüldüğü üzere tek kullanıcıda olduğu gibi burada da MUSIC algoritmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. MUSIC algoritmasıyla verilen açı değerleri için kullanıcı sayısından bir fazla anten elemanı ile yani 5 eleman ile açılar rahatlıkla kestirilirken EBOY ile yapılan benzetimde kestirilemeyebilmektedir.

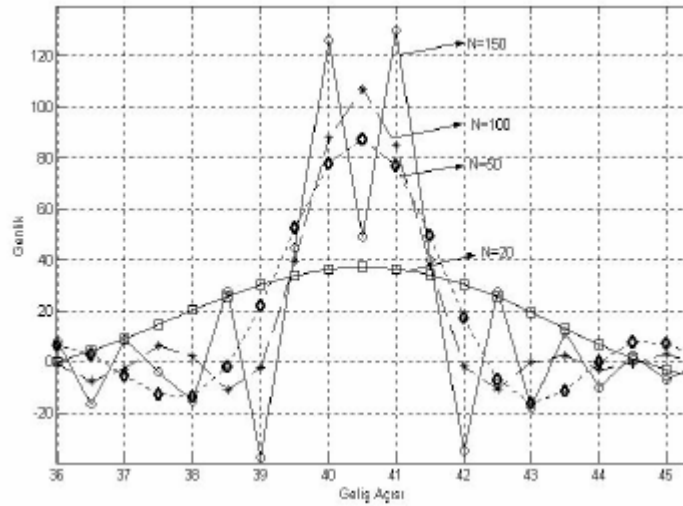


Şekil 6.43. En büyük olabilirlik yöntemiyle yapılan benzetim [9]

