

155082

KOCAELI ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ İLETİŞİMDE AKILLI ANTEN SİSTEMLERİ ve
IŞIN ŞEKİLLENDİRME TEKNİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elo. Hab. Müh. Erkan VURAL

Ana Bilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Müh.

Danışmanı: Prof.Dr. Hasan DİNÇER

Haziran 2004

**KABLOSUZ İLETİŞİMDE AKILLI ANTEN SİSTEMLERİ ve
IŞIN ŞEKİLLENDİRME TEKNİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elo. Hab. Müh. Erkan VURAL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 Haziran 2004

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Temmuz 2004

Tez Danışmanı

Prof.Dr.

Hasan DİNÇER

(Handwritten signature)

Üye

Yard.Doç.Dr.

Y. Emre ERDEMLİ

(Handwritten signature)

Üye

Yard.Doç.Dr.

Soner ÖZGÜNEL

(Handwritten signature)

KABLOSUZ İLETİŞİMDE AKILLI ANTEN SİSTEMLERİ VE IŞIN ŞEKİLLENDİRME TEKNİKLERİ

ERKAN VURAL

Anahtar kelimeler : Akıllı anten sistemi, ışın şekillendirme, uzamsal süzgeçleme

Özet : Akıllı anten sistemleri kablosuz iletişim sistemlerinin performansını iyileştirebilen yeni bir teknolojik değişimdir. Akıllı anten sistemi, uzamsal boyutu kullanarak ve dinamik olarak uyarlanabilir alım ve iletim anten örüntüleri üreterek etkileşimi önemli derecede azaltabilmekte, sistem kapasitesini ve aynı zamanda bütün arayapım maliyetlerini azaltarak güç verimliliğini arttırabilmektedir. Işın şekillendirme, istenilen kullanıcı doğrultusunda iletim ve alım yaparak diğer doğrultulardan gelen işaretleri bastıran bir sayısal işaret işleme tekniğidir. Yani, ışın şekillendirme uzamsal süzgeçleme işlemidir. Böylece, farklı uzamsal konumlara aynı frekans bandının tahsis edilmesine olanak sağlanmaktadır. Bu tezde, akıllı anten sistemi ve uzamsal süzgeçleme için farklı ışın şekillendirme teknikleri incelenerek uzamsal süzgeçleme işlemi tanıtılmıştır. Örnek bir uygulama olarak da, geliş açısı doğrultusu bilindiğinde anten örüntüsünü istenen doğrultuya yönlendirme benzetimi bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir.

SMART ANTENNA SYSTEMS AND BEAMFORMING TECHNIQUES FOR WIRELESS COMMUNICATION

ERKAN VURAL

Key words : Smart antenna system, beamforming, spatial filtering

Abstract : The technology of smart or adaptive antennas for mobile communications has received enormous interest worldwide in recent years. Smart antenna systems are recognized as a key technology for increasing capacity and using efficient spectrum in wireless communication systems. Using spatial dimension and dynamically generating adaptive beam patterns, smart antennas can eliminate interference signals, increase the system capacity, power and spectrum efficiency. Beamforming is the process of forming beams towards the direction of the desired user while simultaneously suppressing signals originating from other directions. Thus, beamforming can also be considered as the spatial filtering of signals using their spatial signature properties. With this technology, more than one desired signal can allocate the same frequency band. In the thesis, beamforming techniques, smart antenna systems and the concept of the spatial filtering are reviewed. As an exemplary application, a computer simulation of steering antenna pattern to a desired direction for a given direction of arrival is presented.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde kablosuz iletişim sistemlerine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu ilginin nedenleri arasında, artan talepleri karşılamak için varolan sistem kapasitesini arttırma, tayf (spectrum) kullanımını daha verimli hale getirme, daha az güçlü yayılım yaparak daha fazla bölgeyi kapsama ve maliyeti azaltma gibi istenilir özellikler bulunmaktadır. Akıllı anten sistemleri ve ışın şekillendirme teknikleri, bu amaçlara cevap verebilmek amacıyla geliştirilen yeni teknolojilerden birisidir. Daha yüksek hızlı sayısal işaret işlemcilerin ve analog sayısal dönüştürücülerin üretilmeye başlanması ve mikrodalga elemanlarının maliyetlerinin azalmasıyla bu teknoloji tasarlanabilir olmaktadır. Geliştirilen bu teknik ile farklı uzamsal yerlerden gelen işaretlerin ayrımı yapılarak istenilen doğrultu boyunca iletim ve alım yapılabilmektedir. Benzer şekilde, istenmeyen doğrultulardaki anten kazançları da daha düşük seviyelere çekilebilmektedir. Böylece, aynı frekans bandının farklı uzamsal yerlere göre kullanılabilmesine olanak sağlanmakta ve sistem kapasitesi arttırılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, akıllı anten sistemleri incelenmekte ve ışın şekillendirme teknikleri tanıtılmaktadır. Ayrıca bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş bir uygulamanın sonuçları verilmektedir.

Bu çalışmanın konuyla ilgili araştırma ve uygulama yapacak kişilere katkıda bulunmasını diler, bütün yaşamım boyunca büyük desteklerini esirgemeyen aileme ve danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan DİNÇER'e teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2004

Erkan Vural

İÇİNDEKİLER

ÖZET :	ii
ABSTRACT :	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR :	iv
İÇİNDEKİLER :	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR :	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ :	x
TABLolar LİSTESİ :	xiii

BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. AKILLI ANTEN MİMARİSİNE GENEL BİR BAKIŞ	4
2.1 Giriş.....	4
2.2 Akıllı Anten Sistemi İçin Yararlı Bir Benzerlik	4
2.3 Genel Akıllı Anten Mimarisi	5
2.4 Antenler.....	7
2.4.1 Akıllı anten sistemleri	8
2.4.3 Çoklu yol ve komşu kanallar etkileşimi.....	13
2.4.4 Akıllı anten teknolojisinin kullanım alanları	14
BÖLÜM 3. ANTEN DİZİLİMLERİ VE IŞIN ŞEKİLLENDİRME	16
3.1 Giriş.....	16
3.1.1 Faz ve çeşitlilik dizilimleri arasındaki farklılık	18
3.2 Düzgün Dağılımlı Doğrusal Dizilim.....	18
3.3 Işın Şekillendirme	22
3.4 FIR Süzgecine Benzerlik	24
3.5 Algoritma Seçimi	26
3.6 En Uygun Işın Şekillendirme.....	27

3.7 Uyarlamalı Işın Şekillendirme Algoritmaları	28
3.7.1 En küçük kareler yöntemi (LMS)	29
3.7.2 Özyineli en küçük kareler yöntemi (RLS)	30
3.7.3 Doğrudan matris tersi (DMI)	31
3.7.4 Karar yönlendirilmiş algoritmalar (Decision Directed Algorithms).....	32
3.8 Çeşitlilik Birleştirmesi (Diversity Combining).....	33
3.8.1 Seçim birleşimi (Selection Combining).....	33
3.8.2 En büyük oran birleşimi (MRC)	33
3.8.3 Eşit kazanç birleşimi (EGC)	34
3.9 Özet.....	35
BÖLÜM 4. UZAMSAL SÜZGEÇLEME TEKNİKLERİ.....	36
4.1 3-Boyutlu Giriş Uzayı.....	36
4.2 Genel Işın Şekillendirme Eşitlikleri.....	38
4.2.1 Işınım örüntüsü yönlendirme	38
4.3 Doğrusal Dizilim Geometrisi	39
4.3.1 Doğrusal dizilim benzetim uygulaması	40
4.4 Zaman Domeninde Işın Şekillendirme Yapısı.....	42
4.5 CDMA Sistemleri İçin Uzamsal Süzgeçleme.....	44
4.5.1 Giriş.....	44
4.5.2 Dizilim işaret işleme	44
4.5.3 Işın şekillendirme modeli.....	44
4.5.4 Ağırlık vektörü seçimi	45
4.5.5 DOA kestirimi (DOA estimation).....	47
4.5.6 Temel CDMA ışın şekillendirme modeli.....	51
4.5.7 Uzamsal bölümlü çoklu erişim (SDMA)	52
4.5.8 Gerçekleştirilen Benzetimler	52
4.5.9 Özet.....	65
BÖLÜM 5. YAZILIM RADYODA AKILLI ANTEN SİSTEMİ.....	66
5.1 Giriş.....	66
5.2 3G Akıllı Anten Gereksinimleri.....	68
5.3 Anten Sistemlerine Yazılım Radyo Prensiplerinin Uygulanması.....	68

BÖLÜM 6 : SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR :	73
EK-A: Işınım Örüntüsü Yönlendirme Kodu	76
EK-B: MUSIC Algoritması	77
EK-C: Pencereleme Fonksiyonları	80
ÖZGEÇMİŞ :	82



SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR LİSTESİ

$a(\theta)$: yönlendirme vektörü
c	: ışığın boşlukta yayılma hızı
d	: dizilim elemanları arası uzaklık
f	: frekans
M	: dizilim eleman sayısı
$n(t)$: gürültü işareti (zaman domeninde)
$s(t)$: giriş işareti (zaman domeninde)
T_s	: örnekleme hızı
v	: dalga hızı
w	: ağırlık fonksiyonu
λ	: dalga boyu
θ	: geliş açısı (geliş doğrultusu)
$x(t)$: anten elemanlarında alınan işaret (zaman domeninde)
$x(n)$: ayrık zamanlı işaret
$y(t)$: giriş vektörü (zaman domeninde)
$z(k)$: ışın şekillendirme çıkışı
3G	: Third Generation (3. nesil)
ADC	: Analog Digital Converter (analog sayısal dönüştürücü)
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
ASIC	: Applicable Specific Integrated Circuit (uygulamaya özgül tümdevre)
BER	: Bit Error Rate (bit hata oranı)
BTS	: Base Transmission Station (temel iletim istasyonu)
CDMA	: Code Division Multiple Access (kod bölmeli çoklu erişim)
DSP	: Digital Signal Processor (sayısal işaret işlemcisi)

DOA	: Direction Of Arrivals (geliş doğrultusu)
FDMA	: Frequency Division Multiple Access (frekans bölmeli çoklu erişim)
FIR	: Finite Impuls Response (sonlu darbe cevabı)
IF	: Intermediate Frequency (ara frekans)
LMS	: Least Mean Squares (en küçük kareler)
MMSE	: Minimum Mean Square Error (en küçük ortalama karesel hata)
MRC	: Maximal Ratio Combining (en büyük oran birleşimi)
MSE	: Mean Square Error (ortalama karesel hata)
MVDR	: Minimum Variance Distortionless Response (en küçük değişimli bozulmasız cevap)
MUSIC	: Multiple Signal Classification (çoklu işaret sınıflandırılması)
PCS	: Personal Communications System (kişisel iletişim sistemi)
RF	: Radio Frequency (radyo frekansı)
RLS	: Recursive Least Squares (özyineli en küçük kareler)
SDMA	: Spatial Division Multiple Access (uzamsal bölmeli çoklu erişim)
SDR	: Software Defined Radio (yazılım radyo)
SINR	: Signal Interference Noise Ratio (işaret gürültü ve etkileşim oranı)
SIR	: Signal Interference Ratio (işaret etkileşim oranı)
SNR	: Signal to Noise Ratio (işaret gürültü oranı)
TDMA	: Time Division Multiple Access (zaman bölmeli çoklu erişim)
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System (evrensel gezgin iletişim sistemi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Genel akıllı anten mimarisi.....	6
Şekil 2.2: Çoklu servis UMTS servisinde akıllı anten örüntüsü.....	8
Şekil 2.3: Anahtarlama yönlü ve uyarlamalı dizilim sistemleri	9
Şekil 2.4: Anahtarlama anten dizilimi kapsama örüntüsü.....	10
Şekil 2.5: İşaret etkileşim oranını iyileştiren uyarlamalı anten dizilimi kapsama	11
örüntüsü.....	11
Şekil 2.6: Anahtarlama ve uyarlamalı anten dizilerinin kapsama örüntüleri	13
Şekil 2.7: Çoklu yol yayılım gecikmesinin etkisi ve hücrel gösterimde komşu.....	13
kanal etkileşiminin gösterimi.....	13
Şekil 2.8: Faz nedeniyle oluşan çoklu yol işaretleri.....	14
Şekil 3.1: (a) Elemanlar arası mesafenin d olduğu düzgün dağılımlı doğrusal dizilim.	
(b) Dairenin yarıçapının r olduğu düzgün dağılımlı dairesel dizilim.....	17
Şekil 3.2: Gelen dalga yüzeyini gösteren düzgün dağılımlı doğrusal anten dizilimi.	18
Şekil 3.3: Dar bant ışın şekillendirici.....	23
Şekil 3.4 LMS algoritması.....	29
Şekil 3.5: RLS algoritması.....	31
Şekil 3.6: 3 etkileşimli 4 elementli ışınım örüntüsü.....	32
Şekil 3.7: Seçim çeşitliliği.....	33
Şekil 3.8: Çeşitleme birleşimi.....	34
Şekil 3.9: Eşit Kazanç Birleşimi.....	34

Şekil 4.1: Üç boyutlu giriş uzayı sistemi (Hampson 1997).	37
Şekil 4.2: Doğrusal dizilimden elde edilen gösterim.	39
Şekil 4.3: Eşit aralıklarla yerleştirilmiş M elementli doğrusal dizilim	40
Şekil 4.4: $d = 0.5\lambda$ aralıklarla yerleştirilmiş $M = 16$ elementli doğrusal dizilim için ışınım örüntüsü ($f = 900.10^6 \text{ Hz}$).....	41
Şekil 4.5: $M = 16$ elementli doğrusal dizilim için Hamming pencere fonksiyonu ile ağırlıklandırılmış ışınım örüntüsü.....	42
Şekil 4.6: Zaman domeninde gecikme-toplam ışın şekillendiricisi	43
Şekil 4.7: Geleneksel ışın şekillendirici yayılım örüntüsü.....	46
Şekil 4.8: Sıfır yönlendirme yayılım örüntüsü.....	47
Şekil 4.9: İşaret sayısı = 2, element sayısı = 8, Geliş açıları = $[30^\circ, 75^\circ]$, $d = \lambda/2$ SNR = 20.	50
Şekil 4.10: İşaret sayısı = 2, element sayısı = 4, Geliş açıları = $[30^\circ, 75^\circ]$, $d = \lambda/2$, SNR = 20.	50
Şekil 4.11: İşaret sayısı = 3, element sayısı = 12, Geliş açıları = $[30^\circ, 45^\circ, 75^\circ]$,... $d = \lambda/2$, SNR = 20.	51
Şekil 4.12: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).....	53
Şekil 4.13: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,4\lambda$)	54
Şekil 4.14: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,3\lambda$).....	54
Şekil 4.15: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,8\lambda$).....	55
Şekil 4.16: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 1,0\lambda$).....	56
Şekil 4.17: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$)	56
Şekil 4.18: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,4\lambda$).....	57
Şekil 4.19: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,8\lambda$)	58

Şekil 4.20: a vektörü kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).	58
Şekil 4.21: a vektörü kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,4\lambda$).	59
Şekil 4.22: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).....	60
Şekil 4.23: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,4\lambda$).	61
Şekil 4.24: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,8\lambda$).....	61
Şekil 4.25: Hamming fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).....	62
Şekil 4.26: Hamming fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,4\lambda$).	62
Şekil 4.27: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).....	63
Şekil 4.28: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).	64
Şekil 4.29: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).....	64
Şekil 4.30: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).	65
Şekil 5.1: Tipik 2G basit anten sistemi.	67
Şekil 5.2: Yazılım radyo kullanarak akıllı anten sistemi.	69
Şekil C.1: Blackman pencere fonksiyonu.....	80
Şekil C.2: Hamming pencere fonksiyonu	81

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Uygulanabilir standartlar.....	15
Tablo C.1: Pencereleme fonksiyonları.....	80



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kablosuz servislerin kullanımındaki talep son yıllarda önemli derecede artmıştır ve giderek de artmaktadır. Artan talebi karşılamak iyi bir servis kalitesi ve yüksek bant genişliği gerektirmektedir. Gezgin haberleşme kullanıcılarının sayısının giderek artmasıyla birlikte kapasite daha önemli hale gelmektedir. Bu durum tasarım mühendislerine büyük bir teknolojik değişim sunmaktadır. Bu teknolojik değişim; tayf (spectrum) verimliliği, güç kullanımı ve maliyet baskıları altında artan kullanıcı sayısı ile birlikte kablosuz sistemin performansını ve verimliliğini bütünüyle arttırmayı amaçlamaktadır. Bu konudaki araştırmaların çoğu, son zamanlara kadar, iletişim protokollerinin yanı sıra kodlama teknikleri ve modülasyon gelişimi üzerine yoğunlaşmıştır. Alıcı-verici yapısı ve anten teknolojileri üzerine daha az ilgi gösterilmiştir. Son zamanlarda geliştirilen akıllı anten teknolojisi, gelecek nesil kablosuz ağların gereksinimlerini karşılayacak çözüm olarak düşünülmektedir (Loadman et al 2003). Akıllı anten veya uyarlamalı (adaptive) dizilim, sistemin alınan işaretleri sadece zaman ve frekans domenini kullanarak değil aynı zamanda en uygun sistem hedeflerini başarmak için uzamsal domeni de kullanabilmesini sağlar. Hem alıcı hem de verici işaretlerinde uzamsal süzgeçlemeyi gerçekleştiren akıllı antenin kapasitesi, var olan geleneksel alıcı-verici tekniklerine nazaran önemli avantajlar sağlamaktadır (Godara 1997).

Akıllı antenler üçüncü nesil (3G: Third Generation) gezgin ağlarda kapasiteyi arttırabilecek anahtar bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Akıllı antenler %100'den daha fazla servis kapasitesi kazancı sağlar ve bu nedenle de gerekli temel istasyon (base station) sayısını yarı yarıya düşürebilmektedir (Symena).

Bir akıllı anten sistemi, kablosuz haberleşme sistemlerinde çok sayıda avantajı başarabilmektedir. İlk olarak, çoklu yol zayıflaması (fading) büyük oranda azaltılabilmektedir. Güvenirlik ve servis kalitesi çoğunlukla zayıflama oranına bağlı

olduğu için zayıflamadaki herhangi bir azalma performansı büyük miktarda iyileştirmektedir. İkinci bir avantaj, temel istasyonda akıllı antenin yer aldığı herhangi bir gezgin sistem daha iyi güç verimliliğine sahiptir. Bunun nedeni, verilen bir işarette akıllı antenin geleneksel sisteme nazaran gürültü ve etkileşim oranı (SINR) açısından daha iyi bit hata oranı (BER) başarabilme yeteneğinden kaynaklanır. Bu durum gezgin birimden baz istasyonuna daha az güçlü iletim anlamına gelmektedir. Bir diğer avantaj ise, işaret etkileşim oranının (SIR) artırılmasıyla sistem kapasitesinin artırılmasıdır (Okamoto 2002).

Teorik ve deneysel olarak akıllı antenlerin yukarıda bahsedilen faydaları sağlayabildiği kanıtlanmıştır; fakat, muhtemelen uyarlamalı (adaptive) antenlerle ilgili en önemli problem pratik tasarımlarıdır (Okamoto 2002). Akıllı antenlerle ilgili sayısal işaret işleme (DSP) algoritmaları yüksek hesapsal işlemleriyle, gerçek zamanlı tasarımlarını zor kılmaktadır. Adaptif antenler, alıcının RF donanım karmaşıklığını artırarak ve daha pahalı, tamamen fonksiyonel, çok kanallı alıcı-verici donanımlı çoklu anten elemanları (anten dizilimleri) kullanırlar. Yüksek hızlı analog sayısal dönüştürücülerinin (ADC) ve sayısal işaret işlemcilerinin ortaya çıkmasıyla ve de mikrodalga bileşenlerinin maliyetlerindeki azalmayla birlikte akıllı antenlerin tasarım ve geliştirmesi uygulanabilir bir sistem haline gelmektedir. İkinci bölümde akıllı anten sistemi üzerine genel bir bakış verilecektir.

Akıllı anten sisteminin yukarıda bahsedilen avantajları sağlamada kullandığı tekniklerden birisi ışın şekillendirme (beamforming) işlemidir, ve tasarlanan yapı ışın şekillendiricisi olarak isimlendirilir. Işın şekillendiricisi uzamsal süzgeçleme yapabilen bir sensör dizisidir. Burada amaç, gürültü ve diğer etkileşim (interference) işaretleri varolduğunda arzu edilen doğrultudan işaret alımını yaklaşık olarak hesaplamaktır. Bir ışın şekillendiricisi, frekanslarının örtüştüğü durumlarda bile farklı doğrultulardan gelen işaretleri ayırabilecek duyarlılıkta uzamsal süzgeçleme yapar. Bu tezde, akıllı anten sistemi ve uzamsal süzgeçleme için farklı ışın şekillendirme teknikleri üzerinde çalışılmıştır ve geliş açısı doğrultusu bilindiğinde anten diziliminin çıkışını istenen doğrultuya yönlendirme işleminin farklı değişken değerlerine göre sonuçları karşılaştırılmıştır.

Akıllı anten sistemi ve ışın şekillendirme ile ilgili yayınlara kısaca göz atacak olursak; Filiz (2003) çoklu erişim haberleşme teorisine, uyarlamalı anten sistemlerine ve uzamsal süzgeçleme tekniklerine değinmektedir. Venkatasubramanian (2003) ise OFDM ve MC-CDMA sistemlerine genel bir bakış verdikten sonra uyarlamalı anten sistemi ve MC-CDMA sistemi için ışın şekillendirme konularını incelemektedir. [7] nolu kaynakta ise akıllı anten sistemi tanıtılmaktadır. Campbell (1999) geliş açısı doğrultusu belirlemek için teknikler ve benzetimler sunmaktadır. Hampson (1997) ışın şekillendirme ve tasarımlarına ilişkin teknikleri açıklamaktadır. Ayrıca, ışın şekillendirici tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalara değinmektedir. Turner and Koirala (2002) Motorola işlemcisi kullanılarak tasarlanan bir akıllı anten sistemini sunmaktadır. Philips (et al 1999), Texas Instruments'in bir sayısal işaret işlemcisiyle uyarlamalı anten dizilimi vermektedir. Burns (2003) ise, üçüncü nesil gezgin haberleşme sistemleri için yazılım radyo mimarisini ve akıllı anten sistemi ile birlikteliğini tanıtmaktadır.

BÖLÜM 2. AKILLI ANTEN MİMARİSİNE GENEL BİR BAKIŞ

2.1 Giriş

Şu anki varolan sistemlerde geleneksel temel istasyon antenleri ya tüm yönlü ya da sadece belirli doğrultulara yöneltmiş bir şekildedir. Bu şekilde olduğu için kaynakların kullanımında israflar oluşmaktadır. Yani istenen kullanıcının dışında da diğer doğrultulara yönelik yayınımlar olmaktadır. Bütün hücre alanı boyunca yayınlanan bu işaret istenen kullanıcı haricindeki diğer doğrultulardaki kullanıcılar için etkileşim oluşturmaktadır. Akıllı antenlerin, işaretin geliş doğrultusuna göre otomatik olarak istenen kullanıcı doğrultusuna güç iletimi/alımı yapabiliyor olması, iletimin kapasitesini arttırmaktadır.

2.2 Akıllı Anten Sistemi İçin Yararlı Bir Benzerlik

Bir uyarlamalı anten sisteminin nasıl çalıştığını önsezi ile kavramak için gözlerimizi kapatıp hareket halindeki birisiyle konuştuğumuzu düşünelim. Aşağıda verilen nedenlerden dolayı konuştuğumuz kişinin yerini kolaylıkla belirleriz [7].

-Kulaklarımızla (işitme sensörü) konuşma işaretini duyarız.

-Ses her kulağımıza farklı zamanlarda ulaşır.

-Beynimiz, özel bir işaret işlemcisi gibi çalışarak, konuşmacının yerini hesaplamak ve bilgiyi ilişkilendirmek için çok fazla sayıda hesaplama yapar.

Beynimiz, ayrıca, her bir kulağımıza birlikte gelen işaretlerin güçlerini toplar ve bu nedenle sesi seçilmiş bir doğrultuda alırız.

Uyarlamalı anten sistemleri de kulakların yerine antenleri kullanarak aynı işlevi görür. Bunun sonucunda, sekiz, on veya oniki kulak işaretin yerini bulmak için ve iletim kapasitesini arttırmaya yardımcı olmak için kullanılabilir. Antenler

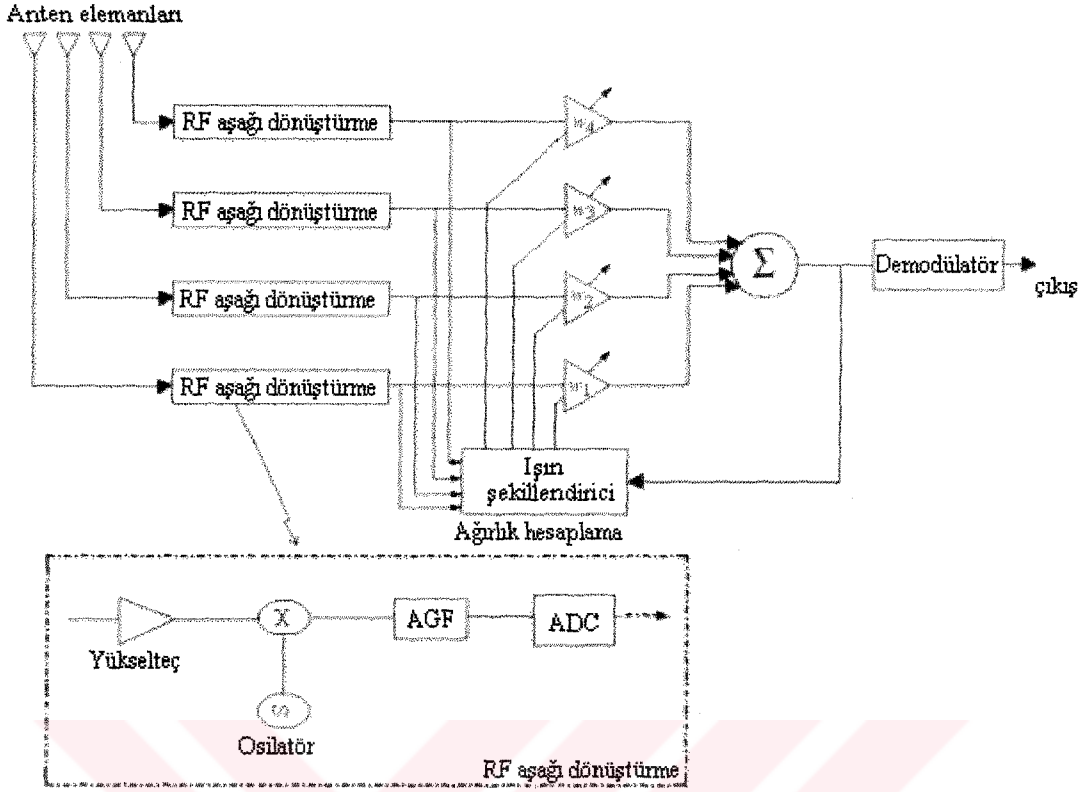
hem dinleyip hem de iletim yapabildiklerinden dolayı, uyarlamalı bir anten sistemi işaretleri geldiği doğrultudan geriye gönderebilmektedir. Yani, anten sistemi, sadece sekiz, on veya oniki kez daha yüksek alım yapmakla kalmaz, bunun yanında daha yüksek ve istenilen kullanıcı doğrultusunda iletim yapabilmektedir.

