

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLATFORMA MONTELİ BASKILI ANTEN
DİZİLERİNE MEKANİK TİTREŞİMLERİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Cantürk KARADENİZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLATFORMA MONTELİ BASKILI ANTEN
DİZİLERİNE MEKANİK TİTREŞİMLERİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Cantürk KARADENİZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Serkan AKSOY**

**GEBZE
2011**



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/02/2011 tarih ve 2011/09 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15/04/2011 tarihinde tez savunma sınavı yapılan ...Cantürk...KARADENİZ'in... tez çalışması ...ELEKTRONİK... Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.
Mehmet Kp.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Sarıhan AKSOY

ÜYE

: Doç. Dr. Ahmet DEMİR

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. İ. Hakkı TAYYAR

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: PLATFORMA MONTELİ BASKILI ANTEN DİZİLERİNE MEKANİK TİTREŞİMLERİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YAZAR ADI: CANTÜRK KARADENİZ

Hava, deniz ve kara platformlarına entegre edilmiş antenler değişken aerodinamik yüklere ve platformun hareketinden kaynaklanan titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu durum anten yüzeylerinin deformasyonuna, dizi antenin elemanlarının pozisyonunun ve yönlerinin değişmesine neden olduğundan, dizi elemanlarında istenmeyen genlik ve faz değişimlerini beraberinde getirmektedir. Dizi elemanlarında oluşan bu değişimler, ışın diyagramına (ana hüzme yönünün ve şeklinin değişmesi, yan kulakçık seviyelerinin artması v.b.) olumsuz etki etmektedir. Bu etkiler Yapay Açıklık Radar antenleri, Hareketli Hedef Belirleme antenleri ve Yön Bulma antenleri için çok önemli değişikliklere neden olabilir. Örneğin; bir hava savunma aracı tarama radarı veya kanat altına yerleştirilmiş Yapay Açıklık Radarının anten ışın diyagramlarında, uçağın hareketinden kaynaklanan kaymalar, yanlış hedef algılamasına veya yanlış veri alınmasına sebep olabilmektedir. Bu tezde temel amaç, titreşim ve deformasyonların mikroşerit dizi anten performansı üzerindeki etkilerini Geliş Açısı Kestirimi algoritması olan MUSIC Yöntemi ile incelemek ve bozulan ışın diyagramının düzeltilmesi için Yapay Uyarlamalı Hüzme Şekillendirme (Adaptive Synthetic Beamforming) Yöntemini kullanarak düzeltme sağlamaktır.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: ANALYSING MECHANICAL VIBRATION EFFECTS OF PRINTED ANTENNA ARRAYS MOUNTED ON A PLATFORM

AUTHOR: CANTÜRK KARADENİZ

Array antennas which are integrated into the skin of air, land and sea vehicles are subject to unsteady aerodynamic loads. Mechanical forces and these aerodynamic loads will cause deformation of the antenna surface. As a consequence, the positions and orientations of the elements of the phased array antenna change. The relative phases of the respective signals feeding the antennas will vary, and the antenna radiation pattern is affected: the main beam direction can change and the beam width and/or side lobe levels can increase. The influence of deformations and vibrations will be most significant on array antennas, which are large in terms of wavelength (high gain antennas). Examples of such antennas are array antennas for Synthetic Aperture Radar (SAR), Moving Target Indication (MTI) and antenna systems to identify direction of arrival of signals. The objective of this thesis to discuss the effects of deformations and vibrations on the performance of microstrip antenna arrays by the MUSIC algorithm for Direction of Arrival Estimation and to describe technology to counteract these effects by means of adaptive or synthetic beamforming.

TEŞEKKÜR

Bu alıőmada yardım ve desteklerini esirgemeyen tez danıőmanım Sayın Do. Dr. Serkan AKSOY'a ve konunun belirlenmesinde, problemin özölmesinde ve uygulamasında değerli katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Bahattin TÜRETKEN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Konusu ve Önemi	1
1.2. Tarihsel Gelişim	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	3
2. ANTEN ve ANTEN DİZİSİ	5
2.1. İzotropik Elemanlardan Oluşan Anten Dizisi	5
3. GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ	8
3.1. Dizi Cevap Vektörü	8
3.2. Alınmış İşaret Modeli	10
3.3. Alt Uzay Temelli Veri Modeli	12
3.4. İşaret Otokovaryans Matrisleri	14
3.5. Klasik Geliş Açısı Kestirim Yöntemleri	17
3.5.1. Klasik Demet Şekillendirme Yöntemi	17
3.5.2. Capon'un Minimum Varyans Yöntemi	18
3.6. Geliş Açısı Kestiriminde Alt Uzay Yaklaşımı	19
3.6.1. MUSIC Algoritması	19
3.7. Kompanzasyon Tekniği ve Yapay Hüzme Şekillendirme Yöntemi	22
4. SAYISAL ÇÖZÜM TEMELLİ BENZETİMLER	24
4.1. Titreşime Maruz Kalan Sekiz Elemanlı Anten Dizisi Benzetimi	25
4.1.1. Birinci Pozisyon	26
4.1.2. İkinci Pozisyon	27
4.1.3. Üçüncü Pozisyon	28
5. SEKİZ ELEMANLI ANTEN DİZİSİ İÇİN GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ	31
6. ÖLÇÜM DÜZENEGİ ve ÖLÇÜM SONUÇLARI	35

6.1. AD8302 Uygulama Kartı	38
6.2. Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı	42
6.2.1. Tek Bir Mikroşerit Yama Anten Tasarımı	42
6.2.2. Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı	45
6.3. Geliş Açısı Kestirimi için Ölçümler	46
6.4. Kompanzasyon Ölçümleri	51
7. YORUMLAR ve DEĞERLENDİRME	53
8. KAYNAKLAR	55

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
DOA	Direction of Arrival
İGO	İşaret Gürültü Oranı
MTI	Moving Target Indication
MUSIC	Multiple Signal Classification
MVY	Minimum Varyans Yöntemi
SAR	Synthetic Aperture Radar
ZUSF	Zaman Uzayında Sonlu Farklar

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
dB	Desibel
dB_i	Desibel (İzotropik)
dB_m	Desibel (Miliwatt)
θ	Teta (derece)
f	Frekans (Hz)
t	Zaman (sn)
λ	Dalga Boyu (m)
d	Yaman Anten Elemanları Arasındaki Mesafe (cm)

τ_q	Faz Gecikmesi (sn)
c	Işık Hızı(m/sn)
\vec{k}	Dalga Yayınım Yönünü Gösteren Birim Vektör
\vec{x}	Dizi Ekseni Yönündeki Birim Vektör
f_m	Gelen Düzlemsel Dalganın Frekansı (Hz)
k_m	Gelen m 'inci İşaretin Yön Vektörü
ψ	Faz Gecikmesi (sn)
β	Gelen Düzlemsel Dalganın Dalga Sayısı Vektörü (Rad/m)
ϕ	Azimut Açısı (derece)
$G_i(\theta, \phi)$	i 'inci Elemanın (θ, ϕ) Yönündeki Kazancı
$a(\theta, \phi)$	Yönlendirme Vektörü
θ	Bütün Geliş Açılarının Vektörü
K	Alt Uzay Boyutu
R_{xx}	Alınan İşaret Otokovaryans Matrisi
R_{ss}	İstenen İşaret Otokovaryans Matrisi
H	Hermitian Matris Operatörü
ε	Beklenti Operatörü
$x(t_m)$	Alınan m 'inci Örnek
$x^H(t_m)$	Alınan m 'inci Örneğin Hermitiani

σ_n^2	Gürültü Varyansı
\vec{E}_j	j 'inci Anten Elemanındaki Elektrik Alan Vektörü (V/m)
A_j	j 'inci Anten Elemanın Genliğini (V)
\hat{e}^i	Elektrik Alanın Yönünü Gösteren Birim Vektör
\hat{k}^i	Gelen Düzlemsel Dalganın Yönünü Gösteren Yayılım Vektör
t_n	Zaman Aralığı (sn)
R	Kovaryans Matrisi
V_s	İşaret Alt Uzayı
V_n	Gürültü Alt Uzayı
σ^2	Gürültü Eşik Seviyesi
Λ_s	Diagonal Matris
ΔV_j	Faz Farkı (derece)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Uçak kanadındaki titreşimler.	1
2.1. Lineer anten dizisi ve düzlemsel dalga.	6
3.1. Düzgün lineer dizi.	9
3.2. Geliş açısı kestirim probleminin geometrik gösterilimi.	12
3.3. İşaret Otokovaryans matrisi örneği.	15
3.4. Sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin deformasyona uğramış hali.	22
4.1. Sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin üç farklı pozisyonu.	25
4.2. Kartezyen tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınma diyagramı.	26
4.3. Polar tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınma diyagramı.	27
4.4. Kartezyen tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınma diyagramı.	27
4.5. Polar tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınma diyagramı.	28
4.6. Kartezyen tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınma diyagramı.	29
4.7. Polar tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınma diyagramı.	29
5.1. $\theta=10^\circ$ için geliş açısı kestirimi.	32
5.2. $\theta=20^\circ$ için geliş açısı kestirimi.	32
5.3. $\theta=30^\circ$ için geliş açısı kestirimi.	33
5.4. $\theta=40^\circ$ için geliş açısı kestirimi.	34
6.1. Laboratuvar ölçüm düzeneği.	35
6.2. ETS 3115 Horn antenin kazanç grafiği.	36
6.3. Yarı yansız oda içinde kaynak Horn anten ve yerleşimi.	37
6.4. Yarı yansız oda içinde anten dizisi ve yerleşimi.	37
6.5. AD8302 uygulama kartının genel görünümü.	38
6.6. AD8302 uygulama kartının faz çıkışı grafiği.	39

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7. AD8302 uygulama kartının faz/genlik farkı ölçümünde ideal transfer karakteristikleri.	39
6.8. AD8302 uygulama kartının faz/genlik farkı ölçümü için kullanılan devre şeması.	40
6.9. AD8302 uygulama kartı ile faz farkı ölçümü.	40
6.10. AD8302 uygulama kartı ile genlik farkı ölçümü.	41
6.11. Koaksiyel kablo ile beslenen mikroşerit yama antenin yandan şematik görünümü.	42
6.12. Tek yama antenin önden ve arkadan görünümü.	42
6.13. Birinci mikroşerit yama antenin S11 parametresi.	43
6.14. Polar tipte tek elemanlı yama antenin uzak alan ışın diyagramı.	43
6.15. Kartezyen tipte tek elemanlı yama antenin uzak alan ışın diyagramı.	44
6.16. Sekiz elemanlı mikroşerit yama anten dizisinin koaksiyel kablo ile beslenmesi.	45
6.17. İkinci mikroşerit yama antenin S11 parametresi.	45
6.18. Mikroşerit anten dizisi pozisyonlarının görünümü.	46
6.19. $\theta=30^\circ$ geliş açısı kestirimi için antenin konumlandırılması.	48
6.20. $\theta=30^\circ$ için geliş açısı kestirimi (ölçüm).	48
6.21. $\theta=41^\circ$ geliş açısı kestirimi için antenin konumlandırılması.	49
6.22. $\theta=41^\circ$ için geliş açısı kestirimi (ölçüm).	49
6.23. $\theta=18^\circ$ geliş açısı kestirimi için antenin konumlandırılması.	50
6.24. $\theta=18^\circ$ için geliş açısı kestirimi (ölçüm).	50
6.25. İkinci pozisyon için kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumda geliş açıları.	51
6.26. Üçüncü pozisyon için kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumda geliş açıları.	52

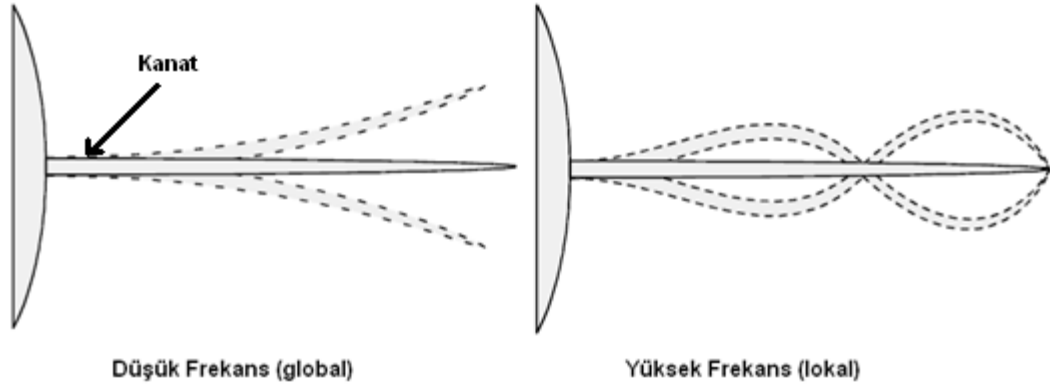
TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
I: Yama antenlerin besleme noktalarının koordinatları	24
II: Yama antenlerin referans yama antene göre faz fark gerilimleri	47

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Konusu ve Önemi

Hava, deniz ve kara platformlarına entegre edilmiş antenler, değişken aerodinamik yüklere ve platformun hareketinden kaynaklanan istenmeyen titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle yük ve antenin entegre edildiği yapının mekanik özelliklerine bağlı olarak farklı frekanslarda titreşimler oluşabilir. Şekil 1.1'de görülebileceği üzere bir uçağın kanadında düşük ve yüksek frekanslarda (300 Hz 'e kadar) titreşimler oluşabilmektedir [Knott, 2006].



Şekil 1.1. Uçak kanadındaki titreşimler.

Bu titreşimler anten yüzeylerinin deformasyonuna, dizi antenin elemanlarının pozisyonunun ve yönlerinin değişmesine neden olarak dizi elemanlarında istenmeyen genlik ve faz hatalarına neden olmaktadır. Dizi elemanlarında oluşan bu istenmeyen değişim, ışıma diyagramına (ana hüzme yönünün ve şeklinin değişmesi, yan kulakçık seviyelerinin artması v.b.) olumsuz etki etmektedir. Ortaya çıkan bu etkiler Yapay Açıklık Radar (Synthetic Aperture Radar) antenleri, Hareketli Hedef Belirleme (Moving Target Indication) antenleri ve Yön Bulma (Direction Finding) antenleri için çok önemli değişikliklere neden olabilir. Özellikle hava savunma aracı tarama radarı veya kanat altı Yapay Açıklık Radarının (Synthetic Aperture Radar) anten ışıma diyagramlarında, uçağın titreşimlerinden kaynaklanan kaymalar,

yanlış hedef algılamasına veya yanlış veri alınmasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden titreşimden kaynaklanan genlik ve faz değişimlerini algılayarak otomatik olarak kompanze etmek oldukça önemli bir problemdir. Bu tez çalışmasında uçağın hareketli olduğu dikkate alınmayacak olup, sadece anlık olarak uçağın üzerinde bulunan bir anten dizisinin titreşime maruz kaldığı öngörülmüştür.

1.2. Tarihsel Gelişim

Mikroşerit yama anten kavramı ilk kez 1953 yılında Deschamps tarafından ortaya atılmıştır [Deschamps, 1953]. Daha sonra Gutton ve Baissinot bir mikroşerit antene patent almıştır [Gutton ve Baissinot, 1955]. Buna rağmen geniş bir değer aralığındaki dielektrik sabiti, bakır veya altınla kaplanmış alt tabaka için fotografüv tekniklerinin kullanılabilir ısı ve mekanik düşük kayıp oranlarının geliştirilerek teorik modelleri kadar iyi pratik antenler üretilmesi yirmi yıl sürmüştür. Bu durumun başlıca nedeni iyi dielektrik tabanların mevcut olmamasıdır. Bu tabanların gelişimi ile mikroşerit antenlerde hızlı bir gelişim sürecine girilmiştir. İlk pratik antenler 1970'li yılların başlarında Howell ve Munson tarafından geliştirilmiştir [Howell, 1972], [Munson, 1973]. Mikroşerit antenlerin hafiflik, küçük hacim, düşük maliyet, baskı devrelere uygunluk gibi avantajları nedeniyle çok sayıda araştırma ve geliştirmeler yapılmıştır [Balanis, 1997].

Literatürde, dizi antenlerin çevre koşulları nedeniyle oluşan yansıma problemi, faz-genlik hataları ve dizi anten elemanlarının birbirlerini elektriksel olarak etkilemeleri (mutual coupling) ve bu problemlerin düzeltilmesi konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. 1982 yılında A. L. Aizenberg tarafından bir dizi antende dalgaboyuna eşit veya yakın bir deformasyon olması durumunda, antenin ışım diyagramının bozulması ile ilgili çalışma yapılmıştır [Aizenberg, 1982]. Ayrıca; NATO bünyesinde oluşturulan bir çalışma grubunda uçak kanadı üzerine yerleştirilen dizi antenlerin performansı konusunda çalışmalar yapılmaktadır [Knott, 2006], [Schippers v.d., 2006], [Schippers v.d., 2007], [Karadeniz ve Türetken, 2010].

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında öncelikle anten ve izotropik anten dizisi kavramları açıklanmıştır. Daha sonra ölçümler yapabilmek için S bandında çalışan sekiz elemanlı mikroşerit yama anten dizisi tasarlanmıştır. Anten dizilerinde eleman sayısı arttıkça ana hüzmelerin genişliği daralmaktadır. Bu sebeple anten dizisi sekiz elemanlı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yama antenin boyutları ve dielektrik malzemenin özellikleri kapsamında sekiz elemanlı yama antenin Network Analizör ile ölçülmüş olan S_{11} parametreleri verilmiştir.

Alınmış işaret modellemesi, geliş yönü kestirimi yöntemlerinden MUSIC yöntemi ve alt uzay yaklaşımı hakkında bilgiler verilmiştir. Tasarlanan dizi antenin deformasyona uğradığı ve uğramadığı durumlar için hazır bir ticari yazılım olan CST STUDIO SUITE (Zaman Uzayında Sonlu Farklar (ZUSF) yöntemi tabanlı) kullanılarak sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin ışın diyagramlarının benzetimleri yapılmıştır. CST STUDIO SUITE benzetimlerinde, mikroşerit antenler verici olarak kullanılmış olup dizi antenin bozulmaya uğramadığı 30° durumundaki ışın diyagramları hesaplanmıştır. Daha sonra deformasyonun olduğu durumlar olan 21° ve 41° için benzetimler yapılarak mikroşerit dizi anten ışın diyagramının önemli parametreleri olan ana hüzmeye yönü, yan hüzmelerin şekli ve seviyelerinin değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte Multiple Signal Classification (MUSIC) algoritması için Matlab ortamında sekiz elemanlı bir dizi anten için geliş açısı kestirimi yapan algoritma geliştirilmiştir. Ölçümlerde MUSIC algoritması alıcı anten olarak düşünülmüştür. Bu algorithmada çeşitli geliş açılarını gösteren benzetim sonuçları grafik olarak sunulmuştur. Tasarlanan anten ile ölçümler TÜBİTAK Ulusal Elektronik Kriptoloji ve Araştırma Enstitüsü'nde bulunan yarı yansız oda içinde yapılarak, dışarıdan gelebilecek istenmeyen işaretler engellenmiştir. Ölçümler için tasarlanan 2 GHz frekansında sekiz elemanlı mikroşerit yama anten dizisi bir platforma monte edilmiştir. Dizi antenin sol ucu her zaman sabit kalacak, sağ ucu ise ileri geri hareket edebilecek şekilde serbest bırakılmıştır. Kaynak olarak kullanılan Horn anten, mikroşerit yama

anten dizisine göre 30° açıyla sabitlenmiştir. Dizi antenin deforme olmamış durumdaki geliş açısı bulunduktan sonra, dizi anten iki farklı biçimde deformasyona uğratarak geliş açıları tekrar ölçülmüş ve Matlab programı ile tekrar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; dizi antenin elemanlarının pozisyonu değiştiğinde, geliş açısının da değiştiği görülmüştür. Daha sonra bozulan geliş açısının düzeltilmesi için Yapay Uyarlamalı Hüzme Şekillendirme (Adaptive Synthetic Beamforming) Tekniği kullanılarak düzeltme sağlanmıştır.

