

T.C.
DENİZ HARP OKULU
DENİZ BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRONİK SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOYUTU KÜÇÜLTÜLEN GENİŞ BANT VİVALDİ DİZİ
ANTEN TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

MERT KARAHAN

Tez Danışmanı: Dr. Demet S. ARMAĞAN ŞAHİNKAYA

Tez Eş Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Fatih ERDEN

İstanbul, 2014

© Çalışmanın Tüm Hakları Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü'ne aittir,
2014

T.C.
DENİZ HARP OKULU
DENİZ BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRONİK SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOYUTU KÜÇÜLTÜLEN GENİŞ BANT VİVALDİ DİZİ
ANTEN TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

MERT KARAHAN

Tez Danışmanı: Dr. Demet S. ARMAĞAN ŞAHİNKAYA

Tez Eş Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Fatih ERDEN

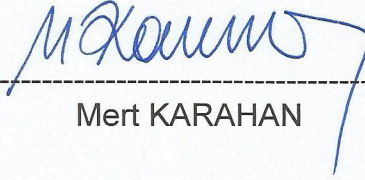
İstanbul, 2014

BOYUTU KÜÇÜLTÜLEN GENİŞ BANT VİVALDİ DİZİ ANTEN TASARIMI

Mert KARAHAHAN

ELEKTRONİK SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

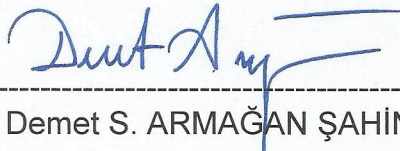
Yazar:

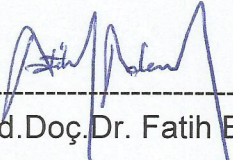

Mert KARAHAHAN

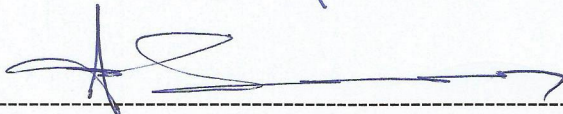
Sınav Tarihi:

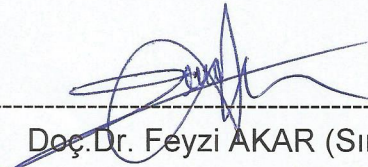
18 Haziran 2014

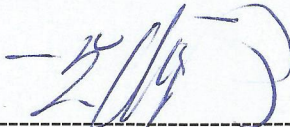
Onaylayanlar:


Dr. Demet S. ARMAĞAN ŞAHİNKAYA (Tez Danışmanı)


Yrd.Doç.Dr. Fatih ERDEN (Tez Eş Danışmanı)


Prof.Dr. Fevzi BABA (Sınav Komitesi Üyesi)


Doç.Dr. Feyzi AKAR (Sınav Komitesi Üyesi)


Yrd.Doç.Dr. Erol ÖNEN (Sınav Komitesi Üyesi)

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince danışmanlığımı yapan ve çalışmalarım sırasında deneyimi ve bilgi birikimi ile desteğini esirgemeyen, fikirleri ve yol göstericiliği ile çalışmamın gelişmesine imkân tanıyan sayın hocam Dr. Demet S. ARMAĞAN ŞAHİNKAYA'ya teşekkürü borç sayarım.

Çalışmamın gelişim ve üretim aşamasında yardımını esirgemeyen, verdiği destekle bana büyük katkı yapan Engin Kurt başta olmak üzere tüm TÜBİTAK BİLGEM çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve beni destekleyen, yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen kıymetli eşime ve canım oğluma çok teşekkür ederim.

ÖZET

BOYUTU KÜÇÜLTÜLEN GENİŞ BANT VİVALDİ DİZİ ANTEN TASARIMI

Mert KARAHAN

Elektronik Sistemleri Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2014

Danışman: Dr. Demet S. ARMAĞAN ŞAHİNKAYA

Eş Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Fatih ERDEN

Anahtar Kelimeler: Geniş bant anten, antipodal Vivaldi anten, güç bölücü

Bilginin inanılmaz derecede değer ve güç kazandığı günümüzde, insanların daha fazla bilgiye en kısa sürede erişme isteği onları yeni teknolojiler üzerinde çalışmaya yönlendirmiştir. Başta askeri sistemler olmak üzere günümüz uygulamalarında sıkça kullanılan geniş bant teknolojisi bunların en başında gelmektedir. Geniş bant teknolojisi bugüne kadar; askeri haberleşme, elektronik harp ve radar sistemlerinde yüksek kapasitesi, frekans karıştırmaya karşı dirençli olması, tespit edilmesinin zor oluşu nedeniyle ticari uygulamalara nazaran daha fazla kullanılmıştır. Özellikle bu alanlardaki geniş bantlı uygulamalarda Vivaldi antenler, boyutlarının küçük olması, taşınabilirliği, düşük üretim maliyetli oluşu, bant genişliği boyunca anten değerlerinin kararlı dağılıma sahip olması ve kullanım alanlarının genişliği nedeniyle tercih edilen en yaygın anten çeşitlerinden biri olmuştur.