Bir aşama ilerlediğimizi düşünelim; eğer ilave konuşmacılar katılırlarsa, dahili işaret işlemcisi istenmeyen gürültüyü (etkileşimi) kaldırabilmekte ve aynı zamanda sırasıyla bir konuşmaya odaklanmaktadır. Buradan yola çıkarak, ileri seviye uyarlamalı dizi sistemleri istenen ve istenmeyen işaretleri ayırt etmek için tasarlanmaktadır.

2.3 Genel Akıllı Anten Mimarisi

Bir akıllı anten sistemi gezgin radyo kanalının uzamsal boyutunu kullanabilmek için gelen işaretleri dinamik bir şekilde işleyen M anten elemanını içerir. En basit durumda, farklı anten elemanlarından alınan işaretler karmaşık ağırlıklarla çarpılıp sonrasında bu terimler toplanmaktadır. Burada ağırlıklar dinamik olarak hesaplanmaktadır. Esasen antenin kendisi değil, işaret işlemeyi içeren anten sisteminin bütünü uyarlamalı veya akıllıdır. Anten diziliminin bütün M elementleri varolan kanal ve kullanıcı karakteristiklerine uyum sağlayabilmek için birleştirilmektedir (ağırlıklandırılmaktadır).

Bugünün akıllı antenleri çoklu antenlerin kullanımının yararlarını başarmak için farklı yöntemleri kullanmakta ve farklı şekillerde ortaya çıkmaktadır. Çoğu akıllı alıcı-verici sistemi geliş doğrultusunu belirlemek için alıcıda bir tür geliş doğrultusunun yaklaşımını kullanır. Alıcı daha sonra dizilimin ilişkili olduğu her bir elemanda analitik işaretin çarpıldığı karmaşık ağırlık çarpanlarını hesaplamak için bir algoritma kullanır (Tsoulos et al 1995). Bu işaretler daha sonra SINR'li geliştirmek için birleştirilir. Birleştirilen bu işaret BER performansının geliştirildiği bir demodülatöre geçirilir. Şekil 2.1 genelleştirilmiş akıllı anten mimarisini göstermektedir.



Şekil 2.1: Genel akıllı anten mimarisi.

Bu sistemde tüm yönlü anten elemanlarını içeren 4 elemanlı dizilim yüksek frekans RF işaretini alır. Bu yüksek frekanslı işaret örnekleme için uygun bir ara frekansa (IF) dönüştürülür. Dizilimde, sayısal işaret işleme işlemleri IF bandında yapılmaktadır. Dizilimin her bir elemanındaki analog IF işaretleri yüksek hızlı ADC'lerle sayısal biçime dönüştürülür ve bu örnekler geliş açısı doğrultusunu yaklaşık olarak hesaplamak için ışın şekillendirici bölümüne geçirilmektedir. İşaretlerin geliş doğrultuları yaklaşık olarak hesaplandığında, ışın şekillendirme ağırlıkları yine yaklaşık olarak hesaplanabilmekte ve dizilimin her bir elemanına uygulanabilmektedir. Bu RF işaretlerinin en uygun bir biçimde alınmasını ve iletilmesini sağlayan alıcı-vericinin anten örüntüsünü etkin bir şekilde düzenleyen karmaşık ağırlıkların uygulamasıdır. Son olarak ağırlıklandırılmış işaretler toplanır ve demodülatöre geçirilir.

2.4 Antenler

Fiziksel tasarımları büyük ölçüde değişebilmesine rağmen radyo antenleri, elektromanyetik enerjinin bir ortamdan (boşluk) diğerine (kablo, koaksiyel kablo veya dalga kılavuzu gibi) iletilmesi için kullanılmaktadırlar. Antenler aşağıda verildiği gibi sınıflandırılabilirler.

- Tüm yönlü antenler (omni directional)
- Yönlendirilmiş antenler

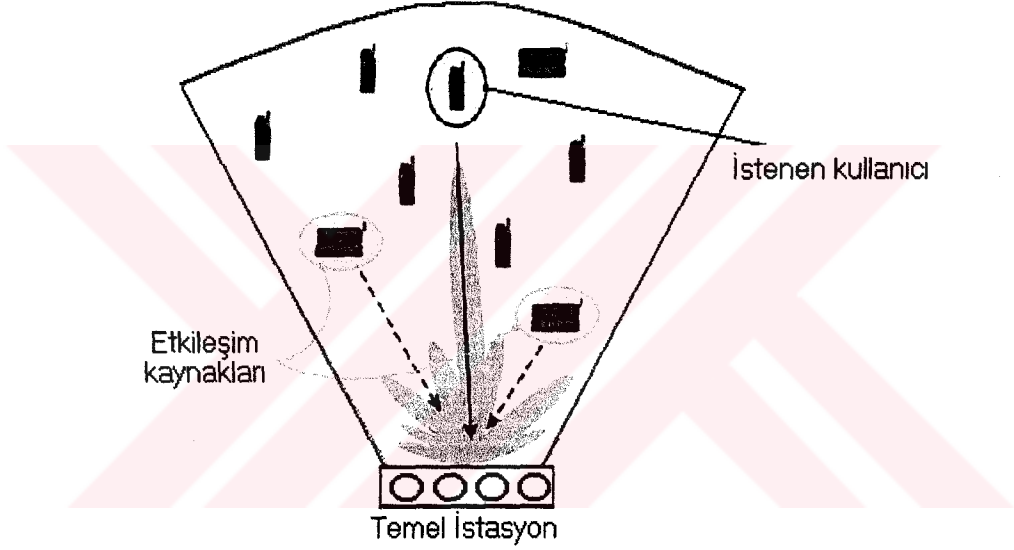
Bir anten nasıl daha akıllı yapılabilir? İlk olarak, fiziksel tasarımı daha fazla ilave elemanla değiştirilebilir. İkincisi, her başarılı elemanda iletim öncesi işaretleri kaydırmak için tasarlanabilen bir anten sistemi olmaktadır. Böylece anten birleştirici özelliğe sahip olur. Bu temel donanım ve yazılım düşüncesi faz dizilim anteni olarak bilinir.

Hücrelere daha akıllıca hizmet sunmak için çoklu antenlerin ve yeni işaret işleme teknikleri kullanımının gereği yıllardan beri bilinmektedir. Gerçekte göreceli olarak değişen açılarda pahalı akıllı anten sistemleri savunma sistemlerinde uzun süredir uygulanmaktadır. Son yıllara kadar, maliyet engelleri akıllı antenlerin ticari olarak kullanımına engel olmaktadır. Güçlü, düşük maliyetli sayısal işaret işlemcilerinin, uygulamaya özgül tümdevrelerin (ASIC) ve de yazılım tabanlı işaret işleme tekniklerinin (algoritmalarının) gelişimi hücresel iletişim sistemleri için pratik akıllı antenler düşüncesini ortaya çıkarmıştır.

Günümüzde, tayf kullanımı açısından verimli çözümlerin gereksinimi bir zorunluluk arz etmektedir. Bu sistemler her bir hücre yerleşimi için daha büyük kapsama alanı, daha yüksek etkileşimin önlenmesi ve azımsanmayacak miktarda kapasite geliştirmelerini sağlamaktadır.

2.4.1 Akıllı anten sistemleri

Gerçekte, antenler değil anten sistemleri akıllıdır. Genel olarak, baz (temel iletim) istasyonuna yerleştirilmiş bir akıllı anten sistemi, gelen işaretleri uyarlamalı, uzamsal duyarlı halde almak ve iletmek için sayısal işaret işleme kapasitesiyle bir anten dizilimini içerir. Diğer bir deyişle, işaretin geldiği konuma göre yayının örüntüsünün doğrultusunu otomatik olarak değiştirebilen bir sistemdir. Bu, özellikle, kablosuz sistemin kapasite gibi performans karakteristiklerini hissedilir bir şekilde arttırabilmektedir.



Şekil 2.2: Çoklu servis UMTS (Evrensel gezgin iletişim sistemi) servisinde akıllı anten örüntüsü (Symena).

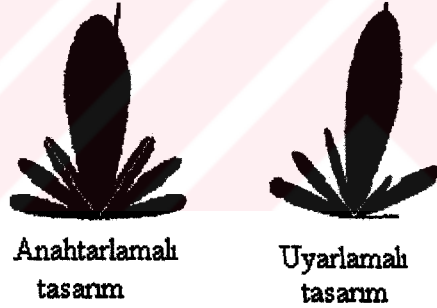
Ağırlıkların dinamik bir şekilde güncellenmesi akıllı antenlerin “akıllı” bölümüdür ve bu nedenle uyarlamalı (adaptive) antenler olarak da isimlendirilmektedirler.

Akıllı antenlerin en önemli avantajı daha yüksek ağ kapasitesi sağlayabilmeleridir. Yani, her temel istasyonun daha fazla kullanıcıya hizmet vermesi sağlanabilmektedir. Böylece, gezgin haberleşme operatör şirketlerinin geliri artmakta ve kullanıcıların görüşmelerinin kesilmesi veya temel istasyondan cevap alamama olasılığı azalmaktadır. İletim kapasitesi, istene kullanıcıların gücü arttırılarak ve etkileşim

azaltılarak da iyileştirilmektedir. Şekil 2.2’de örnek bir akıllı anten yapısı gösterilmektedir.

Akıllı anten sistemi teknolojisinin kabul edilen değişik görünüşlerinin bugün yaygınlıkla duyduğumuz terimleri, akıllı antenler, fazlı dizi, SDMA, uzamsal işleme, sayısal ışın şekillendirme, uyarlamalı anten sistemleri ve diğerlerini kapsamaktadır. Akıllı anten sistemleri ticari olarak, anahtarlama ışın (switched beam) ve uyarlamalı dizilim (adaptive array) sistemi şeklinde sınıflandırılmaktadır. Aşağıda, iletişim stratejisindeki seçimlerle ilgili olarak akıllı antenlerin bu iki kategorisi arasındaki farklılıkları verilmektedir.

- Anahtarlama ışın (Switched Beam): Sınırlı sayıda önceden tanımlanmış sabit örüntü veya stratejiyi birleştirme.
- Uyarlamalı dizilim (Adaptive Array): Gerçek zamanlı ayarlanabilen sınırsız sayıda örüntü.

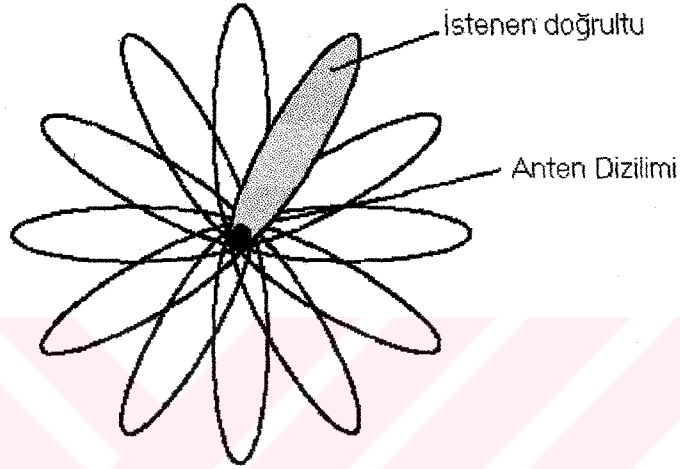


Şekil 2.3: Anahtarlama ışın ve uyarlamalı dizilim sistemleri aynı kullanıcı işaretlerini ve yan kanal etkileşimi seçebilir [7]. Yeşil, istenen kullanıcı, turuncu ise etkileşim doğrultusunu göstermektedir.

Şekil 2.3’de görüldüğü üzere, uyarlamalı yapıda etkileşim kaynaklarının anten cevabı anahtarlama yapıyla karşılaştırıldığında çok daha azdır.

2.4.1.1 Anahtarlamalı yönlendirilmiş antenler (Switched beam antennas)

Anahtarlamalı yönlendirilmiş anten sistemleri, doğrultuları, özellikle yükseltilmiş duyarlılıklarıyla çoklu sabit yönleri oluşturur. Bu anten sistemleri işaretin gücüne göre önceden belirlenen sabit yönlerin bir tanesini seçer ve işaretin geliş doğrultusu değiştiğinde bir yönden diğerine doğrultu dilimi (sector) boyunca hareket edip anten örüntüsünü değiştirir.



Şekil 2.4: Anahtarlamalı anten dizilimi kapsama örüntüsü.

Tek bir elemanın fiziksel tasarımıyla yönlü anten örüntü şeklinin yerine anahtarlamalı yönlendirilmiş sistemler, geleneksel tek eleman yaklaşımlarıyla başarılabilenden daha yüksek uzamsal seçicilikte, hassas bir şekilde yönlendirilerek oluşturulan çoklu antenlerin çıkışlarını birleştirir.

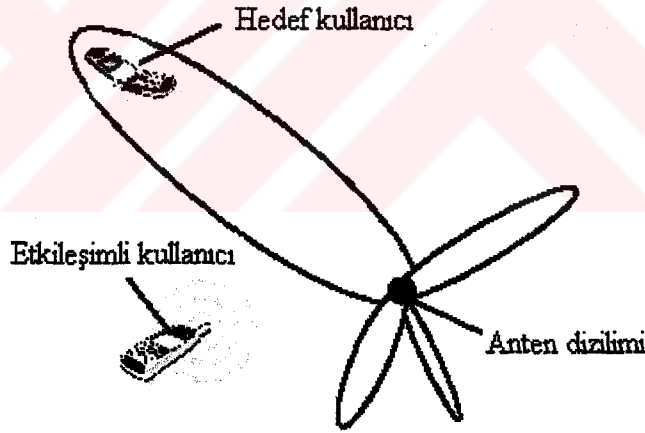
Anahtarlamalı yönlü sistem uzak kullanıcının kanalında en büyük çıkış gücüyle önceden kararlaştırılan birkaç sabit yön örüntüsünden (anten çıkışlarının ağırlıklı kombinasyonlarına bağlıdır) birini seçer. Bu seçimler RF veya temel bant DSP donanım ve yazılımı tarafından sürülür. Sistem, anten elemanlarını beslemek için kullanılan veya onlardan alınan işaretlerin faz farklarını değiştirerek yayılım ortamında farklı doğrultularda yönünü anahtarlar. Gezgin kullanıcı belirli bir mikro hücre doğrultusuna girdiğinde, anahtarlamalı yönlü sistem en güçlü işareti içeren mikro hücrenin doğrultusunu seçer. Görüşme süresince, sistem işaret gücünü izler ve gerekirse diğer sabit doğrultulara anahtarlar.

Akıllı anten sistemleri özel anten yön örüntüsü kullanarak doğrultusal olarak haberleşir. Bir akıllı anten kullanıcının doğrultusunda ayarlanmış kazancıyla ana demete (main lobe) yönlendiğinde, yan kulakçıklar (side lobes) ve ana demetten uzaktaki kulakçık doğrultularında orta ve minimum kazanç oluşmaktadır.

Farklı anahtarlamalı yönlü ve uyarlamalı (adaptif) akıllı anten sistemleri ana demet ve kulakçıkları doğruluk ve esnekliğin değişen açılarıyla kontrol eder.

2.4.1.2 Uyarlamalı anten dizilimleri (Adaptive antenna arrays)

Uyarlamalı anten teknolojisi, bugüne kadar en ileri seviye akıllı anten yaklaşımı olarak kabul edilmektedir. Yeni işaret işleme algoritmalarının bir çeşidini kullanarak, uyarlamalı sistem dinamik olarak etkileşimi en aza indirmek ve istenen işaret alımını en büyük yapmak için işaretlerin farklı türlerinin izini sürme ve yerini saptama yeteneği kazanmaktadır.



Şekil 2.5: İşaret etkileşim oranını iyileştiren uyarlamalı anten dizilimi kapsama örüntüsü (Devlin).

Uyarlamalı anten sistemi, uzamsal boyutu hesaba katarak kullanıcı ve temel istasyon arasında farklı bir yolda haberleşir. RF çevresi ve değişimlerine (veya işaretlerin uzamsal geliş yerlerine) ayarlandığında uyarlamalı anten teknolojisi kablosuz sistemin performansını en uygun yapabilmek için dinamik olarak işaret örüntülerini değiştirebilmektedir.

Uyarlamalı diziler, istenen işaretler, çoklu-yol ve etkileşim işaretleri arasında sürekli ayırım yapmak ve aynı zamanda bu işaretlerin varış doğrultularını hesaplamak için karmaşık işaret işleme algoritmalarını kullanır. Bu yaklaşım hem istenen işaretin hem de etkileşim işaretlerinin yer değişikliklerine bağlı iletim stratejisini sürekli olarak günceller.

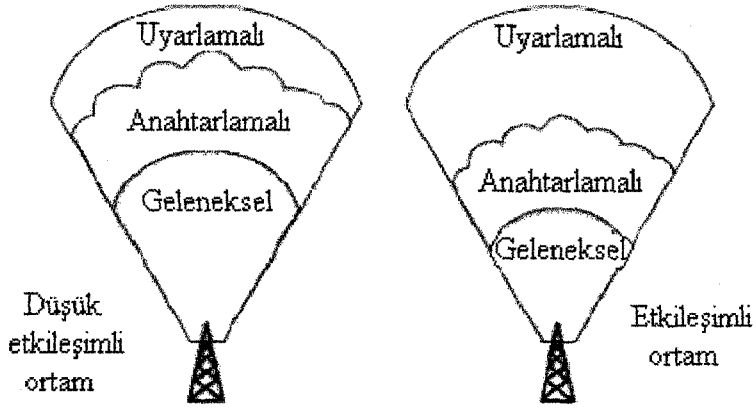
Ana demet (main lobe) ve etkileşimleriyle doğru düzgün bir biçimde kullanıcılara kanal ayırma yeteneği, alıcı-verici hattının sabit bir şekilde en büyük olmasını garanti eder. Çünkü hem önceden belirlenmiş doğrultular hem de önceden tanımlanmış örüntüler mevcut değildir.

Hem anahtarlama hem de uyarlamalı anten dizilimleri kullanıcının yerine göre kazancı artırma çabasıdadır, fakat sadece uyarlamalı sistem eşzamanlı tanımlama yapar, iz sürer ve etkileşim işaretlerini en aza indirgeyerek en uygun kazancı sağlar.

Anahtarlama yönlü ve uyarlamalı dizilim sistemleri birçok donanım karakteristiğini paylaşmasına rağmen, temel olarak kendilerinin uyarlamalı akıllılıklarıyla ayrılmaktadır.

Doğrultusal olarak duyarlı bilgiyi işlemek ve uyarlamalı bir şekilde işaret iletimini kontrol etmek için birleştirilen girişlerle anten elemanlarının bir dizilimi (tipik olarak 4-12) gerekmektedir. Anten elemanları doğrusal, dairesel veya planlanan konfigürasyonla düzenlenebilmektedir. Cep telefonlarında, dizüstü bilgisayarlarda da kullanılmasına karşın çoğunlukla temel istasyonlarda kullanılmaktadır.

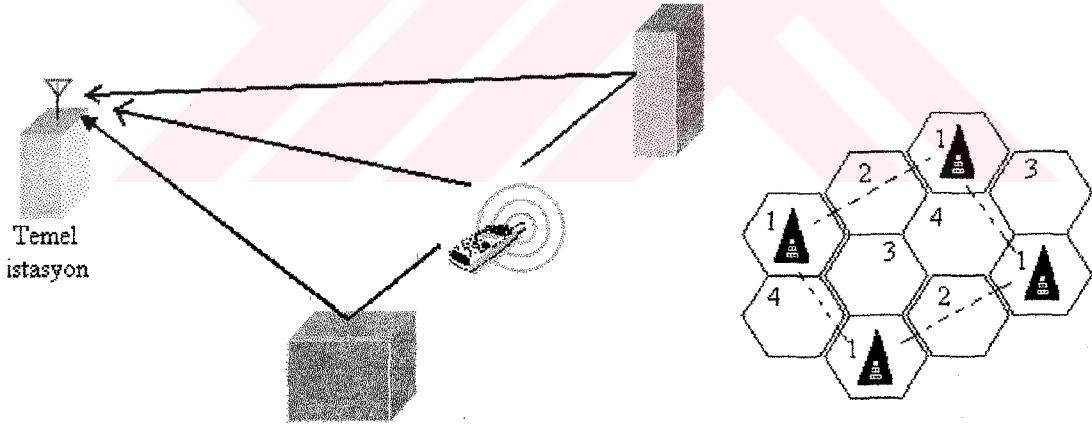
Şekil 2.6 geleneksel, anahtarlama yönlü ve uyarlamalı anten sistemleri için göreceli kapsama alanını göstermektedir. Akıllı anten sistemlerinin her iki türü tüm yönlü antenlerin kullanıldığı geleneksel anten sistemleri üzerinde büyük kazançlar sağlar. Soldaki etkileşimin düşük seviyesi daha düşük nüfuz etme seviyeleriyle yeni bir kablosuz sistemi gösterir. Sağdaki etkileşimin önemli miktardaki seviyesi daha çok kullanıcı bir kablosuz sistemi ya da frekans tekrar kullanım örüntüsünün çok daha karmaşık olduğu bir kablosuz sistemi gösterir. Bu senaryoda uyarlamalı sistemin etkileşim engelleme kapasitesi hem geleneksel hem de anahtarlama yönlü sistemden önemli derecede daha iyidir ve daha çok kapsama alanı sağlar.



Şekil 2.6: Anahtarlamalı ve uyarlamalı anten dizilerinin kapsama örüntüleri [7].

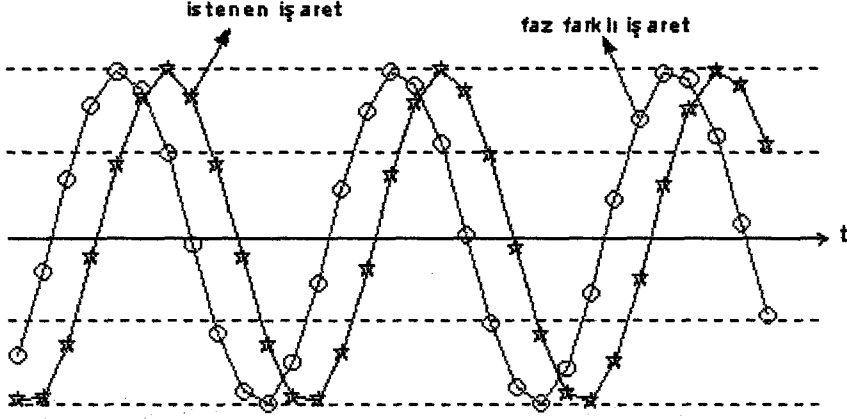
2.4.3 Çoklu yol ve komşu kanallar etkileşimi

Çoklu yol, iletilecek radyo işaretinin temel istasyon ve kullanıcı terminali arasında çoklu işaret yolları oluşturarak fiziksel özelliklerden veya yapılardan yansıması durumudur.



Şekil 2.7: Çoklu yol yayılım gecikmesinin etkisi ve hücresel gösterimde komşu kanal etkileşiminin gösterimi.

İstenmeyen yansıyan işaretlerden kaynaklanan bir problem alıcı istasyonuna ulaşan işaretlerin sıklıkla fazlarının eşleşmemesiyle ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.7'de alıcı tarafından görülen faz gecikmeleri nedeniyle oluşan işaretler, şekil 2.8'de ise çoklu yol etkisiyle oluşan işaretler gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Faz nedeniyle oluşan çoklu yol işaretleri.

2.4.4 Akıllı anten teknolojisinin kullanım alanları

Akıllı anten teknolojisi kablosuz sistem performansını önemli derecede geliştirebilmektedir. Bu durum, işaretle önemli miktarda kalite, kapasite ve kapsama alanını arttırmayı gerçekleştirmek için kablosuz yerel çevrim (WLL) ağları, hücresel ve kişisel iletişim sistemi (PCS) operatörlerini yetkilendirir. Operatörler sıklıkla farklı zamanlarda bu avantajların farklı bileşimlerini gerektirir. Bunun sonucunda, konfigürasyon ve yeniden güncellenebilirliğiyle ilgili en büyük esneklikleri sunan bu sistemler uzun zaman çözümlerinde en verimli maliyete sahiptirler [7].

2.4.4.1 Uygulanabilecek standartlar

Akıllı anten sistemleri bazı değişikliklerle tüm kablosuz protokol ve standartlara uygulanabilirler. Bu standartlar Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Uygulanabilir standartlar

erişim yöntemi	analog - frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) (örneğin AMPS, TACS, NMT)
	sayısal - zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) (örneğin GSM, IS-136) ; kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) (örneğin IS-95)
çift yönlü yöntemler	frekans bölmeli iki yönlü haberleşme (FDD) ; zaman bölmeli iki yönlü haberleşme (TDD)

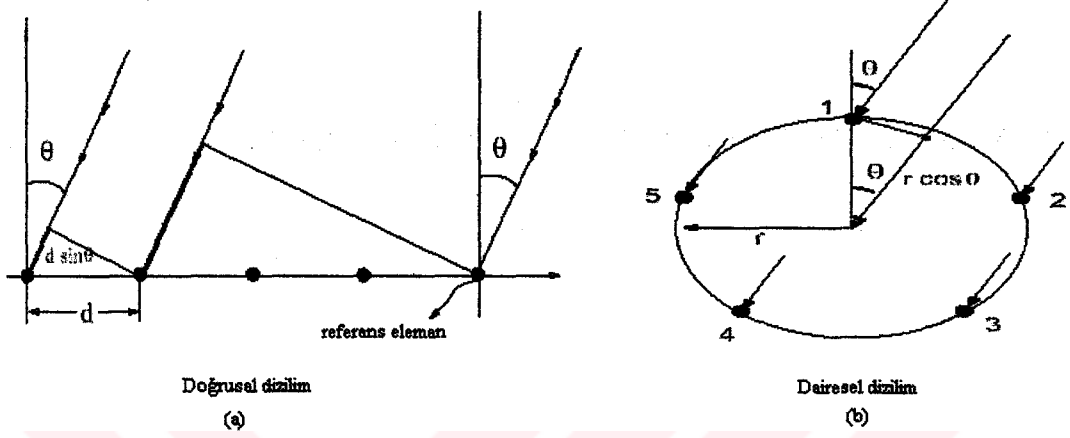
BÖLÜM 3. ANTEN DİZİMLERİ VE IŞIN ŞEKİLLENDİRME

3.1 Giriş

Gezgin radyo alımını zorlaştıran temel iki faktör çoklu-yol zayıflaması ve komşu kanal etkileşimlerinin varlığıdır. Akıllı antenlerin kullanımı bu etkileşimli çevrelerde performansı arttırabilmektedir. Akıllı antenler genel olarak iki kategori şeklinde sınıflandırılmaktadır, bunlar faz dizimleri ve çeşitleme dizimleridir. Faz dizilimindeki elemanlar yarım dalga boyundan daha küçük veya eşit aralıklarla yerleştirilirken, çeşitlilik dizilimindeki elemanlar çok daha büyük aralıklarla yerleştirilir. Bunun sonucunda, faz dizilimi için alınan işaretin bir düzlem dalgası varsayımı doğru, fakat çeşitlilik dizilimi için doğru değildir. Bir faz dizilimi ortak sabit bir noktaya referanslı, bilinen yerlere uzamsal olarak dağılmış anten elemanlarının kümesini içerir. Her bir anten elemanındaki akımın genlik ve fazını değiştirerek herhangi bir doğrultuda kazanç sağlamak ve sıfır (null) oluşturmak mümkündür (Pillai 1989). Bu elemanlarda alınan işaretler tipik olarak temelbantta karmaşık ağırlıklar kullanılarak birleştirilmektedir. Uyarlamalı (adaptive) algoritmalar, çıkıştaki işaret-gürültü oranının (SNR'nin) en büyük yapılması gibi bazı optimizasyon kriterlerine bağlı olarak ağırlıkları uygun yapmak için kullanılabilir. Ayrıca çıkıştaki işaret-etkileşim gürültü oranının (SINR'nin) en büyük yapıldığı algoritmalar da vardır. Bu sistemde biz istenilen kullanıcı doğrultusunda anten örüntüsünün kazancını en büyük, etkileşimin doğrultusunda en küçük yaparak istenilen ışın şekillendirme işlemini gerçekleştirmiş oluruz.