2. ANTEN ve ANTEN DİZİSİ

Antenler elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren veya bunun tersini de yapabilen yapılardır. Anten etrafındaki açısız ışımaya karakteristiğine “ışımaya diyagramı” adı verilir. Küresel koordinatlarda yatay ve düşey açılarla belirlenen anten diyagramı için uygulamada yatay diyagram ve düşey diyagram olarak iki diyagram önemlidir. En basit anten izotropik yayıcı ya da noktasal kaynaktır. Birden fazla anten elemanı bir arada kullanılarak anten dizisi oluşturulur ve böylece istenen ışımaya karakteristikleri elde edilebilir. Ayrıca dizi elemanlarının besleme gerilimlerinin genlikleri ve fazları değiştirilerek ışımaya karakteristiğinin yön ve şekil değiştirmesi de sağlanabilir [Akkaya,1996].

Dizi antenler ışımaya gücünü belli bir yöne doğrulturlar. Ana ışımaya doğrultusundaki hüzmeye genişliğine “ana hüzmeye” adı verilir. Ana hüzmeyin yanlarında oluşan istenmeyen hüzmelere “yan hüzmeler (yan kulakçıklar)” ve arkada oluşan hüzmelere “arka hüzmeler (arka kulakçıklar)” denir. Ana ışımaya doğrultusunda gücün yarıya (3 dB) düştüğü genişlik olan hüzmeye genişliği önemli bir parametredir [Akkaya,1996].

2.1. İzotropik Elemanlardan Oluşan Anten Dizisi

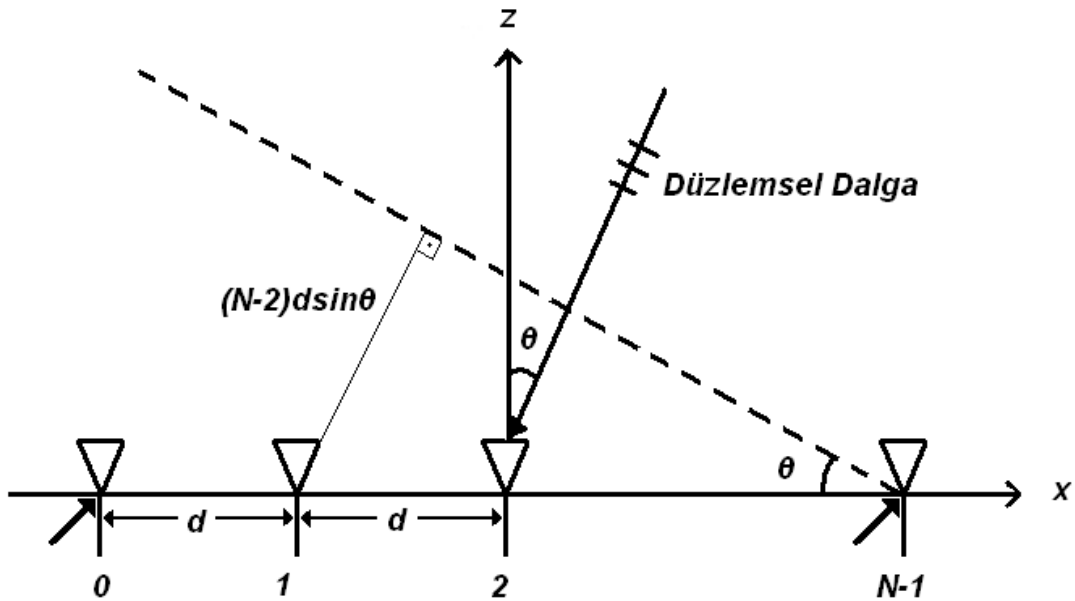
Belli noktalara yerleştirilmiş bir grup anten elemanının oluşturduğu dizi ışımaya diyagramı, tek elemanın ışımaya diyagramı ile izotropik dizinin ışımaya diyagramının çarpımına eşittir. Bu nedenle dizi karakteristikleri için genelde izotropik (eş yönlü) elemanlardan oluşmuş dizilerle çalışmak yeterlidir. Bu şekilde oluşturulan dizilerin temel farkı ışımaya karakteristiğine getireceği değişiklikler olacaktır. Anten dizilerinin ışımaya karakteristikleri dizi eleman karakteristiğine, eleman sayısına, yerleşim şekillerine ve uyarma (besleme) gerilimlerine ve fazlarına bağlıdır [Akkaya,1996]. Antenler uzaysal filtreler olarak düşünülebilir; yani eş zamanlı olarak istenen yöndeki işaretleri alırken diğer yöndeki işaretleri bastırırlar. Bir faz dizisinde seçicilik, faz kaydırma ve sonra bütün anten elemanlarının çıkışlarına ilave edilmesiyle elde edilir. Bir

pasif anten dizisinde İşaret/Gürültü Oranı (İGO) iyileştirmesi, anten dizisi eleman sayısı ile orantılıdır. Özdeş elemanlardan oluşan bir anten dizisinde iki faktör dikkate alınmalıdır. Birincisi, anten dizisinin geometrik yapısı (lineer, dairesel v.b.), ikincisi ise anten dizi elemanlarının birbiriyle olan uzaklığıdır [James, 1995].

Şekil 2.1'de x eksenini boyunca N elemanlı ve $q=0,1,\dots,N-1$ indisli bir lineer dizi anten gösterilmiştir. Tek kaynaktan gelen düzlemsel dalga ve geliş açısının şekilde görüldüğü gibi θ olduğu varsayalım. Gelen dalganın sinüsoidal ve frekansının f olduğunu kabul edersek, q 'uncu dizi elemanında oluşan işaret $g(q,t)$

$$g(q,t) = A \cos[2\pi f(t - \tau_q)] \quad (2.1)$$

olarak verilir. Burada A gelen dalganın genliği, τ_q referans anten elemanına göre ($q=0$) faz gecikmesini gösterir.



Şekil 2.1. Lineer anten dizisi ve düzlemsel dalga.

Anten elemanları arasındaki mesafe d ve düzlemsel dalganın geliş açısı θ olması durumunda faz gecikmesi τ_q

$$\tau_q = -\frac{qdsin\theta}{c} \quad (2.2)$$

olarak yazılabilir. Burada c ışık hızıdır. Denklem (2.2), denklem (2.1)'de yerine yazılırsa

$$g(q, t) = A \cos\left(2\pi f \left[t + \frac{qdsin\theta}{c}\right]\right) \quad (2.3)$$

elde edilir. \vec{k} dalga yayılım yönünü gösteren birim vektör ve \vec{x} ise dizi eksenini yönündeki birim vektör olmak üzere denklem (2.1)

$$g(q, t) = A \cos\left(2\pi f t - 2\pi f q \vec{k} \cdot \vec{x} \frac{d}{c}\right) \quad (2.4)$$

olur. Burada $\vec{k} \cdot \vec{x}$

$$\vec{k} \cdot \vec{x} = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) = -\sin\theta \quad (2.5)$$

olarak verilir.

Eğer M tane işaret varsa q 'uncu anten elemanının çıkışı, alınan işaretlerin süperpozisyonu olarak

$$g(q, t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos\left(2\pi f_m t - \frac{2\pi f_m q d \cdot \vec{k}_m \cdot \vec{x}_m}{c}\right) \quad (2.6)$$

gibi yazılabilir. Burada f_m m 'inci işaret için gelen düzlemsel dalganın frekansını, \vec{k}_m ise gelen m 'inci işaretin yönünü gösterir. Bu denklem üstel olarak

$$g(q, t) = \sum_{m=1}^M A_m \exp\left(j \left[2\pi f_m t - \frac{2\pi f_m q d \vec{k}_m \cdot \vec{x}_m}{c}\right]\right) \quad (2.7)$$

biçiminde yazılabilir [James, 1995].

3. GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ

Bu çalışmada, kaynak anten sabit olmak üzere dizi antenin deformasyona uğraması durumunda, dizi antenin ışın diyagramı üzerindeki etkilerini görebilmek için Geliş Açısı Kestirim Yöntemi (Direction of Arrival, DOA) kullanılacaktır. Buna göre dizi antenin deformasyona uğramamış durumdaki ışın diyagramı bulunduktan sonra, dizi anten deformasyona uğratılarak ışın diyagramı tekrar bulunacak ve ışın diyagramları arasındaki fark irdelenecektir. Geliş Açısı Kestirimi uygulamalarında gürültü içeren ölçümlerden gerçek işaretin geliş açısının tahmin edilmesi amaçlanır. Böylece dizi anten elemanlarından alınan veriler toplandıktan sonra kaynakların yeri tespit edilmeye çalışılır. Genel olarak geliş açısı kestirim algoritmaları; klasik algoritmalar ve alt uzay algoritmaları olarak iki gruba ayrılabilir. Bu algoritmaların daha iyi anlaşılabilmesi için önce Dizi Cevap Vektörü, Alınmış İşaret Modeli, Alt Uzay Temelli Veri Modeli ve İşaret Otokovaryans Matrisi kavramları ele alınacaktır [Balanis ve Ioannides, 2007].

3.1. Dizi Cevap Vektörü

Özdeş izotropik elemanlardan oluşan bir anten dizisi düşünölsün. Antenin her bir elemanına, gelen işaretin fazının kaymış hali ulaşır. Örnek olarak Şekil 3.1'de ardışıl anten elemanları arasındaki faz gecikmesi $\psi = (2\pi/d) \sin \theta$ olan bir lineer dizi verilmiştir. Dizi Cevap Vektörü, her bir dizi elemanın gelen düzlemsel dalgaya cevabı ve yönlendirme vektörünün kombinasyonudur. Buna göre N elemanlı üç boyutlu anten dizisi için normalize Dizi Cevap Vektörü ifadesi

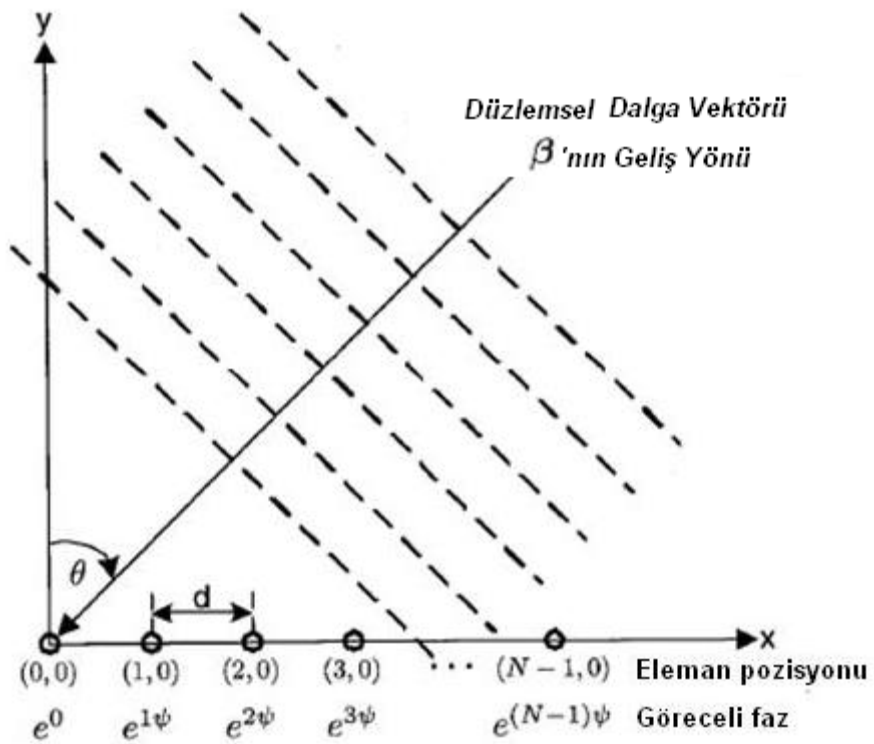
$$a(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} G_1(\theta, \phi)e^{-j\beta r_1} \\ G_2(\theta, \phi)e^{-j\beta r_2} \\ \vdots \\ G_N(\theta, \phi)e^{-j\beta r_N} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

olacaktır [Balanis ve Ioannides, 2007]. Burada β gelen düzlemsel dalganın dalga sayısı vektörü olup, Kartezyen koordinat sisteminde genel olarak

$\beta = [\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\theta]$ biçiminde verilir. $i=1,2,\dots,N$ olmak üzere $r_i = [x_i, y_i, z_i]$ dizideki i 'inci elemanın üç boyutlu pozisyon vektörüdür. θ elevasyon açısı, ϕ azimut açısı olmak üzere $G_i(\theta, \phi)$, i 'inci elemanın (θ, ϕ) yönündeki kazancıdır. Bu durumda izotropik anten dizisi için Yönlendirme Vektörü olan $a(\theta, \phi)$

$$a(\theta, \phi) = [e^{-j\beta r_1}, e^{-j\beta r_2}, \dots, e^{-j\beta r_N}]^T \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir [Balanis ve Ioannides, 2007].



Şekil 3.1. Düzgün lineer dizi.

3.2. Alınmış İşaret Modeli

K tane birbirinden bağımsız kaynağın N elemanlı anten dizisine doğru elektromanyetik işaret yaydığı varsayalım. Gelen her işaret için dizi cevabının sadece bir açının (θ) parametresinin fonksiyonu olduğu kabul edilsin. Alınmış İşaret Modeli analizi için darbant işaret yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, işaret veya anten elemanlarının band genişliğinin çalışma frekansına oranla çok küçük olduğu (veya işaret zarfı değişiminin çok yavaş olduğu) varsayılır. Buna göre alınan işaretler, kaynaklardan gelen işaretlerin süperpozisyonu ve lineer gürültü eklenmiş olarak aşağıdaki iki denklemlerle açıklanabilir [Balanis ve Ioannides, 2007].

$$x(t) = \sum_{k=1}^K a(\theta_k) s_k(t) + n(t) \quad (3.3)$$

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \quad (3.4)$$

Burada $x(t) \in \mathbb{C}^N$, t anında anten dizisindeki temel bant işaret vektörü eş değerini, $s_k(t)$, t anında θ_k açısı ile k 'inci kaynaktan gelen düzlemsel dalgayı, $a(\theta_k) \in \mathbb{C}^N$ geliş açısı yönünde dizi cevabı vektörünü ve $n(t) \in \mathbb{C}^N$ ise eklenen gürültüyü ifade eder. Buna göre daha genel olarak $x(t)$

$$x(t) = \mathbb{A}(\theta) s(t) + n(t) \quad (3.5)$$

olarak verilir. Bu denklemden $\mathbb{A}(\theta) \in \mathbb{C}^{N \times K}$ dizi cevabı matrisi olmak üzere

$$\mathbb{A}(\theta) = [a\theta_1(t), a\theta_2(t), \dots, a\theta_K(t)] \quad (3.6)$$

şeklinde verilir. Burada $\mathbb{A}(\theta)$ j 'inci işaret yönünde gelen işarete, i 'inci dizi elemanının cevabını gösterir. Ayrıca burada θ , bütün geliş açılarının vektörü olup

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]^T \quad (3.7)$$

olarak verilir. Yine $s(t) \in \mathbb{C}^K$ anında her işaret kaynağından gelen işaretin vektörü olup

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir. Genellikle $s(t)$, $x(t)$ işaretinin istenen kısmı olarak adlandırılır. Geliş Açısı Kestirimi için geliştirilen algoritmaların çoğu, dizi cevabı matrisi olan $\mathbb{A}(\theta)$ 'yı bilmeyi gerektirir. Özdeş sensörlerden oluşan düzgün lineer dizinin işaret kaynaklı dizi cevabı vektörü $\mathbb{A}(\theta)$ 'nın her bir elemanı

$$a(\theta_k) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_k} \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}2d \sin \theta_k} \\ \vdots \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d \sin \theta_k} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

denklemini ile orantılıdır. Burada λ gelen dalganın dalga boyu, d anten elemanları arasındaki mesafeyi gösterir. Geliş açısı $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ aralığında $d < \lambda/2$ için kesin sonuçlar verir [Balanis ve Ioannides, 2007].

$L > K$ için elde edilen matrisler

$$X = [x(1), x(2), \dots, x(L)] \quad (3.10)$$

$$S = [s(1), s(2), \dots, s(L)] \quad (3.11)$$

$$N = [n(1), n(2), \dots, n(L)] \quad (3.12)$$

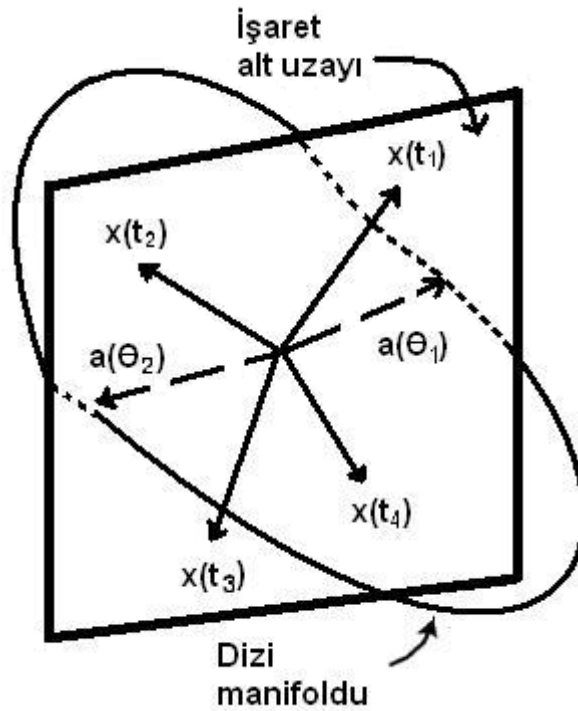
olarak ifade edilebilir. Burada X ve $N \in \mathbb{C}^{N \times L}$ ve $S \in \mathbb{C}^{K \times L}$ olarak ifade edilirse X

$$X = \mathbb{A}(\theta)S + N \quad (3.13)$$

olarak yazılabilir.

3.3. Alt Uzay Temelli Veri Modeli

Denklem 3.13'teki gürültü etkileri ihmal edilirse, alınan işaretin her bir gözlemi olan $A(\theta)S$, K boyutlu \mathbb{C}^N alt uzayında tanımlanır. Bu düşünce Şekil 3.2'de iki kaynaklı ($K = 2$) ve dört anlık değerli ($L = 4$) olarak gösterilmiştir. Buna göre iki kaynağın her biri $a(\theta_k)$ cevap vektörü ile birleştirilir ve dört anlık değer bu vektörlerle aralıklandırılmış iki boyutlu uzayda yer alır. Bu vektörlerin özel konumu her bir andaki işaret dalga şekline bağlıdır. Dizi manifoldu işaret alt uzayını sadece iki noktadan keser, işaretlerden birinin cevabına karşılık gelir.



Şekil 3.2. Geliş açısı kestirim probleminin geometrik gösterilimi.

$L > K$ olsa bile, işaret alt uzayının boyutları K 'dan küçük olabilir. Eğer S işaret örneklerinin matrisi K 'dan küçük bir ranka sahipse bu durum ortaya çıkabilir. Örneğin işaretlerden biri diğerlerinin lineer kombinasyonu ise bu durum oluşur. Böyle işaretler 'uyumlu' veya 'tam ilintili' işaretler olarak ifade edilir ve çoklu yansıma yayılım (multi-path propagation) senaryolarında sık olarak görülür. Çoklu yansıma, gelen işaretin farklı cisimlerden yansımalarından kaynaklanır. Ayrıca yayılım yapan kaynaklardan daha az

anlık değer alınırrsa burada çoklu yansıma muhtemeldir. Her iki durumda da işaret alt uzayının boyutları ortamda bulunan kaynak sayısından azdır. Bununla birlikte bu durumda kaynak sayısının kestirimi imkansız hale gelmez. Örneğin bir parametrelili vektörler için geliş açısı, $K' = \text{rank}[\mathbb{A}(\theta)S]$ iken $\mathbb{A}(\theta)$ kesin ve $N > 2K - K'$ ise işaret parametreleri hala tanımlanabilir.