Bu tez çalışmasında geniş bantlı uygulamalarda kullanılabilecek, küçük boyutlu, yüksek kazançlı, yan lob seviyesi düşük, belirli bir alan içerisinde elektronik tarama yapabilme özelliğine sahip antipodal Vivaldi dizi anten tasarımı gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Geniş bant teknolojisinde kullanılan küçük ve hafif yapılı baskı devre kartlarına rahatlıkla uyum sağlayabilmesi için anten mikroşerit yapıda düzlemsel olarak tasarlanmıştır. Anten tasarımında 3 boyutlu bilgisayar benzetim programı CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio) ve matematiksel hesaplamalarda MATLAB programı kullanılmıştır. Anten üretimi TUBİTAK BİLGEM (Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi) laboratuvarlarında yapılmıştır.

Çalışmada tek anten, 1x8 doğrusal ve 8x8 düzlemsel dizi anten ve bu dizi antenler için güç bölücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonucunda 13.2 x 9.5 x 11.8 cm³'lük hacme sahip (8x8 anten ve WPD için), 6-18 GHz frekans aralığında çalışabilen, bu frekans aralığında geri dönüş kaybı -10 dB'nin altında olan, yüksek kazançlı (kazanç değeri 8x8'lik anten için 17.1 – 23.5 dB aralığında); 6-18 GHz frekans aralığında 40°, 6-12 GHz aralığında 70° tarama yapabilen (1x8'lik dizi anten); farklı genlik beslemeleri uygulandığında yan lob seviyesi bant genişliği boyunca ortalama -23.5 dB olan bir anten üretilmiştir.

Üretilen tek antenin literatürde mevcut bulunan benzerlerine göre %66 oranında daha küçük olduğu, boyutları küçük olmasına rağmen benzerleri ile aynı kazanç değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

ABSTRACT

A REDUCED SIZE WIDEBAND VIVALDI ANTENNA ARRAY DESIGN

Mert KARAHAN

Master Thesis for Electronics Systems Engineering, 2014

Advisor: Dr. Demet S. ARMAĞAN ŞAHİNKAYA

Co-advisor: Yrd.Doç.Dr. Fatih ERDEN

Key Words: wide band antenna, antipodal Vivaldi Antenna, power divider

Nowadays when the information gains incredibly power and value, the request of rapidly accessing much more information for human have led them to work on new technologies. Including military systems, broadband technology commonly used in today's applications is the leading of them. But at military communications, electronic warfare and radar systems compared to commercial applications, this technology is ever used more due to its high capacity, jamming resistance and Low Probability of Intercept. Especially in those areas, Vivaldi antenna has been one of the most common antenna because of their stable broadband characteristics (suitable for ultra-wideband signals), their easy manufacturing process using common methods for PCB production, and their easy impedance matching to the feeding line using microstrip line modeling methods.

In this thesis, antipodal Vivaldi array antenna which can be used in broadband applications, has small dimension, high-gain, low side lobe level (SLL), capable of scanning within a particular area is intended to realization.

Antenna is designed to be planar structure in order to adapt easily broadband technology which is made with the printed circuit board. In

antenna design, 3-dimensional computer simulation program CST MWS, and MATLAB for mathematical calculations was used. Antenna is produced and measured in the TÜBİTAK BİLGEM's laboratory.

In this study, single antenna, a 1x8 linear and an 8x8 planar array antenna, and for these array antennas power divider design were carried out. As a result of design; a antenna with a volume of $13.2 \times 9.5 \times 11.8 \text{ cm}^3$ (for 8x8 array with WPD), with capable of operating in the frequency range 6-18 GHz, with return loss less than -10 dB in this frequency range, with high-gain (17.1 – 23.5 dB for 8x8 array), with capable of scanning 40° at 6-18 GHz, 70° at 6-12 GHz; When applied different amplitude excitation to each array element, with -23.5 dB SLL was produced.

The produced antenna compared to similar studies in literature is smaller than 66%, It has the same gain value as similiars despite of its small size.

“Bu çalışmada yazarın ortaya koymuş olduğu ifadelerin hiçbiri T.C. Deniz Kuvvetleri’nin ve Deniz Harp Okulu ile Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü’nün resmi görüşlerini ve politikalarını yansıtmamaktadır.”

İÇİNDEKİLER

TÜRKÇE ÖZET	ii
İNGİLİZCE ÖZET	iv
SORUMLULUK NOTU	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR LİSTESİ	xii
I. GİRİŞ	1
II. GENEL BİLGİLER.....	3
A. GENİŞ BANTLI ANTENLER	3
1. Geniş Bant Tanımı.....	3
2. Geniş Bant Antenler.....	4
B. VİVALDİ ANTEN VE DİZİLERİ.....	6
1. Vivaldi Anten Çeşitleri.....	7
2. Antipodal Vivaldi Anten.....	8
3. Vivaldi Anten Dizileri	11
III. TASARIM	14
A. GİRİŞ	14
1. Kullanılan Baskı Devre Kartı Seçimi	15
B. ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN TASARIMI	16
1. Işıma Bölümü ve Parametreleri	18
2. Besleme Bölümü ve Parametreleri	22
3. Tek Anten için Benzetim ve Test Sonuçları	24
C. DİZİ ANTEN TASARIMI	26
1. AVA Doğrusal Dizi Tasarımı	26
2. AVA Düzlemsel Dizi Tasarımı.....	28