Anten elemanları için değişik dizilim geometrileri mevcuttur. Bunların en yaygın olanları doğrusal, dairesel ve düzlemsel dizimlerdir. Doğrusal bir dizilimde bütün dizi elemanlarının merkezleri düz bir hatta dizilmiştir. Eğer elemanlar arasındaki boşluk aynı olursa düzgün dağılımlı doğrusal dizilim olarak isimlendirilmektedir. Dairesel bir dizilimde, dizilim elemanlarının merkezleri bir daire boyunca uzanır.

Diğer taraftan dizilim elemanlarının merkezleri aynı düzlemde uzanırsa düzlemsel dizilim olarak isimlendirilir. Doğrusal ve dairesel dizilimler düzlemsel dizilimin özel durumlarıdır. Şekil 3.1'de doğrusal ve dairesel dizilime ilişkin gösterimler verilmektedir.



Şekil 3.1: (a) Elemanlar arası mesafenin d olduğu düzgün dağılımlı doğrusal dizilim.

Referans eleman en sağdaki eleman olarak alınmıştır.

(b) Dairenin yarıçapının r olduğu düzgün dağılımlı dairesel dizilim.

Referans eleman dizilimin merkezine yerleştirilmiş sanal bir eleman olarak alınmaktadır.

Dizilimin yayınım örüntüsü, elementlerin teker teker yayınım örüntüsü, onların boşluktaki yönleri ve besleme akımının fazı ve genliği tarafından belirlenir. Eğer dizilimin her bir elemanı izotropik (bütün doğrultularda aynı özelliklere sahip) bir kaynak olursa, yayınım örüntüsü sadece dizilim geometrisine ve besleme akımına bağlı olacaktır. Elde edilen bu yayınım örüntüsü dizilim etkeni olarak isimlendirilir. Dizilimin elementleri benzerse ve izotropik değilse, yayınım örüntüsü dizilim etkeninin ve teker teker eleman örüntüsünün üretimi gibi yayınım hesaplama ilkesinden hesaplanmaktadır (Stutzman and Thiele 1981).

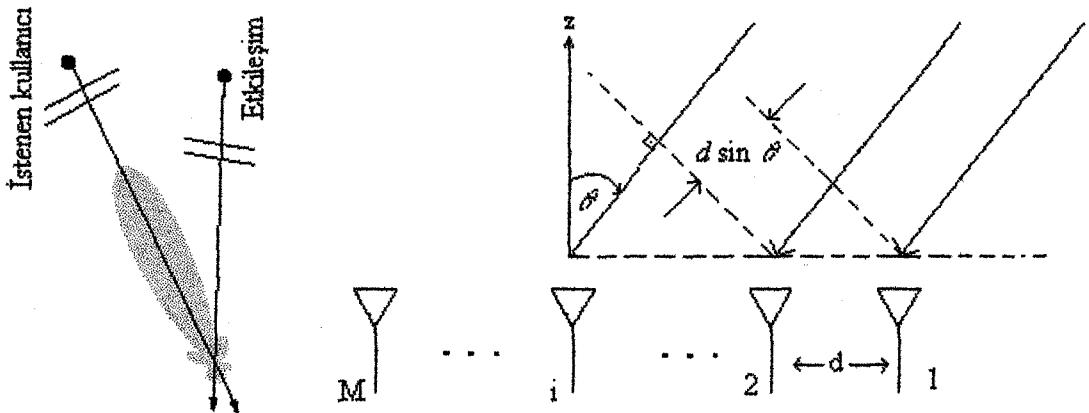
Bu çalışmada, elementler arası uzaklığın sabit olduğu, yani, eşit aralıklı düzgün dağılımlı doğrusal dizilimler incelenmiştir.

3.1.1 Faz ve çeşitlilik dizilimleri arasındaki farklılık

Gezgin kablosuz kanallarda, faz dizilimleri tipik olarak etkileşim iptali olarak kullanılırken, çeşitlilik dizilimleri çoklu-yol zayıflama etkisi için kullanılmaktadır. Çeşitlilik dizilimlerinde elemanların istenilen kadar ayrı yerleştirilememesinden dolayı (tipik olarak $10\lambda'$ 'dan büyük) anten elemanlarında görünen zayıflama ilişkisi veya biraz ilişkilidir. Çeşitlilik (çeşitleme) antenlerinin arkasındaki temel fikir bu ilişkisiz (veya biraz ilişkili) dallar dip zayıflama deneyiminin eş zamanlılığı çok düşük olasılığa sahip olacaktır. Bu daha çok elemanlara sahip olma, en azından bilginin güvenli çözülmesi için yeterli SNR'yi üretecek bir elemanın olasılığını artırır. Ek olarak, çeşitlilik dizilimlerinde, dizilim cevabının geometrik yorumlaması yoktur ve ışınım örüntüsünün değeri geçersizdir. Buna rağmen, çok önemli bir sonuç, çeşitlilik dizilimlerinde kullanılan birleştirici yaklaşımlar faz dizilimlerinde kullanılan ışın şekillendirme yaklaşımlarına benzerdir; çünkü, bu algoritmaların bir kısmı aynı optimizasyon kriterine sahiptir. Böylece SNR'yi en büyük yapmak için faz dizilimlerinde kullanılan ağırlıklar temel olarak çeşitlilik dizilimlerinde en büyük oran birleştirici (MRC, Maximum Ratio Combining) çözümüyle aynıdır.

3.2 Düzgün Dağılımlı Doğrusal Dizilim

Şekil 3.2, 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.



Şekil 3.2: Gelen dalga yüzeyini gösteren düzgün dağılımlı doğrusal anten dizilimi.

θ açısı geliş açısı veya geliş doğrultusu (DOA) olarak isimlendirilir ve z eksenine göre ölçülmektedir. Referans elemanında alınan işaretin (bant geçiren) ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\tilde{x}_1(t) = s(t) \cos(2\pi f_c t + \alpha(t) + \gamma) \quad (3.1)$$

Burada, $s(t)$ zayıflama (fading) kanalı tarafından zarar görmüş veya görmemiş alınan işaretin genliği, f_c taşıyıcı frekansı, $\alpha(t)$ faz bilgisi ve γ kanal yüzünden oluşan gelişigüzel faz değeridir. Yukarıdaki işaretin karmaşık zarf gösterimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tilde{x}_1(t) = s(t) \exp\{j\alpha(t) + \gamma\} \quad (3.2)$$

Alınan işaret ve onun karmaşık zarfı arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.

$$x_1(t) = \text{Re} \left[\tilde{x}_1(t) \exp(j2\pi f_c t) \right] \quad (3.3)$$

Şimdi, çok uzak mesafeden kaynaklanan işaretleri düşünelim; bu durumda işaretle ilişkili dalga yüzeyi sadece yayılma gecikmesi oluşturan dağıtmasız ortam boyunca ilerlemektedir. Bu nedenle herhangi bir elemandaki işaret, referans elemanındaki işaretin zaman ilerlemeli veya zaman gecikmeli bir versiyonu olarak açıklanabilmektedir. Şekil 3.2'den referans elemanındaki işaret ikinci elemana ulaşmak için $d \sin \theta$ mesafesi kadar daha fazla yol alacaktır. Buna karşılık zamandaki gecikme

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{v} \quad (3.4)$$

şeklinde verilebilir. Elektromanyetik işaretler örnekleme frekansı ile karşılaştırıldığında çok büyük bir yayılım hızına (v) sahiptir ve bu hız ihmal edilebilir bir hatayla sabit varsayılabilir. Bu sabit hız ışığın boşluktaki hızıdır. Havanın kırılma indisinden dolayı ışığın havadaki hızı gerçekte ışığın boşluktaki hızıyla aynı değildir fakat çok yakındır.¹ Bir dalganın dalgaboyu $\lambda = v / f$ eşitliğiyle

¹ Havanın kırılma indisi standart sıcaklık ve basınçta (1 atm basınç ve 0°C sıcaklık) nominal olarak 1,000293'tür. Bu da yaklaşık olarak ışığın havadaki hızının 0,99971c'ye eşittir. Daha düşük basınçlarda ve daha yüksek sıcaklıklarda bu hız artacaktır.

verilmektedir. Burada v dalganın hızı, λ dalgaboyu ve f frekanstır. Buradaki hız terimi için c ışık hızı düşünülecektir.

Burada c ışığın hızıdır, ikinci elemandaki işaret

$$\tilde{x}_2(t) = \tilde{x}_1(t - \tau) = s(t - \tau) \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \alpha(t - \tau) + \gamma) \quad (3.5)$$

şeklinde verilmektedir. Eğer taşıyıcı frekansı mesaj işaret bant genişliğiyle karşılaştırıldığında büyükse, alınan işaret sözde statik yani frekansı sabit düşünülebilir ve böylece yukarıdaki eşitlik

$$\tilde{x}_2(t) = s(t) \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \alpha(t) + \gamma) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir.

Buradan alınan işaretin karmaşık zarfı

$$\tilde{x}_2(t) = s(t) \exp(j(-2\pi f_c \tau + \alpha(t) + \gamma)) \quad (3.7)$$

$$= \tilde{x}_1(t) \exp(-j2\pi f_c \tau) \quad (3.8)$$

Buradan görülüyor ki, yayılma gecikmesi nedeniyle oluşan zaman farkı, referans elemanındaki faz kayması şeklinde görülebilmektedir.

(3.8) nolu eşitlikte (3.4) nolu eşitlik kullanıldığında,

$$\tilde{x}_2(t) = \tilde{x}_1(t) \exp(-j2\pi f_c \frac{d \sin \theta}{c}) \quad (3.9)$$

$$= \tilde{x}_1(t) \exp(-j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}) \quad (3.10)$$

eşitlikleri elde edilir.

Buna göre dizilimdeki herhangi i . element için, alınan işaret

$$\tilde{x}_i(t) = \tilde{x}_1(t) \exp(-j2\pi(i-1) \frac{d \sin \theta}{\lambda}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir.

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]^T \quad (3.12)$$

$$a(\theta) = \left[1, \exp\left(\frac{j2\pi d \sin \theta}{\lambda}\right), \dots, \exp\left(\frac{j2\pi(m-1)d \sin \theta}{\lambda}\right) \right]^T \quad (3.13)$$

eşitliklerini tanımlayalım.

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

$$y(t) = a(\theta)x_1(t) \quad (3.14)$$

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. Düzgün dağılımlı doğrusal dizilim düşünüldüğü için dizilim etkeni analitik olarak belirlenebilmesine rağmen, pratik olarak değişik açı ve frekanslar için dizilim cevabının kaynak noktası olarak ölçülmektedir. Kazanç sağlamak için dizilim etkeninin bu şekilde kullanılabilmesi dizilim kalibrasyonu olarak isimlendirilir. Yukarıdaki incelemelede, geliş işaretinin bant genişliğinin tersi dizilim boyunca yayılımdan çok daha büyük varsayılmaktadır. Bu, dar bant işaret varsayımı olarak isimlendirilir.

Aynı f_c merkez frekansı ve farklı θ_i geliş açılarıyla, anten dizilimine ulaşan k giriş işaretinin $[s_1(t), s_2(t), \dots, s_k(t)]$ olduğunu düşünelim. Bu durumda giriş veri vektörü bütün işaretlere ve gürültüye etki ederek üst üste binmesi gibi (superposition) düşünülebilir. Bu giriş veri vektörü aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$y(t) = \sum_{j=1}^k a(\theta_j)s_j(t) + n(t) \quad (3.15)$$

Yukarıdaki eşitlikte $a(\theta_j)$ her işarete karşılık düşen dizilim vektörü ve $n(t)$ gürültü bileşeninin $M \times 1$ boyutlu vektörüdür. Yukarıdaki ifade matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y(t) = A(\theta)s(t) + n(t) \quad (3.16)$$

Burada $A(\theta)$ yönlendirme vektörlerini içeren $M \times k$ boyutlu doğrultu matrisi ve $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_k(t)]^T$ 'dir. Bizim ilgilendiğimiz genel ışın şekillendirme

problemleri, alınan işaret vektöründen ($y(t)$) giriş işaretlerini ($s(t)$) belirlemektir. Bu ışın şekillendirme algoritmaları ileriki bölümlerde anlatılacaktır.

3.3 Işın Şekillendirme

Uzamsal olarak işaretlerin yayını, etkileşim işaretlerinin ve gürültü işaretinin varolmasıyla zorlaşmaktadır. Sıklıkla, gezgin kablosuz ortamlarda, istenen işaret ve etkileşimi aynı frekans bandını paylaşır. Eğer işaretler CDMA sistemindeki gibi düşük korelasyona (ilişki) sahip değillerse, geçici işleme, etkileşim iptalinde verimli olmayacaktır. Fakat istenen işaret ve etkileşimi farklı doğrultulardan gelmektedir ve bu nedenle farklı geliş açılarına sahiptirler. Işın şekillendirme, istenen kullanıcının doğrultusu boyunca ışınlarını (beam) toplarken eş zamanlı olarak diğer doğrultulardan kaynaklanan işaretleri bastıran bir işlemdir. Buradan ışın şekillendirme işaretlerin uzamsal özelliklerini kullanarak işaretlerin uzamsal süzgeçlenmesi gibi de düşünülebilmektedir. Diğer bir deyişle ışın şekillendirme eleman dizilimi kullanarak işaretlerin uzamsal olarak ayırt edilmesine izin veren bir işaret işleme tekniğidir. Işın şekillendirme tekniğinin tipik kullanım alanları arasında radar, sonar, haberleşme, görüntü işleme ve biyomedikal bulunmaktadır.

Bir ışın şekillendirici geçici olarak örneklenmiş bilgiyi birleştiren FIR filtre gibi her anten elementinden gelen örneklenmiş veriyi birleştirir. Işın şekillendirici özel olarak sıralanmış bir eleman dizilimini içerir. Her elemanın çıkışı süzgeç işlemine tabi tutulmakta ve bütün elemanların süzgeçlenen çıkışları toplanmaktadır. Işın şekillendiriciler genelde dar bant ve geniş bant ışın şekillendiricileri olmak üzere iki çeşittir. Dar bant bir ışın şekillendirici Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Geniş bant ışın şekillendirme, darbant ışın şekillendirmede kullanılan aynı temel ilkeleri kullanır. Geniş bant ışın şekillendirme mantığını anlamak için uygulanabilen dar bant ışın şekillendirme sürecini anlamak zorunludur.

Dar bant ışın şekillendirme elektromanyetik işaretler ve küçük bant genişliğiyle ilgilidir. Gelen işaretler bir tek frekansa sahip gibi davranır. Böyle işaretlerin ışın şekillendirme türünü geniş banda göre daha kolay yapan birçok özellik vardır. Işın şekillendiricisinin çıkışı

$$z(k) = \sum_{i=1}^M w_i^* y_i(k) \quad (3.17)$$

şeklinde verilmektedir. Burada w karmaşık ağırlıkları istenen kullanıcı boyunca ışınımı (beam) yönlendirmek için kullanılmaktadır.

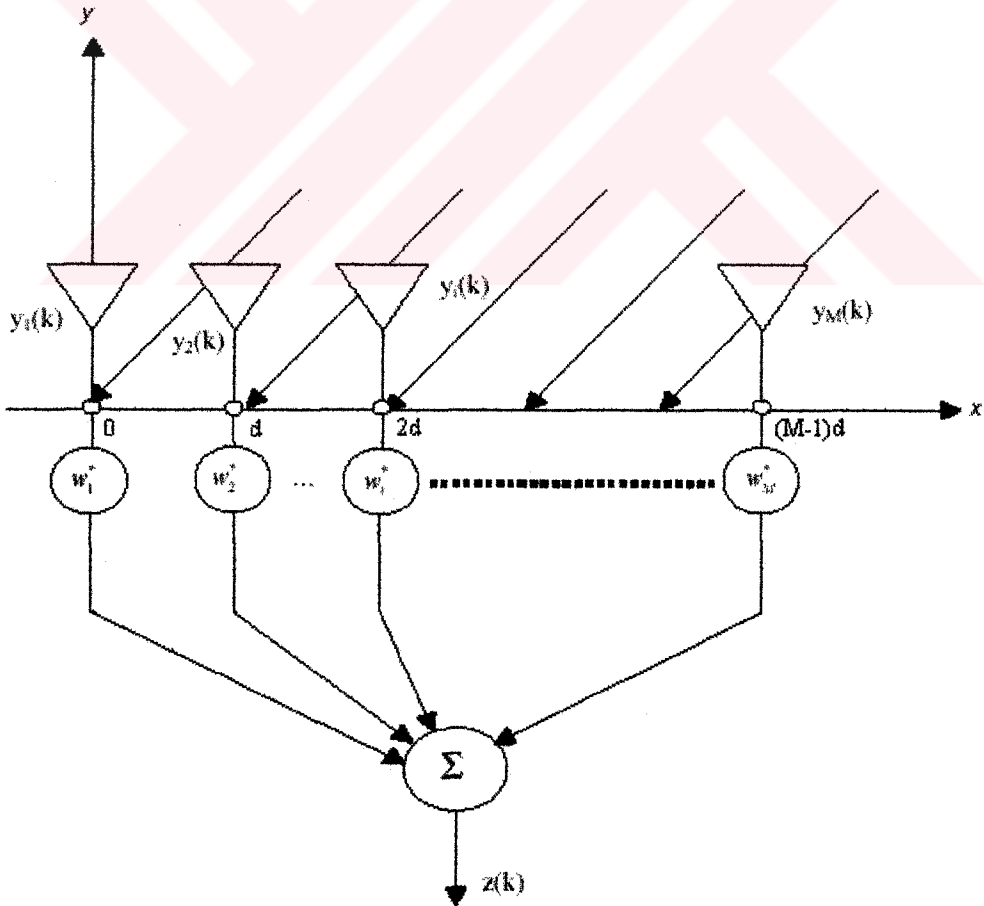
Yukarıdaki eşitlik vektör formu şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$z(k) = \begin{bmatrix} w_1^* \\ w_2^* \\ \vdots \\ w_M^* \end{bmatrix} [y_1(k) \ y_2(k) \ \dots \ y_M(k)]$$

$$= [w_1^* \ w_2^* \ \dots \ w_M^*]^T [y_1(k) \ y_2(k) \ \dots \ y_M(k)]$$

$$z(k) = w^H y(k) \quad (3.18)$$

Geniş bant bir ışın şekillendiricisi, ilgilenilen geniş bantlı işaretlerde sıklıkla kullanılmaktadır ve dar bant ışın şekillendiriciden daha karmaşıktır (Van Veen and Buckley 1988).



Şekil 3.3: Dar bant ışın şekillendirici (Philips et al 1999).

3.4 FIR Süzgecine Benzerlik

Bir ışın şekillendirici uzamsal bilgiyi kullanarak istenen kullanıcı işaretinden etkileşim işaretlerini ayırmak için kullanılmaktadır. Bu tekniğin FIR süzgecine benzerliğini kullanmak bize ışın şekillendiriciyi daha iyi kavrama olanağı sağlayacaktır. Bu noktayı göstermek için zaman domeninde sinusoidal işaretini yeniden elde etme problemini kullanacağız ve uzamsal domendeki ışın şekillendirme problemiyle karşılaştıracacağız.

$$x(t) = \sum_{i=1}^k b_i e^{(j2\pi f_i t + \phi_i)} + n(t) \quad (3.19)$$

Burada b_i , f_i ve ϕ_i i . sinüsoidal işaret için sırasıyla genlik, frekans ve fazına karşılık gelmektedir. $x(t)$, T_s örnekleme hızı ile örneklendiğinde, nT_s anlarındaki örneklenmiş işaret $x(n)$ aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$x(n) = \sum_{i=1}^k b_i e^{(j2\pi f_i (nT_s) + \phi_i)} + n(nT_s) \quad (3.20)$$

Bu örneklenen işaretin $(M-1)$ gecikme elemanlı bir FIR süzgecine beslendiğini varsayalım. nT_s anlarındaki gecikme elemanlarının süzgeç girişi ve çıkışı aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$x(n) = \sum_{i=1}^k a(f_i) s_i(n) + n(n) \quad (3.21)$$

$x(n)$, sürekli $x(t)$ işaretinin nT_s anlarındaki ayrık değerlerine eşittir.

Burada,

$$x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T \quad (3.22 a)$$

$$n(n) = [n(nT_s), \dots, n((n-M+1)T_s)]^T \quad (3.22 b)$$

$$a(f_i) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j2\pi T_s f_i} \\ \vdots \\ e^{j2\pi (M-1)T_s f_i} \end{bmatrix} \quad (3.22 c)$$

$$s_i(n) = b_i e^{(j(2\pi f_i (nT_s) + \phi_i))} \quad (3.22 d)$$

şeklindedir.

(3.22 c) ve (3.22 d) eşitliklerini (3.15) ve (3.16) eşitlikleriyle karşılaştırdığımızda ışın şekillendiricinin normalleştirilmiş element boşluğu d/λ geçici filtrenin T_s örnekleme periyoduna karşılık gelmektedir ve ışın şekillendiricinin geliş açısının (θ_i) sinüsü, FIR süzgeci girişinin geçici frekansına (f_i) karşılık gelmektedir.

Uyarlamalı dizilim tarafından gerçekleştirilen temel fonksiyon, alım veya iletim için özel bir doğrultuda tek bir yöne yoğunlaşmaktadır. Anten dizilimindeki işlem, zaman domenindeki ayrık işaretin FIR süzgeçlemesinin uzamsal karşılığı olarak görülebilir. FIR süzgeci ve düzgün dağılımlı doğrusal dizilimin işlevsellikleri benzerdir. FIR süzgecine zaman domeninde uygulanan Nyquist örnekleme teoremi, boşluk domeninde ışın şekillendiriciye uygulanabilmektedir. Nyquist örnekleme teoremi, örneklenen bir işaretin yeniden elde edilebilmesi için gerekli örnekleme frekansının sınır değerini vermektedir. Bu teoreme göre en yüksek frekans bileşeni f olan bant sınırlı bir işaret örnekleme oranının en az $2f$ olduğu durumda belirlenebilmektedir. Eğer $2f$ 'den daha düşük frekanslarda örnekleme yapılırsa katlanma (frekansta örtüşme) ortaya çıkacaktır. Boşluk domeninde örnekleme oranı normalize edilmiş eleman aralığının tersine ($1/(d/\lambda)$) eşdeğerdir ve en yüksek frekans bileşeni (f_i) 1'e karşılık gelmektedir ($\sin \theta_i \leq 1$). Böylece uzamsal Nyquist teoremi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\frac{1}{d/\lambda} \geq 2 \cdot 1 \Rightarrow d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (3.23)$$

Yukarıdaki ifadeden görüyoruz ki, uzamsal katlanmayı önlemek için elemanlar arası boşluk taşıyıcı dalga boyunun yarısından daha büyük olamaz. Frekans ortamındaki katlanmada olduğu gibi uzamsal katlanma da, farklı doğrultulardan gelen farklı iki işareti ayırmaya engel olmaktadır.

Tam tersine, elemanlar arası aralık çok yakın olduğunda ortak çiftleme etkileri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle aralık ortak çiftleme etkilerinden sakınmak için yeterince büyük olmak zorundadır. Düzgün dağılımlı doğrusal dizilimler için, eğer işaretler delik görme gücüne karşılık olarak eşlenik (complementary) açılarda geliyorsa katlanma hala ortaya çıkabilmektedir. Bu belirsizlik, doğrusal olanların yerine dairesel dizilimlerin kullanılmasıyla giderilebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen benzerliği kullanarak ışın şekillendirici cevabı (beamformer response) belirli bir f frekansının sinusoidal işareti için FIR süzgeci cevabına karşılığı kullanılarak belirlenebilmektedir.

FIR süzgecinin frekans cevabı, w_i^* ağırlıklarıyla ve $M - 1$ girişle aşağıdaki gibi verilebilir.

$$H(e^{j2\pi f}) = \sum_{i=1}^M w_i^* e^{-j2\pi T_s(i-1)} \quad (3.24)$$

FIR süzgecinde önceden tartışılan f ve T_s harmoniklerini tekrar elde etme problemi ışın şekillendirici için sırasıyla $\sin \theta$ ve d/λ 'ya karşılık gelmektedir. Böylece ışın şekillendirici cevabı, (3.24) eşitliğindeki karşılık gelen değerlerini yerine koyarak aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir.

$$g(\theta) = \sum_{i=1}^M w_i^* e^{-j \frac{2\pi(i-1)d \sin \theta}{\lambda}} \quad (3.25)$$

(3.25) nolu eşitlik belirli bir geliş açısı θ için ışın şekillendirici cevabını vermektedir. Böylece eğer farklı uzamsal yerlerden gelen bir kaç işarete sahipsek ve θ_i doğrultusundan gelen işareti ayırt etmek istiyorsak, doğru ağırlıkları bulmak zorundayız. Bunun için θ_i doğrultusunda ışın şekillendirici cevabı en büyük, diğer işaretlerin geliş doğrultularında ise en küçük olmaktadır.

3.5 Algoritma Seçimi

Gezgin radyo ortamlarında kullanıcılar hareketli olmaktadır ve bu yüzden kullanıcıların geliş doğrultuları zamanla değişmektedir. Kullanıcının işaretlerinin parametreleri de (yan kanal etkileşimi, gürültüsü ve kanalla ilişkili çoklu yol etkisi) zamanla değişmektedir. Sabit ağırlıklar zamanla değişen kanalın değişikliklerini izleyemeyecektir. Uyarlamalı bir anten dizisi değişen işaretlere göre ışınım örüntüsünü değiştirebilmektedir. Anten sistemlerinin bu türü, genellikle sistemin anten örüntülerini güncelleyebildiği bazı dahili geri beslemeyle çalışır.