Ölçümler mevcut bulunan işarettten fazla yapıldıysa (K kaynak sayısı eleman sayısı olan N 'den azdır), denklem (3.5)'teki veri modeli etkili bir geometrik yorumlamaya izin verir ve sensör dizi işleme probleminin kavranmasına olanak sağlar. Alınan lmler dizi elemanlarının sayısına eşit uzay boyutlu kompleks değerli vektörleri oluşturur. Denklem (3.5)'te $x(t)$ 'yi veren ifade gürültünün olmadığı durumda $\mathbb{A}(\theta)s(t)$ 'yi K' uzay boyutuyla sınırlandırır ve işaret alt uzayı olarak adlandırılır. Eğer mükemmel korelasyonlu işaret yoksa işaret alt uzayı K boyutludur. Gürültü hesaba katıldığında, gözlem uzayının tüm boyutlarında enerjinin olduğu varsayılırsa denklem (3.5), "tam-rank (full rank)" gürültü veri modelinde "düşük rank işaret (low-rank signal)" olarak ifade edilir. Bu tüm geometrik resim, alt uzay kesişimi olarak ele alındığında doğru parametre kestirim problemine yol gösterir. Birçok uygulamada alt uzay tabanlı veri modeli uygun olduğu için sayısız alt uzay tabanlı teknik geliştirilmiştir [Balanis ve Ioannides, 2007].

3.4. İşaret Otokovaryans Matrisleri

Tesadüfi değişkenlere bağlı süreçler stokastik süreç olarak tanımlanabilir. Stotastik süreçte otokovaryans, işaretin kendisinin zaman kaydırmalı versiyonuna karşı kovaryansıdır. Geliş açısı kestirim algoritmalarında sıklıkla kullanılan iki terim Alınan İşaret Otokovaryans Matrisi R_{xx} ve İstenen İşaret Otokovaryans Matrisi R_{ss} ifadeleri

$$R_{xx} = \mathcal{E}\{x(t)x^H(t)\} \quad (3.14)$$

$$R_{ss} = \mathcal{E}\{s(t)s^H(t)\} \quad (3.15)$$

olarak verilir [Balanis ve Ioannides, 2007]. Burada H Hermitian matris operatörü (veya kompleks-konjuge transpose) ve \mathcal{E} beklenti operatörünü gösterir.

Gerçekte beklenen değer, sonsuz zaman aralığı gerektirdiği için tam olarak elde edilemez. Pratik uygulamalarda denklem (3.16)'da görüleceği gibi yeterli sayıda örnek kullanılır.

$$R_{xx} \triangleq \lim_{M \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{M} \right) \sum_{m=1}^M x(t_m)x^H(t_m) \quad (3.16)$$

Burada $x(t_m)$ alınan m 'inci örneği $x^H(t_m)$ ise alınan m 'inci örneğin Hermitianını gösterir. Aynı yaklaşım R_{ss} için de geçerlidir. Gelen işaretlerin uyumsuz olduğu varsayımıyla alınan işaretin Kovaryans Matrisi R_{SS} pozitif olarak belirtilir. İlave olarak gürültünün de kompleks Gauss rastgele süreç olduğu varsayılmıştır. Eğer gürültü kaynakları varsa toplam merkez limit teoremine göre Gauss dağılımlı olacaktır [Balanis ve Ioannides, 2007]. Ayrıca beyaz Gauss gürültüsü varsayımıyla, yön bulma analizi performansı kolaylaşacaktır. Eğer ilave olarak, her iki işaretin korelasyonunun olmadığı varsayımıyla başarılı işaret örnekleri için

$$R_{xx} = \mathbb{A}(\theta)R_{ss}\mathbb{A}^H(\theta) + \mathcal{E}\{n(t)n^H(t)\} \quad (3.17)$$

$$= \mathbb{A}(\theta)R_{ss}\mathbb{A}^H(\theta) + \sigma_n^2 \Sigma \quad (3.18)$$

denklemini de yazılabilir [Balanis ve Ioannides, 2007]. Burada σ_n^2 gürültü varyansı olup Σ ise $\det(\Sigma) = 1$ olarak normalize edilmiştir.

Bilinen dizi cevabı ve bilinen gürültü kovaryans varsayımları pratikte tam olarak geçerli değildir. Havadaki değişiklikler, yakın civardaki yansıtıcı ve sönümleyici yapılar, anten yerleşimleri nedeniyle dizinin cevabı en son kalibrasyondan sonra farklılıklar gösterebilir. Ayrıca, kalibrasyon ölçümlerinin kendileri de faz ve genlik hatalarına maruz kalabilir. Yine özdeş elemanların analitik olarak kalibre edilmeleri durumunda da hatalar oluşabilir. Çünkü anten elemanları gerçek anlamda özdeş değildir ve yerleşimleri tam olarak bilinemez. Açığa bağlı olarak algoritmanın performansı azalabilir.

$$\begin{bmatrix} 100 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 92 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 85 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 60 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 25 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 5 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0.5 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0.01 \end{bmatrix}$$

Şekil 3.3. İşaret Otokovaryans matrisi örneği.

Pratikte, dizinin içinde bulunduğu ortamın koşulları zamanla değişebileceğinden gürültü karakteristiğini doğrulamak zordur. İlave olarak, modellenemeyen gürültü etkileri de hesaplanamaz. Geliş açısı kestirimine işaret alt uzay yöntemleri uygulandığında, gürültünün (gerçekte var olmayan biçimde) kanaldan kanala bağımsız ve izotropik olduğu kabul edilir. Yüksek İGO değerlerinde bu varsayımlardan gürültünün sapmaları kritik değildir. Düşük İGO değerlerinde ise algoritmaların performansı ciddi olarak düşebilir [Balanis ve Ioannides, 2007]. Elde edilen işaret otokovaryans matrisi Şekil 3.3'teki gibi bir yapıdadır. Diagonal olarak sıralandığında ilk katsayı (100)

işaretin katsayısı olarak düşünülebilir. Katsayılar, işaret katsayısından gürültü katsayısına doğru devam etmektedir. Gürültü alt uzayının başlama noktası için işaret alt uzayının ilk katsayısının $(1/20)-(1/25)$ 'i gibi bir oran seçilebilir. Burada kırmızı dikdörtgen içindeki bölge işaret alt uzayını, mavi dikdörtgen ile gösterilen bölge ise gürültü alt uzayını gösterir. Böylece alt uzaylar belirlenmiş olur.

3.5. Klasik Geliş Açısı Kestirim Yöntemleri

Klasik Geliş Açısı Kestirim Yöntemleri, Klasik Demet Şekillendirme Yöntemi ve Capon'un Minimum Varyans Yöntemi olarak ikiye ayrılabilir [Balanis ve Ioannides, 2007].

3.5.1. Klasik Demet Şekillendirme Yöntemi

Bu yöntem ayrıca "Geciktir ve Topla Yöntemi" veya "Bartlett Yöntemi" olarak da bilinir. Yöntemin amacı, ilgili açısız bölgeyi taramak ve en büyük çıkış gücünü üreten geliş açısını bulmaktır. Dizi cevabı $a(\theta)$ bulunduğundan sonra Klasik Demet Şekillendirici Yöntemi (KDŞY) çıkış gücü $P_{KDŞY}(\theta)$

$$P_{KDŞY}(\theta) = \frac{a^H(\theta)R_{xx}a(\theta)}{a^H(\theta)a(\theta)} \quad (3.19)$$

olarak verilir. Burada $a^H(\theta)$ bulunan $a(\theta)$ 'nın Hermitian'ını belirtir. Çıkış güç spektrumunun maksimum değeri, geliş açısı olan θ 'ya tekabül eder. Bu yöntem aynı zamanda "Fourier Yöntemi" olarak da bilinir. Aslında eğer izotropik elemanlı bir düzgün lineer dizi kullanılırsa uzaysal spektrum $P_{KDŞY}(\theta)$, zaman serileri analizindeki klasik periodogramın uzaysal benzeşiği olur. Diğer tip diziler, zaman serileri analizinde düzgün olmayan örneklemelerle benzerdir. Uzaysal spektrumun bir çözünürlük eşiği vardır. Sadece birkaç elemanlı bir dizide keskin ve dar pikler elde edilemediğinden, yöntemin yeteneği yakın yerleştirilmiş kaynaklar ile sınırlıdır. Bu yöntemle geliş açısı $2\pi/N$ den daha küçük olan işaretler çözümlenemez. Örneğin, beş elemanlı ve elemanlar arası mesafe $d=\lambda/2$ olan bir düzgün lineer dizide çözünürlük eşiği 23° olarak ortaya çıkar. Yine zayıf çözünürlük eşiği bu yöntemin önemli bir zaafiyetidir [Balanis ve Ioannides, 2007].

3.5.2. Capon'un Minimum Varyans Yöntemi

Capon'un Minimum Varyans Yöntemi (MVY, Minimum Variance Distorsionless Look), Geciktir ve Topla Yöntemiyle zayıf çözünürlük problemini çözmeyi amaçlar ve önemli iyileştirme sağlar. Buna göre Capon'un uzaysal spektrumu

$$P_{Capon}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)R_{xx}^{-1}a(\theta)} \quad (3.20)$$

olarak verilir. Capon'un Minimum Varyans Yöntemi ile Geliş Açısı Kestirim spektrumunda da pik değeri veren " θ " geliş açısıdır. Minimum Varyans Yöntemini Klasik Demet Şekillendirici Yöntemiyle kıyaslayınca sadece ilave olarak bir matris tersi gerektirir ve birçok durumda daha iyi bir çözünürlük ortaya çıkarır.

Genel olarak klasik geliş açısı kestirim yöntemleri bazı önemli avantajlar sağlar. Buna göre θ aralığı için uzaysal güç spektrumu hesaplanması ve aynı veriyi kullanarak θ 'nın bir başka aralığının hesaplanması da mümkündür. Bütün yönler için verinin uzaysal karakteristikleri R_{xx} ile verilir ve bir kere hesaplanması yeterlidir. Böylece yöntemin kör noktaları olmaz.

3.6. Geliş Açısı Kestiriminde Alt Uzay Yaklaşımı

Geliş Açısı Kestirim algoritmalarının bir diğer önemli grubu “Alt Uzay Yöntemleri” olarak adlandırılır. Geometrik olarak alınmış işaret vektörleri, alınmış işaret vektörleri uzayını oluşturur ve bu uzayın boyutları dizi elemanlarının sayısı olan N kadardır. Alınan işaret uzayı, gürültü alt uzayı ve işaret alt uzayı olarak ikiye ayrılabilir. İşaret alt uzayı $\mathbb{A}(\theta)$ 'nin sütunlarından oluşan alt uzaydır. İşaret alt uzayına dik (ortogonal) olan uzay ise gürültü alt uzayı olarak bilinir. MUSIC algoritması ve ESPRIT algoritması alt uzay yaklaşımıyla geliş açısı kestirim algoritmalarındandır [Balanis ve Ioannides, 2007].

3.6.1. MUSIC Algoritması

İşaret alt uzay algoritmaları olarak adlandırılan bu sınıf içinde Multiple Signal Classification (MUSIC) üzerinde en çok çalışılan algoritmalarından biridir [Schmidt, 1986]. Bu algoritma, konfigürasyonu ve cevabı bilinen dizilere uygulanabilir ve her kaynağın çoklu parametrelerinin (azimut, elevasyon, aralık, polarizasyon v.b.) kestiriminde kullanılabilir. Bu algorithmada dizi cevabı kaynak parametrelerinin bütün olası kombinasyonları için bilinmelidir.

Bir dizinin izotropik kabul edilen j 'inci elemanındaki elektrik alan

$$\vec{E}_j = E_0 e^{-ik(x_j \sin \theta \cos \phi + y_j \sin \theta \sin \phi + z_j \cos \theta)} \hat{e}^i \quad (3.21)$$

$$\hat{k}^i = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \quad (3.22)$$

olarak verilir [Schippers v.d., 2006]. Burada \hat{e}^i elektrik alanın yönünü gösteren birim vektördür. \hat{k}^i ise gelen dalganın yönünü gösteren yayılım vektörüdür. Bu durumda dizi antendeki toplam elektrik alan

$$\vec{E}_{toplama} = \sum_j A_j \vec{E}_j \quad (3.23)$$

olur. Burada A_j , j 'inci anten elemanının genliğini gösterir.

MUSIC algoritması aşağıdaki veri modelini öngörür.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_D)] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_M \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Buna göre X_M , gelen D tane işaret ve gürültü sonucunda j 'inci anten elemanından ölçülen işareti ifade eder. Burada gelen dalgalar F_1, F_2, \dots, F_D kompleks formda faz ve genlik olarak verilir. Gürültü ise kompleks $W = W_1, W_2, \dots, W_M$ vektörü olarak ortaya çıkar. Yönlendirme vektörü olan $a(\theta)$ ise

$$a(\theta) = [1 \ e^{-i\phi} \ e^{-i2\phi} \ \dots \ e^{-i(M-1)\phi}]^T \quad (3.25)$$

olarak verilir. Burada d anten elemanları arasındaki mesafe ve θ kestirimi yapılan geliş açısı olmak üzere ve $\phi = k \sin(\theta) d$ olarak verilmiştir. X_M 'nin anten elemanlarının titreşmesiyle değişeceği aşikardır. Buna göre t_n zaman aralıklarıyla ölçülen işaret seti \vec{X}_n

$$\vec{X}_n = [X_1(t_n), X_2(t_n), \dots, X_M(t_n)]^T \quad (3.26)$$

biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda zaman içinde anlık değerlerden oluşan matris

$$X = [\vec{X}_n \ \vec{X}_{n+1} \ \dots \ \vec{X}_{n+T-1}] \quad (3.27)$$

olarak ifade edilir [Balanis ve Ioannides, 2007]. Daha sonra X 'in kovaryans matrisi elde edilir ($R = XX^*$). Burada R 'nin öz dekompozisyonu

$$R = V_s \Lambda_s V_s^* + \sigma^2 V_n V_n^* \quad (3.28)$$

şeklini alır. Burada V_s gürültü eşik seviyesi σ^2 'den büyük olan öz değerli işaret vektörlerinin d boyutlu alt uzayını, V_n gürültü özvektörlerinin $(M - d)$ boyutlu alt uzayını, σ^2 gürültü özdeğerlerini ve Λ_s diagonal matrisi gösterir. Böylece gürültü öz vektörleri ve denklemin yönlendirme vektörü olan denklem (3.25) kullanılarak MUSIC spektrumu

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{a^*(\theta) V_n V_n^* a(\theta)} \quad (3.29)$$

biçiminde hesaplanır [Schippers v.d., 1955], [Schmidt,1986]. Burada $*$ Hermitian operatörü, $a^*(\theta)$ yönlendirme vektörü ve V_n^* gürültü özvektörü olarak verilmiştir.

3.7. Kompanzasyon Tekniği ve Yapay Hüzme Şekillendirme Yöntemi

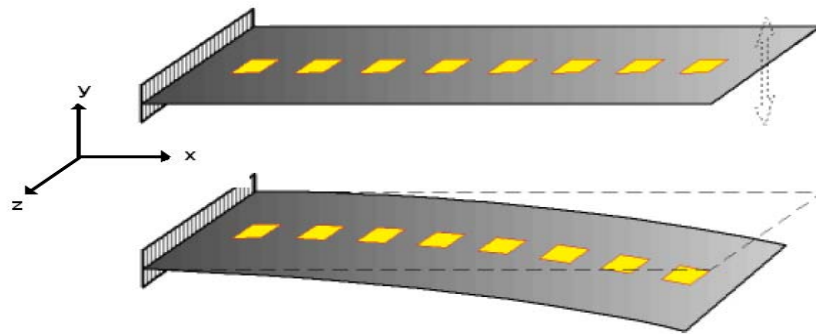
Dizi antenin titreşimleri sonucu faz değışimleri ortaya çıkar ve kompanze edilmeleri zorunludur. Şekil 3.4'teki gibi bir dizi antenin $x=0$ noktasından sabitlendiği varsayılırsa dizi antenin deformasyonu $z(x, t)$ olarak gösterilebilir. Bu durumda plakanın deformasyonu nedeniyle her bir yama antendeki oluşan faz farkı

$$\Delta V_j \approx -k\{(x_j - (x_j)^u) \sin \theta \cos \phi + z(x_j, t_0 + n\Delta t) \cos \theta\} \quad (3.30)$$

olarak verilir [Schippers v.d., 1955]. Burada x_j , j 'inci anten elemanının deformasyonunun olmadığı durumdaki x eksenindeki pozisyonunu gösterir. $(x_j)^u$ ise j 'inci anten elemanının deformasyonunun olduğu durumdaki x eksenindeki pozisyonudur. Ayrıca $z(x_j, t_0 + n\Delta t)$ j 'inci anten elemanının deformasyonunun olduğu süre boyunca oluşan yerdeğiştirmedir. Plakanın deformasyonu

$$z(x, t) = Z_0(x) + \alpha(t) + q_1(t)Z_1(x) \quad (3.31)$$

olarak modellenebilir. Burada, $Z_0(x)$ bükülme fonksiyonunu, $\alpha(t)$ plakanın $x=0$ daki hareketini, $Z_1(x)$ ilk titreşim modu fonksiyonunu ve $q_1(t)$ ise birinci titreşim modunun katsayısını ifade eder.



Şekil 3.4. Sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin deformasyona uğramış hali.

Yapay Hüzme Şekillendirme Yönteminde faz farkını saptamak için z yer değiştirmesini ve gelen dalganın (θ, ϕ) geliş açısını ölçmek gerekir. Sadece z yer değiştirmesi değerlendirilecek olursa, gelen dalganın $z=0$ düzlemine dik ve yönü $(\theta, \phi)=(0,0)$ olarak kabul edilirse faz düzeltmesi

$$\Delta V_j \approx -kz(x_j, t_0 + n\Delta t) \quad (3.32)$$

halini alır. Bu aşamada

$$A_j = A_j e^{-i\Delta V_j} \quad (3.33)$$

olmak üzere, denklem (3.23)'te yerine yazılırsa kompanzasyondan sonra mikroşerit anten dizisindeki toplam elektrik alan

$$\vec{E}_{toplam} = \sum_j A_j e^{-i\Delta V_j} \vec{E}_j \quad (3.34)$$

olarak ifade edilebilir. Böylece, mikroşerit dizi antenin her bir elemanının işareti oluşturulurken, faz farkı bileşeni çarpan olarak alınmış işarete ilave edilerek faz düzeltmesi yapılmış olur.

4. SAYISAL ÇÖZÜM TEMELLİ BENZETİMLER

Bu bölümde mikroşerit dizi anten Şekil 4.1'de gösterildiği gibi üç farklı pozisyonda konumlandırılmıştır. Her üç pozisyon için yama anten elemanlarının koordinatları Tablo I'de verildiği gibidir.

Tablo I: Yama antenlerin besleme noktalarının koordinatları.