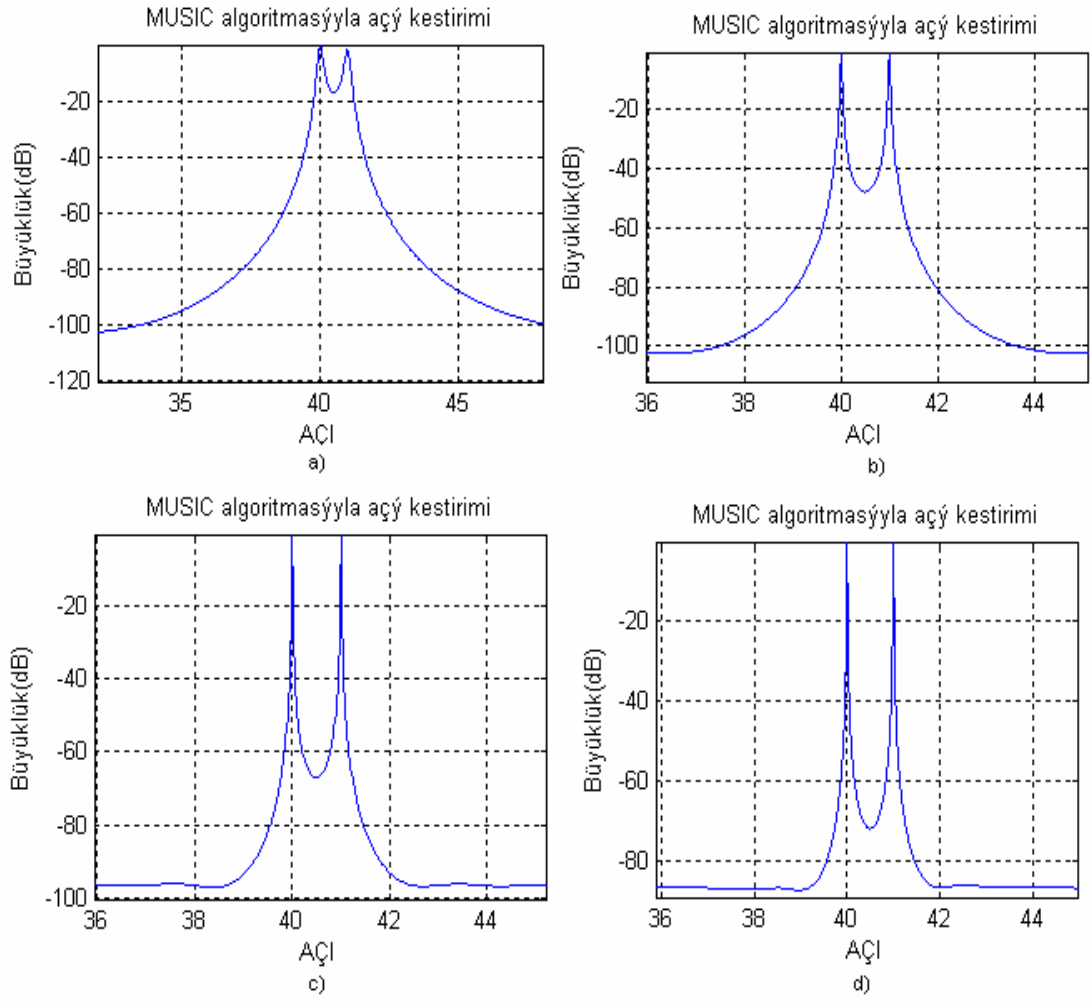


Şekil 6.44. MUSIC algoritmasıyla yapılan benzetim a) 20 anten b) 50 anten c) 100 anten

iii) Şekil 6.45 de iki kullanıcı ve aralarındaki derece farkı 1 olmak üzere EBOY ile yapılmış olan tahmin grafiği ve bu grafikte 20, 50, 100 ve 150 anten eleman sayısı ile yapılmış olan tahminler verilmiştir. Yine şekil 6.46. da iki kullanıcı ve aralarına 1 derece fark olmak koşulu ile benzetimini MUSIC algoritmasıyla yapmış olduğum kestirim grafikleri verilmektedir. Burada şekil 6.46.a. 20 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim, şekil 6.46.b. 50 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim, şekil 6.46.c. ise 100 anten elemanı ile yapılmış olan benzetim, şekil 6.46.d. ise 150 anten elemanı ile yapılmış olan benzetimdir. Şekillerden açıkça görülmektedir ki EBOY ile yapılan benzetimde 20, 50 ve 100 eleman ile kullanıcılar bir birlerinden ayıramamaktadır. Kullanıcıların bir birlerinden ayrılması için 150 anten elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat MUSIC algoritması ile yapılmış olan benzetimde görüldüğü üzere kullanıcıların bir birlerinden ayrılması için 20 anten elemanı bile yeterli olmaktadır. Buradan anlaşılan MUSIC algoritmasıyla daha yüksek performans çok daha az anten elemanı kullanılarak sağlanabilmektedir. Dolayısı ile anten sayısının getirdiği işlem yükü ve işlem zamanı artışı MUSIC algoritmasıyla oldukça düşmekte ve performans aynı oranda yükselmektedir.



Şekil 6.45 En büyük olabilirlik yöntemiyle yapılan benzetim [9]



Şekil 6.46. MUSIC algoritmasıyla yapılan benzetim a) 20 anten b) 50 anten c) 100 anten d) 150 anten

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada günümüzde halen daha üstünde çalışma yapılan akıllı anten sistemlerinden ve yöntemlerinde bahsedilmiştir. Akıllı anten sistemlerinin en önemli yöntemi olan geliş açısı kestirim yönteminden özellikle bahsedilmiş ve bu yöntemde kullanılan algoritmalar verilmiş ve bu algoritmalarından en çok kullanılan MUSIC algoritması yöntemiyle Matlab programında benzetim gerçekleştirilmiştir. Anlatılanlardan ve yapılan benzetimin sonucundan aşağıda detaylı olarak verilen vargılar çıkarılmıştır:

Sinyal sayısı arttıkça anten sayısının da belli oranlarda arttığı ortaya çıkmaktadır. Açılar küçültüldüğü vakitte (örneğin 1'er derecelik farklar ile) anten sayısının oldukça fazla arttığı tespit edilmiştir. Hem sinyal sayısı artırıldığında hem de dereceler arasındaki fark azaltıldığında bunlarla orantılı olarak anten sayısı artmaktadır. SNR değerini sıfır yaptığımızda yani gürültünün maksimum olduğu durumda, gürültü miktarı ile sinyalin ayırt edilmesi zorlaşmakta ve geliş açısını tahmin etmek için anten sayısı artmaktadır. SNR değeri yüz yapılırsa yani gürültü minimum yapılırsa bu durumda da gürültü miktarı hemen hemen sıfır olur ve işaretlerde bozulmalar minimum olmaktadır. Geliş açısını tahmin etmek için az miktarda antene ihtiyaç duyulmaktadır. Şimdi ise gelen işaretlerin frekanslarının eşit olması durumu incelenecek olursa. Yapılan benzetimlerden görülen aynı frekanslı işaretlerin bir birlerine karıştığı gözlemlenmiştir. Burada aynı frekanslı işaretlerin geliş açıları tahmin edilememektedir. Yani MUSIC algoritması ile aynı frekanslı işaretlerin birbirinden ayrılması mümkün değildir sonucu ortaya çıkmaktadır. Son olarak işaretlerin örnek sayılarının değiştirilmesi durumu incelenirse, örnek sayısı ne kadar fazla olursa işaretlerin bir birlerin ayrılması o kadar keskin olmaktadır. Burada açıkça görülmektedir ki bir haberleşme sisteminde frekansları farklı olmak koşulu ile MUSIC algoritması kullanılarak işaretlerin geldikleri yön rahatlıkla tespit edilebilir. İşaret sayısına ve aralarındaki açıklığa bağlı olarak anten sayısı artmaktadır. Bir genelleme yapılacak olursa birincisi, kullanıcıların bir birlerinden ayrılabilmesi için frekanslarının aynı olmaması gerekmektedir yani aynı hücredeki kullanıcılar farklı frekanslara sahip olmalıdır. Buda çok büyük bir dezavantaj olup band genişliğinin

daha verimli bir şekilde kullanılması söz konusu olmamaktadır. Bu durum MUSIC algoritmasının tek büyük dezavantajı olarak nitelenebilir. İkinci olarak, performansı etkileyen ikinci önemli parametre kullanıcıların bir birlerine olan yakınlığıdır yani kullanıcılar bir birlerine ne kadar yakın olursa anten sayısı oldukça artmakta ve işlem zamanı bir o kadar yükselmektedir. Üçüncüsü, ortamdaki ve sistemde kullanılan aktif malzemelerin oluşturduğu gürültü büyük önem arz etmektedir. Gürültü arttıkça yine anten sayısı artmaktadır ve buna bağlı olarak işlem zamanı yükselmektedir. Dördüncüsü, kullanıcı sayısıdır kullanıcı sayısı sistemi diğer parametreler kadar kötü etkilemezse de yine anten sayısını artırmakta ve işlem zamanı artmaktadır. Bu üç (ikinci, üçüncü, dördüncü) durumda da anten sayısı artmakta ve işlem zamanı yükselmektedir ve bu yüzden performans kötü etkilenmektedir. Beşinci ve son olarak sistemimizi etkileyen parametre örnek sayısıdır burada örnek sayısı ne kadar fazla olursa grafiklerde görüldüğü üzere keskinlik artmakta anten sayısı az da olsa azalmaktadır ve buna bağlı olarak işlem zamanı da kısalmış olur. Yani örnek sayısı seçilirken çok dikkatli olunması gerekmektedir. Pratikte 5 derece aralıklı olan işaretler yeterli olacağından 180 derecelik bir alan içinde 33 kullanıcı 56 antenle kolaylıkla ayrılabilir. Ayrıca yaptığım çalışmada kullanıcı sayısına ve derece farklarına bağlı olarak en az kaç adet anten elemanı kullanılması gerektiği otomatik olarak tespit edilebilmektedir. EBOY ile yapılan benzetimde belirtildiği üzere 6'şar derecelik aralıklarla 15 kullanıcının ayrılabilmesi için 20 civarında elemana ihtiyaç duyulurken, MUSIC algoritmasıyla yaklaşık 15 civarında antenle kullanıcılar ayrılabilir. Buradan yine MUSIC algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği ve daha makul sayıda anten elemanına ihtiyaç duyulduğu çıkarılabilir.