Kullanılan ağırlıklar bazı uyarlamalı algoritmalar kullanılarak değiştirilmek zorundadır. Bu algoritmalar genellikle performans kriterini karşılamak için tasarlanmaktadır ve sonrasında performans kriterini karşılayan eşitlikleri elde edilmektedir. Sıklıkla kullanılan performans kriterlerinden bazıları; ortalama karesel hata (MSE, Mean Square Error), en büyük olabilirlik (ML, Maximum Likelihood), en büyük işaret gürültü oranı (MSNR, Maximum Signal to Noise Ratio) ve en büyük işaret etkileşim gürültü oranıdır. (SINR, Signal to Interference Noise Ratio)

Bu performans kriterleri, genellikle maliyet (cost) fonksiyonları gibi açıklanabilmektedir ve ağırlıklar maliyet fonksiyonlarının tersi en küçük olana kadar yinelemeli bir şekilde sisteme dahil edilebilmektedir. Maliyet fonksiyonu en küçük yapıldığında performans kriterinin gereksinimi karşıladığı kabul edilir ve algoritmanın bir noktada birleştiği yani belirli bir doğrultuya yönlendirme yaptığı söylenebilir.

Uyarlamalı algoritmayı seçerken algoritmanın birleştirme (yakınsama) oranı, karmaşıklığı ve dayanıklılığı gibi düşünülmesi gereken bir kaç faktör vardır. Birleştirme oranı algoritmanın bir noktada birleştirilmesi için gerekli yinelemelerin sayısıdır. Gezgın ortamlarda bir noktada birleştirme oranı önemlidir. Karmaşıklık, algoritmanın tasarımı için gerekli DSP çevrimlerinin sayısını belirlemeye ihtiyaç duyduğumuzda rol oynamaktadır. Ayrıca seçtiğimiz algoritma, giriş verisinin bozuk olabileceği durumlarda çalışabilecek uygunlukta olmalıdır (Venkatasubramanian 2003).

3.6 En Uygun Işın Şekillendirme

Dizilimde kullanılan karmaşık ağırlıklar alınan işaretin bazı özelliklerinin en uygun yapılabilmesi için hesaplanabilmektedir. Elde edilen ağırlıklar, mutlaka istenilen kullanıcı yönünde ışınım örüntüsünü en büyük yapmak için kullanılmazlar. Daha doğrusu ağırlıklar maliyet fonksiyonunu en uygun (optimum) yapmak için seçilirler. Uyarlamalı ışın şekillendirme, en uygun ışın şekillendirmenin bir yaklaşımıdır.

Eğer performans kriterini düşünürsek, alınan ve iletilen işaretler arasındaki ortalama karesel hatayı (Mean Square Error) minimum yapmak gerekmektedir. Minimum yapılması gereken maliyet (cost) fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$J = E \left[|d(n) - y(n)|^2 \right] \quad (3.26)$$

Buradaki $E[.]$ bir bütün gibi görülen bir ortalamayı göstermektedir.

Işın şekillendirici (beamformer) çıkışı için $y(n) = w^H x(n)$ 'i yerine yazıp, maliyet fonksiyonunun gradyentini alıp sıfıra eşitlersek aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$\nabla J = -2r_{xd} + 2R_{xx}w = 0 \quad (3.27 a)$$

$$R_{xx} = E \left[x(n)x(n)^H \right] \quad (3.27 b)$$

$$r_{xd} = E \left[x(n)d^*(n) \right] \quad (3.27 c)$$

Burada R_{xx} giriş $x(n)$ işaretinin $M \times M$ boyutlu ilişki (korelasyon) matrisidir. r_{xd} istenen işaret, $d(n)$ ve eleman girişleri arasındaki çapraz-ilişki (cross-correlation) vektörüdür. (3.27 a) eşitliğini çözerek MMSE için en uygun (optimum) ağırlıklar aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (3.28)$$

Yukarıdaki eşitlik Wiener-Hopf eşitliği veya en uygun Wiener çözümü olarak bilinmektedir.

3.7 Uyarlamalı Işın Şekillendirme Algoritmaları

Uyarlamalı algoritmalar, en uygun ağırlık hedeflerine yaklaşmak için, yinelemeli algoritmalar kullanarak dinamik ağırlıkları belirler. Takip eden bölümler en yaygın ve geniş bir şekilde kullanılan ışın şekillendirme tekniklerinden bazılarını özetlemektedir. Ağırlıkların dinamik bir şekilde hesaplanması işlemi ışın şekillendirme cevabını en uygun çözüme ulaştırmak için yapılmaktadır.

3.7.1 En küçük kareler yöntemi (LMS, Least Mean Squares)

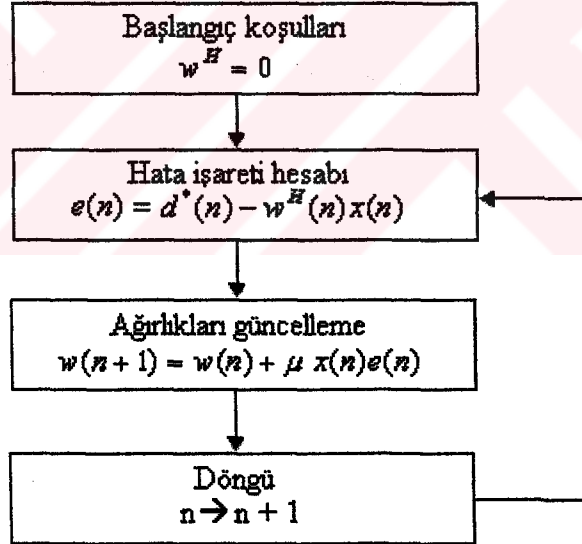
LMS algoritması dik iniş algoritmasını (steepest descent algorithm) kullanan MMSE ağırlık uyarlama algoritmasıdır. Ağırlık vektörleri aşağıdaki eşitlikleri kullanarak özyineli (recursive) bir şekilde hesaplanmaktadır.

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n)e(n) \quad (3.29)$$

Burada

$$e(n) = d^*(n) - z(n) = d^*(n) - w^H(n)x(n) \quad (3.30)$$

Yukarıdaki eşitlikte, μ adım büyüklüğüdür ve bir noktada birleştirme oranını belirler. μ 'nun seçimi korelasyon matrisine (R_{xx}) bağlıdır. LMS algoritması iletilen işaretin bilgisini gerektirir. Bu, genellikle, periyodik olarak bilinen bazı pilot işaretlerini alıcıya göndererek başarılmaktadır. Şekil 3.4'te LMS algoritmasına ilişkin akış şeması verilmektedir.



Şekil 3.4 LMS algoritması.

Bir uyarlamalı algoritmanın tek bir doğrultuda birleştirme oranı w 'nun w^* 'ya dönüştürme oranıdır. Hızlı bir birleştirme oranı, bant genişliği verimliliği için istenen bir özellik olan kısa eğitici dizisini sağlamaktadır. Bu konu LMS algoritmasının adım boyutuyla ilişkilidir ve genellikle μ ile gösterilmektedir (Haykin 2001).

Eğer μ küçük seçilirse, her bir yinelemede, w^* 'ya doğru daha küçük bir adım alınacaktır. Bu durumda algoritma daha düşük birleştirme oranına sahip olur. Fakat birleştirme noktasında w , w^* 'ya daha yakın olabilecektir. Bu durumun tersi olarak eğer μ büyük seçilirse tek bir noktada birleştirme oranı daha yüksek olacaktır, fakat birleştirme noktasındaki daha büyük dalgalanmalar w 'nun w^* 'dan daha çok sapmasına neden olacaktır. Bu algoritma bir geri besleme mekanizması içerdiği için adım büyüklüğünde bir üst sınır gereklidir. Adım büyüklüğünün bir kuralı olarak aşağıdaki ifade verilebilir (Filiz 2003).

$$0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}} \quad (3.31)$$

Burada λ_{\max} , $E[xx^H]$ 'un en büyük özdeğeridir (eigenvalue).

3.7.2 Özyineli en küçük kareler yöntemi (RLS, Recursive Least Squares)

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.

$$w(n) = w(n-1) + q(n)[d(n) - w^H(n-1)x(n)] \quad (3.32)$$

Burada,

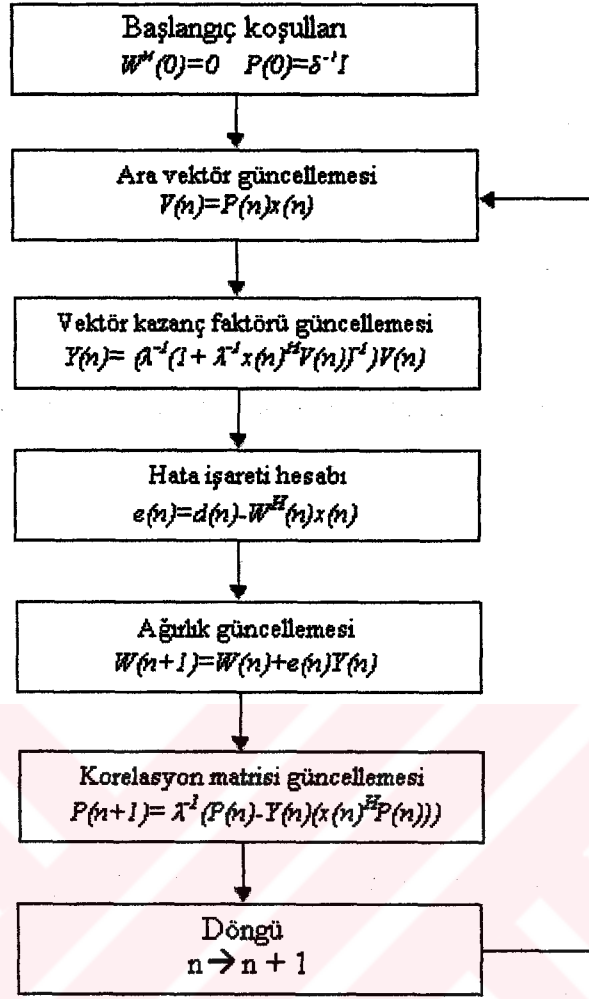
$$q(n) = \frac{\gamma^{-1} R_{xx}^{-1}(n-1)x(n)}{1 + \gamma^{-1} x^H(n) R_{xx}^{-1}(n-1)x(n)} \quad (3.33)$$

ve

$$R_{xx}^{-1}(n) = \gamma^{-1} [R_{xx}^{-1}(n-1) - q(n)x(n)R_{xx}^{-1}(n-1)] \quad (3.34)$$

şeklindedir.

RLS algoritması SINR'nin yüksek olmasını sağlayarak LMS algoritmasından 10 kez daha hızlı yönlendirme sağlayabilmektedir. Bu R_{xx}^{-1} 'in başlangıç yaklaşık matrisini ve referans işaretini gerektirir. Şekil 3.5'te RLS algoritmasına ilişkin akış şeması verilmektedir.



Şekil 3.5: RLS algoritması.

3.7.3 Doğrudan matris tersi (DMI, Direct Matrix Inversion)

Bu yöntemde, sınırlı bir aralık üzerinden veri örneklerinin (R_{xx} ve r_{xd}) hariç tutulduğu, en uygun ağırlık hesaplama eşitliği (3.28) kullanılmaktadır.

Böylece yaklaşıklıklar,

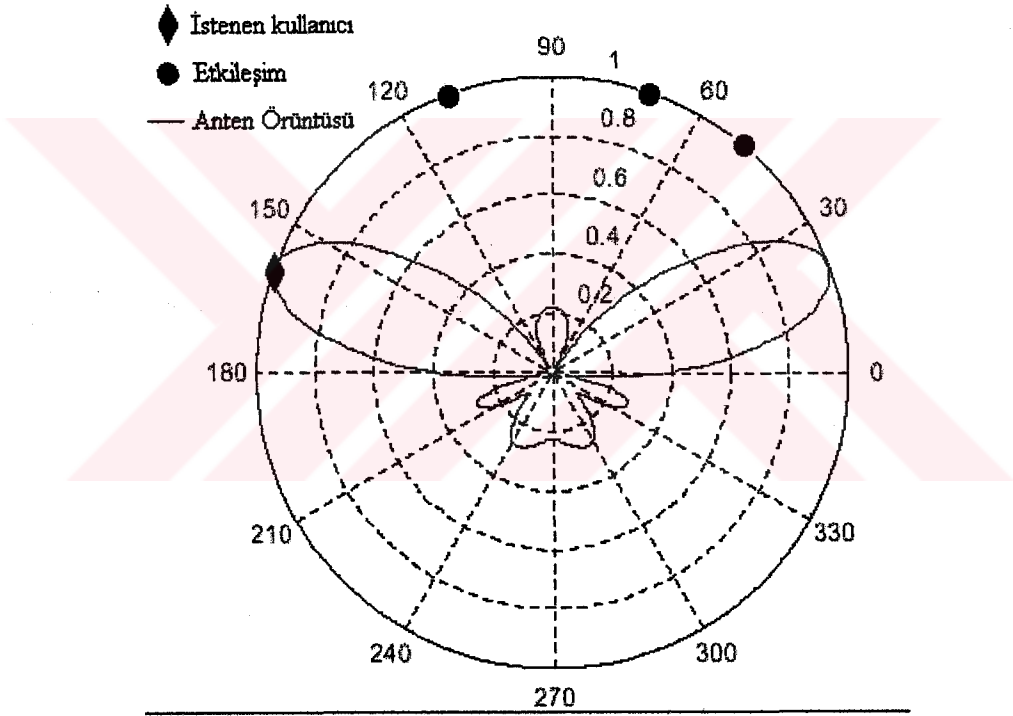
$$\hat{R}_{xx} = \sum_{i=N_1}^{N_2} x(i)x(i)^H \quad (3.35 a)$$

$$\hat{r}_{xd} = \sum d^*(i)x(i) \quad (3.35 b)$$

şeklinde verilmektedir.

DMI (Direct Matrix Inversion) algoritması LMS algoritmasından daha hızlıdır, fakat hesapsal olarak daha karmaşıktır.

Şekil 3.6, DMI algoritması kullanılarak elde edilmiş 4 elementli ışın şekillendiricinin ışınım örüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.6 'te açıkça görüldüğü üzere istenen kullanıcı yönünde eşzamanlı kazancı artırırken etkileşimin bulunduğu uzamsal yerlere sıfırları (null) yerleştirebiliyoruz. M elementli ışın şekillendirici için ideal olarak $(M-1)$ etkileşimi kaldırabileceğini varsayabiliriz. Yükleme dizi işleme algoritmalarına M 'den daha fazla etkileşim kaynağını kaldırmak istediğimizde ihtiyaç duyulabilmektedir (Venkatasubramanian 2003).



Şekil 3.6: 3 etkileşimli 4 elementli ışınım örüntüsü (DMI algoritması, (Venkatasubramanian 2003)).

3.7.4 Karar yönlendirilmiş algoritmalar (Decision Directed Algorithms)

Yukarıda incelenen algoritmaların hepsi iletilen işaretlerin bilgisini gerektirmektedir. Karar yönlendirilmiş algoritmalarda ağırlık, yukarıdaki tekniklerden herhangi biri kullanılmadan güncellenebilmektedir. Bu işlem referans işaret $y(n)$ 'i demodüle ederek gerçekleştirilmektedir. Bu durumda hiçbir harici referans gerekli değildir,

fakat bir noktada birleştirme garanti edilememektedir; çünkü, demodüle edilmiş $y(n)$ orijinal veri sembolleri $d(n)$ 'ye karşılık gelmeyebilir.

3.8 Çeşitlilik Birleştirmesi (Diversity Combining)

Yukarıdaki bölümlerde faz dizilimlerinin performansı ve etkileşim iptali için farklı ışın şekillendirme algoritmaları incelenmiştir. Ek olarak, değişik elemanlardan gelen işaretler, zayıflayan (fading) kanallarda performansı arttırmak için birleştirilebilmektedir. Takip eden bölümlerde, çok yaygın çeşitlilik birleştirme tekniklerinden bazıları incelenmektedir.

3.8.1 Seçim birleşimi (Selection Combining)

Seçim birleşiminde, en büyük SNR'li bölüm (dal) seçilmektedir ve bu elementin işareti kod çözme süreci için kullanılmaktadır. Bu nedenle elemanların sayısı arttıkça seçim birleşimi işleminin performansı artmaktadır. Şekil 3.7'de seçim birleşimine ilişkin yapı verilmektedir.

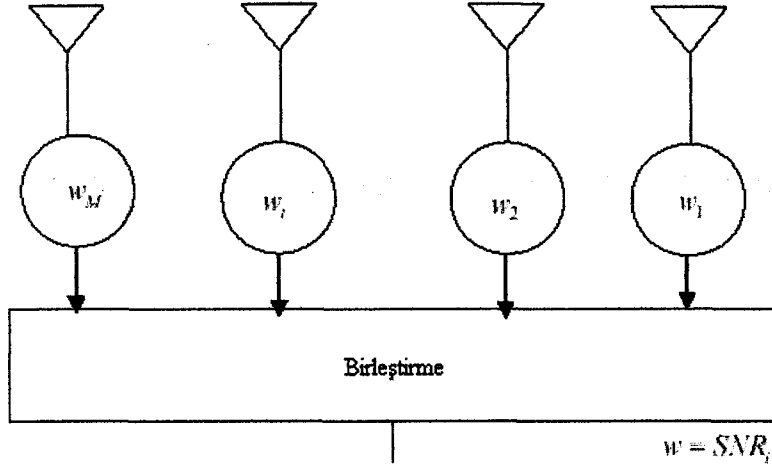


Şekil 3.7: Seçim çeşitliliği.

3.8.2 En büyük oran birleşimi (MRC, Maximal Ratio Combining)

MRC bütün bölümlerden (dallardan) sağlanan çeşitliliğin avantajından daha iyidir. MRC'de elemanlar, kendi anlık SNR'leriyle ağırlıklandırılır. Bölümler (her bir elemanın) toplama işleminden önce çeşitlilik birleşiminin en büyük avantajını getirmek (sağlamak) için ortak fazlı yapılmaktadır. Bu toplam işaret kod çözme süreci için kullanılmaktadır. MRC'nin performansı seçim birleştirmenin (selection

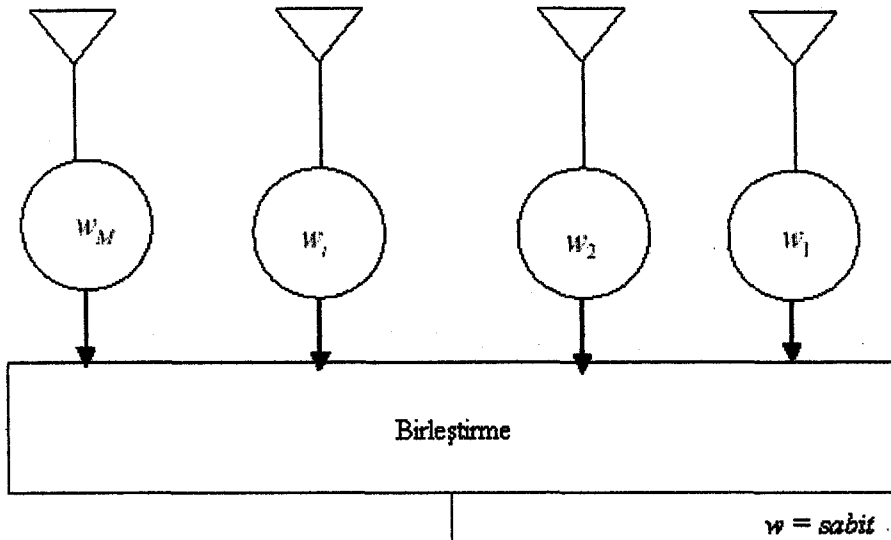
combining) performansından daha iyidir. Fakat, SNR yaklaşıklığı ve ağırlık güncellemeleri gerektirdiği için daha karmaşıktır. Şekil 3.8’de MRC tekniğine ilişkin yapı verilmektedir.



Şekil 3.8: Çeşitleme birleşimi.

3.8.3 Eşit kazanç birleşimi (EGC, Equal Gain Combining)

EGC, en büyük oran birleşimi tekniğinin sabit değerli bir ifadesidir. Ağırlıkların hepsi aynı değere ayarlanır ve bundan sonra değiştirilmez. Sonra işaretler MRC’deki gibi toplam sürecinden önce ortak fazlandırılır. Şekil 3.9’da EGC’ye ilişkin yapı verilmektedir.



Şekil 3.9: Eşit Kazanç Birleşimi.

Elemanların sayısı artırıldığında, çeşitleme birleştirme tekniklerinin performansı artmaktadır.

3.9 Özet

Bu bölümde uyarlamalı anten dizilimleri ve ışın şekillendirme teknikleri üzerindeki temel noktalar vurgulanmıştır. En uygun ışın şekillendirme ve uyarlamalı anten algoritmaları ve son olarak da çeşitleme birleştirme teknikleri tartışılmıştır.



BÖLÜM 4. UZAMSAL SÜZGEÇLEME TEKNİKLERİ

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 (Spatial Division Multiple Access, SDMA) düşüncesine temel teşkil eder ve BER performansını artırır (Loadman et al 2003).

Bu bölümde, zaman domeninde ışın şekillendirmeye bir giriş kullanılarak uzamsal olarak süzgeçlemeyi yani istenilen doğrultulardan gelen işaretlere duyarlı iken diğer doğrultulardan gelen işaretleri zayıflatan dizilim cevabı incelenmektedir. Bölümün sonunda, Matlab ile sayısal ışın şekillendirme yapısının bir benzetimi yer almaktadır.

Işın şekillendirme, tipik olarak sonar (akustik uygulamalar) (Honig et al 1995, Honig and Xiao 2001, Kapoor et al 1999) ve radar (elektromanyetik uygulamalar) (Kohn 1998, Lee and Tsai 2001, Lupas and Verdu 1989) uygulamalarıyla bilinmektedir. Bunun yanında haberleşme, astronomi, sismoloji ve diğer başka uygulamalarda da kullanılmaktadır.

4.1 3-Boyutlu Giriş Uzayı

Işın şekillendirme, istenilen doğrultulardan gelen işaretler üzerinde odaklanarak diğer doğrultulardan gelen işaretleri bastırmada diğer bir deyişle zayıflatmada kullanılan bir sayısal işaret işleme tekniğidir. Işın şekillendirme, alıcıların uygun bir düzende dizilimini kullanarak çoklu doğrultulara yönlendirme yapılabilmesine olanak sağlar. Bu özellik, ışın şekillendirmeye haberleşme, tıp ve askeri uygulamalar gibi konularda yaygın bir uygulama alanı sağlar.

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi r_m konumuna yerleştirilmiş üç boyutlu bir eleman dizilimi varsayalım. Gelen işaretin doğrultusu u birim vektörü tarafından belirlenmesine karşın alıcıların dizilimi u_0 doğrultusunda yönlendirilecektir.

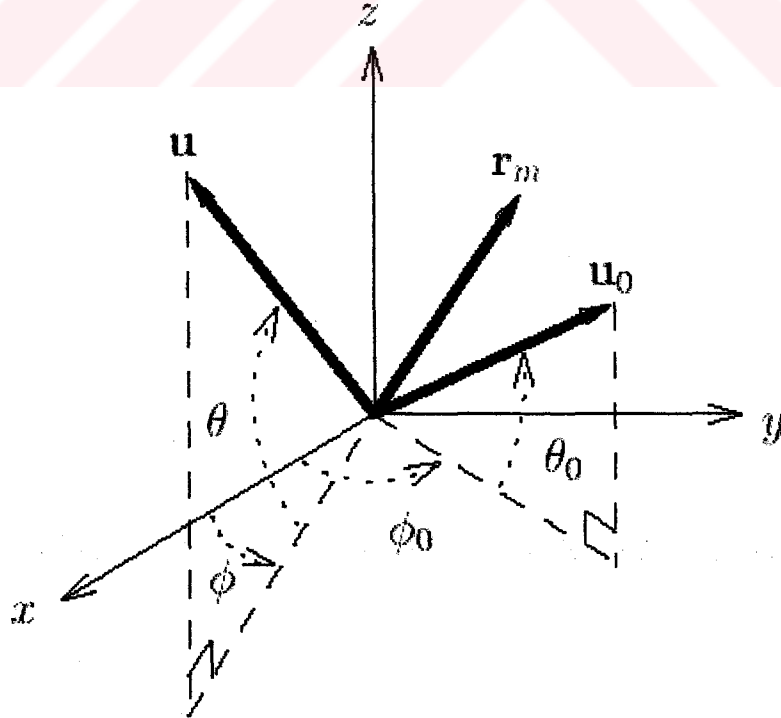
Alınan $x(t)$ işareti, genelde, nesnelere tarafından yansımalarla oluşan uzamsal bilgi içeren, darbe modülasyonlu sinüsoidal işareti göstermektedir.

$$x(t) = e^{j\omega t} \quad (4.1)$$

İşaret c ışık hızıyla açılma frekansı ω olan bir ortamda düzlem dalga şeklinde yayılmaktadır. Burada işaret kaynağı çok uzak varsayılmıştır ve böylece dalga düzlemleri dizilimde paralel olmaktadır. Gelen işaretin fazı, kaynağın uzamsal doğrultusu hakkında bilgi vermektedir. Buradan m . elemanda alınan işaret,

$$x_m(t) = e^{j(\omega t + kr'_m \cdot u)} \quad m = 0, \dots, M - 1 \quad (4.2)$$

şeklinde dir. Burada k ilgili dalga sayısını ($k = \omega/c$), m eleman indeksini göstermektedir.



Şekil 4.1: Üç boyutlu giriş uzayı sistemi (Hampson 1997).

4.2 Genel Işın 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 süzgecine eşdeğerdir (Hampson 1997).

$$y(t) = a.X(t) = x(t).a.e^{jkR} \quad (4.3)$$

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.

$$\begin{aligned} a &= [a_0 \dots a_{M-1}] \\ X(t) &= [x_0(t) \dots x_{M-1}(t)]^T = x(t).e^{jkR} \\ R &= [r_0 \dots r_{M-1}]^T \end{aligned} \quad (4.4)$$

Süzgeç katsayıları tarafından belirlenen a pencere fonksiyonu, bu noktada rastgele düşünülmesine rağmen, genelde ana demetin genişliğini ve yan kulakçıkların yüksekliğini kontrol etmek için kullanılan dikdörtgen, Blackman, Hamming ve Barlett (Miller and Schwartz 1995) tipi fonksiyonlar şeklindedir. Uygulama olarak, a matrisi için, önceki bölümde tanıtılan yönlendirme vektörü, dikdörtgen ve Blackman tipi pencere fonksiyonları kullanılmıştır.

4.2.1 Işının örüntüsü yönlendirme

Belirli bir doğrultuda u_0 yönlendirme veya uzamsal süzgeçleme, ilave alıcı çıkışları $X(t)$, eklenerek başarılmaktadır. Bu, ilk olarak alıcı pozisyon vektörlerinin r_m yansıması hesaplanarak gerçekleştirilmektedir (Hampson 1997).

$$R - R_0 = [\hat{r}_0 \dots \hat{r}_{M-1}]^T \quad (4.5)$$

Buradan, genel ışın şekillendirme eşitlikleri,

$$\begin{aligned} y(t, u_0) &= x(t).a.e^{jk(R-R_0)} \\ &= x(t).b(w, u_0) \end{aligned} \quad (4.6)$$

ve dizilimin uzamsal karakteristiklerini tanımlayan ışınım örüntüsü,

$$b(w, u_0) = a.e^{jk(R-R_0)} \quad (4.7)$$

şeklinde verilmektedir. R_0 her bir alıcının çıkışının gecikme sürecinde $u = u_0$ olduğunda u_0 doğrultusunda yönlendirme yapılmaktadır.