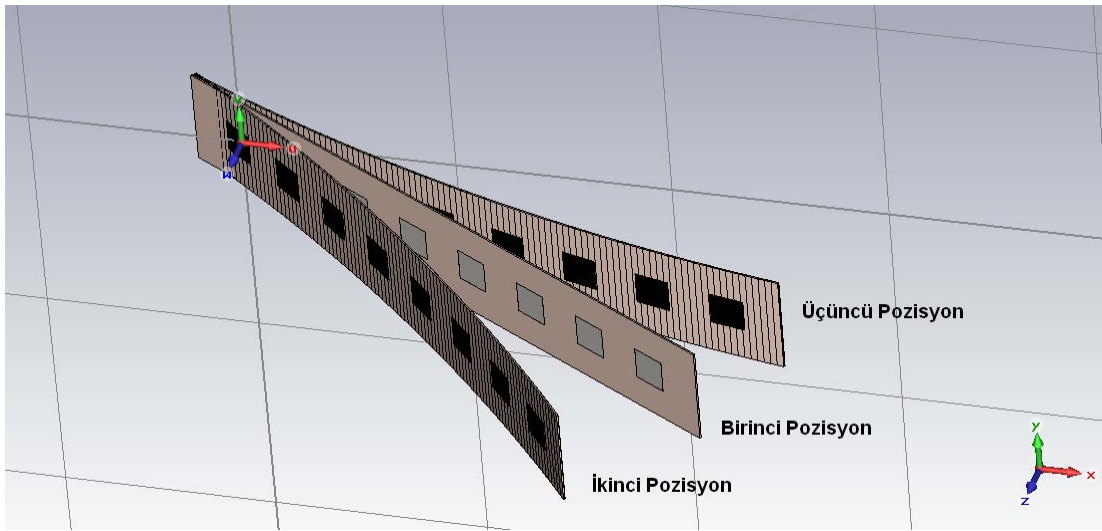
	Birinci Pozisyon		İkinci Pozisyon		Üçüncü Pozisyon	
	$X(cm)$	$Z(cm)$	$X(cm)$	$Z(cm)$	$X(cm)$	$Z(cm)$
Yama 1	0	0	0	0	0	0
Yama 2	6.50	3.70	6.20	4.00	6.70	3.50
Yama 3	12.90	7.50	12.20	8.50	13.50	6.50
Yama 4	19.75	11.20	17.95	13.40	20.80	9.00
Yama 5	26.40	15.00	23.80	18.40	28.20	11.30
Yama 6	32.75	18.60	30.00	23.50	35.30	13.30
Yama 7	39.30	22.30	34.80	28.60	42.65	15.10
Yama 8	46.00	26.00	40.00	34.00	50.00	16.80

Dizi anten elemanlarının toprak ve yama kısımları mükemmel iletken malzeme ve tabakası ise FR-4 (lossy) malzeme seçilmiştir. Mikroşerit dizi antenin uzunluğu 74.4 cm , genişliği 13.6 cm ve kalınlığı ise 2.3 mm 'dir. Benzetimlerde sınır koşulları open (add space) olarak seçilmiştir. Anten dizisinin ışımaya yapan yama kısmının boyutları 3.3 cm ve 3 cm 'dir. Benzetimlerde $N_x \times N_y \times N_z = 339 \times 43 \times 308$ kadar hücre kullanılmıştır.

Mikroşerit antenlerin titreşim hareketi özel olarak CST STUDIO SUITE programı kapsamında, ZUSF yöntemi bakımından Kuvazi Sürekli Hal tekniği ile değerlendirilmiştir [Harfoush v.d., 1989].

4.1. Titreşime Maruz Kalan Sekiz Elemanlı Anten Dizisi Benzetimi

CST STUDIO SUITE [CST, 2010] ticari yazılımı ile 2 GHz frekansında çalışan Şekil 4.1'de görülen sekiz elemanlı mikroşerit anten dizisinin üç pozisyonu için, Kartezyen ve Polar tipinde uzak alan ışınma diyagramlarının benzetimi yapılmıştır. Kartezyen ve Polar tipteki ışınma diyagramı kırmızı renk ile gösterilmiştir. Polar tipteki ışınma diyagramında açık mavi çizgiler ana hüzme genişliğinin 3 dB düştüğü yeri, koyu mavi çizgi ana hüzme yönünü, yeşil daire ise yan hüzme seviyesinin maksimum genliğini gösterir. Benzetimlerde *Core 2 Duo T6400 2 GHz* işlemcili ve *3 GB RAM* kullanan bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Her bir benzetim süresi yaklaşık olarak 10 dakikadır.

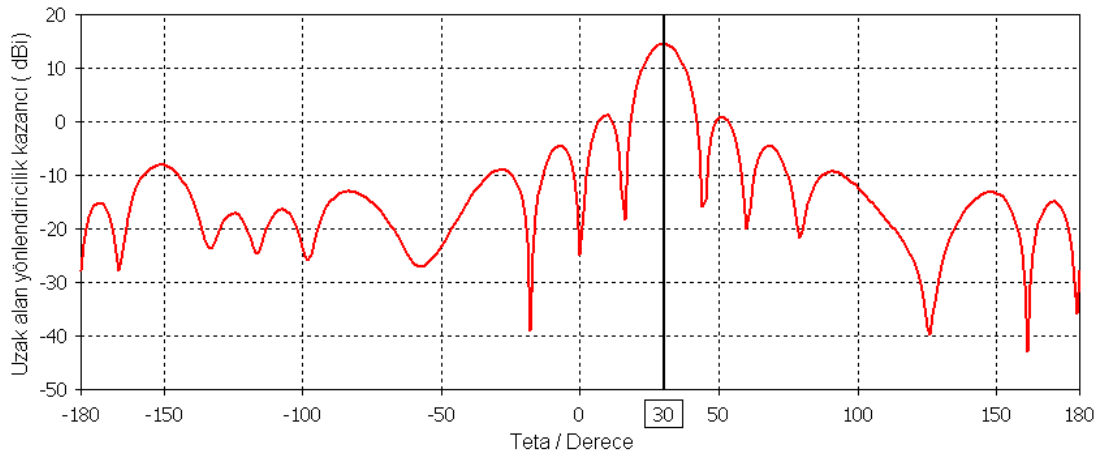


Şekil 4.1. Sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin üç farklı pozisyonu.

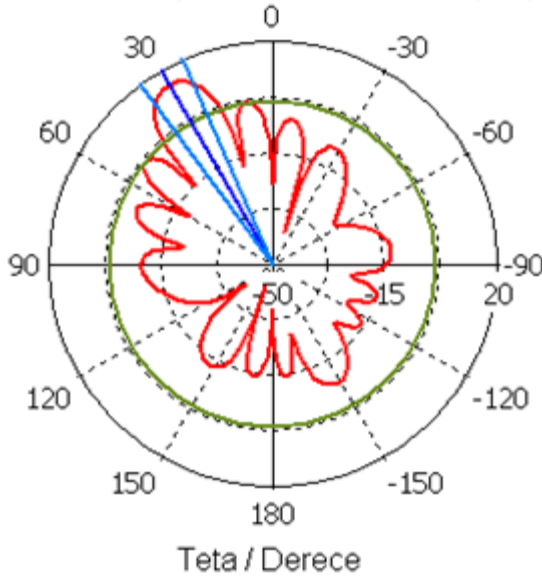
4.1.1. Birinci Pozisyon

Şekil 4.1’de görülen birinci pozisyonda sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten x eksenine paralel yerleştirilmiştir. Yama antenlerin besleme noktalarının koordinatları Tablo l’de verilmiştir. Kartezyen tipteki uzak alan ışınım diyagramı Şekil 4.2’de, Polar tipteki ışınım diyagramı ise Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Mavi çizgi ana hüzme yönünü, açık mavi çizgiler ana hüzme genişliğinin 3 dB düştüğü açığı gösterir. Yeşil ile gösterilen kısım ise yan hüzme seviyesinin maksimum genliğini gösterir. Ana hüzme yönü 30° olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.3’te görüleceği gibi ana hüzme genliği 14.6 dBi , ana hüzme yönü 30° , ana hüzme genişliğinin 3 dB düştüğü noktalar 12.5° ve yan hüzme seviyesi maksimum genliği -13.4 dB olarak hesaplanmıştır. Bu durum mikroşerit dizi antenin deformasyona uğramamış durumdaki verileridir.



Şekil 4.2. Kartezyen tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışınım diyagramı.

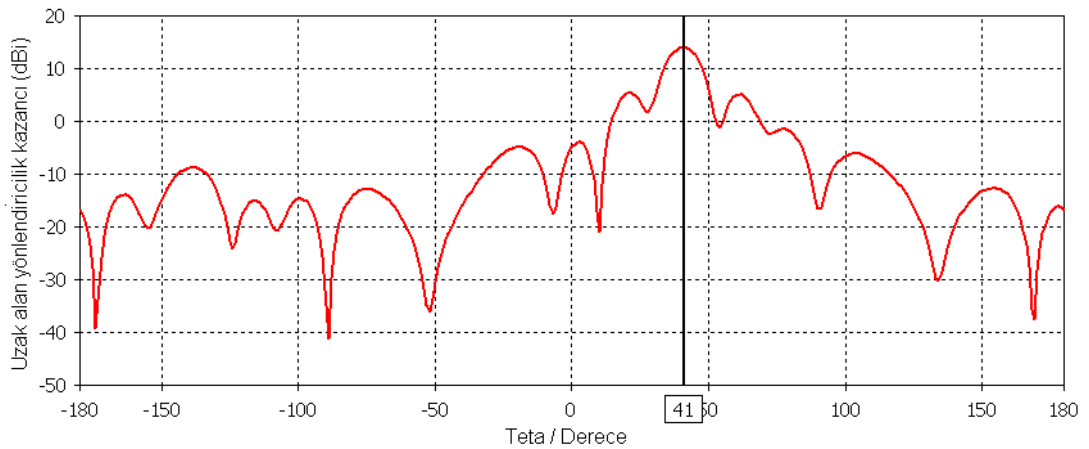


Uzak alan yönlendiricilik kazancı (dBi)
 Frekans = 2GHz
 Ana Hüzme Genliği = 14.6 dBi
 Ana Hüzme Yönü = 30 derece
 Açısal Genişlik (3 dB) = 12.5 derece
 Yan Hüzme Seviyesi = -13.4 dB

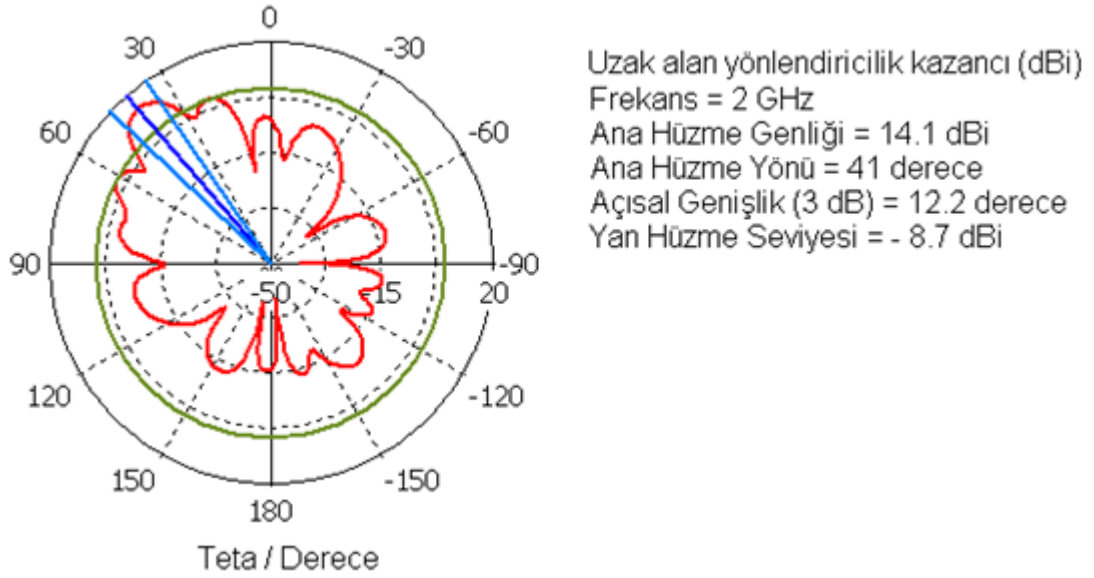
Şekil 4.3. Polar tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışımaya diyagramı.

4.1.2. İkinci Pozisyon

Bu pozisyonda sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin bir ucu sabit tutularak diğer ucu Şekil 4.1'de ikinci pozisyonda görüldüğü gibi bükülmüştür. Yama antenlerin besleme noktalarının koordinatları Tablo 1'de verilmiştir. Kartezyen tipteki uzak alan ışımaya diyagramı Şekil 4.4'te, Polar tipteki ışımaya diyagramı ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Ana hüzme yönü 41° olarak bulunmuştur.



Şekil 4.4. Kartezyen tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışımaya diyagramı.

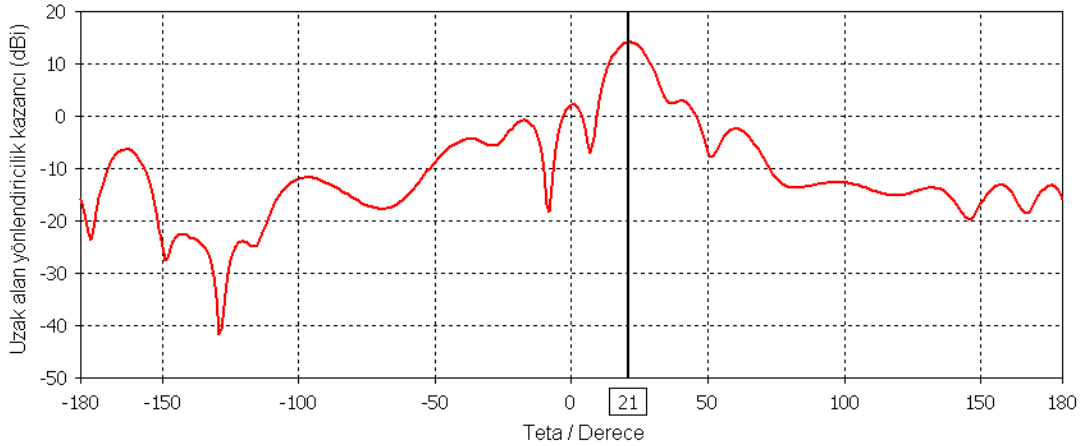


Şekil 4.5. Polar tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışımaya diyagramı.

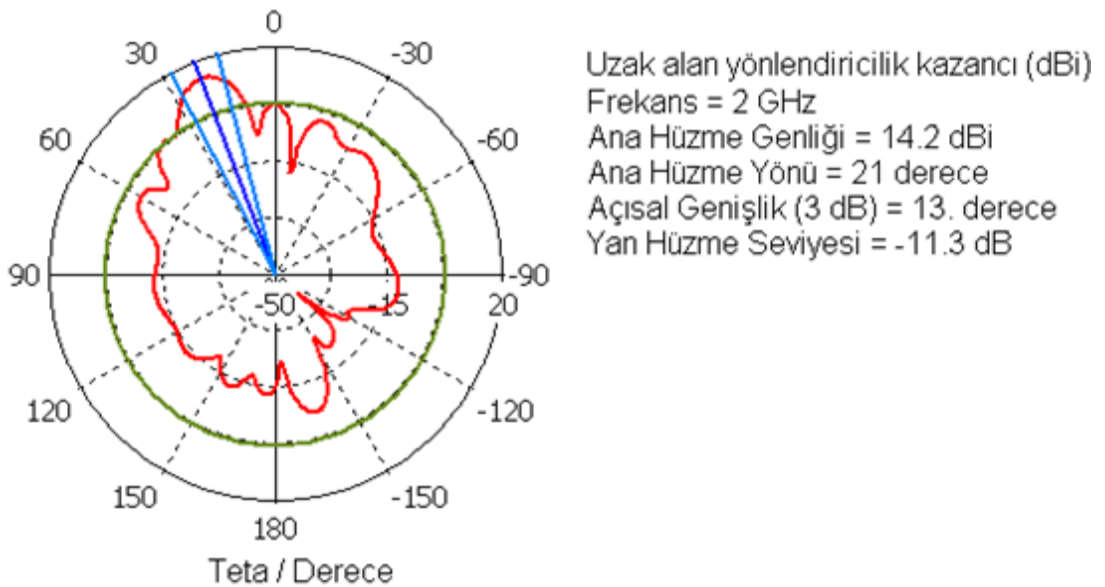
Şekil 4.5'te görüleceği gibi ana hüzme genliği 14.1 dBi , ana hüzme yönü 41° , ana hüzme genişliğinin 3 dB düştüğü noktalar 12.2° ve yan hüzme seviyesi maksimum genliği -8.7 dB olarak hesaplanmıştır. Mikroşerit dizi antenin deformasyona uğramamış durumdaki verileri ile kıyaslandığında ana hüzme genliği seviyesi azalmış yan hüzme seviyesi artmıştır. Ana hüzme yönü ise 30° den 41° ye kaymıştır. Yan hüzme ışımaya diyagramının geometrik yapısı da simetrikliğini kaybetmiştir.

4.1.3. Üçüncü Pozisyon

Bu pozisyonda sekiz elemanlı mikroşerit dizi antenin bir ucu sabit tutularak diğer ucu Şekil 4.1'de üçüncü pozisyonda görüldüğü gibi bükülmüştür. Yama antenlerin besleme noktalarının koordinatları Tablo 1'de verilmiştir. Kartezyen tipteki uzak alan ışımaya diyagramı Şekil 4.6'da, Polar tipteki ışımaya diyagramı ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Ana hüzme yönü 21° olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6. Kartezyen tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışımaya diyagramı.



Şekil 4.7. Polar tipte sekiz elemanlı mikroşerit dizi anten uzak alan ışımaya diyagramı.

Şekil 4.7’de görüleceği gibi ana hüzme genliği 14.2 dBi , ana hüzme yönü 21° , ana hüzme genişliğinin 3 dB düştüğü noktalar 13° ve yan hüzme seviyesi maksimum genliği -11.3 dB olarak hesaplanmıştır. Mikroşerit dizi antenin deformasyona uğramamış durumdaki verileri ile kıyaslandığında ana hüzme genliği seviyesi azalmış yan hüzme seviyesi artmıştır. Ana hüzme yönü ise 30° ’den 21° ’ye kaymıştır. Yan hüzme ışımaya diyagramının geometrik yapısı da simetrikliğini kaybetmiştir.

Şekil 4.2, Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'den görülebileceği üzere dizi antenin pozisyonunun değişmesiyle, ana hüzme genlikleri ve açısız genişlikler değişmekle birlikte en büyük değişiklikler yan hüzme seviyeleri ve şekilleri üzerinde olmuştur. Işıma diyagramlarının simetrikliği bozulmuştur.