3. Güç Bölücü Tasarımı	30
D. BENZETİM VE TEST SONUÇLARI	33
1. AVA Doğrusal Dizi	33
2. AVA Düzlemsel Dizi.....	37
3. AVA Düzlemsel Dizide Aktif Elektronik Tarama.....	39
IV. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	43
KAYNAKÇA	47

TABLolar LİSTESİ

Tablo III.1 Rogers RO4003C baskı devre kartı temel karakteristik özellikleri	16
Tablo III.2 AVA'nın parametre değerleri	23
Tablo III.3 Karşılıklı kuplajın anten kazancı üstündeki etkisi.....	28
Tablo III.4 WPD'nin parametre değerleri	32
Tablo III.5 AVA doğrusal dizi kazanç değerlerinin benzetim ve test sonuçları	36
Tablo III.6 8 elemanlı anten için aynı ve farklı genlik besleme değerleri.....	40
Tablo III.7 Aynı ve farklı genlik beslemeleri arasındaki SLL farkı	40
Tablo III.8 Farklı faz açıları ile anten tarama aralığı	42

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil II.1 Geçmişten günümüze geniş bant anten tasarımları; (a) konik anten, (b) Lindenblad koaksiyel horn dizi anten, (c) Brillouin koaksiyel horn anten, (ç) Slot anten, (d) Harmuth anteni , (e) Notch anten	5
Şekil II.2 Düzlemsel geniş bant anten örnekleri.....	6
Şekil II.3 Vivaldi anten çeşitleri (a) TSA - Vivaldi anten, (b) AVA – Antipodal Vivaldi anten, (c) BAVA – Dengeli antipodal Vivaldi anten.....	8
Şekil II.4 Antipodal Vivaldi anten örneği	9
Şekil II.5 500 MHz - 8 GHz arası çalışan örnek bir AVA'nın ışıma elemanı ve tasarımı	10
Şekil II.6 Işıma prensibi	11
Şekil II.7 Örnek bir mikroşerit besleme yapısı	11
Şekil II.8 Tek ve dual polarizeli Vivaldi anten dizi düzenlemeleri.....	13
Şekil III.1 Anten tasarımı için izlenilen akış diyagramı.....	14
Şekil III.2 AVA'nın geliştirilme evreleri	16
Şekil III.3 AVA'nın parametreleri.....	17
Şekil III.4 R değişkeninin ışıma eğrisi üzerindeki fiziksel etkileri.....	20
Şekil III.5 Kazancın arttırılması için; (a) Anten baskı devre kartının boyunun uzatılması, (b) Yuvarlatılmış uçların kullanılması	21
Şekil III.6 Anten beslemesi (a) 100 ohm, (b) 50 ohm.....	23
Şekil III.7 Üretilen AVA	24
Şekil III.8 AVA'nın geri dönüş kaybı (S ₁₁).....	24
Şekil III.9 AVA'nın ışıma paterninin benzetim ve test sonuçları; (a) 6 GHz, (b) 12 GHz, (c) 18 GHz	26
Şekil III.10 Dizi anten parametreleri.....	27
Şekil III.11 D=30 mm olduğunda 18 GHz'te oluşan istenmeyen loblar	28
Şekil III.12 Dizi elemanlarının H-düzleminde ayna görüntüsü ile yerleştirilmesi	29
Şekil III.13 8x8'lik antipodal Vivaldi dizi anteni tasarımı.....	29
Şekil III.14 8 yollu WPD tasarımı ve parametreleri; 100-100 ohm 5 bölmeli ÇBDB (sol altta), 50-100 ohm 5 bölmeli ÇBDB (sağ altta)	31
Şekil III.15 WPD S-Parametre değerleri	32
Şekil III.16 8x8 elemanlı AVA ve WPD dizisi	33
Şekil III.17 AVA doğrusal dizi üretim modeli	34
Şekil III.18 1X8 AVA doğrusal dizi geri dönüş kaybının benzetim ve test sonuçları karşılaştırması	34
Şekil III.19 1X8 AVA doğrusal dizi ışıma paterninin benzetim ve test sonuçları karşılaştırması; (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 14 GHz, (ç) 17 GHz... ..	36
Şekil III.20 8X8 AVA doğrusal dizi geri dönüş kaybının benzetim sonuçları	37
Şekil III.21 8X8 AVA düzlemsel dizi ışıma paterninin benzetim sonuçları; (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 14 GHz, (ç) 17 GHz	39
Şekil III.22 14 GHz için 1. durum ve 2. durum beslemede SLL değişimi	41

Şekil III.23 12 GHz için $\theta = 90^\circ \pm 30^\circ$ 'de AVA'nın benzetim örüntüsü..... 42

KISALTMALAR LİSTESİ

AVA	: Antipodal Vivaldi Anten
BAVA	: Balanced Antipodal Vivaldi Anten
BW	: Bandwidth – Bant Genişliği
CST MWS	: Computer Simulation Technology Microwave Studio
ÇBDB	: Çeyrek Dalga Boylu Dönüştürücü
dB	: Desibel
FCC	: Federal Communications Commission
GHz	: Gigahertz
LPI	: Low Probability of Intercept – Düşük Kestirilme Olasılığı
mm	: Milimetre
RF	: Radyo Frekans
UWB	: Ultra Wide Band – Ultra Geniş Bant
SLL	: Side Lobe Level – Yan Lob Seviyesi
TSA	: Tapered Slot Antenna
WPD	: Wilkinson Power Divider – Wilkinson Güç Bölücü

I. GİRİŞ

İnsanoğlunun artan ihtiyaçlarını karşılamak her alanda olduğu gibi teknolojik alanda da insanları yeni çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte yüksek kapasiteli bilgiye erişim bu noktada çalışmaların çok geniş bantlı uygulamalar üzerinde yoğunlaşmasını sağlamıştır.