Dizilim geometrisi rastgele bir seçim olabilmektedir, fakat analiz ve tasarımının kolay olması nedeniyle, burada doğrusal dizilim dikkate alınacaktır.

4.3 Doğrusal Dizilim Geometrisi

Yaygın kullanılan dizilim geometrisi Şekil 4.2’de gösterildiği gibi iki boyutlu kutup üreten doğrusal dizilimdir. Burada örnekleme zaman aralıkları ve konum (yönlendirme doğrultuları) bulunmaktadır. Doğrusal dizilim, Şekil 4.3’te gösterildiği gibi d uzaklığıyla birbirinden ayrılmış düzenli bir sırada yerleştirilmiş M anten elementini içermektedir.

Dizilimin x -ekseni üzerinde yerleştirildiğini varsayarsak, m . alıcı konum vektörü:

$$r_m = [md \ 0 \ 0]^T \quad (4.8)$$

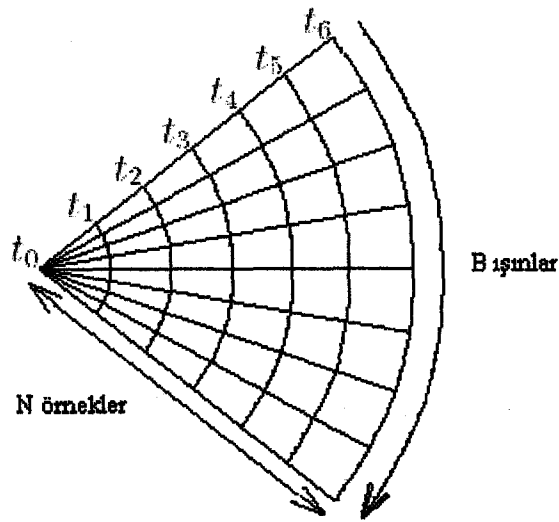
u üzerindeki m . alıcı konum vektörünün izdüşümü

$$r_m = r_m \cdot u = md \cos \phi \cos \theta \quad (4.9)$$

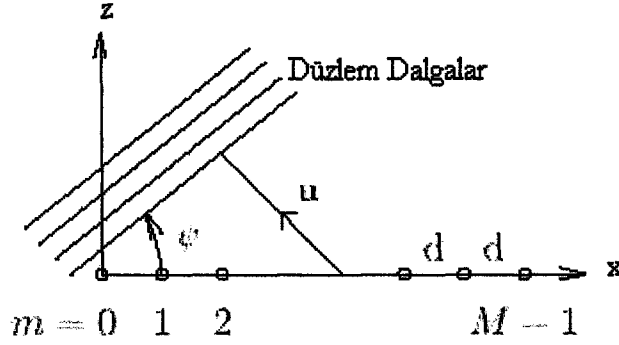
şeklinde olmaktadır. Burada alıcı çıkışları,

$$\begin{aligned} X(t) &= x(t) \cdot e^{jkR} = x(t) e^{jkmd \cos \phi \cos \theta} \\ &= x(t) \cdot e^{jkmd \sin \psi}, \quad m = [0 \ \dots \ M-1]^T \end{aligned} \quad (4.10)$$

olmaktadır.



Şekil 4.2: Doğrusal dizilimden elde edilen gösterim.



Şekil 4.3: Eşit aralıklarla yerleştirilmiş M elementli doğrusal dizilim (Hampson 1997).

(4.10) eşitliğinde gösterildiği gibi $\sin \psi = \cos \phi \cos \theta$ yerine konduğunda 3-boyutlu giriş uzayından ψ açısıyla tanımlanan 2-boyutlu uzaya dönüştürme yapılabilmektedir. Ek olarak ψ_0 yönlendirme doğrultusu kullanılarak izdüşüm, $R-R_0$, aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\hat{r}_m = r_m^T \cdot (u - u_0) = [md \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \sin \psi - \sin \psi_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = md(\sin \psi - \sin \psi_0) \quad (4.11)$$

$$R - R_0 = md(\sin \psi - \sin \psi_0) \quad (4.12)$$

Bu sonucu, genel ışın şekillendirme eşitliğinde (4.6) yerine yazarak doğrusal dizilim ışın şekillendirme eşitliğini elde ederiz.

$$y(t, \psi_0) = x(t) \cdot a \cdot e^{jkdm(\sin \psi - \sin \psi_0)} \quad (4.13)$$

bu eşitlikte (4.4) ifadesindeki $X(t)$ 'yi yerine yazabiliriz.

$$y(t, \psi_0) = a \cdot X(t) e^{-jkdm \sin \psi_0} \quad (4.14)$$

Bu ifade, verilen ψ_0 doğrultusunda anten örüntüsü cevabı en büyük yapılmış, faz kaymalı element çıkışlarının toplamını vermektedir.

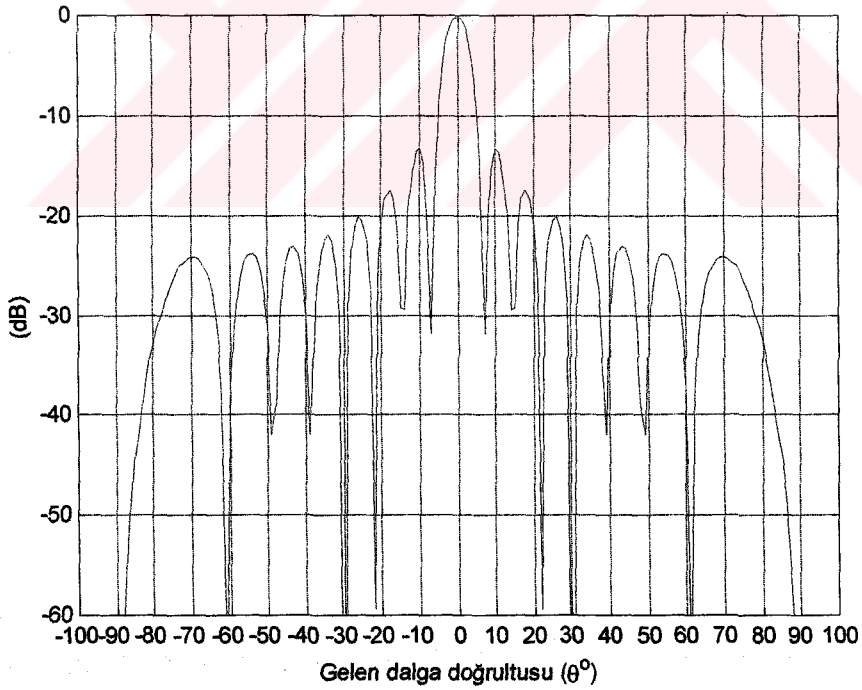
4.3.1 Doğrusal dizilim benzetim uygulaması

Matlab kullanılarak doğrusal dizilimin ışınım örüntülerini analiz etmek ve parametrelerle değişiklikleri gözlemek mümkündür. Burada ışınım örüntüsü hesaplanabilmekte ve çok sayıda giriş doğrultusu olmasına rağmen belirli bir doğrultuda yönlendirme yapılmaktadır. Işınım örüntüsü ve gücü grafiksel olarak

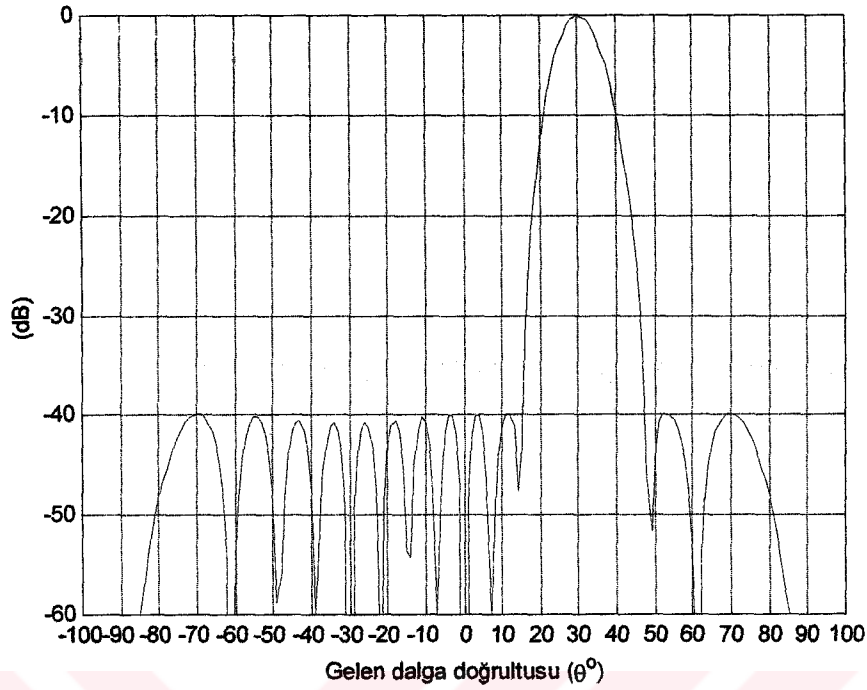
verilebilmektedir. (Verilen ışınım gücü grafiği 3dB güç seviyelerinin belirlenmesi için kullanışlıdır.)

Şekil 4.4, verilen bir frekans için, bütün dizilim elemanlarına eşzamanlı olarak ulaşmış bir düzlem dalgasına ait ışınım örüntüsünü göstermektedir. Elemanların çıkışları fazda tutarlı bir şekilde toplanmakta veya fazda en büyük kazancı oluşturmaktadır. Geliş açısı 0° den farklı olan açılarda zayıflatma uygulanmakta ve bunlar için fazda toplama yapılmamaktadır. Bu sayede, elemanların çıkışlarının toplanması ile dizilimde istenen uzamsal seçicilik özelliği başarılmaktadır. Işınım örüntüsünün ilk sıfır geçişleri arasındaki bölgesi ana demet olarak, geri kalan diğer bölgeler yan kulakçıklar olarak bilinmektedir.

Şekil 4.5, Hamming fonksiyonu ile ağırlıklandırılmış 30° lik geliş açısına sahip bir işaret için elde edilmiştir. Hamming pencere fonksiyonu ile yan kulakçıkların kazançlarının büyük ölçüde azaltılabildiği görülmektedir.



Şekil 4.4: $d = 0.5\lambda$ aralıklarla yerleştirilmiş $M = 16$ elementli doğrusal dizilim için ışınım örüntüsü ($f = 900.10^6 \text{ Hz}$).



Şekil 4.5: $M = 16$ elementli doğrusal dizilim için Hamming pencere fonksiyonu ile ağırlıklandırılmış ışınım örüntüsü.

4.4 Zaman Domeninde Işın Şekillendirme Yapısı

Bu bölüm, ışın şekillendirme algoritmalarının temelini oluşturan, (4.14) eşitliğindeki zaman domeninde ışın şekillendirme yapısını tanımlamaktadır. ψ_b doğrultusundaki uzamsal bilgiyi ayırt etmek için, ışınım örüntüsü, gecikmeli element çıkışlarının ($X(t)$) ağırlık vektörleriyle çarpılmış toplamını kullanarak b . yönlendirme doğrultusuna (u_b) yönlendirme yapılmaktadır.

Doğrusal dizilim tasarım eşitliğini (4.14) kullanarak m element ve b yönlendirme doğrultusu için zaman gecikmesi (veya faz kayması)

$$t_{mb} = r_m \cdot u_b = kdm \sin \psi_b \quad (4.15)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada t_{mb} , sürekli zaman gecikmesidir. $k = \omega/c$ eşitliğini kullanarak (4.15) ifadesi,

$$t_{mb} = \omega \frac{dm}{c} \sin \psi_b \quad (4.16)$$

şeklinde tekrar yazılabilir.

t_{mb} 'yi (4.14) ifadesinde yerine koyarak doğrusal dizilim ışın şekillendirme tasarım ifadesinin yeni bir yazılımını elde ederiz.

$$y_b(t) = a.X(t)e^{-j\omega t_{mb}} \quad (4.17)$$

Burada $y_b(t)$, b . yönlendirme doğrultusuna (ψ_b) karşılık gelen ışınım çıkışıdır. Eğer element işaretleri $f_s = 1/T_s$ örnekleme frekansı ile örneklenirse, ayrık zamanlı gecikme aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

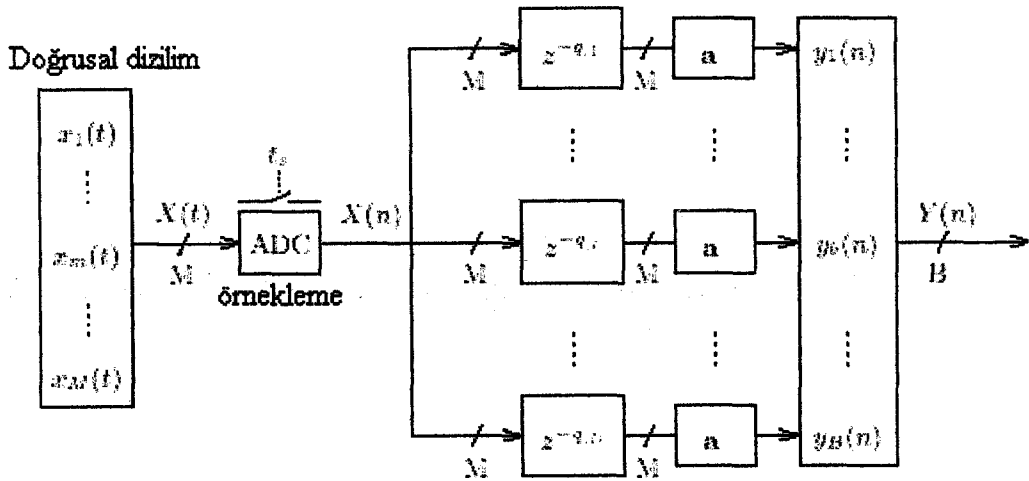
$$q_{mb} = \frac{t_{mb}}{T_s} = f_s t_{mb} \quad (4.18)$$

(4.17) ifadesinde ışın şekillendirici çıkışı için $t = nT_s$ (n : ayrık zaman indeksi) dönüşümünü yaparsak aşağıdaki ayrık zamanlı gösterim ifadesini elde etmiş oluruz.

$$\begin{aligned} y_b(n) &= a.X(n)e^{-j\omega T_s q_{mb}} \\ &= a.X(n)e^{-j\Omega_{mb} q_{mb}} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Burada $\Omega = \omega T_s = 2\pi \frac{f}{f_s}$ açısal frekanstır ve $y_b(n)$ ayrık zaman indeksi n için b . ışın şekillendirici çıkışıdır.

(4.19) eşitliği temel ayrık-zaman domenindeki gecikme-toplam ışın şekillendiricisi olarak bilinmektedir ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Gecikme toplam yapısı istenilen doğrultuların sayısı kadar (B) tekrarlanmaktadır. Burada dizilimden alınan işaretler örneklenmekte, gecikme işlemine tabi tutulmakta ve pencere vektörü değerleriyle çarpılmaktadır. Son olarak, bu çarpım terimleri toplanmaktadır.



Şekil 4.6: Zaman domeninde gecikme-toplam ışın şekillendiricisi (Hampson 1997).

4.5 CDMA Sistemleri İçin Uzamsal Süzgeçleme

4.5.1 Giriş

Etkileşim önleme teknikleri, kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) sistemlerinin potansiyel kazanımlarından büyük ölçüde yararlanmaktadırlar. Bu bölümde çok kullanıcı algılanması (geçici filtreleme) ve alıcı ışın şekillendirmeyi (uzamsal süzgeçleme) birleştiren bir alıcı yapısı incelenmektedir. Alıcı, doğrusal matris süzgeci olarak modellenmiş ve performans kriteri olarak en küçük anlamda karesel hata (MMSE, Minimum Mean Squared Error) kullanılmıştır. Optimum alıcının yapısının fazla karmaşık olması nedeniyle genellikle sabit katsayılı uzamsal süzgeçler kullanılmaktadır (Filiz 2003).

4.5.2 Dizilim işaret işleme

Anten dizilimleri iki temel amaç için kullanılmaktadır; çeşitlilik (diversity) ve kullanıcı ayrımı. Çeşitlilik kazancı her bir anten elementinden alınan işaretlerin düşük ilişki zayıflaması deneyimine bağlıdır. Bu yöntemdeki en yaygın teknik, düşük korelasyon sağlamak amacıyla (yani kullanıcı ve etkileşim işaretlerinin birbirinden ayrımını yapabilmek için) belirli aralıklarla yerleştirilmiş anten elemanlarının kullanıldığı uzamsal çeşitlemedir. Anten elemanları arasındaki gereken ayırım açısız hızın yayılımına bağlıdır. Açısız hızın 360° olduğu bina içi durumlarda, $\lambda/4$ aralık yeterlidir, fakat bina dışı baz istasyonları için 10λ 'lık bir ayırım gerekli olabilmektedir (Winters 1988). Anten diziliminin çıkışları, seçim çeşitliliği (selection diversity) veya en büyük oran birleşimi (MRC) kullanılarak birleştirilebilmektedir. Seçim çeşitliliğinde, en yüksek işaret gücüyle antenin çıkışı kullanılır. En büyük oran birleşiminde ise, çıkışlar işaret gürültü oranını (SNR) en büyük yapmak için ağırlıklandırılır. Anten elementleri arasında düşük ilişkiyi sağlamak için başka seçenekler de vardır, bunlar polarizasyon ve açısız çeşitlemedir.

4.5.3 Işın şekillendirme modeli

Önceki bölümde, yaygın bir şekilde kullanılan M -elemanlı temel ışın şekillendirici tanıtılmıştı. Işın şekillendiricinin çıkışı, her bir anten elementinden alınan işaretlerin doğrusal birleşimine eşittir.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m^* x_m(t) \quad (4.20)$$

(4.20) nolu eşitlikte verilen ifadenin matris formunda gösterimi (4.21) nolu eşitlikte verilmiştir.

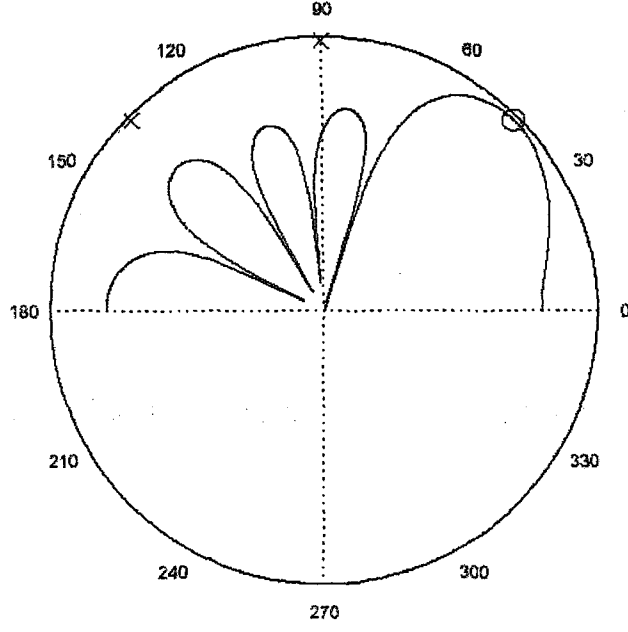
$$y(t) = w^H x(t) \quad (4.21)$$

w ve $x(t)$ sırasıyla dizilim ağırlık vektörü ve dizilime gelen işaret vektörü olarak isimlendirilmektedir. Anten elemanlarının sayısı ışın şekillendiricinin hassasiyetini (yani ana kulakçığın genişliğini) belirler, anten elemanlarının sayısını arttırmak daha büyük açısal ayrımı gösteren daha dar kulakçıklara neden olmaktadır (Winters 1988). Yani eleman sayısı arttırıldığında daha dar ana kulakçıklar ve yan kulakçıklar oluşmaktadır. Ayrıca, yan kulakçıkların yükseklikleri de azalmaktadır. Çok sayıda geometrik yapı ışın şekillendirme için uygundur; örneğin doğrusal, dairesel, elips, Y şeklinde ve hatta düzensiz yapılar.

4.5.4 Ağırlık vektörü seçimi

Ağırlık vektörünün katsayılarının seçimi için çok sayıda değişik yöntem vardır. Geleneksel ışın şekillendiricide, bütün katsayılar aynı değere sahiptir ve fazlar dizilimi belirli bir doğrultuda yönlendirmek için seçilmektedir. Bu tür bir dizilim bakılan doğrultuda birim cevaba sahiptir. Yaygınlıkla kullanılan bir diğer yaklaşım, bilinen bir doğrultudan gelen düzlem dalgasını iptal eden sıfır-yönlendirme ışın şekillendiricisidir (Null-Steering beamformer). Fakat bu yöntem hem etkileşim kaynaklarının doğrultu bilgisini gerektirir hem de işaret gürültü oranının (SNR) en büyük olmasını sağlayamaz (Godara 1997). Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 geleneksel ve sıfır yönlendirme vektörü arasındaki farkı göstermektedir. Burada etkileşim kaynakları (x) istenen kullanıcı ise (o) ile temsil edilmiştir. Bu ışın şekillendiriciler eşlemeli süzgeç ve çoklu-kullanıcı dedeksiyon koşulundaki deko-relasyon detektörü ile aynı ilkelerle çalışmaktadır. Burada üzerinde çalışılacak yöntem MMSE ışın şekillendiricisidir. Referans işaretinin $d(t)$ oluşturduğu hata işareti aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$e(t) = d(t) - w^H r(t) \quad (4.22)$$



Şekil 4.7: Geleneksel ışın şekillendirici yayının örüntüsü (Filiz 2003).

Ağırlıklar aşağıda verilen ortalama karesel hatayı (mean-squared error) en küçük yapmak için ayarlanmaktadır.

$$MSE = E \left[e(t)^2 \right] \quad (4.23)$$

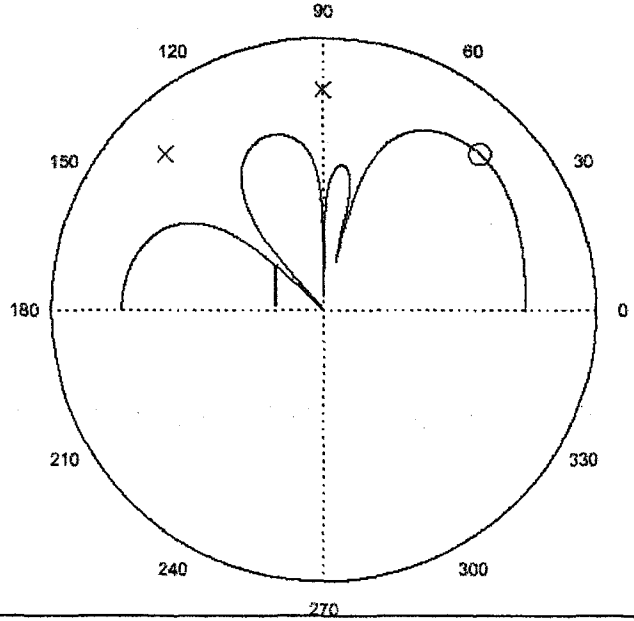
MSE 'nin gradyentini sıfıra eşitleyerek MSE 'yi en küçük yapacak ağırlık vektörünün katsayıları elde edilir.

$$w_{MMSE} = R^{-1} z \quad (4.24)$$

Burada R ve z aşağıdaki gibi tanımlanan ilişki (korelasyon) matrisleridir .

$$R = E[r(t)r^H(t)] \quad (4.25)$$

$$z = E[b(t)r(t)] \quad (4.26)$$



Şekil 4.8: Sıfır yönlendirme yayılım örüntüsü (Filiz 2003).

Işın şekillendirmenin vektörsel gösterimi daha kullanışlıdır. Ağırlık vektörünün w ve dizilim cevap vektörünün a , M boyutlu karmaşık uzayda vektörler olduğunu unutmayalım. Geliş açısı doğrultusuyla (θ) belirli cevap, w ve a arasındaki açıya bağlıdır. Eğer w a 'ya dikgen (ortogonal) ise cevap sıfır olmaktadır ve bu sayede işaret bastırılmaktadır. Eğer yönlendirme vektörü a ve ağırlık vektörü w arasındaki açı 0 'a yakınsa işaret bastırılmaz (Filiz 2003).

4.5.5 DOA kestirimi (DOA estimation)

Ağırlık katsayılarını seçmek için kullanılan yöntemlerin çoğu işaretlerin geliş doğrultusunun bilgisini gerektirir. Bu bölümde yaygın kullanılan bazı geliş açısı doğrultusu kestirimi (DOA estimation) tekniklerini inceleyeceğiz.

Spektral yaklaşım yöntemleri, uzamsal tayfi kullanarak DOA'yı yaklaşık olarak hesaplar ve sonra yerel en büyük noktalarını belirler. Bu süreç, dizilimi mekanik olarak kesin bir doğrultuda yönlendirme ve çıkış gücünü ölçme sürecine benzerdir. Spektrum yaklaşımının en büyük olabilirlik yöntemi, MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) ışınım yönlendiricisi olarak bilinmektedir (Miller and Fuhrmann 1990).

Daha popüler bir yaklaşım özdeğer (eigen) yapısı yöntemidir. Bu yöntemde, R özdeğer vektörleri tarafından uzanan boşluk, işaret boşluğu ve gürültü alt boşluğu arasında bölünmüştür ve bir boşluğa karşılık gelen özdeğer vektörler diğer alt uzayların özdeğer vektörlerine diktir (Godara 1997). İşaret alt uzayına karşılık gelen özdeğerler gürültü alt uzayına karşılık gelen özdeğerlerden daha büyüktür. MUSIC algoritması (Vijayan) özdeğer yapısı yöntemlerinin en basitlerindedir. Bu algoritmada gürültü alt uzayı kullanılabilir örnekler için hesaplanmakta ve yönlendirme doğrultuları gürültü alt uzayına ortogonal (dikgen) olan özdeğer vektörleri araştırılarak bulunmaktadır. Kullanılmakta olan diğer yöntemler CLOSEST (Buckley and Xu 1990) ve ESPRIT'tir (Guanghan et al 1994). Bunlar gibi çok sayıda yöntemin, dizilime ulaşan işaretlerin sayısını gerektirdiğini unutmamak gerekir.

Tanımlanan yöntemlerin çoğu için, alıcıya ulaşan işaretlerin birbirleriyle ilişkili olması çalışma verimini düşürmektedir. Bunun neticesinde çoklu yolun bulunduğu ortamlarda performans düşmektedir (Godara 1997). İlişkili işaretlerin alıcıya ulaştığı durumlarda performansı geliştirme yöntemleri önerilmiştir, fakat bu durumda, ilişkili işaret bileşenleri etkileşim işareti olarak davranmaktadır. Bu etkileşimi önlemek için etkileşim bileşenlerinin olduğu doğrultuda sıfır (null) atanarak bu işaretler bastırılır (Godara 1997).

4.5.5.1 MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) Algoritması

Çoklu kaynakların bulunduğu ortamlarda geliş doğrultularını belirlemek için Schmidt (Schmidt 1979) tarafından önemli bir teknik geliştirilmiştir. Dizilime K sayıda kaynak ulaştığını varsayarsak R 'nin en büyük K özdeğerleri her bir K işaretinin güç fonksiyonunu gösterir. En küçük $M-K$ özdeğerleri, gürültü gücünü göstermekte ve bunlar teorik olarak beyaz gürültü varsayımı altında eşittirler. Bu özdeğerlerle ilgili özdeğer vektörler geliş açısına karşılık gelen doğru vektörlerine diktir. MUSIC algoritması aşağıda tanımlanmaktadır.