5. SEKİZ ELEMANLI ANTEN DİZİSİ İÇİN GELİŞ AÇISI KESTİRİMİ

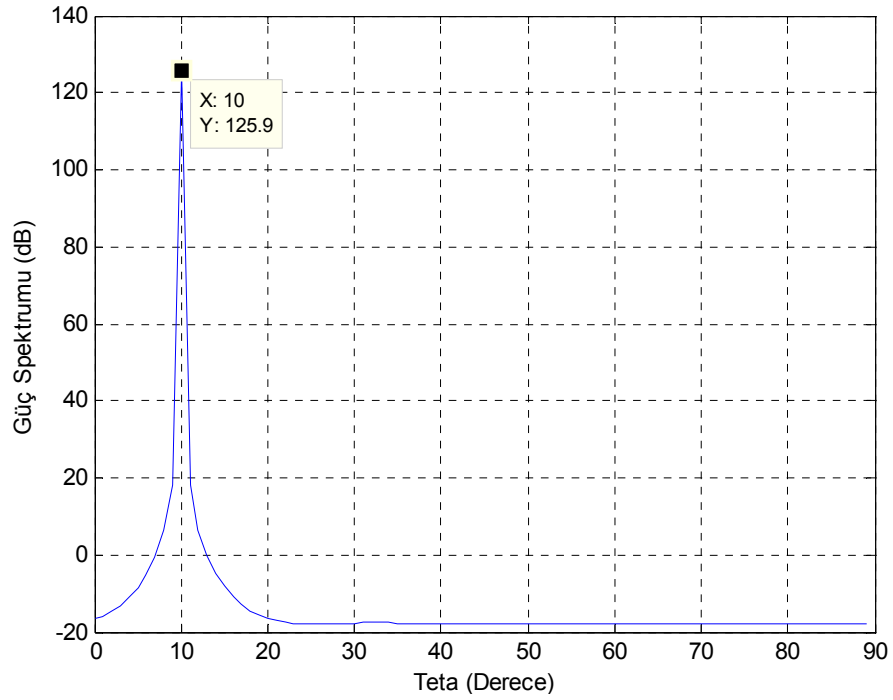
Sekiz elemanlı mikroşerit yama antenin birinci yama elemanının aldığı işaret

$$A_1 = a_1 * \exp(-i * 2 * \pi * f * t) \quad (5.1)$$

olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde anten dizisinin diğer yedi elemanı için alınan işaretler

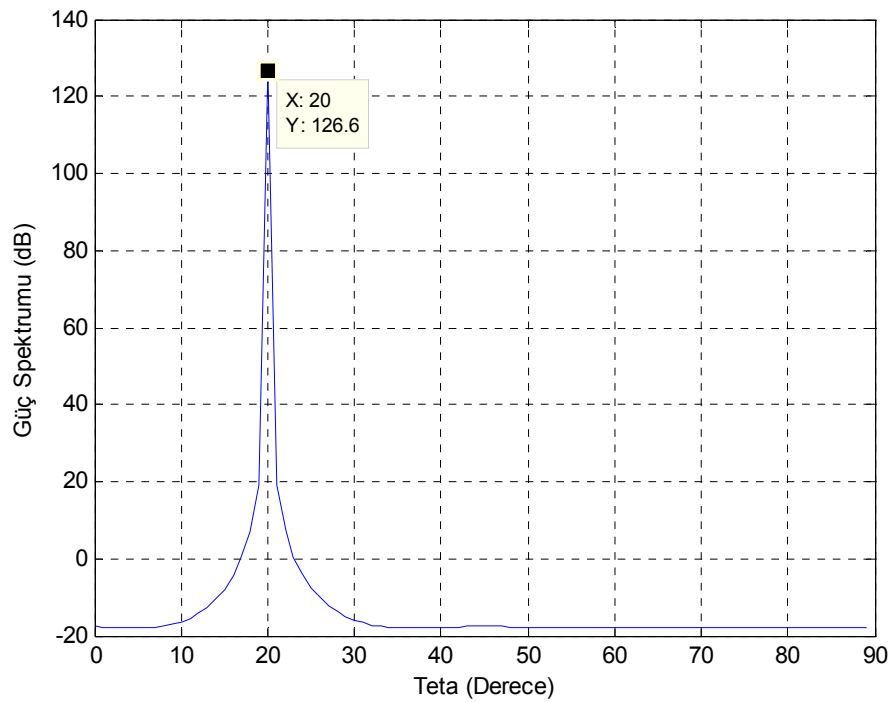
$$\begin{aligned} A_2 &= a_2 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_1))) \\ A_3 &= a_3 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_2))) \\ A_4 &= a_4 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_3))) \\ A_5 &= a_5 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_4))) \\ A_6 &= a_6 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_5))) \\ A_7 &= a_7 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_6))) \\ A_8 &= a_8 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_7))) \end{aligned} \quad (5.2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $a_1...a_8$ alınan işaretlerin genliğini, f gelen işaretin frekansını, $t_1...t_7$ ise faz farklarını göstermektedir. Her bir yama anten elemanı tarafından alınan işaretlere beyaz Gauss gürültüsü ilave edilerek, dizi anten için MUSIC algoritması aşağıdaki geliş açıları kullanılarak Matlab benzetimi yapılmıştır. Buna göre $\theta=10^\circ$ için geliş açısı kestirimi Şekil 5.1'de, $\theta=20^\circ$ için Şekil 5.2'de, $\theta=30^\circ$ için Şekil 5.3'te ve $\theta=40^\circ$ için Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Benzetimlerde gelen işaretin frekansı 2 GHz ve anten elemanları arasındaki mesafe 7.5 cm olarak alınmıştır. Benzetimlerde her açı için geliştirilen program çalıştırıldığında Gauss gürültüsü nedeniyle grafiklerin geliş açısı kestirimlerinin güç yoğunlukları değişmekte olup geliş açısı değişmemektedir.



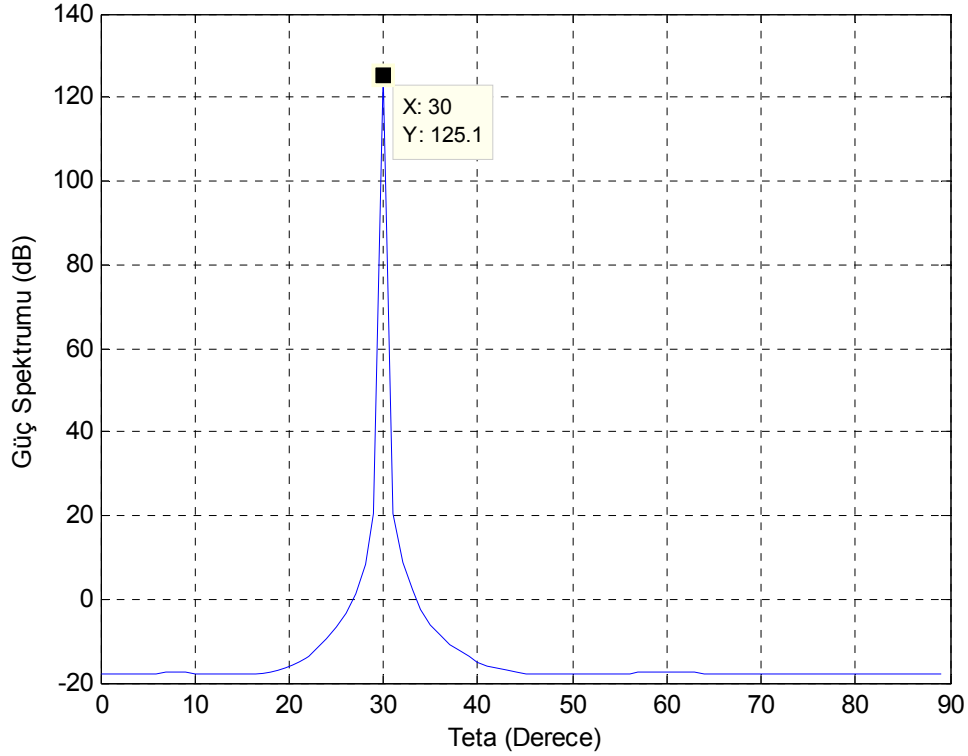
Şekil 5.1. $\theta=10^\circ$ için geliş açısı kestirimi.

Bu kestirimde, kaynak antenin mikroşerit anten dizisine doğru 10° açıyla düzlemsel dalga yayını yaptığı öngörölmüştür. Matlab ortamında her bir dizi anten elemanı için alınan işaretler oluşturulmuş ve Gauss gürültüsü ilave edilmiştir. Geliş Açısı Kestirimi 10° olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.2. $\theta=20^\circ$ için geliş açısı kestirimi.

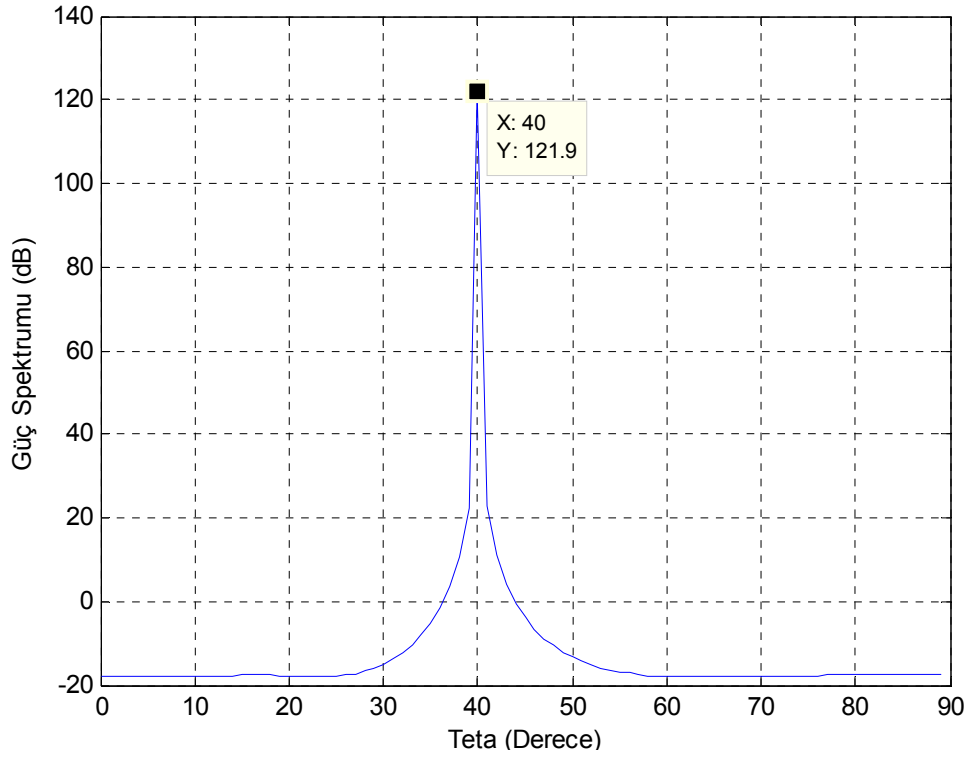
Bu kestirimde, kaynak antenin mikroşerit anten dizisine doğru 20° açıyla düzlemsel dalga yayını yaptığı öngörölmüştür. Matlab ortamında her bir dizi anten elemanı için alınan işaretler oluşturulmuş ve Gauss gürültüsü ilave edilmiştir. Geliş Açısı Kestirimi 20° olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. $\theta=30^\circ$ için geliş açısı kestirimi.

Bu kestirimde, kaynak antenin mikroşerit anten dizisine doğru 30° açıyla düzlemsel dalga yayını yaptığı öngörölmüştür. Matlab ortamında her bir dizi anten elemanı için alınan işaretler oluşturulmuş ve Gauss gürültüsü ilave edilmiştir. Geliş Açısı Kestirimi 30° olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.4'te gösterilen kestirimde, kaynak antenin mikroşerit anten dizisine doğru 40° açıyla düzlemsel dalga yayını yaptığı öngörölmüştür. Matlab ortamında her bir dizi anten elemanı için alınan işaretler oluşturulmuş ve Gauss gürültüsü ilave edilmiştir. Geliş Açısı Kestirimi 40° olarak hesaplanmıştır.

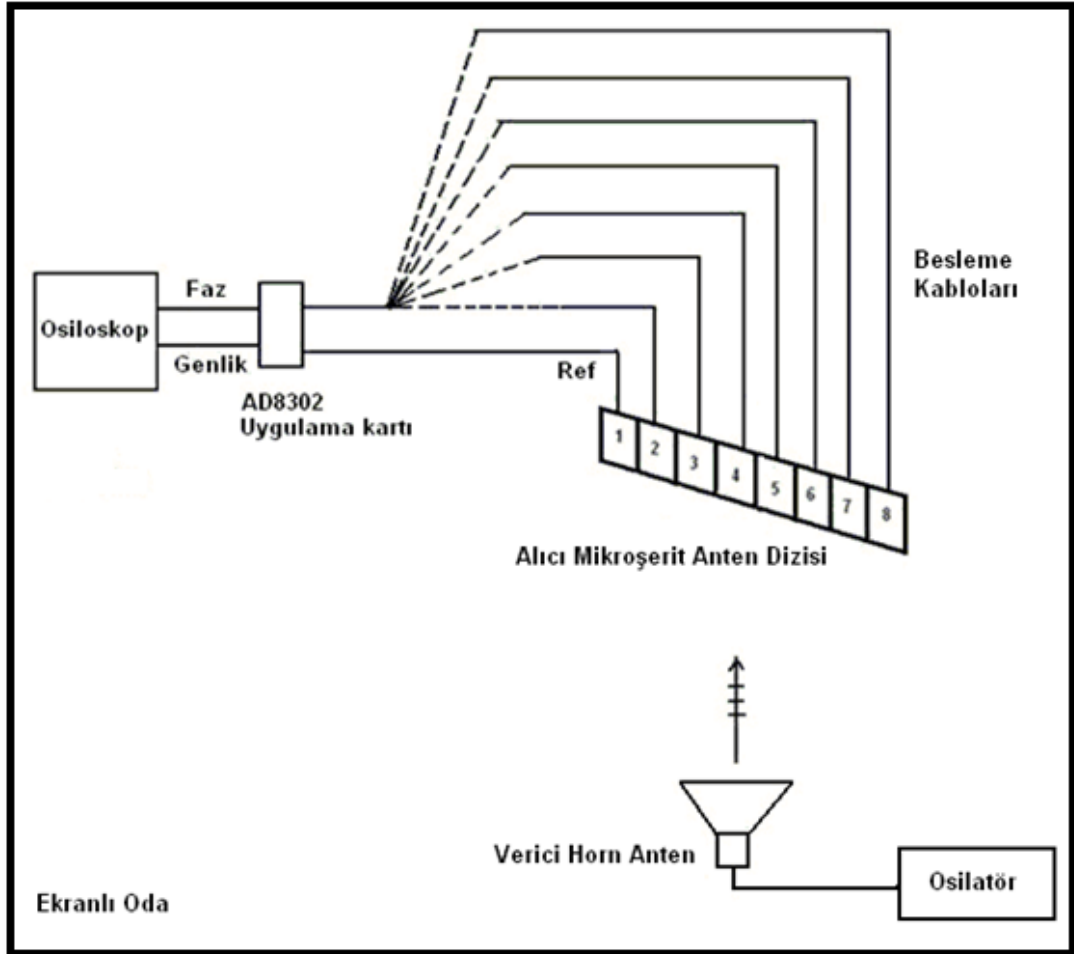


Şekil 5.4. $\theta=40^\circ$ için geliş açısı kestirimi.

Dört pozisyon için yapılan geliş açısı kestirimlerinde güç yoğunluklarında oluşan fark, benzetim programında ilave edilen Gauss gürültüsü faktörüdür. Gauss gürültüsü seviyeleri, gelen işarete oranla düşük olarak belirlenmiştir. Bu yüzden her dört açı için kestirim hatasız olarak hesaplanmıştır. Genliklerde ise en fazla 4 dB'lik fark oluşmuştur, ancak grafiklerde geliş açılarının dereceleri net olarak görülmektedir.

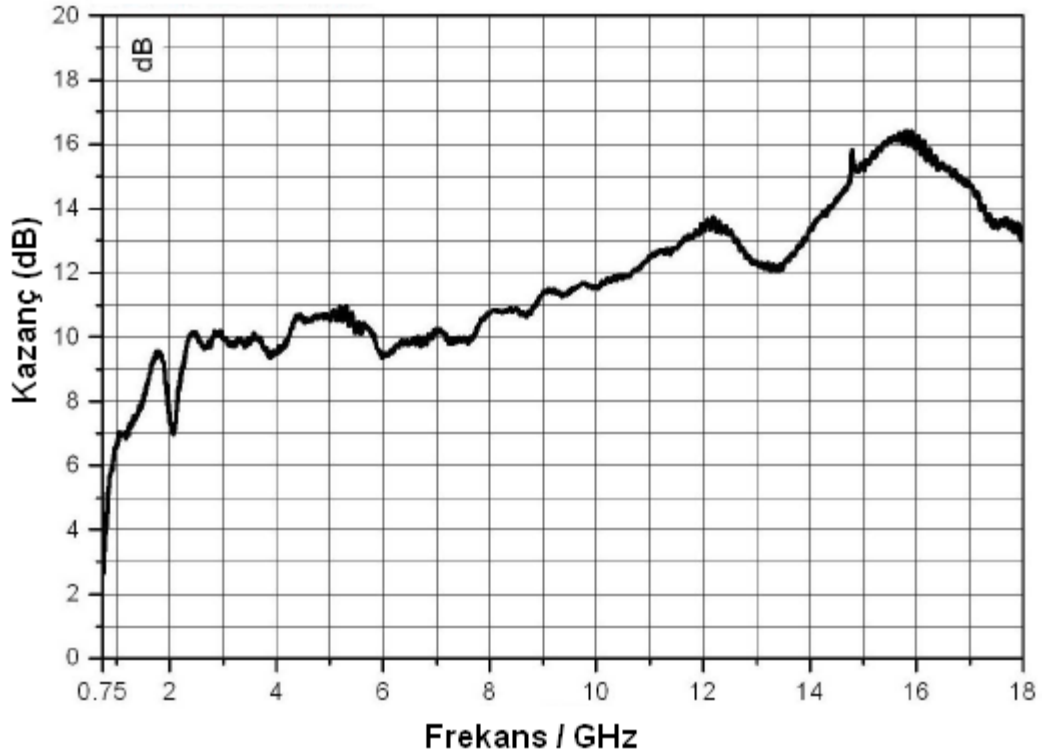
6. ÖLÇÜM DÜZENEĞİ ve ÖLÇÜM SONUÇLARI

Ölçümler, istenmeyen dış etkilerin engellenmesi için yarı yansız odada yapılmıştır. Ölçüm düzeneği Şekil 6.1'de, kaynak Horn anten ve yerleşimi Şekil 6.3'te ve mikroşerit dizi anten ve yerleşimi Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



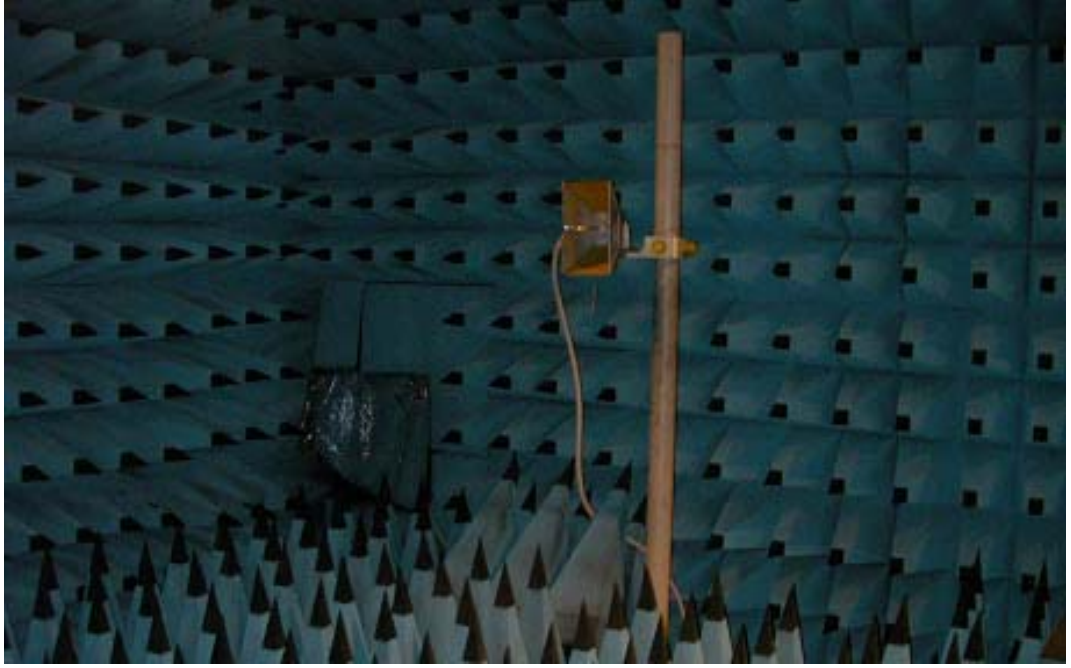
Şekil 6.1. Laboratuvar ölçüm düzeneği.

Kaynak olarak kullanılan Horn anten, mikroşerit anten dizisine göre $6.5 m$ uzakta konumlandırılarak uzak alan şartı olan $L=2D^2/\lambda$ sağlanmıştır. Ölçümlerde kullanılan ETS 3115 Horn antenin frekansa göre kazanç grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir. Anten $750 MHz-18 GHz$ aralığında çalışmaktadır.