Baz istasyonlarında işlem zamanının ve eleman (anten) sayısının ne kadar önemli olduğu günümüzde açıkça bilinmektedir. Sistem ne kadar yavaş ve karmaşık olursa performans aynı oranda azalmakta ve maliyette bir o kadar yükselmektedir. MUSIC algoritmasıyla EBOY'ın karşılaştırılmasına tekrar dönülürse, MUSIC ile yapılan benzetimlerde EBOY ile yapılan benzetimlere göre çok daha iyi sonuçlar gözlenmiş ve işlem zamanı ve karmaşıklıkta azalma çok açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu nedenle MUSIC algoritması EBOY'dan daha yüksek performansa sahiptir denilebilir.

KAYNAKLAR

1. Stevanovic, I., Skrivervik, A. and Mosig, J.R., "Smart Antenna Systems for Mobile Communications", *Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Lausanne*, 8-25 (2003).
2. Sarkar, K.T., Wicks, M.C., "Smart antennas", *John Wiley and Sons*, New Jersey, 1-50 (2003).
3. Petrus, P., "Novel Adaptive Array Algorithms and Their Impact on Cellular System Capacity", PhD thesis, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 5-10 (1997).
4. Balanis C.A. "Antenna Theory and Design", *John Wiley and Sons*, Arizona, 7-44 (1997).
5. Haykin, S., "Adaptive Filter Theory, 4th edition", *Prentice Hall*, New Jersey, 2-20 (2002).
6. Kocakaya, A., Burdurlu, H., Dinçer, H., "Akıllı Antenlerde Girişim Bastırma İçin LMS ve SMI/LMS Algoritmalarının Başarım Değerlendirmesi", *II. Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Ulusal Kongresi*, İstanbul, 1-30 (2005).
7. Göğüsdere, Ş., "Adaptif Antenlerde Işın Demeti Oluşturma Algoritmaları", Yüksek lisans tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 5-40 (2000).
8. Vural, E., "Kablosuz İletişimde Akıllı Anten Sistemleri ve Işın Şekillendirme Teknikleri", Yüksek lisans tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-50 (2004).
9. Tamer, Ö., Köktürk, G., Özmehmet, K., "Düzgün Doğrusal Anten Dizilerinde En Büyük Olabilirlik Yöntemi Kullanarak Geliş Açısı Belirlenmesi", *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, İzmir, 4(3): 37-43 (2002).
10. Campbell, D. K., "Adaptive Beamforming Using a Microphone Array for Hands-Free Telephony", Master thesis, *The faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 3-6 (1999).
11. Donald F. Breslin, "Adaptive Antenna Arrays Applied To Position Location", *The faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 14-22 (1997).

EKLER

EK-1 Matlab programı

```

function music(i_say,g_aci,i_frek,lamda,or_say)
close all;
clc;
e_bosluk=lamda/2;
kp=2*pi/lamda;
d=e_bosluk;
disp(' ')
SNR=input(' SNR değerini giriniz (Maksimum gürültü için "0",
minimum gürültü için "100"):');
disp(' ')
disp(' Eğer girilen anten sayısı minimum anten sayısının altındaysa
minimum değer alınır. ')
disp(' ')
x=input(' Anten sayısını giriniz(minimum anten sayısını belirlemek
için "0" girin):');
if x==0;
e_say=i_say+1;
else
    e_say=x;
end

say=0;
while 0<e_say
%-----
%işaratlerin üretilmesi
%-----
Toplam_sinyal=zeros(i_say,or_say);
k=1 :or_say;
for i=1 : i_say;
    Toplam_sinyal(i,:)=sqrt(2)*sin(2*i_frek(i)*pi*k);
end
figure(1);
plot(k,Toplam_sinyal(1,:));
grid on
hold on
xlabel('Örnek sayıları');