Düzgün dağılımlı M elemanlı bir anten dizilimi düşünelim ve dizilime K sayıda işaretin ulaştığını varsayalım. Bu durumda alınan işaret,

$$u(t) = \sum_{l=0}^{K-1} a(\phi_l(s_l(t))) + n(t) \quad (4.27)$$

şeklinde olur. Bunu matris formunda yazarsak,

$$u(t) = \begin{bmatrix} a(\phi_0) & a(\phi_1) & \dots & a(\phi_{K-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_1(t) \\ \vdots \\ s_{K-1}(t) \end{bmatrix} + n(t) \quad (4.28)$$

$$u(t) = As(t) + n(t) \quad (4.29)$$

Burada $s(t) = [s_0(t) \ s_1(t) \ \dots \ s_{K-1}(t)]^T$ gelen işaretleri içeren vektör ve $n(t) = [n_0(t) \ n_1(t) \ \dots \ n_{M-1}(t)]^T$ her anten elementine ulaşan gürültü bileşenleridir. $a(\phi_i)$, ϕ_i açısıyla dizilime ulaşan i . dizilim yayılım vektörüdür.

(4.29) nolu eşitliğe beklenti operatörünü uygularsak,

$$R_{xx} = E[u(t)u(t+\tau)^H] = E[(As(t) + n(t))(As(t) + n(t))^H] \quad (4.30)$$

Burada $[\cdot]^H$ hermit transpozisini gösterir. Gürültünün işaretle ilişkisiz olduğunu varsayarak bu eşitliği daha sade biçimde yazabiliriz.

$$R_{xx} = A E[ss^H] A^H + E[nn^H] \quad (4.31)$$

Her bir işarete karşılık gelen dizilim yayılım vektörü R_{xx} 'in özdeğerlerine diktir.

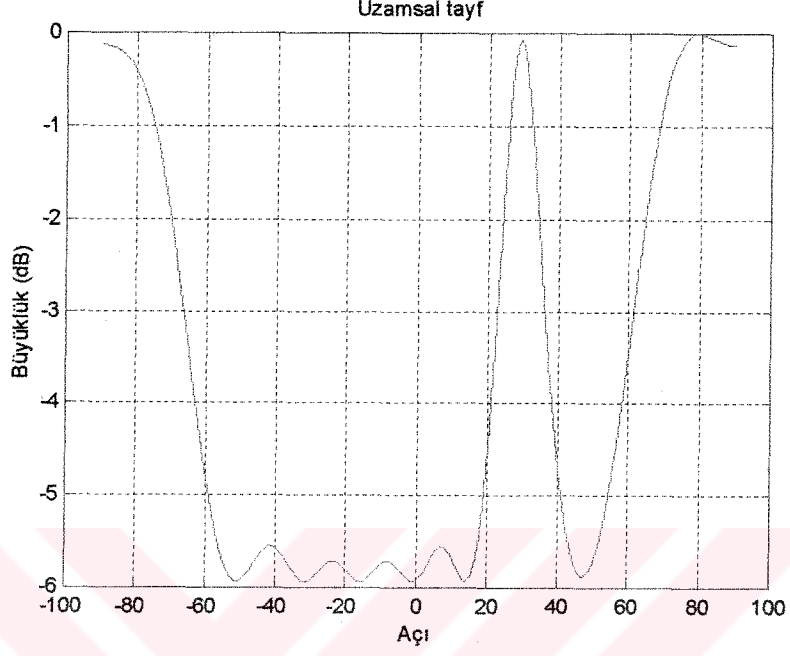
Gelen işaretlerin uzamsal taraması dizilim yayılım vektörü $a(\theta)$ 'yi hesaplayarak ve $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ aralığında özdeğerlere dik olup olmadığını kontrol ederek yapılabilir.

Gelen işaretlerin her birinin geliş açısı doğrultusu aşağıda uzamsal tayf ile verilmektedir.

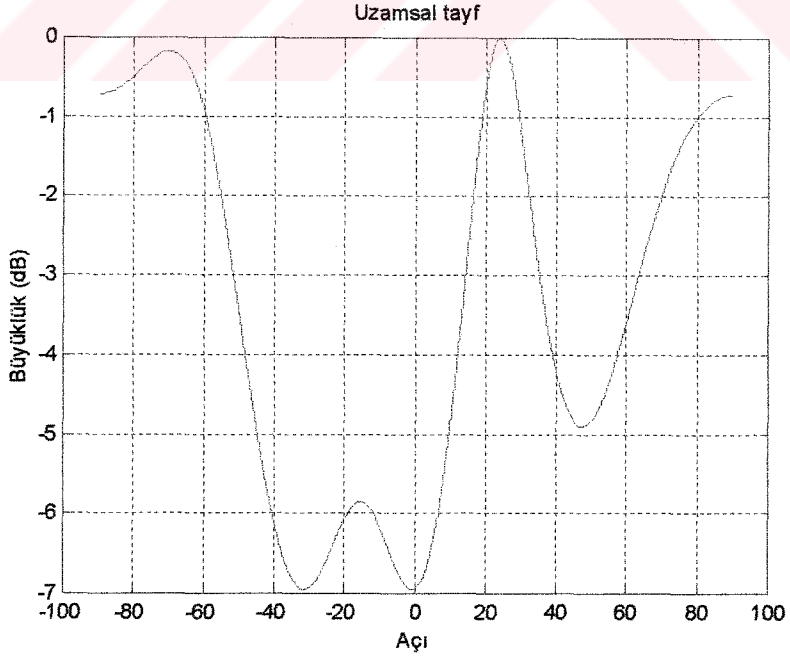
$$P_{MUSIC} = \frac{a^H(\phi)a(\phi)}{a^H(\phi)V_n V_n^H a(\phi)} \quad (4.32)$$

$$V_n = [q_K \quad q_{K+1} \quad \dots \quad q_{M-1}] \quad (4.33)$$

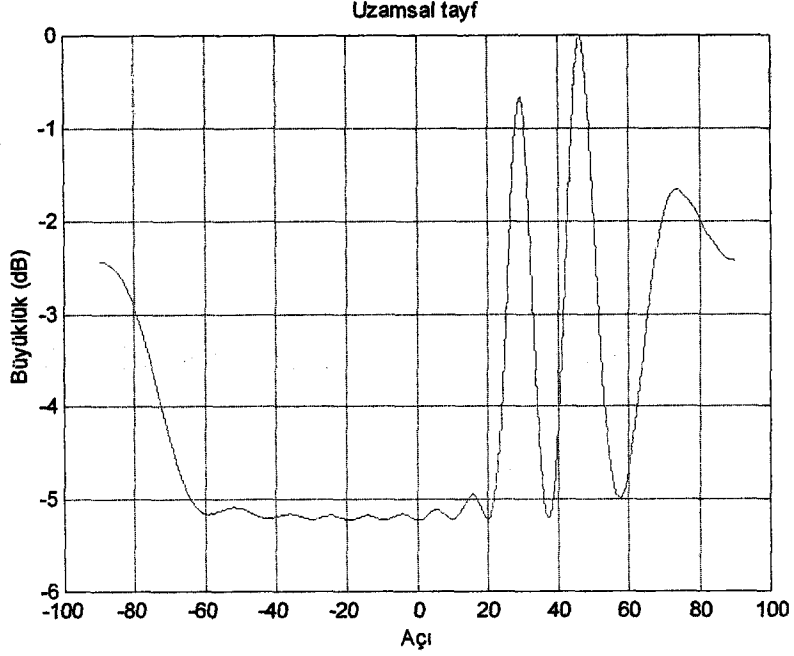
Aşağıda MUSIC algoritmasıyla elde edilmiş 3 grafik verilmiştir.



Şekil 4.9: İşaret sayısı = 2, element sayısı = 8, Geliş açıları = $[30^\circ, 75^\circ]$, $d = \lambda / 2$, SNR = 20.



Şekil 4.10: İşaret sayısı = 2, element sayısı = 4, Geliş açıları = $[30^\circ, 75^\circ]$, $d = \lambda / 2$, SNR = 20.



Şekil 4.11: İşaret sayısı = 3, element sayısı =12, Geliş açıları = [30°, 45°, 75°], $d = \lambda / 2$, SNR = 20.

MUSIC algoritmasının sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Vijayan).

- Gelen işaretlerin sayısının fazla olması (element sayısına yakın olması) durumunda işaretlerin her birini ayıramaz.
- SNR azaldığında MUSIC algoritması gelen bütün işaretleri ayıramamaktadır.
- İlişki (korelasyon) matrisinin kestirimi için kullanılan örnek sayısı arttıkça algoritmanın uzamsal çözünürlüğü de daha iyi olmaktadır.
- Gelen işaretlerin türü algoritmanın uzamsal çözünürlük kapasitesi üzerinde etkili değildir.
- Aynı frekanstaki iki işaret düzgün dağılımlı doğrusal dizilime farklı açılardan gelse bile MUSIC algoritması bunları çözümleyemez.

4.5.6 Temel CDMA ışın şekillendirme modeli

4.5.3 bölümünde tanımlanan anten dizilim modeli eşzamanlı CDMA için genelleştirilebilir. Referans anten elementi üzerine gelen işaret:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K P_k b_k s_k(t) + \sigma n(t) \quad (4.34)$$

Bütün elementler boyunca dizilim işaret vektörü ($x = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$)

$$x_1(t) = \sum_{k=1}^K a_{1,k} \sqrt{P_k} b_k s_k(t) + \sigma n_1(t)$$

M

(4.35)

$$x_M(t) = \sum_{k=1}^K a_{1,M} \sqrt{P_k} b_k s_k(t) + \sigma n_M(t)$$

şekline gelir. P_k , b_k ve $s_k(t)$ sırasıyla alınan işaret gücü, iletilen bit ve k kullanıcısının işaretidir. Her bir anten elemanında Gauss gürültüsünün bağımsız olduğu varsayılmıştır. Böylece alınan işaret vektörü:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} b_k s_k(t) a_k + \sigma n(t)$$
(4.36)

olmaktadır. Burada a_k , k kullanıcısının dizilim cevap vektörüdür.

4.5.7 Uzamsal bölme çoklu erişim (SDMA, Spatial Division Multiple Access)

Uzamsal süzgeçleme düşüncesi, FDMA, TDMA ve CDMA gibi varolan teknikleri tamamlayıcı veya başlı başına yeni çoklu erişim teknikleri fikrine öncülük etmektedir. SDMA'nın dayandığı temel, kullanıcıların tek (unique) zaman slotu, frekans tahsisi veya entegre kodu yerine uzamsal konumlarına göre ayrılabilir olmasıdır. Böylece geliş açılara bağlı olarak istenilen kullanıcıların seçilebildiği ve istenmeyen etkileşimlerin iptal edildiği akıllı anten sistemleri ortaya çıkmaktadır. Bazı SDMA türlerinin alıcıda bir sistemin tayf verimliliğini en azından $M^{1/2}$ çarpanıyla geliştirebildiği kanıtlanmıştır (Tangemann et al).

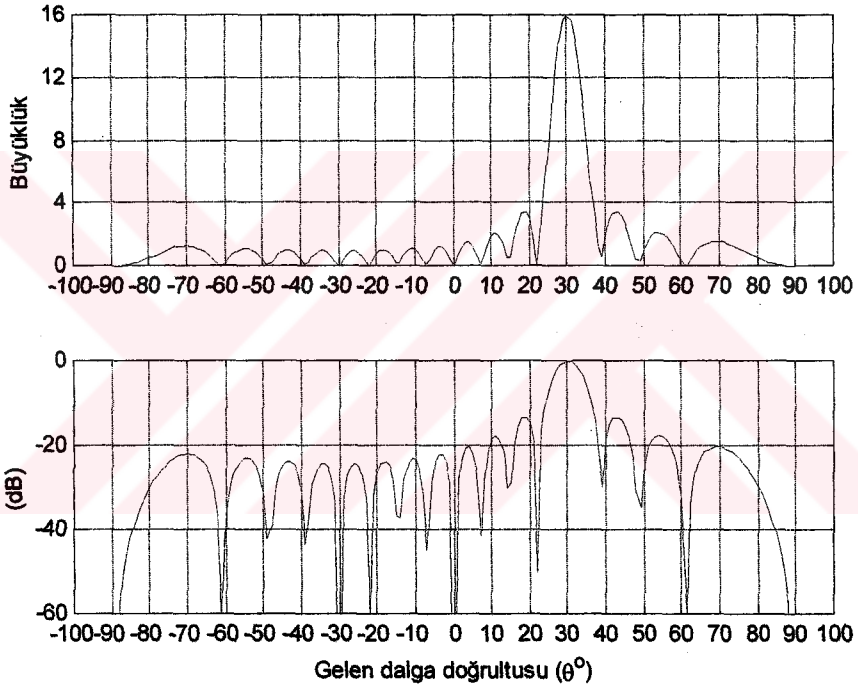
4.5.8 Gerçekleştirilen Benzetimler

Bu bölümde, düzgün dağılımlı doğrusal dizilime ilişkin gerçekleştirilen benzetimler verilmektedir.

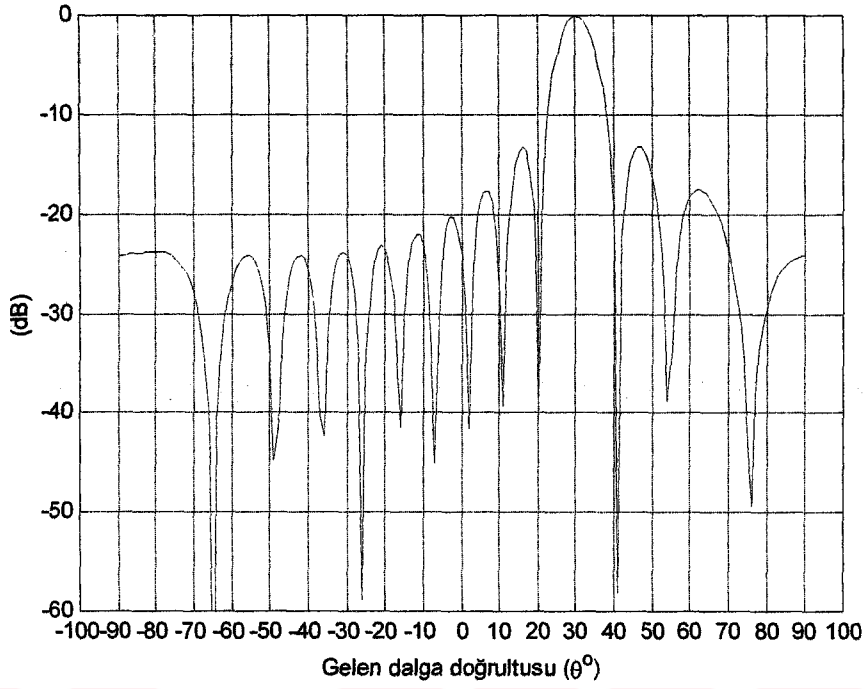
Şekil 4.12-4.19'da dikdörtgen pencere fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. Bunlardan şekil 4.12-4.16'da dizilim eleman sayısı 16, şekil 4.17-4.19'da ise 8 olarak alınmıştır. Bu şekillerde, düzgün dağılımlı doğrusal dizilim düşünülüş ve dizilime 30° 'lik açıyla gelen işaretin sonuçları verilmiştir. Bu bölümde, dizilim

elemanları arasındaki uzaklığın, işaretin dalga boyuna göre belirlenen değerleri kullanılarak benzetim yapılmıştır.

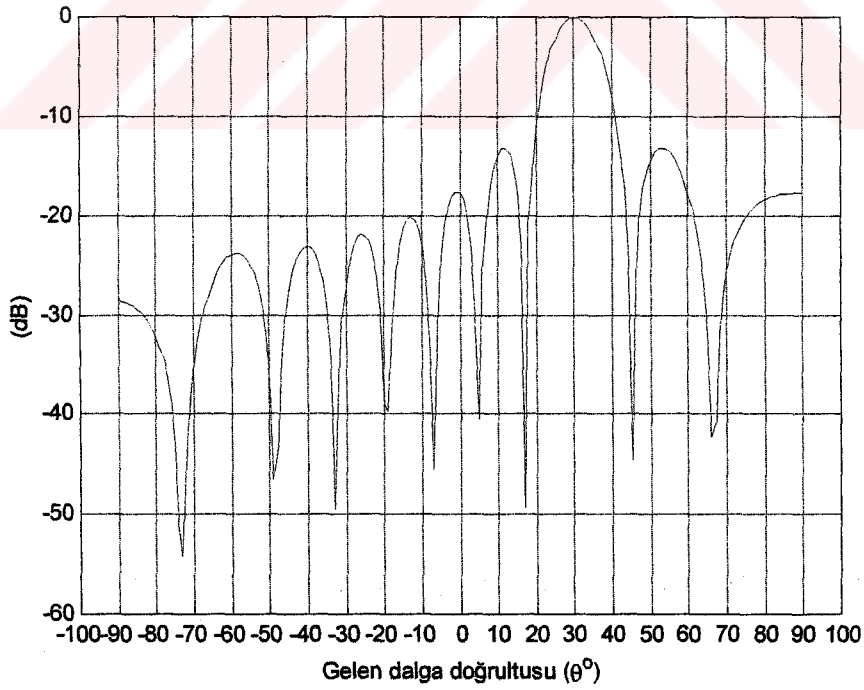
Şekil 4.12’de anten dizilimi çıkışının kazanç değeri de verilmektedir. Her bir anten elemanının kazancını 1 varsayıp topladığımızda kazancın kullanılan eleman sayısına eşit olduğunu da bu grafikten görebiliyoruz. Dikdörtgen tipi pencere fonksiyonu kullandığımız için, bu grafikte, kazanç, her bir anten çıkışını pencereleme fonksiyonu değeri ile çarparak bu değerleri topladığımızda kullanılan eleman sayısına eşit olmaktadır.



Şekil 4.12: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışıınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).

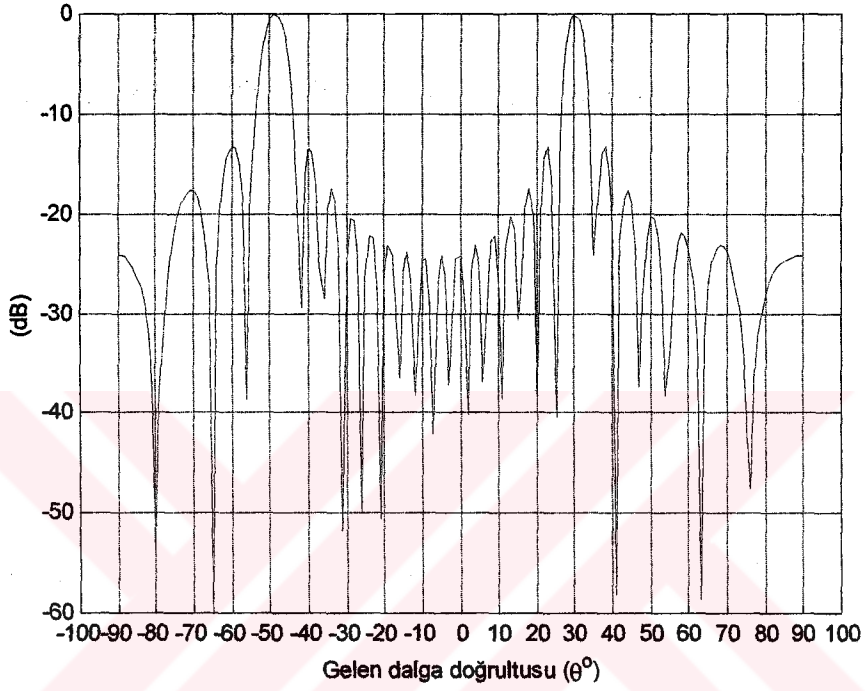


Şekil 4.13: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,4\lambda$).



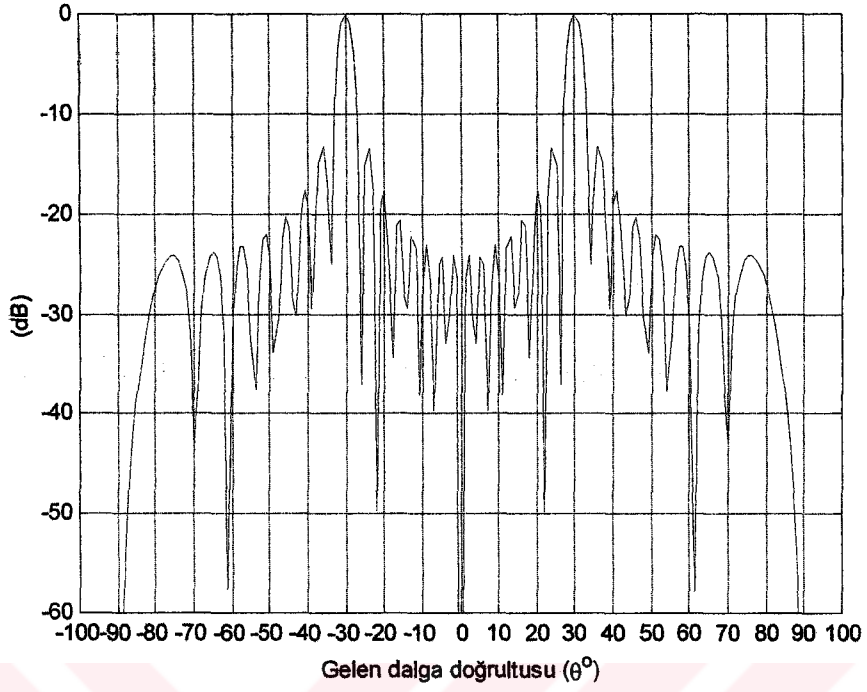
Şekil 4.14: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,3\lambda$).

Şekil 4.12-4.14'te elemanlar arası uzaklık azaltılarak elde edilen sonuçlar verilmektedir. Bu grafikler için elemanlar arası uzaklık sırasıyla 0.5λ , 0.4λ , 0.3λ alınmıştır. Bu sonuçlara göre elemanlar arası uzaklık 0.5λ 'dan başlayarak küçültüğünde ana kulakçığın ve yan kulakçıkların genişliği artmaktadır.

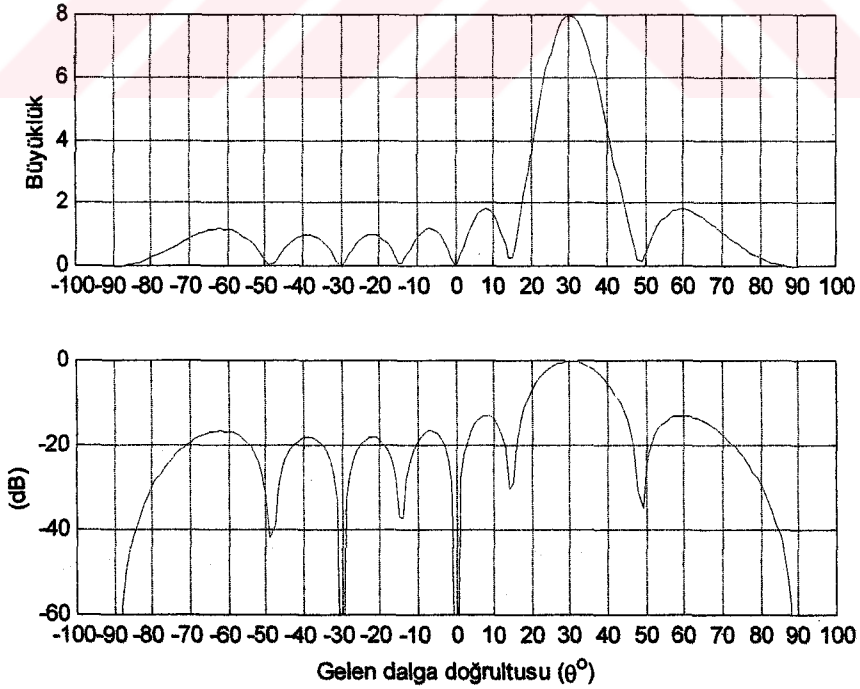


Şekil 4.15: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,8\lambda$).

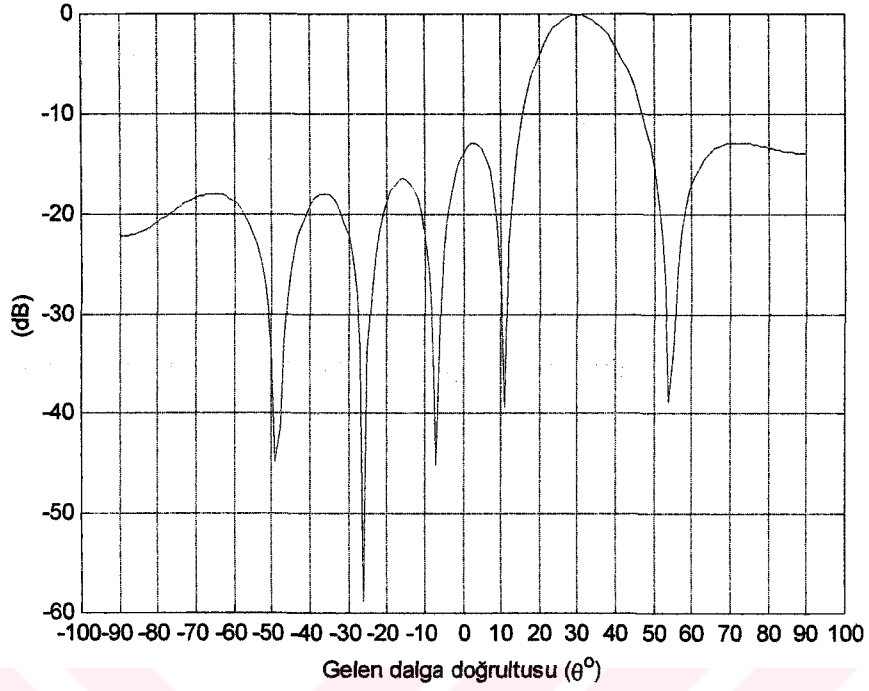
Şekil 4.15-4.16'da ise elemanlar arası uzaklık işaretin yarım dalga boyundan büyük seçilerek çalışılmıştır. Şekil 4.15'te elemanlar arası uzaklık 0.8λ , Şekil 4.16'da ise 1.0λ olarak alınmıştır. Bu iki sonuçtan da göreceğimiz gibi bu değerlerde katlanmalar oluşmaktadır yani geliş doğrultusunun yanında farklı doğrultularda da işaret geliyormuş gibi davranmaktadır. Bu iki grafiği kullanarak (3.23) nolu eşitlikte elde ettiğimiz elemanlar arası uzaklığın işaretin dalga boyuyla ilişkisini veren sonucun gerekli olduğunu çıkarabiliyoruz.



Şekil 4.16: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 1,0\lambda$).