Şekil 6.2. ETS 3115 Horn antenin kazanç grafiği.

Mikroşerit anten dizisi kaynak antene göre 30° açıyla yerleştirilmiştir. Dizi anten elemanlarından gelen işaretlerin işlenmesi için AD8302 (RF/IF Gain and Phase Detector) uygulama kartı kullanılmıştır. AD8302 uygulama kartı gelen iki işaretin faz ve genlik farklarını ölçebilmektedir [AD8302]. Mikroşerit dizi antenin birinci elemanı referans anten olarak alınmış ve AD8302 uygulama kartının birinci girişine bağlanmıştır. Uygulama kartının ikinci girişine ise mikroşerit dizi antenin diğer yedi elemanı sırayla bağlanarak referans antene göre faz ve genlik farkları ölçülmüştür. Alınan faz ve genlik farklarıyla Matlab ortamında anten dizisinin her bir elemanı için gelen işaretler oluşturulmuş ve MUSIC algoritması [Schmidt,1986] kullanılarak geliş açısı kestirimleri yapılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda yedi adet AD8302 kartı ile aynı anda ölçümler alınarak otomatik olarak kompanzasyon yapabilecek bir sistem tasarlanacağı için faz ve genlik farkı bilgileri network analizör ile değil osiloskop ile yapılmıştır.



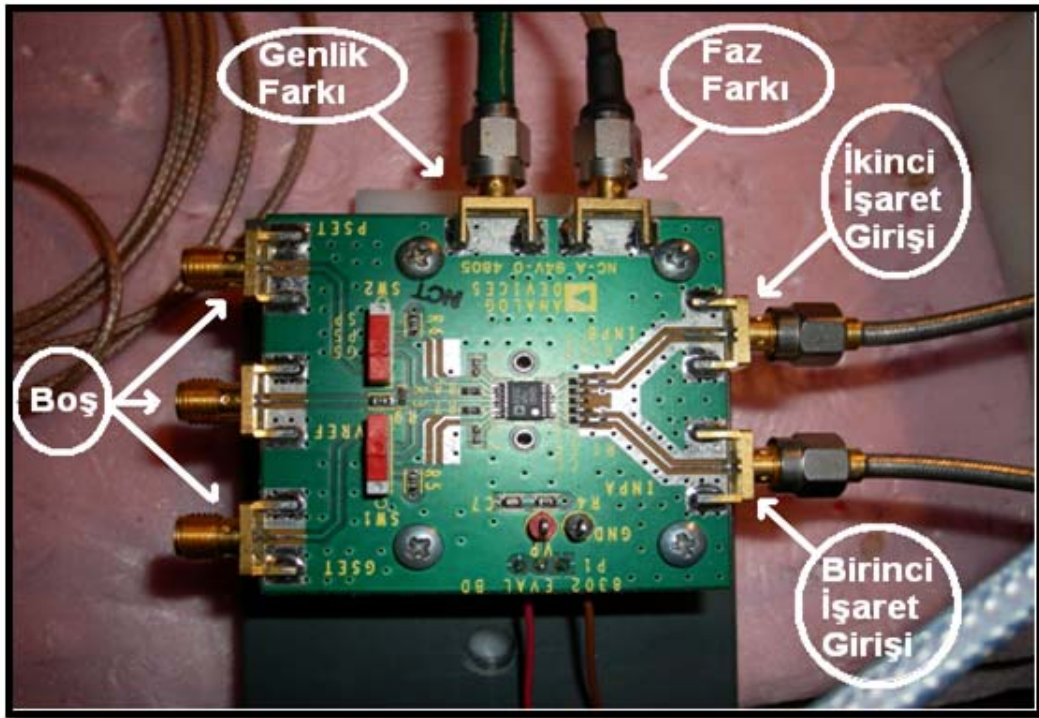
Şekil 6.3. Yarı yansız oda içinde kaynak Horn anten ve yerleşimi.



Şekil 6.4. Yarı yansız oda içinde anten dizisi ve yerleşimi.

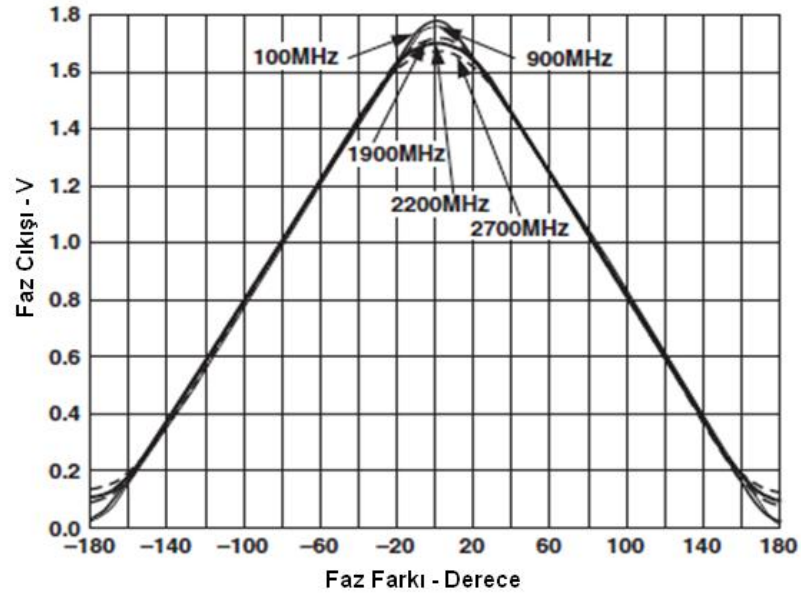
6.1. AD8302 Uygulama Kartı

AD8302 sistemi, alıcı verici uygulamaları için alınan iki işaretin faz ve genlik farkını ölçen bir sistemdir. $2.7 V-5.5 V$ aralığında besleme gerilimi ile çalışabilir. 50Ω luk bir sistemde AC kuplajlı işaretleri $-60 dBm-0 dBm$ aralığında düşük frekanstan $2.7 GHz$ frekansına kadar ölçebilmektedir. Genlik çıkışı $\pm 30 dB$ aralığında, faz çıkışı ise $0^\circ-180^\circ$ aralığındadır [AD8302]. Faz çıkışının $+$ veya $-$ olduğunu anlamak için ikinci bir AD8302 sistemine daha ihtiyaç vardır. Bu çalışmada yama antenlerin yer değiştirmeleri bilindiği için faz bilgisinin pozitif veya negatif olduğuna önceden karar verilmiştir. Uygulama kartının genel görünümü Şekil 6.5'te, genlik çıkışlarının transfer karakteristikleri Şekil 6.7'de, uygulama kartının devre şeması Şekil 6.8'de ve detaylı faz çıkış grafiği ise Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

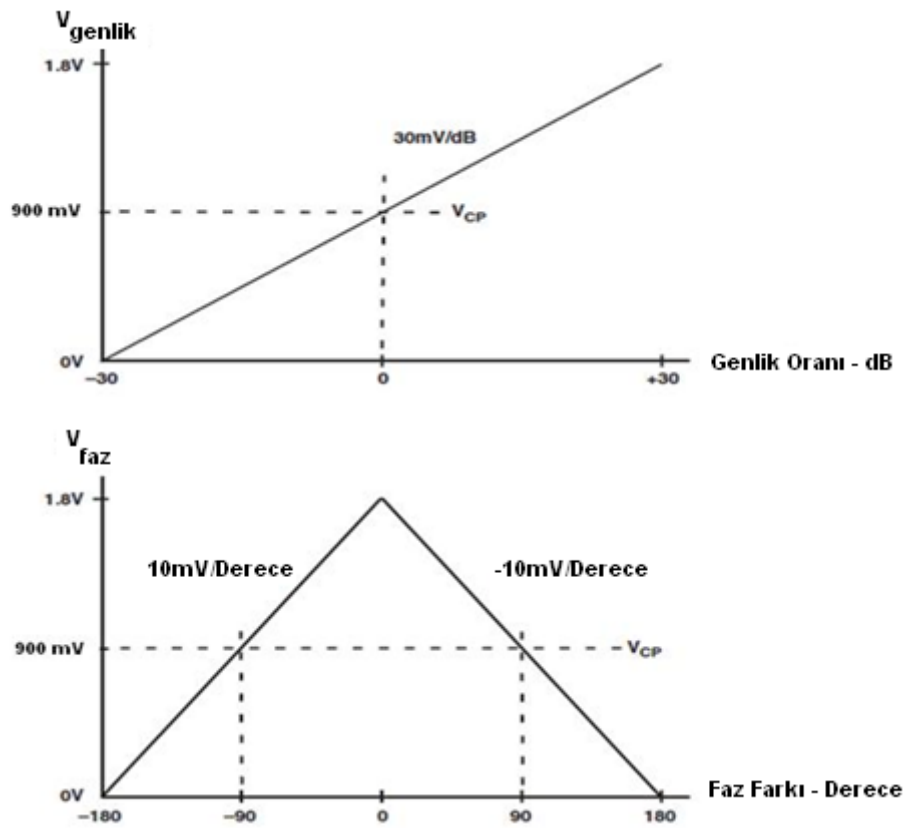


Şekil 6.5. AD8302 uygulama kartının genel görünümü.

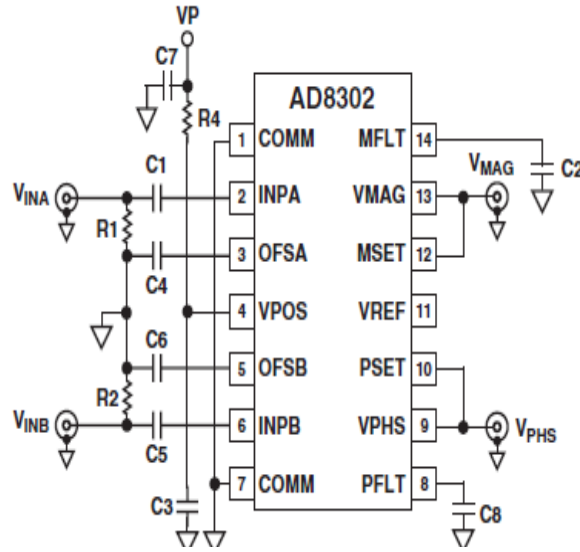
AD8302 sistemi ile ölçülmüş faz farkı osiloskop görüntüsü Şekil 6.9'da ve genlik farkı osiloskop görüntüsü ise Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Burada görülen gerilimler, alınan 30 adet işaretin ortalamasının alınmasıyla oluşturulmuştur.



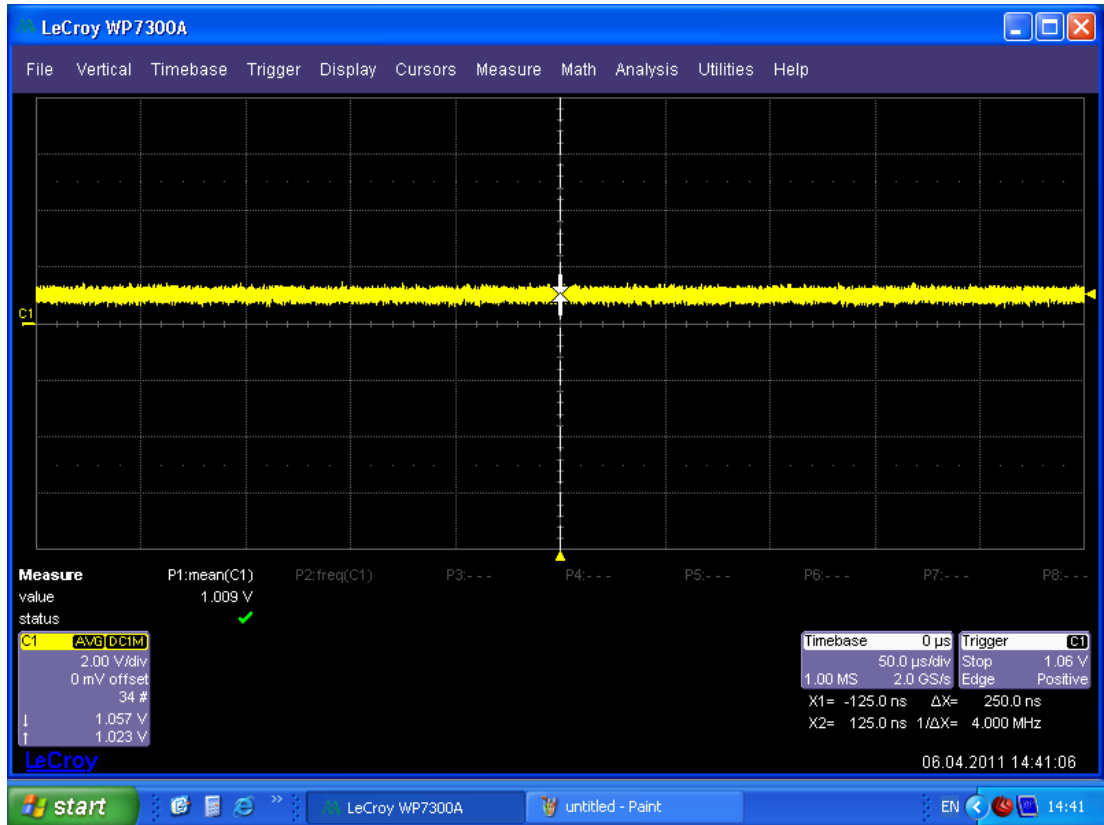
Şekil 6.6. AD8302 uygulama kartının faz çıkışı grafiği.



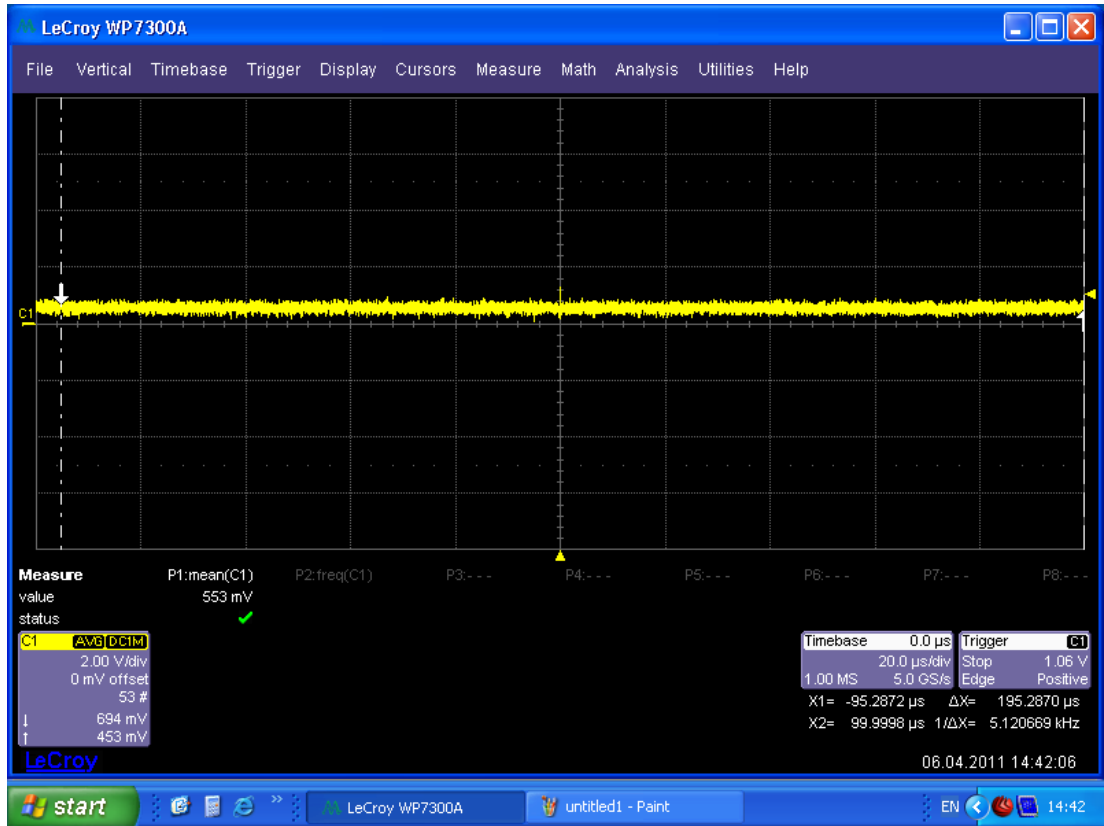
Şekil 6.7. AD8302 uygulama kartının faz/genlik farkı ölçümünde ideal transfer karakteristikleri.



Şekil 6.8. AD8302 uygulama kartının faz/genlik farkı ölçümü için kullanılan devre şeması.



Şekil 6.9. AD8302 uygulama kartı ile faz farkı ölçümü.

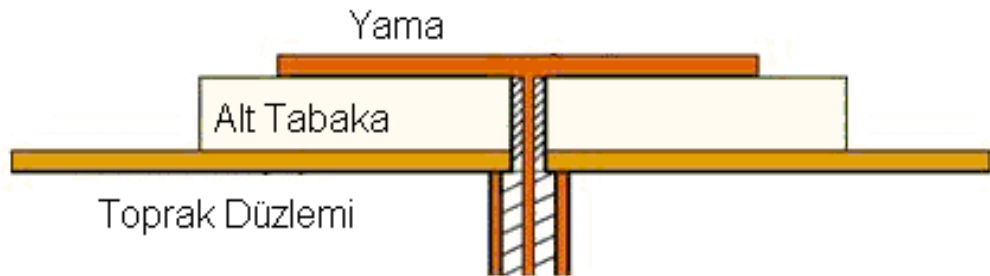


Şekil 6.10. AD8302 uygulama kartı ile genlik farkı ölçümü.

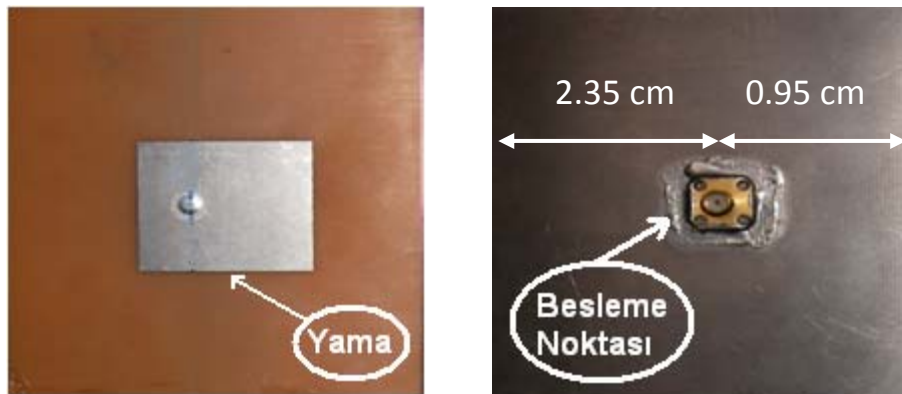
6.2. Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

6.2.1. Tek Bir Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Ölçümlerde kullanılmak üzere 2 GHz frekansında çalışan, dielektrik malzemesi FR-4, kalınlığı 16 mm , boyutları $605\text{ mm}-10\text{ mm}$ olan mikroşerit yama anten Şekil 6.11'de yandan ve Şekil 6.12'de önden ve arkadan gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu mikroşerit yama anten koaksiyel kablo ile beslenmiştir. Yama antenin boyutları 3.3 cm ve 3 cm 'dir. Besleme noktası ise yama antenin sağ ucundan itibaren 0.95 cm ileridedir.