İlk olarak askeri sistemler ile kullanılmaya başlanan geniş bantlı uygulamalar frekans spektrumunun zaman içinde tahsisi ile sağlıktan havacılığa, haberleşmeden uzay teknolojilerine kadar her alanda yaygınlaşmaya başlamıştır. Fakat özellikle frekans karıştırmaya karşı dirençli oluşu, yüksek kapasitesi, dinlenme ve tespit edilmesinin zor olması nedeniyle askeri haberleşme, elektronik harp ve radar sistemlerinde daha çok tercih edilmiştir.

Geniş bantlı uygulamaların en önemli parçası bu özelliğini ona kazandıran antenlerdir. Geniş bant antenler, dar bant antenlere nazaran istenen bant genişliğinin her noktasında aynı özelliği sergilemesi gerektiğinden tasarımı oldukça zor ama bir o kadarda verimli ışıma araçlarıdır. Günümüzde geniş bantlı teknolojik cihazların küçük ve hafif olması buna uyumlu olacak antenlerinde küçük boyutlu olmasını mecbur kılmıştır. Bununla birlikte baskı devre yapıları uygun, küçük hacimli, üretimi kolay ve mikroşerit yapıda olan geniş bant düzlemsel anten tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Geniş bantlı düzlemsel antenlerin tüm özelliğine sahip olan Vivaldi antenler, genel itibarıyla doğrusal ışıma yapabilen, yüksek kazançlı ve yan lob seviyesinin düşük olduğu anten çeşitleridir. Düzlemsel yapısı sayesinde farklı elektronik baskı devreler ile kolayca bütünleşebilmekte ve büyük sistemler ile kolayca uyum sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında geniş bantlı uygulamalarda kullanılmak üzere düzlemsel yapıda antipodal Vivaldi dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiş,

ayrıca radar sistemleri için istenen bazı özellikler bu anten üzerinde incelenmiştir.

Bu çalışmada geniş bant kavramı ve geniş bantlı antenler ile ilgili genel bilgiler ikinci bölümde; anten tasarımı, benzetim ve test sonuçları üçüncü bölümde; yapılan çalışmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler son bölümde sunulmuştur.

II. GENEL BİLGİLER

A. GENİŞ BANTLI ANTENLER

Son zamanlarda teknolojiadaki hızlı gelişim ve kablosuz iletişimdeki başarılı ticari uygulamalar günlük hayatımızı hızla etkiler hale gelmiştir. Analog yayından dijital hücreli iletişime geçiş, 3'üncü ve 4'üncü nesil iletişim sistemleri, kablolu iletişimin yerini kablosuz iletişime bırakması, insanların bulundukları yere bakmaksızın çok geniş çapta bilgiye hızlı bir şekilde ulaşmasına imkân vermiştir. Bununla paralel olarak artan daha geniş kapasiteli, hızlı ve güvenli iletişim ihtiyacı bilim insanlarını, farklı amaçlar için paylaştırılmış, kalabalık ve sınırlı radyo frekans (RF) spektrumunda mevcut kısıtlamaları elimine edip yüksek ve geniş frekans aralığında çalışmaya zorlayarak geniş bantlı uygulamalara yönlendirmiştir. Sivil gereksinimlerle birlikte askeri gereksinimler geniş bantlı sistemlerin yaygınlaşmasına neden olmuştur. Geniş bantlı sistemlerin en önemli kritik bileşenlerinden birisi geniş bantlı antenlerin tasarımıdır.

1. Geniş Bant Tanımı

Federal İletişim Komisyonunun (Federal Communications Commission - FCC) raporunda tanımlandığı gibi bir uygulamanın geniş bantlı olabilmesi için bant genişliğinin 500 MHz'den fazla veya kesirli bant genişliğinin (Fractional bandwidth - B_f) tüm iletim bant genişliğinin %20'sinden fazla olması gerekmektedir [1]. Kesirli bant genişliği bir sistemin dar bant, geniş bant veya ultra geniş bant diye sınıflandıran bir faktör olup merkez frekansın -10 dB'deki bant genişliğine oranıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$B_f = \frac{BW}{f_c} \times 100\% = \frac{f_h - f_l}{(f_h + f_l) / 2} \times 100\% = \frac{2 \times (f_h - f_l)}{f_h + f_l} \times 100\% \quad (II.1)$$

f_h , f_l ve f_c sırasıyla en yüksek, en düşük ve merkez frekansı gösterir. B_f 'ye göre uygulamaların sınıflandırılması ise;