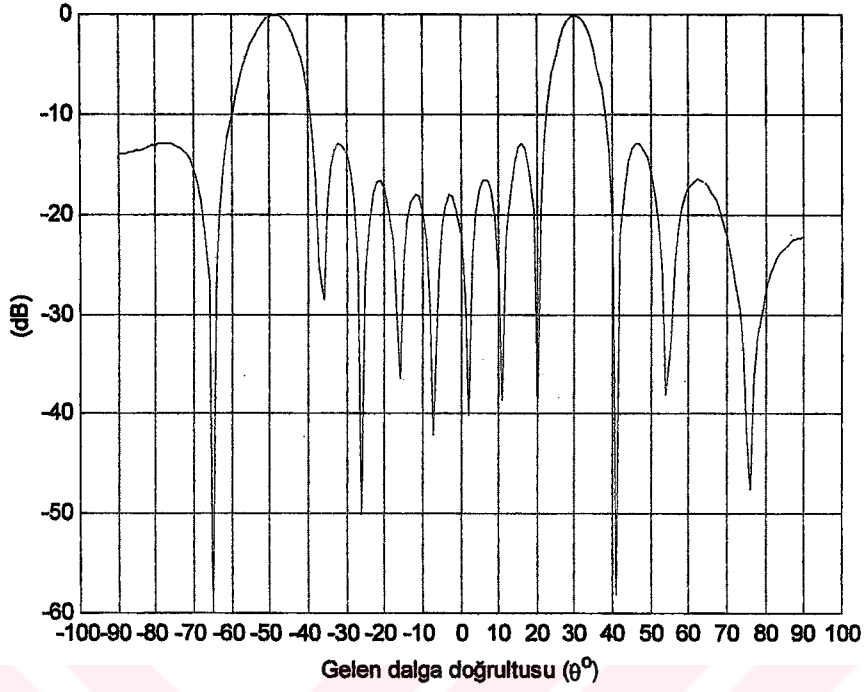


Şekil 4.17: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).

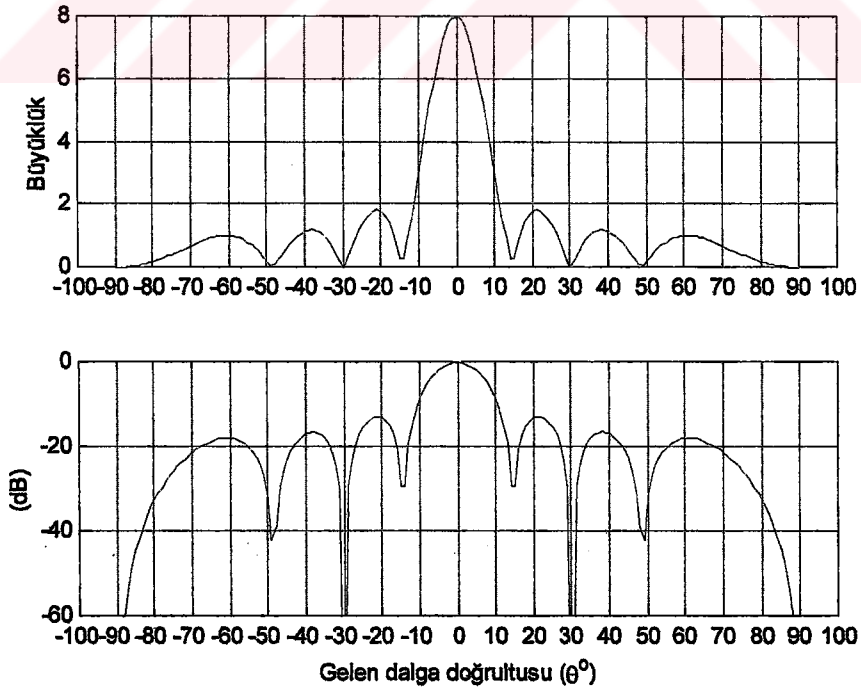


Şekil 4.18: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,4\lambda$).

Şekil 4.17-4.19'da dizilim eleman sayısı 8 alınmıştır. Bu grafikleri kullanarak, dizilim eleman sayısının 16 olduğu durumlardaki elde edilen sonuçlarla (şekil 4.12-4.16) karşılaştırdığımızda görüyoruz ki eleman sayısı azaltığında ana kulakçığın ve yan kulakçıkların genişliği artmaktadır.

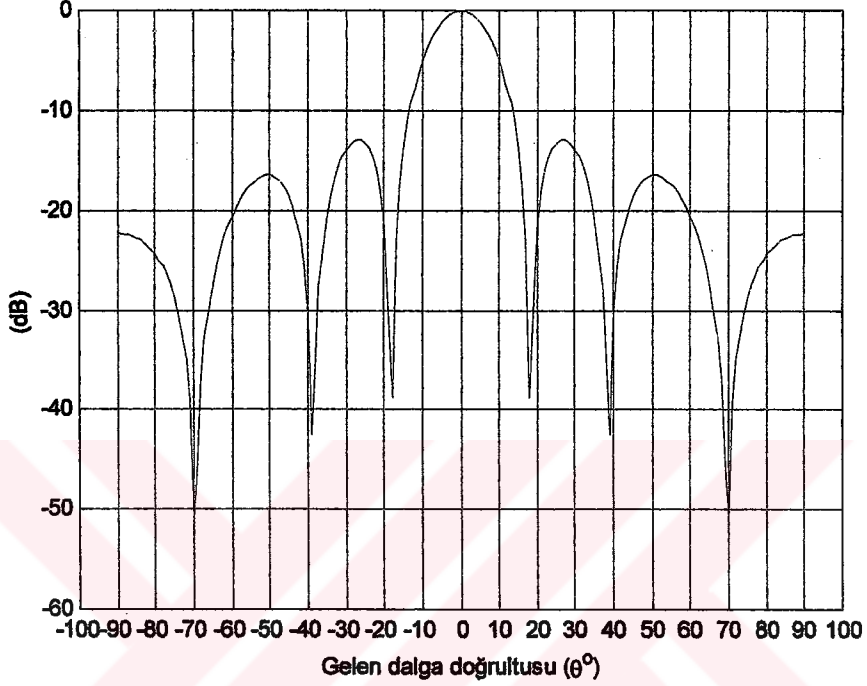


Şekil 4.19: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,8\lambda$).



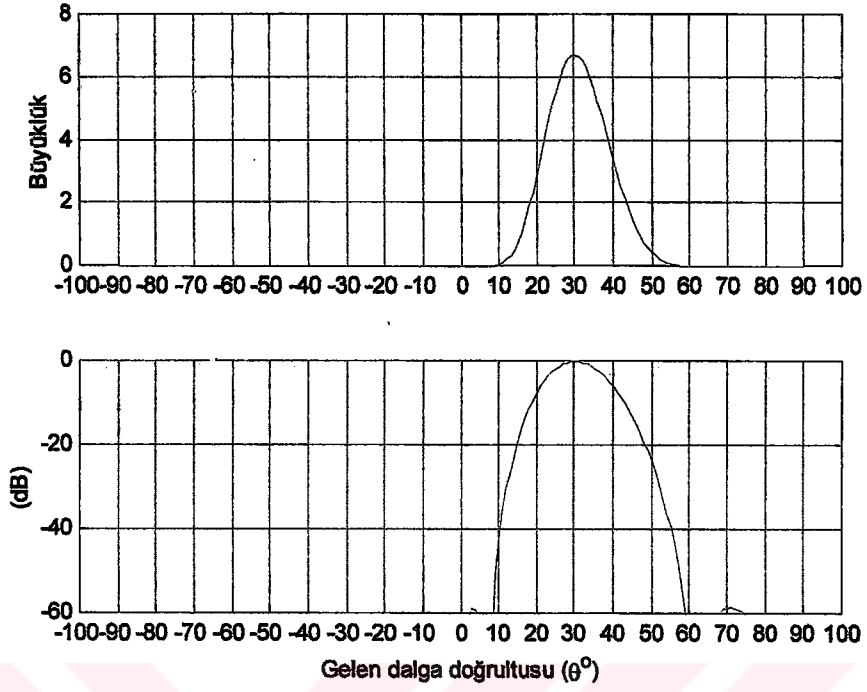
Şekil 4.20: a vektörü kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).

Şekil 4.20 ve 4.21’de (3.13) eşitliğinde verilen yönlendirme vektörü kullanıldığında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Burada, işaretin, dizilim elemanlarına eşzamanlı olarak ulaştığı varsayılmıştır.



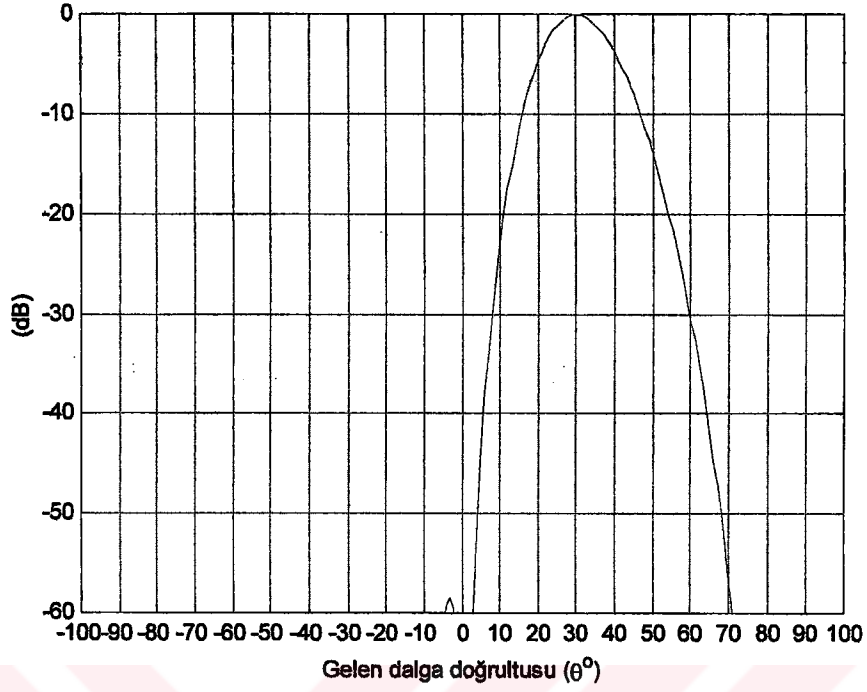
Şekil 4.21: a vektörü kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,4\lambda$).

Şekil 4.22-4.24’te, 30° ’lik geniş açısına sahip işaretlerin Blackman pencereleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan Blackman pencereleme fonksiyonu kullanıldığında yan kulakçıkların neredeyse tamamen ortadan kalktığı görüyoruz. Yani yan kulakçıklarda istenen zayıflatma başarılmaktadır. Fakat şekil 4.22’deki dizilim çıkış kazancına baktığımızda bunun dikdörtgen fonksiyonu ile elde edilenin (şekil 4.12) yarısından daha az olduğunu görüyoruz. Bunun nedeni, Blackman fonksiyonunun karakteristiğini oluşturan katsayılarıdır.

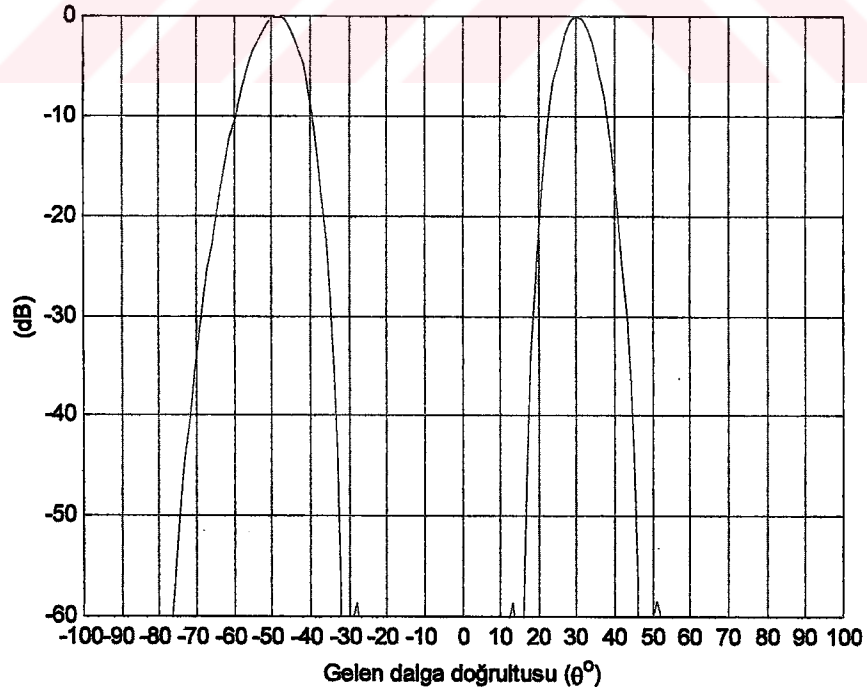


Şekil 4.22: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).

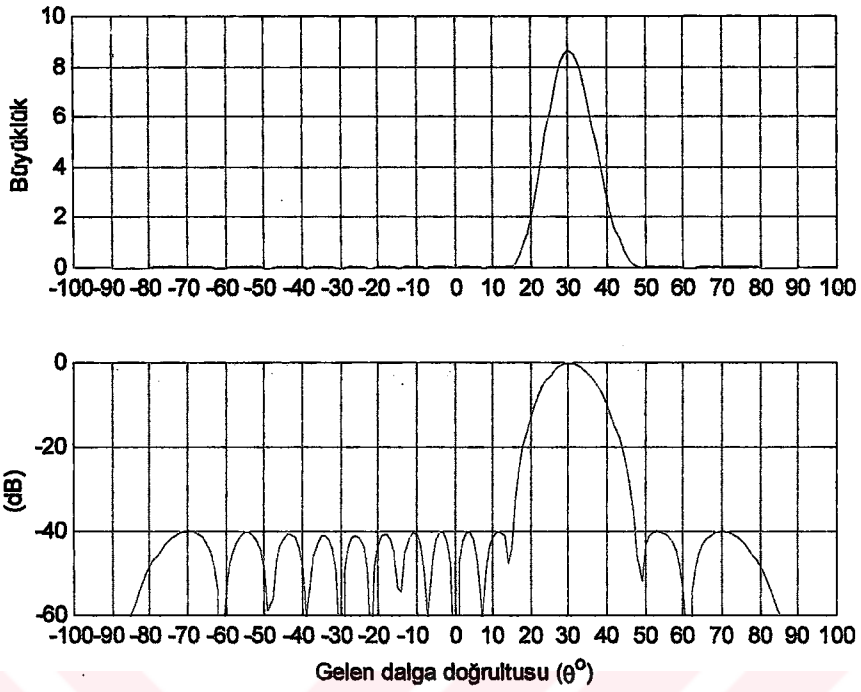
Şekil 4.24'te de, elemanlar arası uzaklığın işaretin yarım dalga boyundan daha büyük olduğunda ortaya çıkan katlanma etkisini görüyoruz.



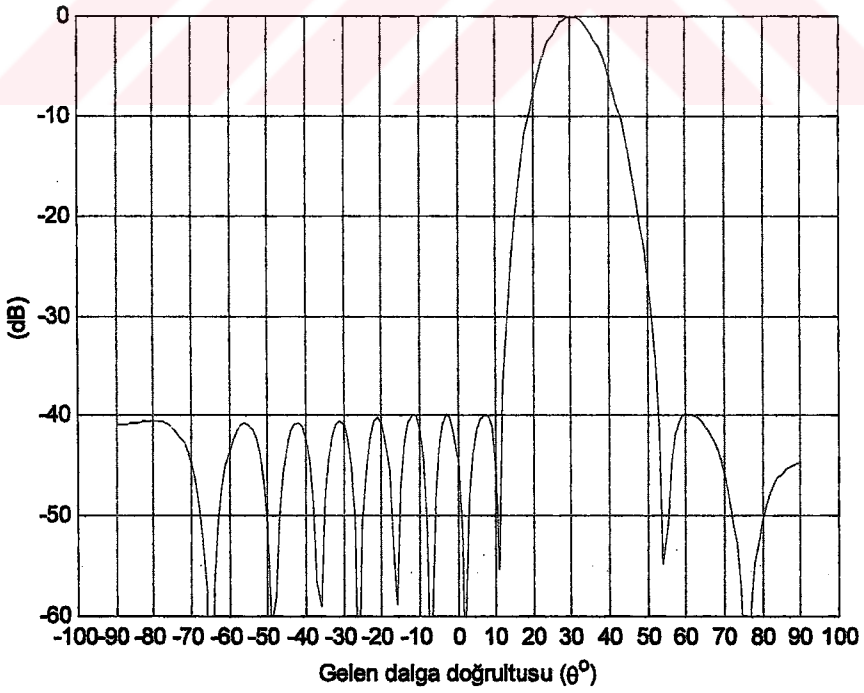
Şekil 4.23: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışıınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,4\lambda$).



Şekil 4.24: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışıınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,8\lambda$).

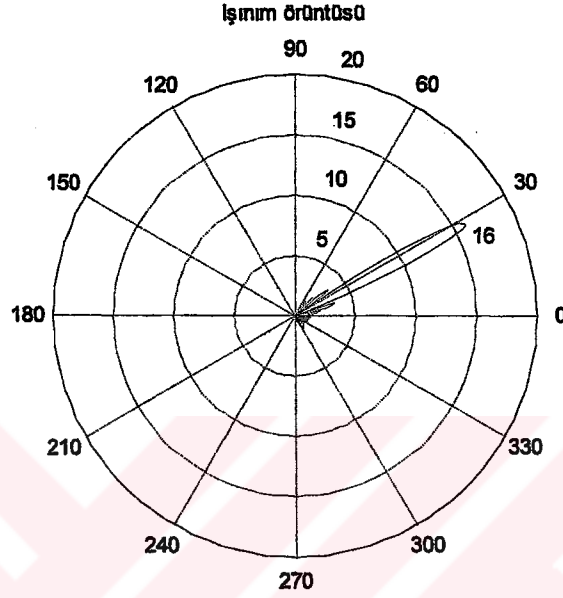


Şekil 4.25: Hamming fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).



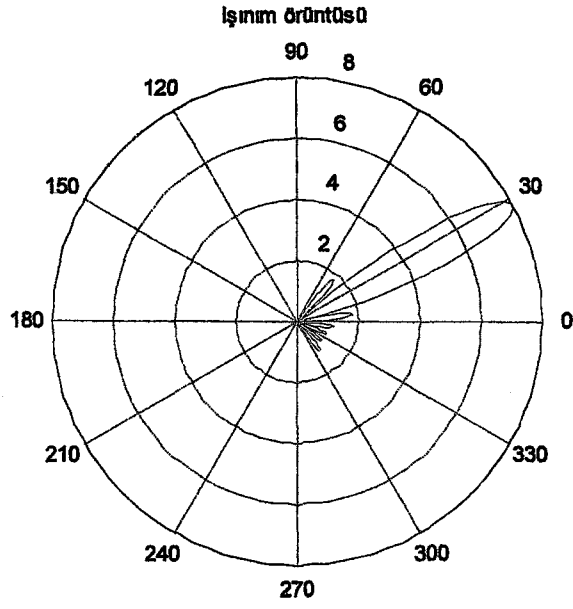
Şekil 4.26: Hamming fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,4\lambda$).

Şekil 4.25-4.26'da, 30° 'lik geliş açısına sahip işaretlerin Hamming pencereleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlarda da, yan kulakçıklar, Blackman fonksiyonunda olduğu gibi, önemli derecede etkisiz hale getirilmektedir.

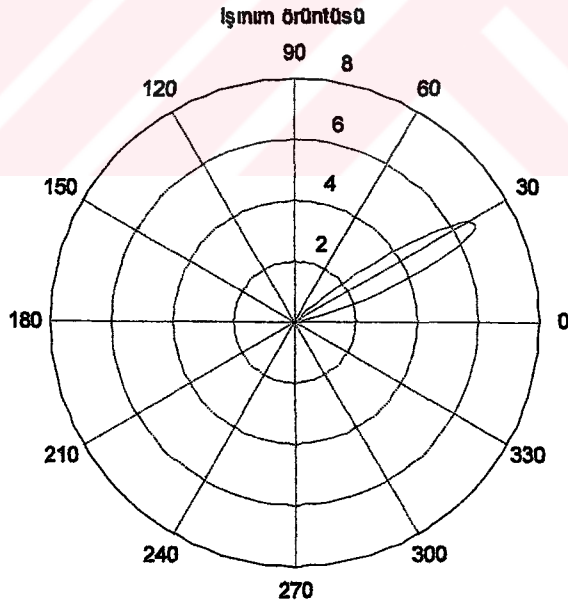


Şekil 4.27: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).

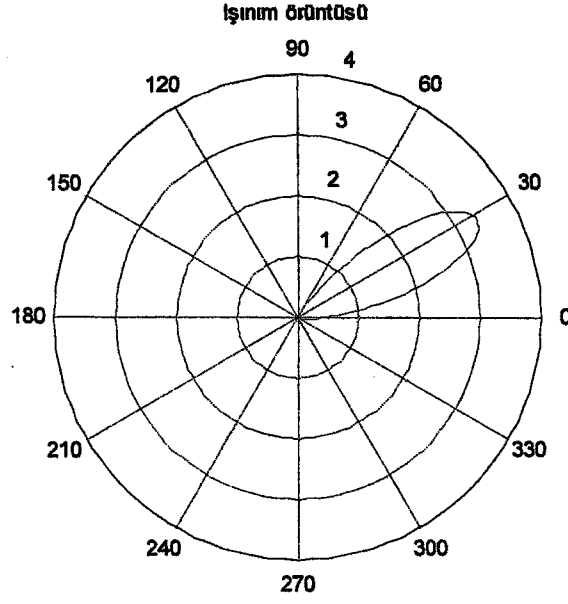
Şekil 4.27-4.30'da, düzgün dağılımlı doğrusal dizilime 30° 'lik geliş açısıyla gelen işaretlerin dikdörtgen ve Blackman pencereleme fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçların kutupsal (polar) gösterilimi verilmektedir.



Şekil 4.28: Dikdörtgen fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).



Şekil 4.29: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 16, d = 0,5\lambda$).



Şekil 4.30: Blackman fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ışınım örüntüsü ($M = 8, d = 0,5\lambda$).

4.5.9 Özet

Bu bölümde, teori ve uygulamalarıyla temel uzamsal süzgeçleme teknikleri açıklanmıştır. Belirli bir doğrultuda dizilimi yönlendirmek için gerekli eşitlikler verilmiş ve bu yönlendirmeyi en uygun yapacak parametreler ve pencere fonksiyonlarına değinilmiştir. Ayrıca CDMA sistemi için bir ışın şekillendirme modeli tanıtılmıştır. Son olarak MUSIC algoritması ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 5. YAZILIM RADYODA AKILLI ANTEN SİSTEMİ

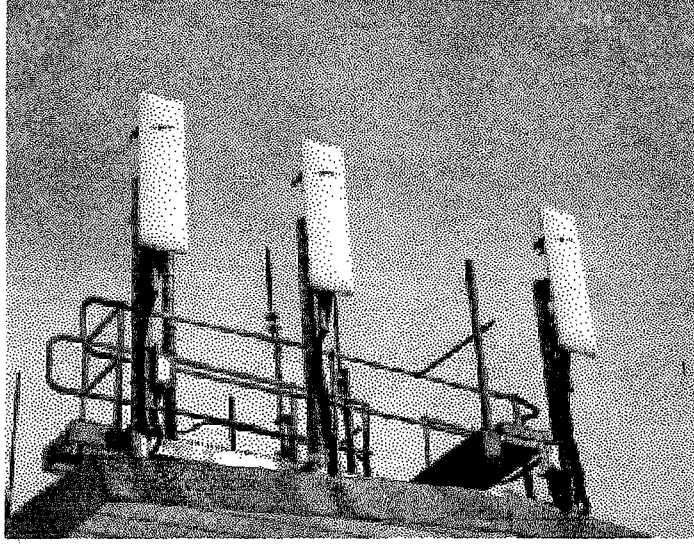
5.1 Giriş

Akıllı antenler, gezgin iletişim düşüncesinin temeli olan fiziksel katmanın kullanılabilir kaynaklarını kazanç sağlamak üzere yetkilendirme teknolojisi olarak ortaya çıktı. Çoklu arayüz standartlarını desteklemeyi amaçlayan gelecek nesil baz istasyonları, ışın şekillendirici mimarileri gerektirecektir. Yazılım radyo düşüncesi, kazanç sağlamak için dizilim işleme alt sistemi tamamen esnek baz istasyonlarını başarmaya engel olmamalıdır. Bu yüzden, gelecek nesil çoklu standart baz istasyonlarında uyarlamalı antenlerin avantajlarına izin verecek ışın şekillendirme mimarileri ve algoritmaları geliştirilmektedir (Mitola 2001).

Akıllı anten teknolojisi, önceleri askeri amaçlarla geliştirilmiştir. Daha sonra, gezgin hücreli temel istasyonlarda kapasiteyi arttırmak için, yazılım ve donanım hizmetleri veren birçok şirketle yolunu ticari marketlere yöneltmiştir. Teknoloji önemli derecede ilgi üretmektedir; çünkü, temel istasyon sitelerinin sayısını azaltmaya olanak sunmakta, sistem kapasitesini geliştirmekte, ve/veya tayf (spektrum) kullanımını azaltmaktadır.

Akıllı anten sistemleri yazılım radyoya bağlı değildir, fakat akıllı antenlerin en büyük kullanım alanı, kontrolün yazılımla sağlandığı ve tümleşik sayısal radyo mimarileri kullanılarak tasarlanan yazılım radyo terminalleridir.

Birinci ve ikinci nesil gezgin hücreli temel istasyonlar kullanıcının yerini dikkate almadan bir hücrenin bütün alanı boyunca yayını yapar. Şekil 5.2, tek doğrusal doğrultu için standart GSM temel istasyon anten sistemini göstermektedir; iki panel anten çeşitlilik alımı için kullanılmaktadır, üçüncü panel iletim için atanmıştır.



Şekil 5.1: Tipik 2G basit anten sistemi (Burns 2003).

Akıllı anten teknolojisi yayılım kontrolünün istenilen doğrultularda yapılabilmesine olanak sağlar ve bu nedenle toplamda yayılım miktarını azaltır. Örneğin [33]'de gösterilmiştir ki, CDMA2000 sistemi için akıllı anten sistemi ile geliştirilen bir temel istasyon güç çıkışı, standart antenler kullanılarak elde edilen 20W'lardan 5.9W'lara kadar azaltılabilmektedir.

Yayılım (radyasyon) tehlikesi üzerine artan bilimsel ve toplum ilgisiyle birlikte, akıllı anten teknolojisi, sadece kullanıcının bulunduğu ortama iletim/alım yapabiliyor olması nedeniyle, RF güç seviyelerinin kontrolünde yer alabilecektir.

Yazılım radyo forumu (SDR forum, [35]), akıllı anten sistemini, hat performansını geliştirmek ve diğer ilave servisleri yetkilendirmek için karar tabanlı işaret işlemeyle birlikte uzamsal domeni kullanan ve hem yazılım hem de donanım nesnelere içeren bir alt sistem olarak tanımlamaktadır.

Sayısal gezgin hücreli sisteminin önemli link ve sistem parametreleri; taşıyıcı etkileşim oranları, aynı frekansları tekrar kullanım değerleri, ve kilometrekare başına kullanıcı sayısıdır.