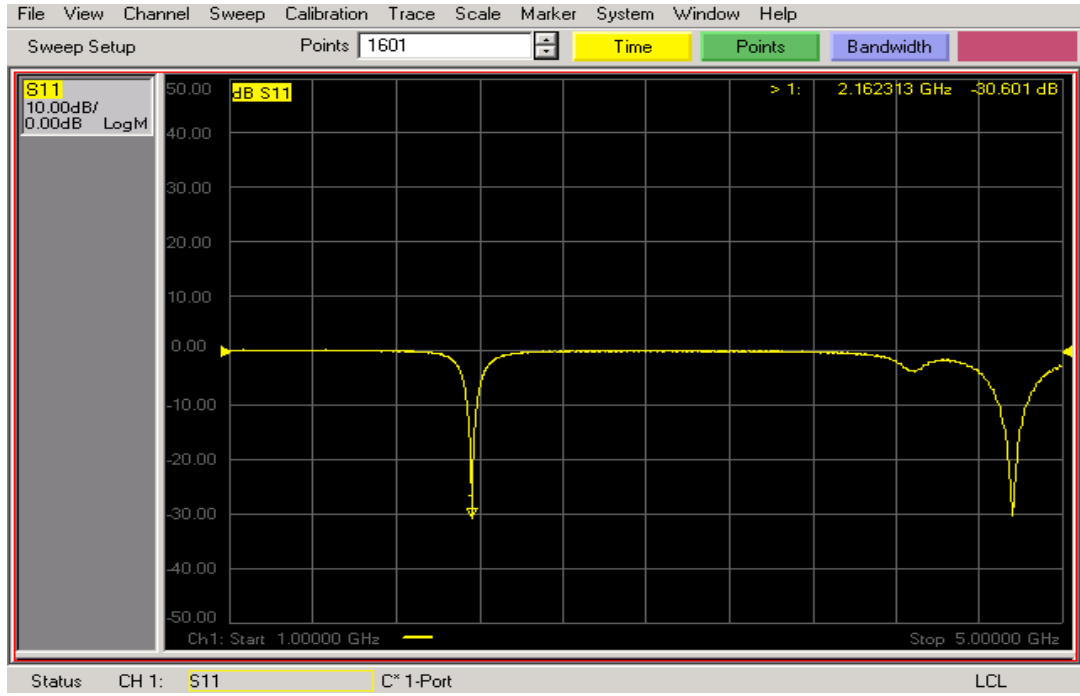


Şekil 6.11. Koaksiyel kablo ile beslenen mikroşerit yama antenin yandan şematik görünümü.



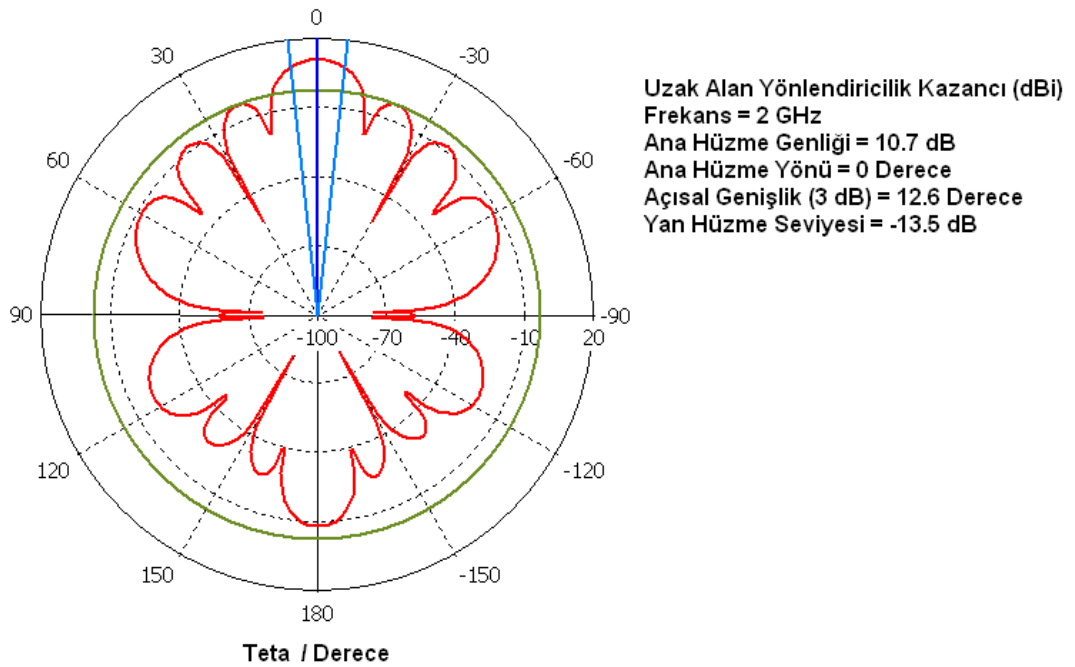
Şekil 6.12. Tek yama antenin önden ve arkadan görünümü.

Şekil 6.12'de gösterilen mikroşerit yama anten elemanının S_{11} parametresi Şekil 6.13'te verilmiştir. Ölçümler HP 8753E Network Analizör ile yapılmıştır. S_{11} parametresine göre yama anten elemanının en iyi çalışma frekansları 2.165 GHz ve 4.75 GHz olarak bulunmuştur.

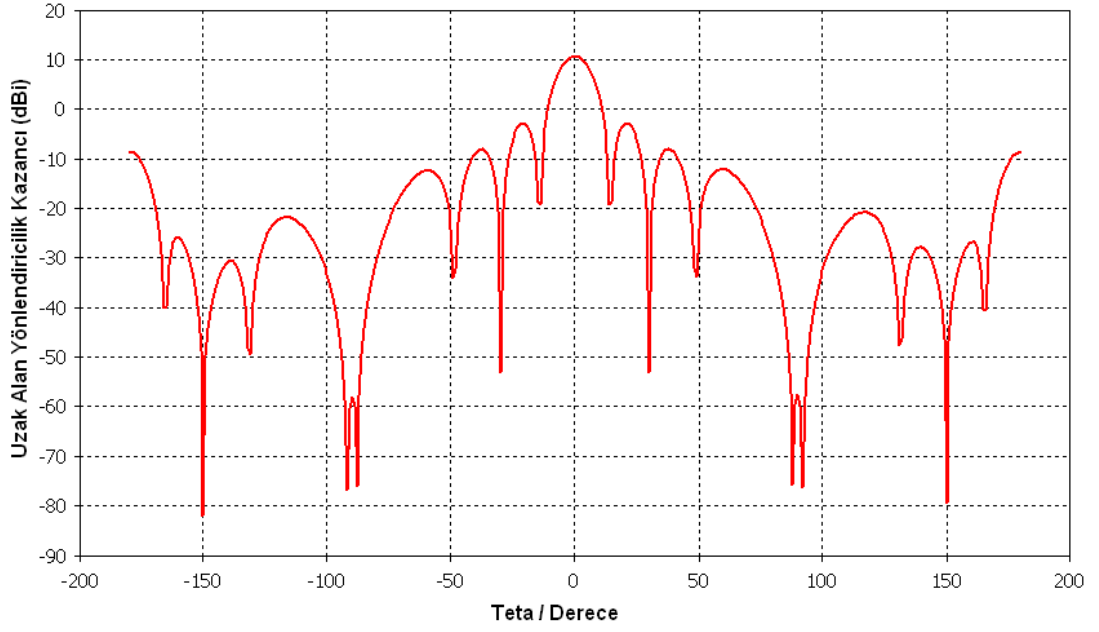


Şekil 6.13. Birinci mikroşerit yama antenin S_{11} parametresi.

Şekil 6.12.'de görülen yama anten elemanının CST programı ile yapılan benzetim sonucu elde edilen Polar tipteki uzak alan ışınma diyagramı Şekil 6.14'te, Kartezyen tipteki uzak alan ışınma diyagramı Şekil 6.15'te verilmiştir.



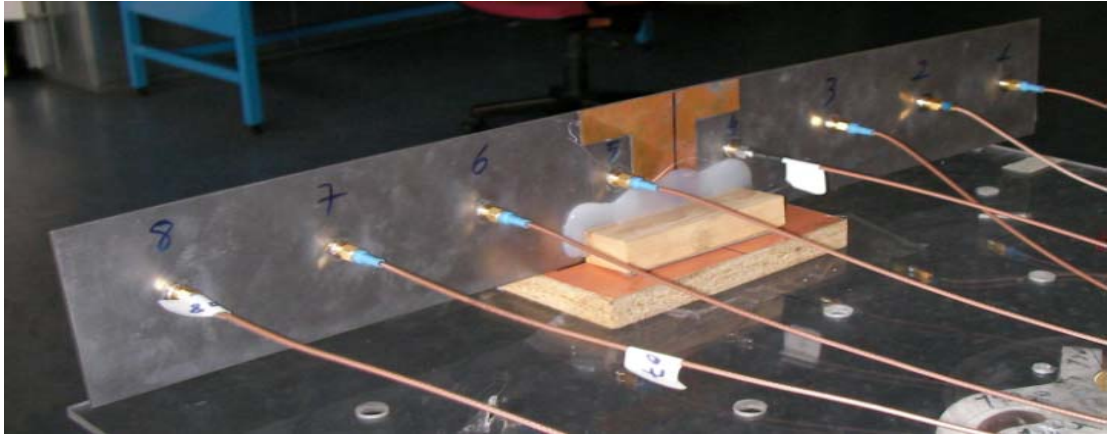
Şekil 6.14. Polar tipte tek elemanlı yama antenin uzak alan ışınma diyagramı.



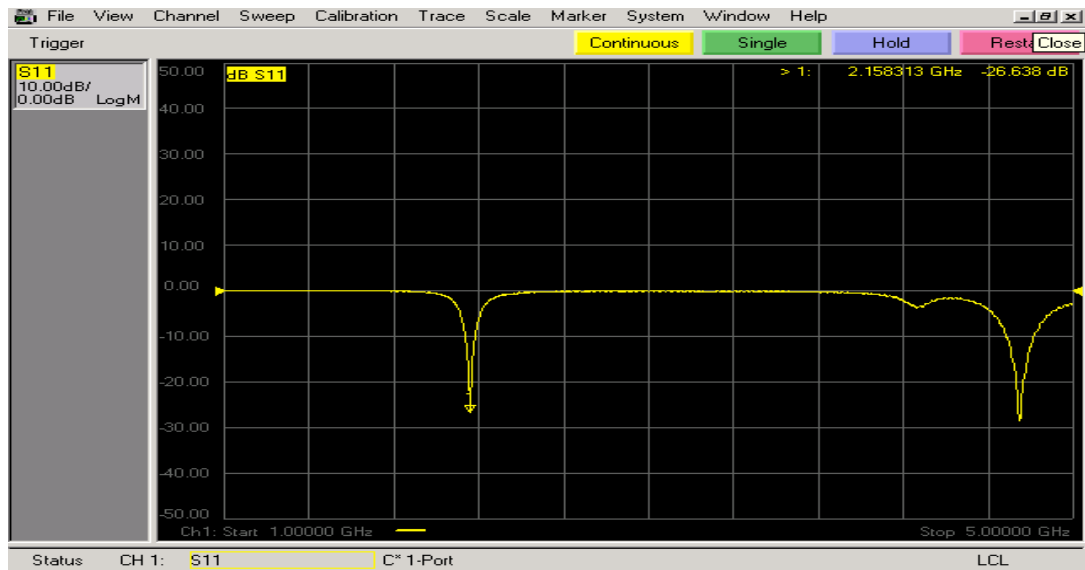
Şekil 6.15. Kartezyen tipte tek elemanlı yama antenin uzak alan ışınma diyagramı.

6.2.2. Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Bir önceki bölümde anlatılan tekli yama anten elemanı temel alınarak yama eleman sayısı sekiz, yama anten elemanları arasındaki mesafe 7.5 cm olacak şekilde Şekil 6.16'da görülen bir mikroşerit anten dizisi tasarlanmıştır. Mikroşerit anten dizisi koaksiyel kablo ile beslenmiştir. Şekil 6.16'da gösterilen mikroşerit anten dizisinin ikinci yama anten elemanının S_{11} parametresi Şekil 6.17'de verilmiştir. Buna göre yama anten elemanının en iyi çalışma frekansları 2.165 GHz ve 4.75 GHz olarak bulunmuştur.



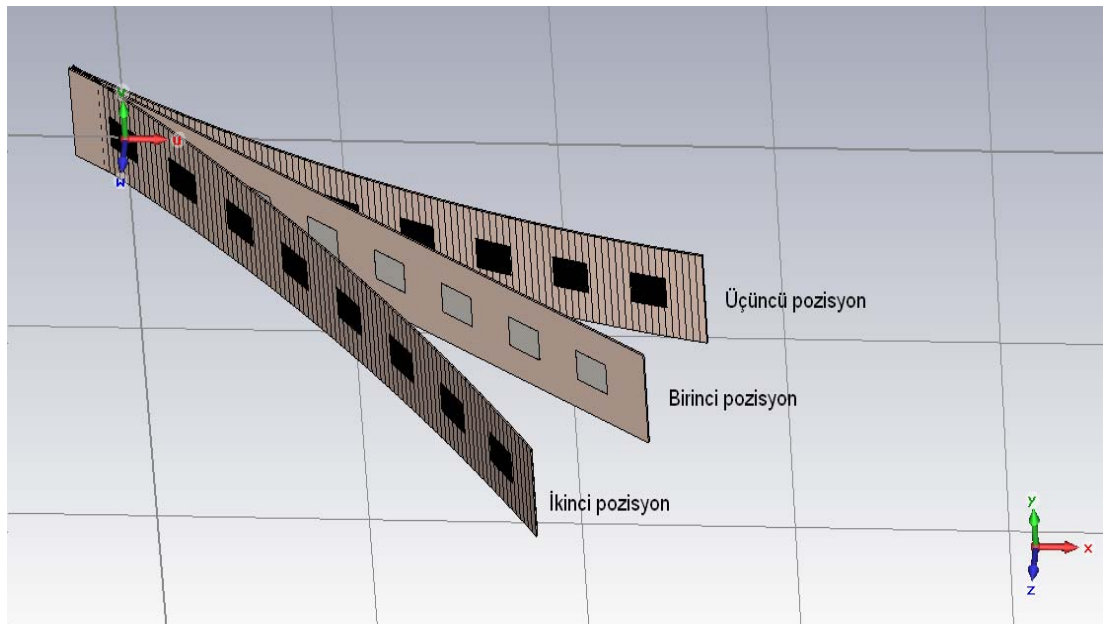
Şekil 6.16. Sekiz elemanlı mikroşerit yama anten dizisinin koaksiyel kablo ile beslenmesi.



Şekil 6.17. İkinci mikroşerit yama antenin S_{11} parametresi.

6.3. Geliş Açısı Kestirimi için Ölçümler

Yarı yansız oda içinde Şekil 6.18'de görüleceği gibi kurulan düzenek ile her üç pozisyon için referans anten ile diğer yedi anten elemanı arasındaki faz farkları ve genlik farkları AD8302 uygulama kartı kullanarak ölçülmüştür. Ölçülen bu genlik ve faz bilgileri kullanılarak Matlab yardımıyla anten dizisinin sekiz elemanı için işaretler oluşturulmuştur. Bu işaretler kullanılarak her üç pozisyon için MUSIC algoritması ile geliş açısı kestirimleri yapılmıştır.



Şekil 6.18. Mikroşerit anten dizisi pozisyonlarının görünümü.

Dizi anten Şekil 6.18'de görüleceği üzere üç farklı pozisyonda yerleştirilmiştir. İlk olarak mikroşerit dizi anten Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da görüleceği gibi birinci pozisyonda x eksenine göre 30° ile yerleştirilmiştir. İkinci pozisyon için dizi antenin bir ucu sabit tutularak diğer ucu Şekil 6.21'de görüldüğü gibi bükülmüştür. Üçüncü pozisyon içinse dizi antenin bir ucu sabit tutularak diğer ucu Şekil 6.23'te görüldüğü gibi bükülmüştür. Her üç pozisyon için yama antenlerin besleme noktalarının koordinatları Tablo I'de verilmiştir. Her üç pozisyon için işaret üreticiden 2 GHz frekansında ve -10 dBm gücünde üretilen işaret güç kuvvetlendirici ile 5 Watt kuvvetlendirilmiştir. Bu işaret ile kaynak Horn anten beslenerek elektromanyetik dalgalar uyarılmıştır.

Dizi antendeki her bir yama antenin referans antene göre AD8302 faz çıkışları

Tablo II: Yama antenlerin referans yama antene göre faz fark gerilimleri.

	Birinci Pozisyon	İkinci Pozisyon	Üçüncü Pozisyon
Yama 1 (mV)	0 (mV)	0 (mV)	0 (mV)
Yama 2 (mV)	820 (mV)	675 mV	990 mV
Yama 3 (mV)	90 (mV)	470 mV	140 mV
Yama 4 (mV)	1000 (mV)	1695 mV	430 mV
Yama 5 (mV)	1750 (mV)	1000 mV	900 mV
Yama 6 (mV)	1085 (mV)	240 mV	1565 mV
Yama 7 (mV)	95 (mV)	1725 mV	1690 mV
Yama 8 (mV)	1020 (mV)	640 mV	1620 mV

Tablo II'de gösterildiği gibi ölçülmüştür. Matlab ortamında birinci pozisyondaki dizi anten elemanları için alınan işaretler

$$A_1 = a_1 * \exp(-i * 2 * \pi * f * t)$$

$$A_2 = a_2 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_1))) \quad (6.1)$$

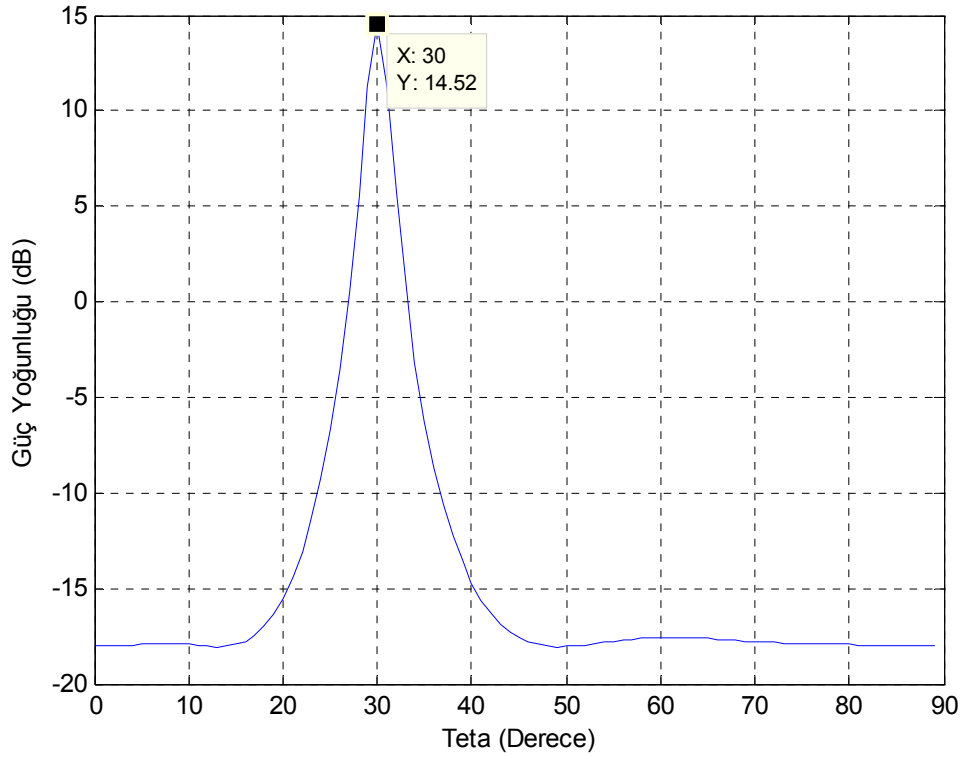
.....

$$A_8 = a_8 * \exp(-i * 2 * \pi * f * (t - (t_7)))$$

biçiminde oluşturulmuştur. Bu denklemde $A_1...A_8$ mikroşerit yama antenler tarafından alınan toplam işareti, $a_1...a_8$ mikroşerit yama antenlerin genliğini, f kaynak antenin frekansını ve $t_1...t_7$ ise referans antene göre faz farklarını belirtmektedir. Daha sonra ölçülen faz fark gerilimleri ile t_i faz farkları oluşturulmuştur. Her bir yama antenin işareti oluşturulduktan sonra MUSIC algoritması ile geliş açısı kestirimi yapılmıştır. Bu kestirimlere göre, geliş açısı birinci pozisyon için 30° (Şekil 6.20) , ikinci pozisyon için 41° (Şekil 6.22) ve üçüncü pozisyon için 18° (Şekil 6.24) olarak bulunmuştur.