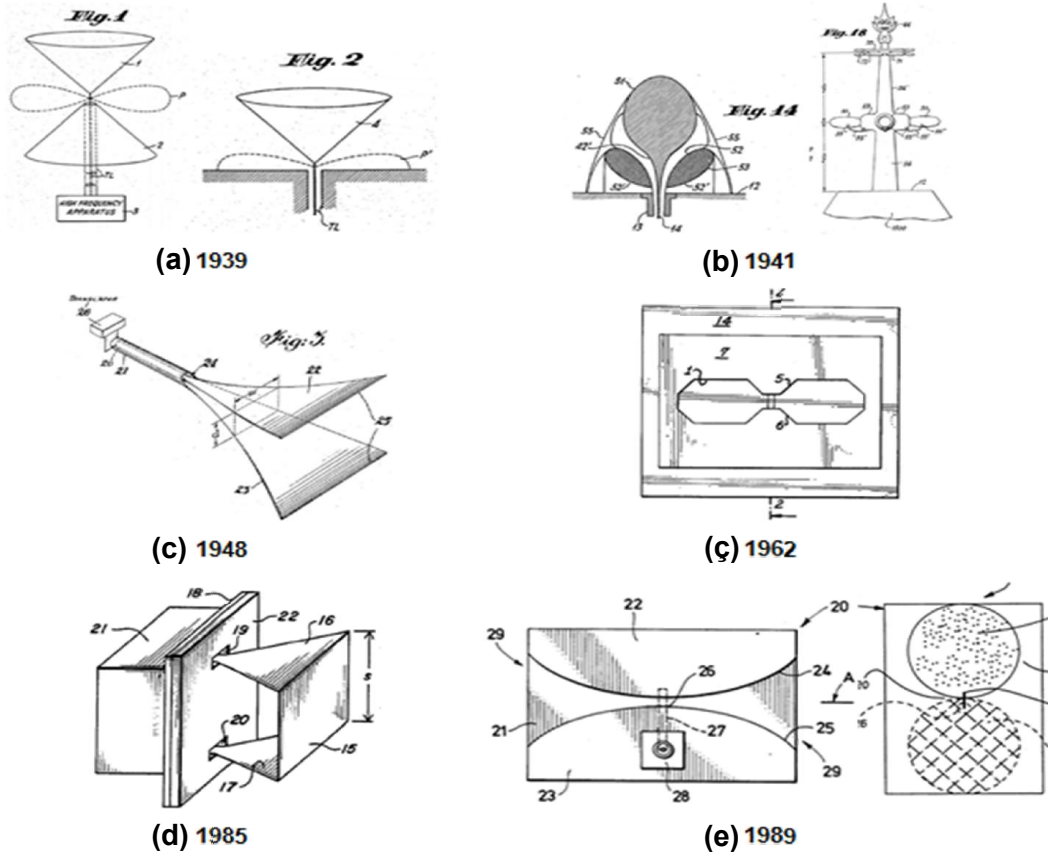
- Dar bant $B_f < 1\%$
- Geniş bant $1\% < B_f < 20\%$
- Ultra geniş bant $20\% < B_f$

olarak tanımlanmaktadır.

2. Geniş Bant Antenler

Geniş bantlı antenler, sivil sektörde geniş bant uygulamalarında ve askeri sektörde geniş bant gereksinimi mevcut olan radar ve elektronik harp uygulamalarında önemli bir role sahiptirler. Anten tasarımcıları tarafından hem sivil hem de askeri uygulamalar için geliştirilen bu antenler dar bant antenlere nazaran tasarlanması daha zorlu bir süreç içermektedir. Tasarımında öne çıkan hususlar şu şekilde sıralanabilir [2]:

- İstenen geniş bant aralığına sahip olması gerekmektedir.
- Anten performansı tüm operasyonel bant genişliği üzerinde aynı tutarlılığı sergilemelidir.
- Talep edilen uygulamaya göre her yöne (omni directional) veya yönlendirilmiş ışıma yapabilmelidir. Örneğin mobil iletişim sistemi her yöne ışıma yapabilen bir tasarım gerektirirken, radar uygulamaları için yüksek kazançlı yönlendirilmiş model tercih edilmektedir.
- Günümüz teknolojisindeki baskı devre kartlı geniş bant sistemlere entegre edilebilmesi için antenin yeteri kadar küçük boyutlarda olması, boyutları küçültülürken de tasarımının kolay olması gerekmektedir.
- İyi tasarlanmış bir geniş bant antenin performansı, tüm sistem performansını gözeterek optimal düzeyde olmalıdır. Örneğin anten ile besleme bağlantıları arasında uyum sağlanmalıdır.
- Son olarak iyi bir zaman domen (time domain) karakteristiğine sahip olması gerekmektedir. Bir başka deyişle alıcı anten tarafından alınan taşıyıcı ve bilgi sinyalindeki bozulma minimum düzeyde olmalıdır.