5.2 3G Akıllı Anten Gereksinimleri

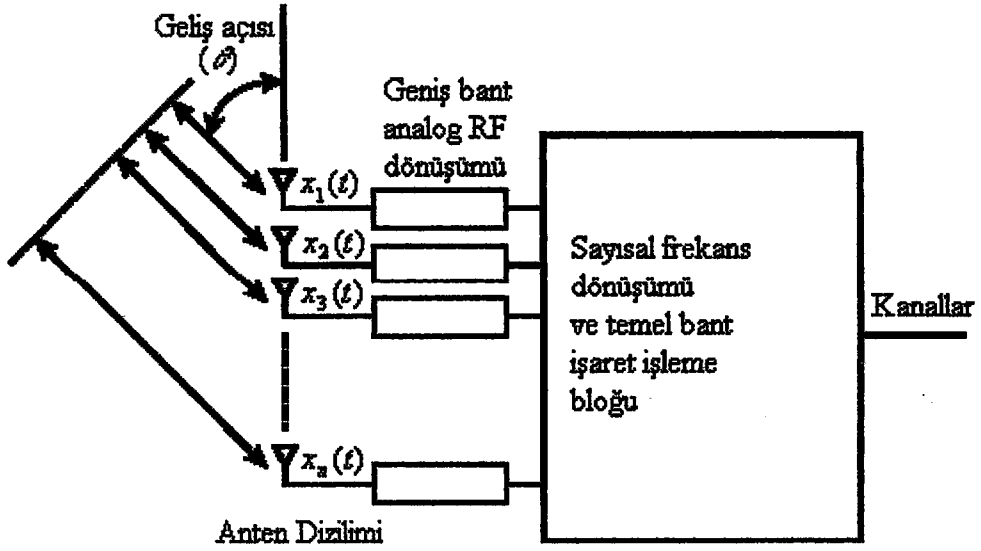
CDMA2000 sistemi, akıllı antenler için eklenmiş fonksiyonlara sahip 3G standartlarından birisidir. Yardımcı pilot kanalı modüle edilmemiş şekilde tanımlanır [34]; doğru ardışıl yayını tayf işareti bir CDMA temel istasyonu tarafından sürekli olarak iletilir. Yardımcı pilot kanalı, ileri hat ışınımı ve anten uygulamaları için gereklidir ve yardımcı pilot işaretiyle ilişkili ileri CDMA hatlarının tutarlı demodülasyonu için referans fazı sağlar. Benzer şekilde, WCDMA UMTS standardını önermektedir ki, ikincil ortak pilot kanalı (CPICH, Common Pilot Channel) ve ikincil ortak kontrol fiziksel kanalı (CCPCH, Common Control Physical Channel) ileri erişim kanal bölümü sadece hücrenin bölümlerinde iletebilmektedir; bu nedenle, aşağı bağlantı ışın şekillendirmeyi gerektirmektedir.

5.3 Anten Sistemlerine Yazılım Radyo Prensiplerinin Uygulanması

Sayısal işaret işleme teknolojisi, yazılım radyoyu kendi hedefi olan anten terminallerine yaklaştırmaktadır. Çünkü sayısal işaret işleme kuadratur işleme kullanarak temel bantta eşdeğer frekans fonksiyonunu gerçekleştirebilmektedir.

Temel SDR (yazılım tabanlı radyo) mimarisinin akıllı anten uyarlaması Şekil 5.2’te gösterilmiştir. Sistem hem alıcı hem de verici olabileceğinden dolayı, çift yönlü veri akış okları veri işleme fonksiyonlarının karşılıklı olduğunu göstermektedir.

Geniş bant analog RF aşağı dönüştürme bölümü her bir anten elemanı için gereklidir. Alım süreci için bu bölüm analog RF’i sayısal IF’ye dönüştürür. İletim durumu için bu durum tersine doğru çalışmaktadır. Her sayısal IF kanalı, sayısal frekans dönüştürme havuzuna ve temel bant işleme bölümüne geçirilir. Kaynak havuzu sayısal IF’i (I ve Q) temel banda dönüştürme ve sonrasında akıllı anten, modülasyon/demodülasyon ve kanal kodlama/çözme fonksiyonlarını gerçekleştirmesinden sorumludur.



Şekil 5.2: Yazılım radyo kullanarak akıllı anten sistemi.

Yazılım radyo mimarisi antenden her zincirle akıllı anten fonksiyonun girişi arasında faz diziliminin bakımına bağlıdır. Çünkü bu mimari, analog RF aşağı dönüştürme bölümlerinin n sayısı ile çoğullanır ve gerekli işlem havuzunun kapasitesini artırır; bu, tayfin sınırlı olduğu yüksek trafik kapasitesine sahip sistemler için çok elverişlidir. Bu durum için, daha fazla tayf kullanıyor olmak yerine akıllı anten fonksiyonu eklenerek, temel istasyonun kapasitesini genişletmek maliyet açısından daha verimli olmaktadır.

Sistem kapasitesi hücre ayırımıyla da büyütülebilmektedir. Yani, makro hücreler çok sayıda mikro hücrelere bölünmektedir. Bu daha fazla temel istasyon (BTS) sitesi gerektirir; fakat, daha fazla temel istasyonun çalışmasının mümkün olmadığı durumlarda tek seçim, akıllı anten kapasitesi ekleyerek varolan site kapasitesini arttırmaktır (Burns 2003).

Akıllı anten mimarileri, çeşitleri, kullanılan teknikleri ve algoritmaları önceki bölümlerde anlatılmıştır.

Genel olarak, yazılım radyo mimarisi, akıllı anten kapasitesiyle kullanıcı kapasitesini arttırmak için kolayca uyarlanabilmektedir ve çoklu sayısal frekans dönüştürme

aşamalarını birleştirmek için herhangi geniş bant analog kanala olanak vermelidir. Bu, bir RF taşıyıcısından daha çok geniş bant taşıyıcı zinciri sağlamak için gereklidir.



BÖLÜM 6 : SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, gezgin haberleşme sistemlerine sürekli artan talep nedeniyle kapasite etkisi, tayf verimliliği gibi karşılaşılan problemleri çözmeye kullanılabilecek yeni teknolojik gelişmelerden biri olan akıllı anten sistemi ve bu sistemlerde kullanılan ışın şekillendirme teknikleri, algoritmaları ve uzamsal süzgeçleme düşüncesi incelenmiştir. Geliş doğrultusu bilinen bir durum için anten örüntüsünü ilgili doğrultuya yönlendirme ve geliş açısını belirlemede kullanılan MUSIC algoritması ile ilgili bilgisayar ortamında (Matlab) yapılan uygulamalar verilmiştir (4. Bölüm).

Bu uygulamalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

-Kullanılan pencereleme fonksiyonu ne olursa olsun, elemanlar arası uzaklık gelen işaretin yarım dalga boyundan büyük olduğunda katlanmalar ortaya çıkmakta ve ışın şekillendirme ile ilgili problem ortaya çıkmaktadır. Elemanlar arası uzaklık gelen işaretin yarım dalga boyundan başlayarak azaltıldığında ise, ana kulakçık ve yan kulakçıkların genişliği artmaktadır.

-Kullanılan eleman sayısı azaltıldığında da ana kulakçık ve yan kulakçıkların genişliği artmaktadır. Ayrıca kulakçıkların yüksekliği de kullanılan eleman sayısı ile doğru orantılı bir şekilde değişmektedir.

-Dikdörtgen pencereleme fonksiyonu kullanıldığında, istenilen doğrultu boyunca dizilim kazancı dizilimde kullanılan eleman sayısına eşit olmaktadır. Blackman ve Hamming gibi pencereleme fonksiyonları kullanıldığında ise, dizilim kazancı neredeyse yarı yarıya azalmaktadır. Fakat Blackman ve Hamming pencereleme fonksiyonları kullanıldığında, dikdörtgen fonksiyonunda belirgin bir şekilde ortaya çıkan yan kulakçıkların etkisi çok önemli miktarda azaltılabilmektedir.

-Pencereleme fonksiyonu olarak, Blackman veya Hamming fonksiyonu yerine, dikdörtgen fonksiyonu kullanıldığında ana ve yan kulakçıkların genişliği daha dar olmaktadır. Böylece, istenilen doğrultuya daha hassas yönlendirme yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır.

-Geliş doğrultusunu belirleme de MUSIC algoritması kullanıldığında, gelen işaretlerin sayısı kullanılan eleman sayısına yakın olduğunda işaretlerin herbirini ayırmada sorunlar oluşmaktadır.

-İşaret gürültü oranı (SNR) azaltıldığında MUSIC algoritması bütün işaretleri ayırt edemez.

Elde edilen sonuçlara dayanarak aşağıdaki önermeleri yapabiliriz.

-Dizilimde elemanlar arası uzaklık gelen işaretin yarım dalga boyundan küçük olmalıdır.

-Dizilimde mümkün olan sayıda çok eleman kullanılarak daha iyi yönlendirme sağlanabilir.

-Yan kulakçıkların etkisi en aza indirmek istendiğinde Blackman gibi pencereleme fonksiyonları kullanılabilir.

-Pencereleme fonksiyonları kullanıldığında dizilim kazancı azalmaktadır.

-MUSIC algoritması için, gelen işaretlerin sayısı kullanılan eleman sayısına nazaran daha küçük olmalıdır.

Sonuç olarak, akıllı anten sistemi ve ışın şekillendirme teknikleri kablosuz iletişim sistemlerinin gereksinimlerini karşılayacak bir çözüm olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Loadman, C., Chen, Z., Jorgensen, D., 2003. "An overview of adaptive antenna technologies for wireless communications", Session A3, Communication Networks and Services Research Conference.
- [2] Godara, L. C., 1997. "Application of antenna arrays to mobile communications, part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations", Proceedings of the IEEE, 1195-1245.
- [3] Smart Antennas – A Technical Introduction, SYMENA Software & Consulting GmbH, Austria (www.symena.com).
- [4] Okamoto, G.T.,2002. Smart Antennas and Wireless LANS. Kluwer Academic Publishers, Norwell Mass.
- [5] Filiz, Ö., 2003. "Rank Constrained Temporal-Spatial Filtering For CDMA Systems", The Pennsylvania State University The Graduate School Department of Electrical Engineering.
- [6] Venkatasubramanian, R., 2003. "Beamforming for MC-CDMA", Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [7] Smart antennas Web ProForum Tutorials, The International Engineering, Consortium, <http://www.iec.org>.
- [8] Campbell, David K., 1999. "Adaptive Beamforming Using a Microphone Array for Hands-free Telephony", Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [9] Hampson, G. Alan, 1997. "Implementing Multi-dimensional Digital Hardware Beamformers", Department of Digital Systems, Faculty of Computing and Information Technology, Monash University.
- [10] Turner, L. and Koirala, D., AN2383/D, Rev. 0, 12/2002. Application Note, "A Smart Antenna System for 3G Wireless Using the MSC8102 DSP Device", Motorola.
- [11] Philips, K. , Hu, Z. ,Blankenship, K. , Siddiqi, Z. , Correal, N., 1999. "Implementation of an Adaptive Antenna Array Using the TMS320C541", Virginia Polytechnic Institute.

- [12] Burns, P., 2003. "Software Defined Radio For 3G" Artech House.
- [13] Tsoulos, G.V., 1995. Adaptive Antennas for Third Generation DS-CDMA Cellular Systems, Proceedings of the 45th Vehicular Technology Conference, Vol. 1, pp 45-49 Meach M.A. Swales S.C.
- [14] Buehrer, R.M., Kogiantis, A.G. , Liu, S. C. , Tsai, J. and Uptegrove D., 1999. "Intelligent Antennas for Wireless Communications – Uplink", Bell Labs Technical Journal, vol 4, pp.73-103.
- [15] Pillai, S. U., 1989. "Array Signal Processing", Springer-Verlag, New York.
- [16] Stutzman, W. L., and Thiele, G. A., 1981. "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons, New York.
- [17] Van Veen, B. D. and Buckley, K. M., 1988. "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP Magazine, pp. 4-24.
- [18] Haykin, S., 2001. "Adaptive Filter Theory". Prentice Hall.
- [19] Honig, M. L., Madhow, U. and Verdu S., 1995. "Blind adaptive multiuser detection", IEEE Transactions on Information Theory, 41(4):944-960.
- [20] Honig, M. L. ,and Xiao, W., 2001. "Performance of reduced-rank linear interference suppression", IEEE Transactions on Information Theory, 47(5):1928-1946.
- [21] Kapoor, S. , Gollamudi, S. , Nagaraj, S. and Huang, Y. F., 1999. "Adaptive multiuser detection and beamforming for interference suppression in CDMA mobile radio systems". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 48(5):1341-1355.
- [22] Kohno, R., 1998. "Spatial and temporal communication theory using adaptive antenna array" , IEEE Personal Communications Magazine, 28-35.
- [23] Lee, T. S. , and Tsai, T. C., 2001. "A beamspace-time interference cancelling CDMA receiver for sectorized communications in a multipath environment", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 19(7):1374-1384.
- [24] Lupas, R. , and Verdu, S., 1989. "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple access channels" , IEEE Transactions on Information Theory, 35:123-136.
- [25] Miller, S. Y. and Schwartz, S. C., 1995. "Integrated spatial-temporal detectors for asynchronous gaussian multiple-access channels", IEEE Transactions on Communications, 43(2/3/4):396-411.
- [26] The MathWorks Inc., Matlab, <http://www.mathworks.com>.

- [27] Winters, J. H., 1998. "Smart antennas for wireless systems" , IEEE Personal Communications, 23-27.
- [28] Miller, M. I. and Fuhrmann , D.R., 1990. "Maximum likelihood narrow-band direction finding and the EM algorithm. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1560-1577.
- [29] Buckley, K. M. and Xu, X. L., 1990. "Spatial spectrum estimation in a location sector" IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing 1842-1852.
- [30] Guanghai, X. , Silverstein, S. D. , Roy, R. H. and Kailath, T., 1994. "Beamspace ESPRIT" IEEE Transactions on Signal Processing, 349-356.
- [31] M. Tangemann, C. Hoek, R Rheinschmitt, Introducing Adaptive Array Antenna Concepts in Mobile Communication Systems, Proceedings RACE Mobile Telecommunications Workshop, Vol. 2, pp. 714-727.
- [32] "Software and DSP in Radio" IEEE Communications Magazine February 2001 pp.157-173.
- [33] ArrayComm, "Smart Antenna Technology for CDMA 2000 Network" July 2001.
- [34] 3GPP2, "C.S0002 Physical Layer Standard for CDMA 2000 Spread Spectrum Systems," Version 3.0, June 2001, p. 674.
- [35] The Software Defined Radio Forum,
http://www.sdrforum.org/MTGS/mtg_14_jun99/sadef.doc, 1999.
- [36] Vijayan, L., "DOA Estimation using MUSIC algorithm".
- [37] Schmidt R.O., 1979. "Multiple Emitter and Signal Parameter Estimation," Proceedings, RADC Spectral Estimation Workshop, pp. 243-258.
- [38] Devlin, M., "How to make smart antenna arrays" Nallatech.
- [39] Van Veen, B. D. and Buckley, K. M., 1988. "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering" , IEEE ASSP Magazine.
- [40] Raykar, Vikas.C., "A Study of a various Beamforming Techniques and Implementation of the Constrained Least Mean Squares (LMS) algorithm for Beamforming" Department of Electrical and Computer Engineering University of Maryland, College Park.

EK-A: Işınım Örüntüsü Yönlendirme Kodu

```
function bp=beam(d,M)
d=input('d mesafesini giriniz      d =');      %dizilimde elemanlar
arası boşluk
M=input('element sayısını giriniz M =');      %dizilimdeki eleman
sayısı
f=900e6;
m=0:M-1;      %eleman indeksleri
c=3e8;      %boşluktaki ışık hızı
k=(2*pi*f)/c;      %dalga sayısı
s_psi0=sin(30*pi/180);      %istenen doğrultunun sinüsü

s_psi=sin((-90:90)*pi/180);      %gelen işaretlerin sinüsü
%*****
% a = ones(M,1);      %dikdörtgen pencere fonksiyonu
%*****
% a = 0.54 - 0.46*cos(2*pi*m/M);      %hamming pencere fonksiyonu
%*****
% a = 0.42 + 0.08*cos(4*pi*m/M) - 0.5*cos(2*pi*m/M);      %blackman
pencere fonksiyonu
%*****
% a = exp(j*2*pi*m*d*s_psi0*f/c);      %gecikme ifadesindeki a
yonlendirme vektörü
a = transpose (a);      %yönlendirme matrisinin
transposesi
%*****
for i=1:length(s_psi)
    eRmR0 =exp(j*k*m*d*(s_psi(i)-s_psi0));      %yönlendirilmiş beam
    bp(i)=abs(eRmR0*a);      %toplam
end;
bpower=real(20*log10(bp/max(bp)));      %ışınım gücünü hesapla
%*****
subplot(211),plot(asin(s_psi)*180/pi,bp),ylabel('Büüklük')
grid on;
subplot(212),plot(asin(s_psi)*180/pi,bpower),xlabel('Gelen dalga
doğrultusu (\theta^o)'),ylabel('(dB)')
grid on;
%*****
%%polar(s_psi,bp),title('Işınım örüntüsü')      %kutupsal gösterim
```

EK-B: MUSIC Algoritması (Vijayan)

```
%-----  
%MUSIC algoritması  
%-----  
function [Count_signals,sorted_matrix,sorted_value] =  
music(No_signals,Angle_arrivals,Freq_signal,No_elements,  
Element_spacing,lambda,No_samples)  
close all;  
Kappa = 2*pi/lambda;  
d = Element_spacing ;  
  
%-----  
%Giris işaretlerinin elde edilmesi  
%-----  
Total_signal = zeros(No_signals,No_samples);  
k = 1 : No_samples;  
  
for i =1 : No_signals  
theta = 180*(2*rand-1);  
theta = theta*pi/180;  
Total_signal(i,:) = sqrt(2)*sin(2*Freq_signal(i)*pi*k);%+theta;  
%Total_signal(i,:) = randBW(No_samples);  
end  
  
%-----  
%Gürültü işaretlerinin elde edilmesi  
%-----  
noise = zeros(No_elements,No_samples);  
SNR = 20;  
noise_var = 1/(10^(SNR/10));  
for i = 1 : No_elements  
noise(i,:) = sqrt(noise_var)*randn(1,No_samples);  
end  
  
%-----  
%Herbir element için dizilim yayılım vektörü  
%-----  
Prop_matrix = zeros(No_elements,No_signals);  
for i = 1 : No_signals  
k = 0 : No_elements - 1 ;  
temp = exp(j.*k*Kappa*d*sin(Angle_arrivals(i)));  
Prop_matrix(:,i) = temp.' ;  
end  
  
%-----  
%Elementlerde alınan dalga şekilleri  
%-----  
U = zeros(No_elements,No_samples);  
for i = 1 : No_samples  
U(:,i) = Prop_matrix*Total_signal(:,i) + noise(:,i);  
end
```

```

%-----
%Giriş kovaryans matrisinin kestirimi
%-----
Cov_matrix = zeros(No_elements,No_elements);
for i = 1 : No_samples
    temp = U(:,i)*(U(:,i)');
    Cov_matrix = Cov_matrix + temp;
end
Cov_matrix = Cov_matrix/No_samples

%-----
%Eigen degerlerin ve karsılık gelen eigen vektörlerin bulunması
%-----
[Eig_matrix,Eig_value] = eig(Cov_matrix,'nobalance');

%-----
%Gelen isaretlerin sayısının kestirimi
%-----
[sorted_matrix,sorted_value,Count_signals,V_matrix] =
Eigsort(Eig_matrix,Eig_value,No_elements,noise_var);
figure(1);
plot([1 : No_elements],abs(fliplr(sorted_value)),'-+');
grid on
hold on
plot([1 : No_elements],noise_var*[ones(1,No_elements)],'-o');
xlabel('Indeks');
ylabel('Özdeger');
title('Korelasyon matrisinin özdegerleri');

%-----
%Tayfın çizdirilmesi
%-----
plotspectrum(V_matrix,No_elements,Kappa,d);

%-----
%Bu matlab fonksiyonu verilen köşegen matrisi sıralar
%-----
function [sorted_matrix,sorted_value,Count_signals,V_matrix] =
Eigsort(Eig_matrix,Eig_value,No_elements,noise_var)

for i = 1 : No_elements
    value(i) = Eig_value(i,i);
end

sorted_value = sort(value);
count = 0 ;

for i = 1 : No_elements
    if (sorted_value(i) < 1.5*noise_var)
        count = count + 1 ;
    end
end
Count_signals = No_elements - count ;
V_matrix = zeros(No_elements,count);
sorted_matrix = zeros(No_elements,No_elements);

```

```

for i = 1 : No_elements
    for k = 1 : No_elements
        if (sorted_value(i) == value(k))
            sorted_matrix(:,i) = Eig_matrix(:,k);
        end
    end
end

for i = 1 : count
    V_matrix(:,count-i+1) = sorted_matrix(:,i);
end

%-----
%Bu bölüm MUSIC algoritmasının tayfını çizdirir.
%-----
function result = plotspectrum(V_matrix,No_elements,Kappa,d)
f = zeros(1,10001);
i = 1 ;
for theta = -90 : 180/10000 : 90
    k = 0 : No_elements - 1 ;
    temp = exp(j.*k*Kappa*d*sin(theta*pi/180));
    a = temp.' ;
    f(i) = (a'*a)/(a'*V_matrix*V_matrix'*a);
    i = i + 1;
end
theta = -90 : 180/10000 : 90 ;
f = abs(f)./max(abs(f));
figure(2);
plot(theta,20*log10(f));
grid on
xlabel('Açıl');
ylabel('Büyüklik (dB)');
title('Uzamsal tayf');

%-----
%Bu fonksiyon rastgele ikili değerler üretir.
%-----
function [result] = randBW(No_samples)
array = randint(1,No_samples,[0 1]);
array = 2.*array-1;
result = array;

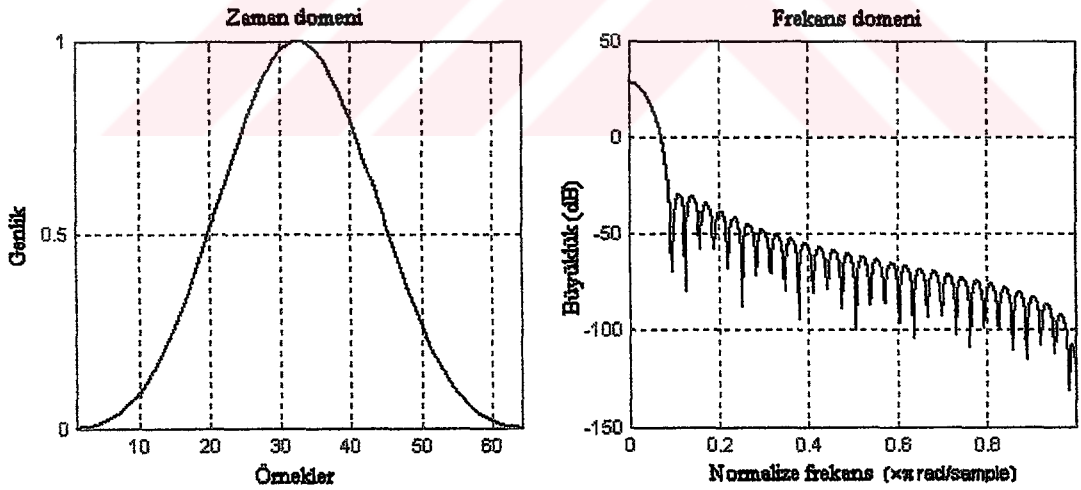
%-----
%Farklı durumları çalıştırmak için
%-----
[Count_signals,sorted_matrix,sorted_value] = ...
music(2,[30*pi/180 60*pi/180],[0.2 0.2],6,0.5,1,100)

```

EK-C: Pencereleme Fonksiyonları

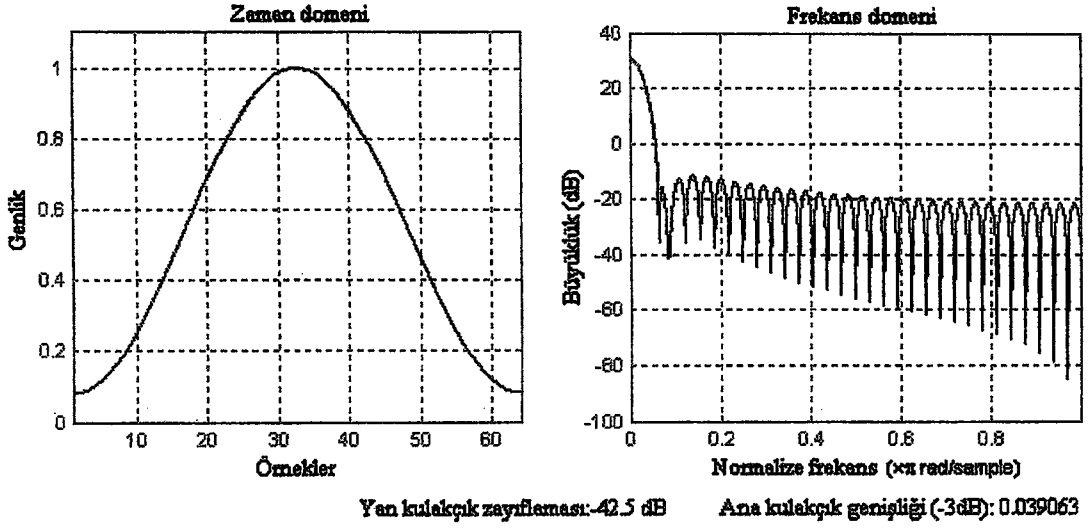
Tablo C.1: Pencereleme fonksiyonları

Pencereleme Fonksiyonu	Matematiksel ifadesi
Dikdörtgen	$W_R(k) = \begin{cases} 1 & ; k \leq N/2 \\ 0 & ; \text{diger} \end{cases}$
Blackman	$W_B(k) = \begin{cases} 0.42 + 0.5 \cos(2\pi k / N) + 0.08 \cos(4\pi k / N) & ; k \leq N/2 \\ 0 & ; \text{diger} \end{cases}$
Hamming	$W_H(k) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos(2\pi k / N) & ; k \leq N/2 \\ 0 & ; \text{diger} \end{cases}$



Yan kulakçık zayıflaması: -58.1 dB Ana kulakçık genişliği (-3dB): 0.050781

Şekil C.1: Blackman pencere fonksiyonu



Şekil C.2: Hamming pencere fonksiyonu

ÖZGEÇMİŞ

1979 Yılıının temmuz ayında İzmit'te doğdu. İzmit Mimar Sinan İlkokulu'nda ilköğrenimini tamamladı. Ortaokul ve lise öğrenimini ise İzmit Namık Kemal Lisesi'nde tamamladı. 1995 yılı Haziran ayında Kocaeli Üniversitesi tarafından düzenlenen 2. Kocaeli Matematik ve Fizik Olimpiyatlarına katıldı. 1996 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2001 yılında bölüm ikincisi derecesiyle Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun olmuştur. Aynı yıl girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ana bilim dalında yüksek lisans programından mezun olma durumundadır. Şuan özel bir şirkette danışman olarak görev yapmaktadır.