Şekil 6.19. $\theta=30^\circ$ geliş açısı kestirimi için antenin konumlandırılması.

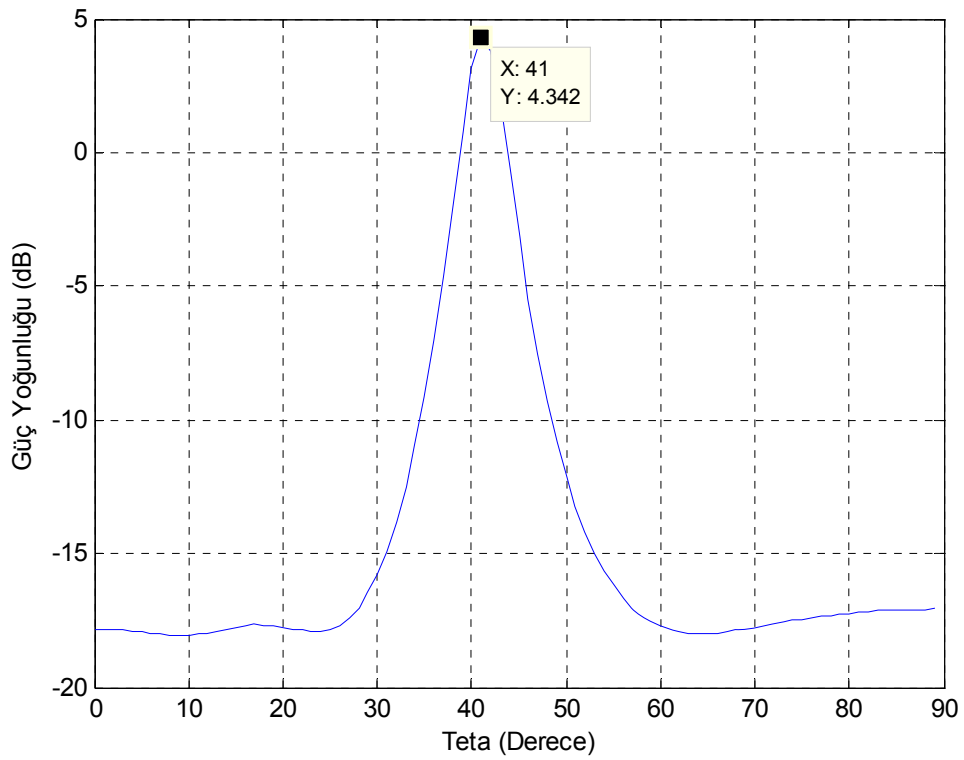


Şekil 6.20. $\theta=30^\circ$ için geliş açısı kestirimi (ölçüm).

Bu kestirimde 30° olarak bulunan geliş açısı, CST programı ile yapılan benzetimde birinci pozisyon için ana hüzme yönü 30° olarak bulunmuştu.



Şekil 6.21. $\theta=41^\circ$ geliş açısı kestirimi için antenin konumlandırılması.

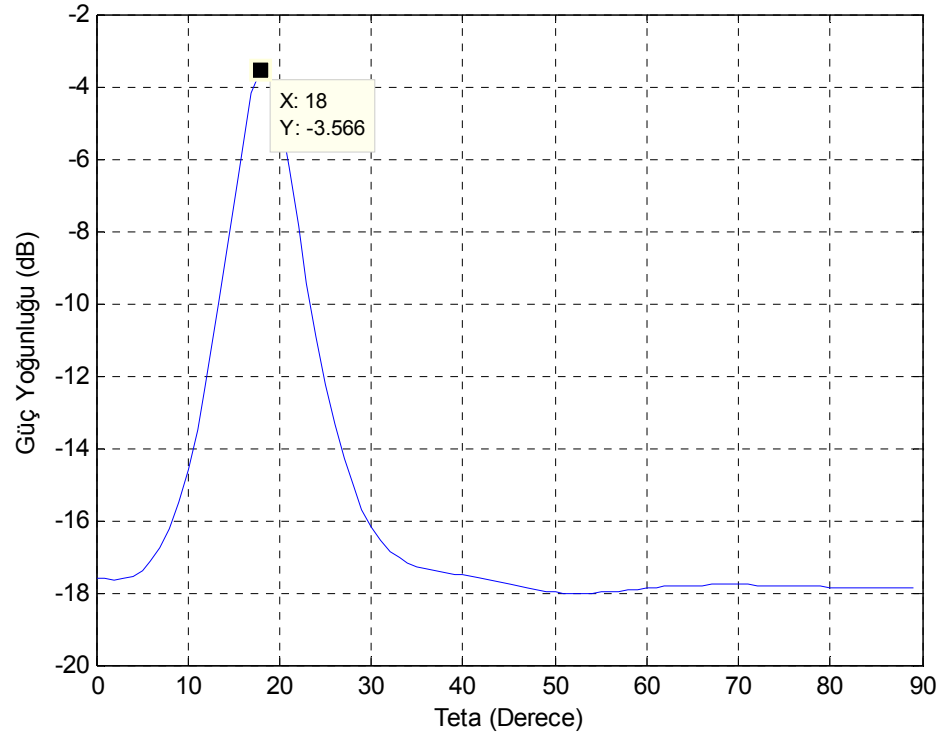


Şekil 6.22. $\theta=41^\circ$ için geliş açısı kestirimi (ölçüm).

Bu kestirimde 41° olarak bulunan geliş açısı, CST programı ile yapılan benzetimde ikinci pozisyon için ana hüzme yönü 41° olarak bulunmuştu.



Şekil 6.23. $\theta=18^\circ$ geliş açısı kestirimi için antenin konumlandırılması.

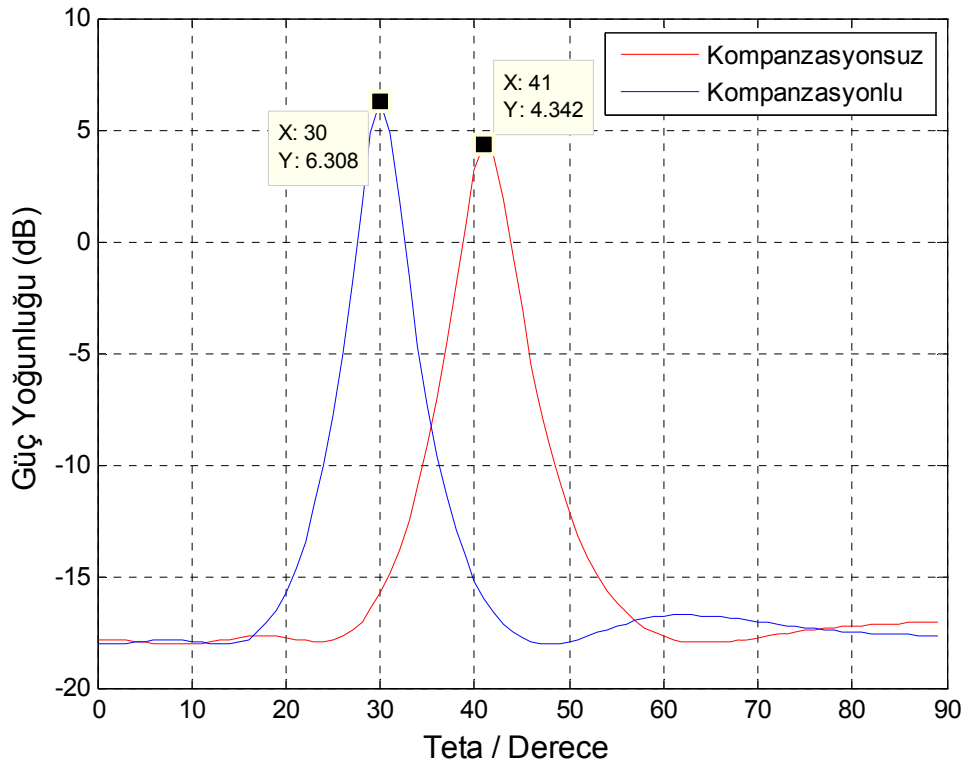


Şekil 6.24. $\theta=18^\circ$ için geliş açısı kestirimi (ölçüm).

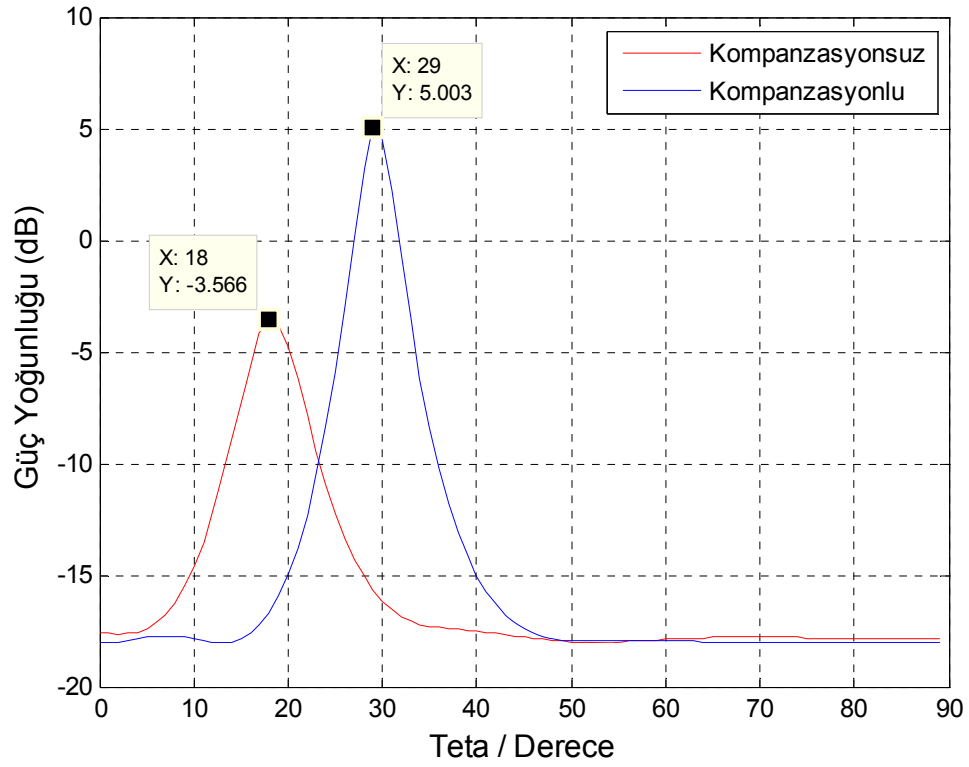
Bu kestirimde 18° olarak bulunan geliş açısı, CST programı ile yapılan benzetimde üçüncü pozisyon için ana hüzme yönü 21° olarak bulunmuştu. Dizi anten iki adet dört yamalı antenin lehimlenmesi ile oluşturulmuştur. Dizi anten üçüncü pozisyon için sabitlendiğinde, tam orta kısımda V şeklinde istenmeyen geometrik bir bozulma oluşmakta ve geliş açısı kestiriminde 3° 'lik fark meydana gelmektedir.

6.4. Kompanzasyon Ölçümleri

Bölüm 3.7' de anlatılan Yapay Uyarlamalı Hüzme Şekillendirme Yöntemi ile ikinci pozisyon ve üçüncü pozisyon için kompanzasyon yapılmıştır. Birinci pozisyonda (deformasyona uğramamış durum) dizi antene 30° ile gelen düzlemsel dalga için ikinci pozisyondaki geliş açısı kestirimi 41° , üçüncü pozisyonda ise 18° olarak bulunmuştur. İkinci ve üçüncü pozisyonlar için kompanzasyonların uygulanmış olduğu yeni geliş açısı kestirimleri Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da verilmiştir. Bu şekillerde kırmızı renkli grafik deformasyona uğramış durumdaki geliş açısı kestirimini, mavi grafik ise kompanzasyon yapılmış geliş açısı kestirimini göstermektedir. İkinci pozisyon için kompanzasyon uygulayınca geliş açısı 30° olarak bulunmuştur (Şekil 6.25). Üçüncü pozisyon için kompanzasyon uygulayınca geliş açısı 29° olarak bulunmuştur (Şekil 6.26).



Şekil 6.25. İkinci pozisyon için kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumda geliş açıları.



Şekil 6.26. Üçüncü pozisyon için kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumda geliş açıları.

Mikroşerit dizi antenin ikinci pozisyon için yapılan kompanzasyon ile geliş açısı kestirimi 30° olarak düzeltilmiştir. Aynı şekilde üçüncü pozisyon için yapılan kompanzasyon ile geliş açısı 29° olarak 1° 'lik hata ile düzeltilmiştir.

7. YORUMLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu tezde, lineer mikroşerit yama dizi antenlerin istem dışı deformasyonlara ve titreşimlere maruz kalması durumunda anten ışım diyagramları üzerinde ne gibi değişiklikler meydana geldiği araştırılmıştır. Ölçümlerde kullanılmak üzere 2 GHz frekansında çalışabilen sekiz elemanlı mikroşerit anten dizisi tasarlanmıştır. Anten dizisinin titreşime maruz kalma senaryosu olarak üç farklı pozisyon tanımlanmıştır. Birinci pozisyonda deformasyonun olmadığı, ikinci ve üçüncü pozisyonlarda deformasyonun olduğu düşünülerek anten dizisi yerleştirilmiştir. Bir adet Horn anten, anten dizisinin uzak alan şartını sağlayacak şekilde elektromanyetik dalgaları uyarması için 6.5 m uzakta konumlandırılmıştır. Birinci dizi anten elemanı ölçümlerde referans olarak kabul edilerek, diğer yedi dizi anten elemanının referans elemana göre genlik ve faz farkları AD8302 uygulama kartı ile ölçülmüştür. Alınan sonuçlar ile Matlab ortamında her üç pozisyon ve her bir mikroşerit dizi anten elemanı için ilgili faz ve genlik farkları kullanılarak işaretler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu işaretler kullanılarak MUSIC algoritması ile üç pozisyon için geliş açısı kestirimleri yapılmıştır. Bu kestirimlere göre dizi anten deformasyona uğradığı zaman geliş açısı değişmektedir. Dizi antenin ışım diyagramı olumsuz etkilenmektedir (ana hüzme yönünün ve şeklinin değişmesi, yan kulakçık seviyelerinin artması v.b.). Bu etkiler Yapay Açıklık Radar antenleri, Hareketli Hedef Belirleme antenleri ve Yön Bulma antenleri için çok önemli değişikliklere neden olabilir. Bir hava savunma aracı tarama radarı veya kanat altı Yapay Açıklık Radarının anten ışım diyagramlarında, uçağın hareketinden kaynaklanan kaymalar, yanlış hedef algılamasına veya yanlış veri alınmasına sebep olabilmektedir. Bu amaçla titreşimden kaynaklanan genlik ve faz değişimlerini algılayarak otomatik kompanze etmek oldukça önemli, gerekli ve kritik bir durumdur. Tasarlanan antenin deformasyona uğradığı durumlar için Zaman Uzayında Sonlu Farklar (ZUSF) yöntemi tabanlı CST STUDIO SUITE programı kullanılarak sekiz elemanlı mikroşerit dizi yama antenin ışım diyagramlarının benzetimleri yapılmıştır. Bu benzetimde de dizi antenin bozulmaya uğramamış durumda ve bozulmaya uğramış durumdaki ışım

diyagramları hesaplanmıştır. Benzetimlerden, deformasyonun olduğu durumlarda anten ışımaya diyagramının değiştiği gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçları ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında dizi antenin ışımaya diyagramının değiştiği görülmüştür. Daha sonra bozulan geliş açısının düzeltilmesi için Yapay Uyarlamalı Hüzme Şekillendirme (Adaptive Synthetic Beamforming) yöntemi kullanılarak düzeltme sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda dizi anten sürekli deformasyona uğrayacak bir platforma yerleştirilecektir. Anlık olarak ışımaya diyagramı oluşturacak, geliş açısı kestirimi yapacak ve deformasyon durumunda oluşan faz farklarını otomatik olarak kompanze edebilecek bir sistem tasarlanmaya çalışılacaktır.

8. KAYNAKLAR

AD8302 (*LF 2 GHz RF/IF Gain and Phase Detector*, www.analog.com).

Aizenberg A. L., “*Radiation Patern of Vibration at No Load in Infinitely Large Plane Array*”, *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 25, issue.2, pp. 165-171, 1982.

Akkaya İ., “*Antenler ve Propagasyon*”, Sistem Yayıncılık, 1996.

Balanis C. A., Ioannides P. I., “*Introduction to Smart Antennas*”, Morgan and Claypool Publishers, Arizona, USA, 2007.

Balanis C.A., “*Antenna Theory Analysis and Design*”, John Wiley and Sons, New York, USA, 1997.

CST STUDIO SUITE, 2010, Computer Simulation Technology (CST AG).

Deschamps G. A., “*Microstrip Microwave Antennas*”, 3th USAF Symp. on Antennas, 1953.

Gutton H., Baissinot G., “*Flat Aerial for Ultra High Frequencies*”, French Patent No.703113, 1995.

Munson R. E., “*Single Slot Cavity Antenna Assembly*”, U.S. Patent No. 37113162, January 23, 1973.

F. Harfoush, A. Taflove and G. A. Kriegsmann, “*A numerical technique for analyzing electromagnetic wave scattering from moving surfaces in one and two dimensions*”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.37, no.1, pp.55-63, 1989.

Howell J. Q., “*Microstrip Antennas*” in *Dig. Int. Symp. Antennas Propagation Soc.*, pp. 177-180, Williamsburg, VA, Aralık 1972.

James T., "*Digital Techniques for Wideband Receivers*", Artech House, 1995.

Karadeniz C., Türetken B., "*Mekanik Titreşimlerin Anten Işıma Örüntüsü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*", INTERNATIONAL UNION of RADIO SCIENCE 2010, sayfa: 473-477, Güzelyurt, K.K.T.C., 25-27 Ağustos 2010.

Knott P., "*Deformation and Vibration of Conformal Antenna Arrays and Compensation Techniques*", Multifunctional Structures/Integration of Sensors and Antennas, Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-141, paper no: 19, Neuilly-sur-Seine, Fransa, 1 Ekim 2006.

Türetken B., Karadeniz C., "*Analysis of Vibration Effects on Antenna Array in S Band*", NATO/RTO Research Task Group SET-131, Toulouse, Fransa, 26 October 2010.

Schippers H., van Tongeren J. H., Vos G., "*Development of Smart Antennas on Vibrating Structures of Aerospace Platforms of Conformal Antennas on Aircraft Structures*", NATO AVT Specialists Meeting, Paper No: 20, Vilnius, Litvanya, 2-5 October 2006.

Schippers H., J. H. van Tongeren, P. Knott, T. Deloues, P. Lacomme, M. R. Scherbarth, "*Vibrating Antennas and Compensation Techniques*", Research in NATO/RTO/SET-087/RTG 50, IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 3-7 March 2007.

Schmidt R. O., "*Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation*", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986.

ÖZGEÇMİŞ

Cantürk KARADENİZ, 1978 yılında Ordu ilinin Akkuş ilçesinde doğmuştur. İlköğrenimini Sivas'ta, ortaokul ve liseyi Gebze'de tamamlayıp 2001 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Vestel Elektronik A.Ş.'de dört yıl uygulama mühendisi ve Ar-Ge mühendisi olarak çalışmıştır. 2006 yılından itibaren TÜBİTAK UEKAE'de uzman araştırmacı olarak görev yapmaktadır.