```

EK-1 (Devam) Matlab programı

```

ylabel('Genlik');
title('Gelen işaret');

%-----
---
%Her bir elemana eklenen gürültü
%-----
---
gurultu=zeros(e_say,or_say);
gurultu_sbt=1/(10^(SNR/10));
for i=1 : e_say;
    gurultu(i,:)=sqrt(gurultu_sbt)*randn(1,or_say);
end

%-----
%Her bir sinyal için dizi yayılma vektörünün üretilmesi
%-----
yay_matris=zeros(e_say,i_say);
for i=1 : i_say;
    k=0 : e_say-1;
    yayilma=exp(j.*k*kp*d*sin(g_aci(i)*pi/180));
    yay_matris(:,i)=yayilma.';
end

%-----
% Elemanlardan alınan dalga şekli
%-----
U=zeros(e_say,or_say);
for i=1 : or_say;
    U(:,i)=yay_matris*Toplam_sinyal(:,i)+gurultu(:,i);
end

%-----
% Giriş kovaryans matrisinin kestirimi
%-----

```

EK-1 (Devam) Matlab programı

```

Kov_matris=zeros(e_say,e_say);
for i=1:or_say;
    kovaryans=U(:,i)*(U(:,i)');
    Kov_matris=Kov_matris+kovaryans;
end
Kov_matris=Kov_matris/or_say;

%-----
% Öz değerler ve ilişkili öz vektörlerin bulunması
%-----

[oz_matris,oz_deger]=eig(Kov_matris,'nobalance');

%-----
% Gelen işaret sayısının kestirilmesi
%-----

for i=1:e_say
    deger(i)=oz_deger(i,i);
end

Sirali_deger=sort(deger);
artir=0;
for i=1: e_say
    if Sirali_deger(i)<1.5*gurultu_sbt
        artir=artir+1;
    end
end
V_matris=zeros(e_say,artir);
Sirali_matris=zeros(e_say,e_say);
for i=1:e_say
    for k=1:e_say
        if Sirali_deger(i)== deger(k)
            Sirali_matris(:,i)=oz_matris(:,k);
        end
    end
end

```

EK-1 (Devam) Matlab programı

```

end
for i=1: artir
    V_matris(:,artir-i+1)=Sirali_matris(:,i);
end
say=0;
for i=1: e_say
    if abs((fliplr(Sirali_deger(i)))) >
gurultu_sbt*[ones(1,i)]*15;
        say=say+1;
    end
end

if say==i_say;
    break
end
e_say=e_say+1;
end
disp(' ')
gst=[' Anten sayısı=' int2str(e_say)];
disp(gst)
figure(2);
plot([1:e_say],abs((fliplr(Sirali_deger))), '-+');
grid on
hold on
plot([1:e_say],gurultu_sbt*[ones(1,e_say)], '-o');
legend('Öz değer', 'gürültü')
xlabel('Antenler');
ylabel('Öz değerler');
title('Alınan işaretlerinin ilişki matrisinin büyüklükleri');

q1=(g_aci(1)-10);
q2=(g_aci(i_say)+10);
q3=q2-q1;

f=zeros(1,10001);
i=1;

```

EK-1 (Devam) Matlab programı

```
for adim= q1:q3/10000:q2
    k=0:e_say-1;
    yayilma=exp(j.*k*kp*d*sin(adim*pi/180));
    a=yayilma.';
    f(i)=(a'*a)/(a'*V_matris*V_matris'*a);
    i=i+1;
end
adim= q1:q3/10000:q2;
f=abs(f)./max(abs(f));
figure(3)
plot(adim,20*log10(f));
grid on
xlabel('AÇI');
ylabel('Büyüklik (dB)');
title('MUSIC algoritmasıyla açı kestirimi');
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARABULUTLU, Kürşat
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.11.1978 Kars
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 284 20 29
 e-mail : bkb7883@yahoo.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Elek-Elektro. Mühendisliği	2006
Lisans	Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Müh.	2001
Lise	Alpaslan Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005- ...	TÜRKSAT A.Ş.	Uzman Yardımcısı
2004-2005	Ankara Metroşu	ATC Başmühendisi
2002-2004	Ankara Metroşu	Bakım Şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Karabulutlu K. "PIC 16F877 mikrokontrolör ile ısı denetim uygulaması", *Elektrik ve Elektronik Mühendisliği İkinci Uluslararası Konferansı, Bursa, 353–357* (2001).

Hobiler

Klasik müzik dinleyiciliği, Amatör şiir yazımı, Spor yapmak, Kitap okumak