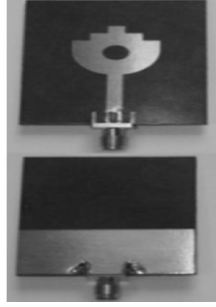
Şekil II.1 Geçmişten günümüze geniş bant anten tasarımları; **(a)** konik anten, **(b)** Lindenblad koaksiyel horn dizi anten, **(c)** Brillouin koaksiyel horn anten, **(ç)** Slot anten, **(d)** Harmuth anteni , **(e)** Notch anten

Bu sınırlamalar altında 1900'lü yıllardan günümüze bilim adamları tarafından birçok türde geniş bant anten tasarımı gerçekleştirilmiştir [3] (Şekil II.1). Ancak, birkaç GHz bant aralığında çok küçük elektromanyetik sinyaller ile bilgi alışverişi sağlayan geniş bantlı uygulamaların ortaya çıkması baskı devre üzerine entegre edilemeyen büyük boyutlu antenlerin yerini daha küçük boyutlu, kolayca üretilebilen ve ucuz maliyetli düzlemsel antenlere (printed (planar) antennas) bırakmasını sağlamıştır (örneğin, Şekil II.1(e)). Literatürde birçok farklı tasarımı bulunan bu düzlemsel anten çeşitlerini,

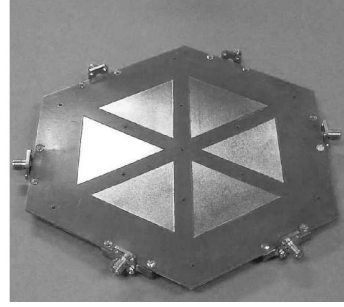
- Monopol baskı antenler (Printed monopole antennas)
- Yarıklı baskı antenler (Printed slot antennas)

- Bant filtreleyen baskı antenler (Band-notched printed antennas)
- Konik yapılı antenler – Vivaldi antenler (Tapered slot antennas-TSA)

şeklinde sınıflandırabiliriz [4].



(a) Monopol baskı antenler



(b) Yarıklı baskı antenler



(c) Bant filtreleyen baskı antenler



(d) Konik yapılı antenler

Şekil II.2 Düzlemsel geniş bant anten örnekleri

Bu tez çalışmasında geniş bant anten çeşitlerinden Vivaldi anten kullanılmış olup sonraki bölümlerde bu anten çeşidinden bahsedilmektedir.

B. VİVALDİ ANTEN VE DİZİLERİ

TSA (Tapered Slot Antenna) denilen Vivaldi anten ilk olarak 1979 yılında P. J. Gibson tarafından sunulmuştur [5]. Antenin ışıma elemanı eksponansiyel biçimde açılan alev şekline benzetilmektedir ki bu yapı sayesinde teorik olarak sonsuz bant genişliğinde çalışma özelliğine sahip olduğu belirtilmekte ve frekanstan bağımsız anten çeşidi olarak adlandırılmaktadır. Çok geniş bantta çalışabilen bu antenler, yalıtkan bir

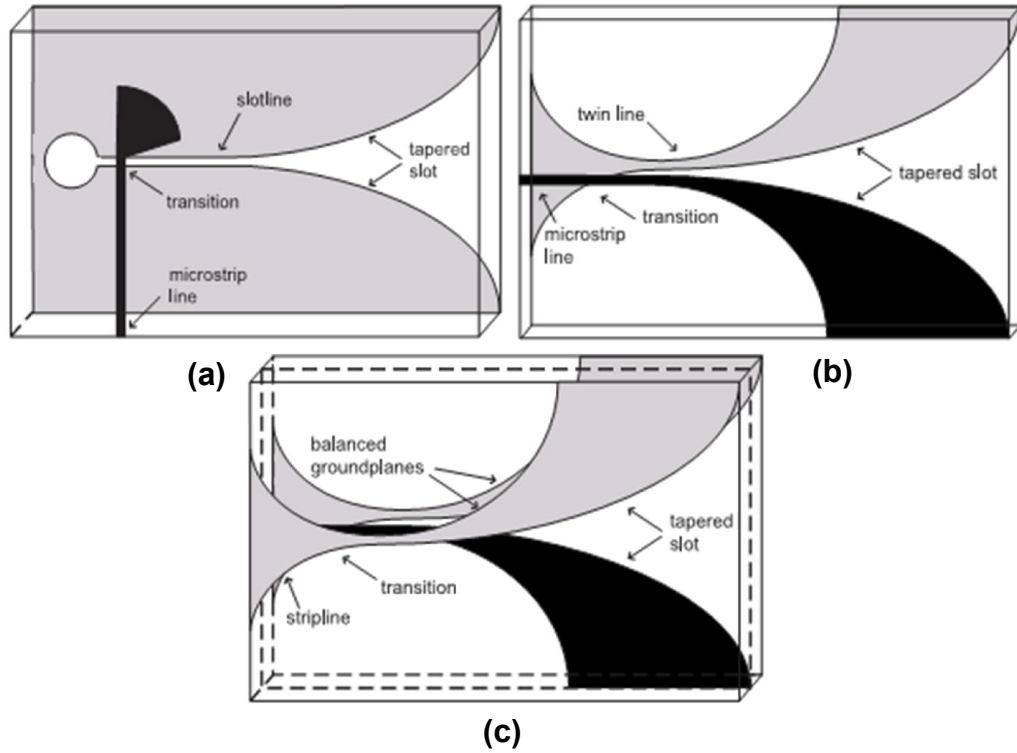
malzemenin ön yüzeyine iletken malzemeden yapılmış ışıma elemanının, arka yüzeyine ise yine ışıma elemanı veya besleme elemanının yerleştirilmesiyle düzlemsel anten olarak oluşturulabileceği gibi yalnızca metal bir malzemeden de oluşturulabilmektedir. Vivaldi antenler genel itibarıyla doğrusal ışıma yapabilen, yüksek kazançlı ve yan lob seviyesinin düşük olduğu anten çeşitleridir. Düzlemsel yapısı sayesinde farklı elektronik baskı devreler ile kolayca bütünleşebilmekte ve büyük sistemler ile uyum sağlayabilmektedir. Ayrıca zaman domen karakteristiğine uygun bir yapıda olup besleme noktasından giren sinyal, minimum bozulma ile antenden ışıkmaktadır.

1. Vivaldi Anten Çeşitleri

Geniş bant anten özelliklerinin tamamına sahip olan Vivaldi antenler düşük maliyeti ve basit yapısı ile araştırmacılar tarafından günümüze kadar birçok çalışmada kullanılmıştır. 1979 yılında üretilen ilk TSA – Vivaldi antenin karmaşık balun yapıdaki beslemesinden kaynaklı olarak bant genişliğinin kısıtlanması ve geniş bantta empedans uyumlamasının zor olması nedeniyle anten üzerinde zamanla iyileştirmeler yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi ise 1988 yılında E. Gazit [6] tarafından sunulan antipodal Vivaldi antendir (AVA). Gazit antipodal yapıdaki antende, balun yapıya ihtiyaç olmadan besleme yapısını tamamen değiştirip klasik Vivaldi antenlerdeki bant genişliği kısıtlaması ve empedans uyumlaması sorununu ortadan kaldırmıştır. 1996 yılında, özellikle dizi anten çalışmalarında AVA'da karşılaşılan çapraz polarizasyon sorunları J.D. Langley [7] tarafından sunulan dengeli antipodal Vivaldi anten (Balanced Antipodal Vivaldi Antenna – BAVA) ile azaltılmıştır. Bugüne kadar Vivaldi anten üzerinde boyutunun küçültülmesi, kazancının artırılması, şeklinin değiştirilmesi vs. gibi birçok çalışma yapılmış olsa da temel olarak Vivaldi antenler,

- Klasik Vivaldi anten (TSA-1979)
- Antipodal Vivaldi anten (1988)
- Dengeli antipodal Vivaldi anten (1996)

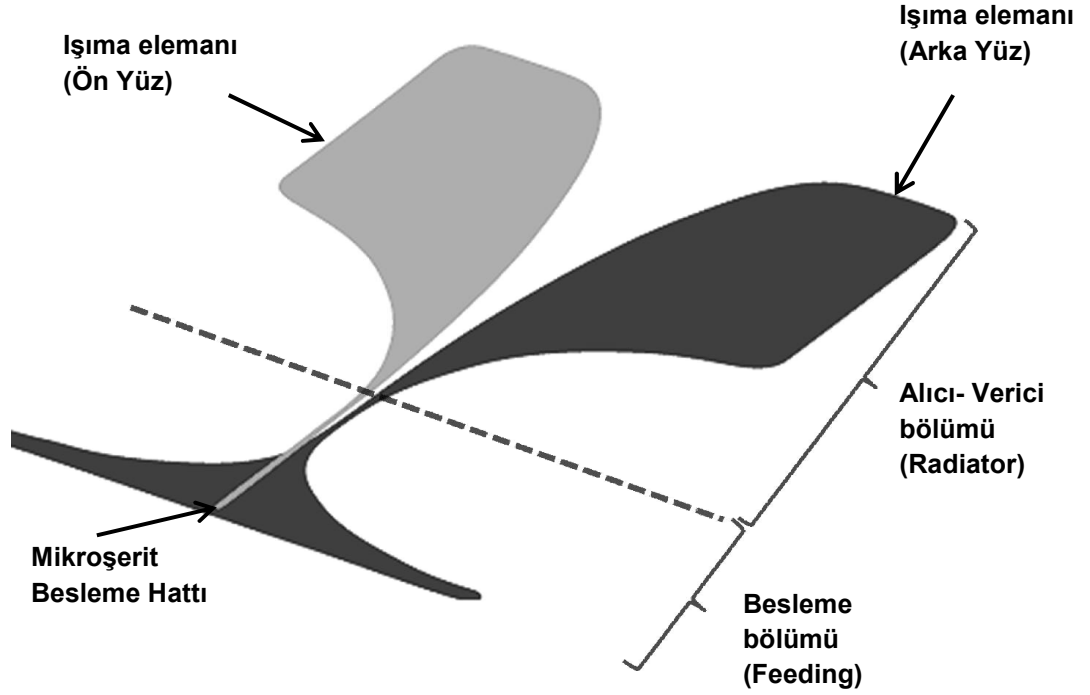
olarak üçe ayrılmakta ve Şekil II.3'te örnekleri gösterilmektedir. Bu tez çalışmasında klasik Vivaldi antenlerdeki bant genişliği kısıtlaması ile empedans uyumlaması sorununu yaşamamak için ve üretiminin dengeli antipodal Vivaldi antene göre daha kolay olması nedeniyle antipodal Vivaldi anten (AVA) çeşidi kullanılmıştır.



Şekil II.3 Vivaldi anten çeşitleri (a) TSA - Vivaldi anten, (b) AVA – Antipodal Vivaldi anten, (c) BAVA – Dengeli antipodal Vivaldi anten

2. Antipodal Vivaldi Anten

Antipodal, kelime anlamı olarak, birbirleri ile zıt özellikler sergileyen güney ve kuzey yarım küreyi betimlemek amacıyla özellikle Yeni Zelanda ve Avusturalya'da kullanılan taban tabana zıt toprak parçaları anlamına gelir. Anten tasarımında ise birbirlerine ters ve simetrik olarak yerleştirilmiş iki ışınma parçasının (Şekil II-4) durumlarını ifade etmek için “Taban tabana tamamen zıt” anlamında kullanılmaktadır [8].

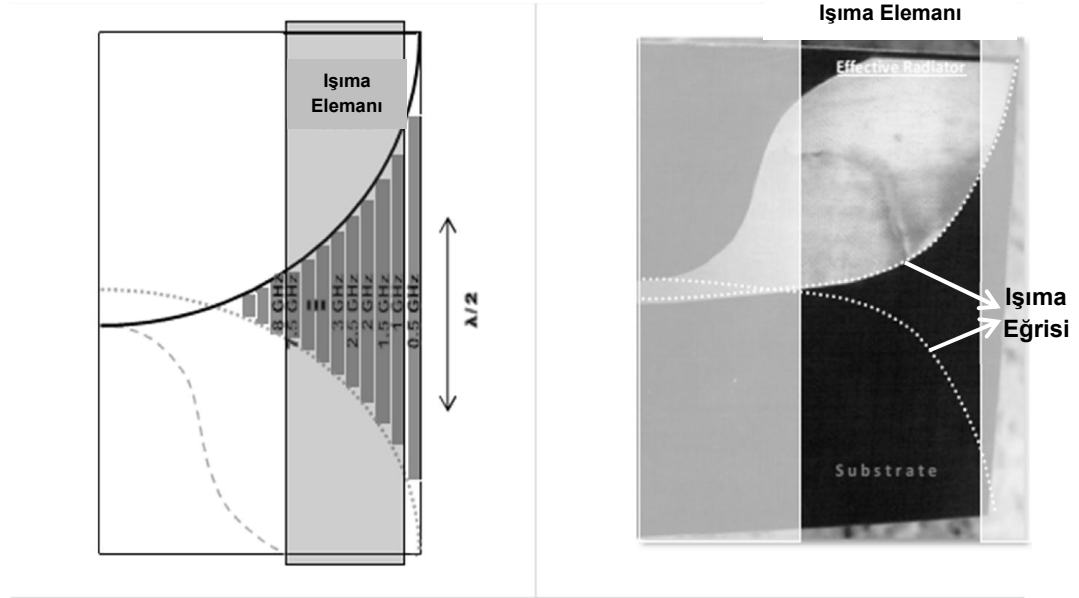


Şekil II.4 Antipodal Vivaldi anten örneği

Özellikle klasik Vivaldi antendeki besleme yapısını basitleştirmek ve bu yapıdan kaynaklanan problemleri ortadan kaldırmak amacıyla Antipodal Vivaldi anten sunulmuştur [6].

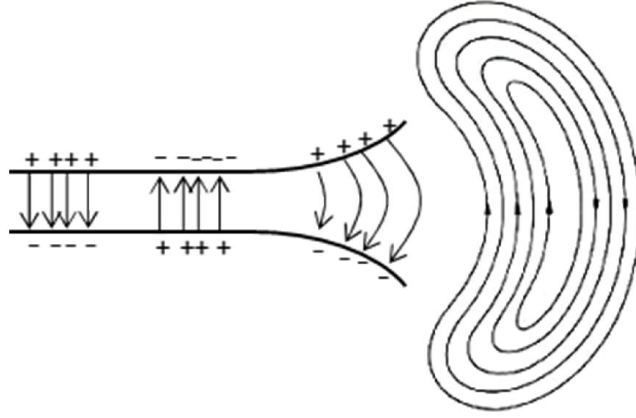
Anten, Şekil II.4'te gösterildiği gibi dielektrik malzemenin her iki yüzeyine simetrik olarak yerleştirilmiş iletken kısımlardan oluşmaktadır. İletken kısımlar ise iki bölüme ayrılmaktadır; ışıma yapan alıcı-verici bölümü, diğeri ise besleme bölümüdür. İki kısmın birbirlerine etkisi yok denecek kadar azdır. Yani tasarımın geliştirilmesi esnasında besleme bölümündeki parametrelerin değiştirilmesi ışıma paternini, aynı şekilde alıcı-verici bölümündeki parametrelerin değiştirilmesi empedans uyumlamasını önemli derecede etkilememektedir. Simetrik olarak yerleştirilmiş iletken ışıma plakaları arasındaki açıklık antendeki minimum frekansı (f_1) belirlemekte ve bu açıklığın genişliği genel olarak f_1 'e göre hesaplanan yarım dalga boyu ($\lambda/2$) veya daha fazlası olmaktadır. Şekil II.5'te görüldüğü gibi ışıma elemanlarının simetrik konumu eksponansiyel bir şekilde birbirlerine doğru daralan iki ışıma eğrisi oluşturmaktadır. Bu ışıma eğrilerinin eğimi, daha önce literatürde yapılmış çalışmalarda da görüldüğü üzere tam bir matematiksel formülü olmamakla birlikte, kabaca dar alandan geniş alana sırasıyla yüksek

frekanstan alçak frekansa hesaplanan dalga boyları uzunluklarını göstermektedir [9].



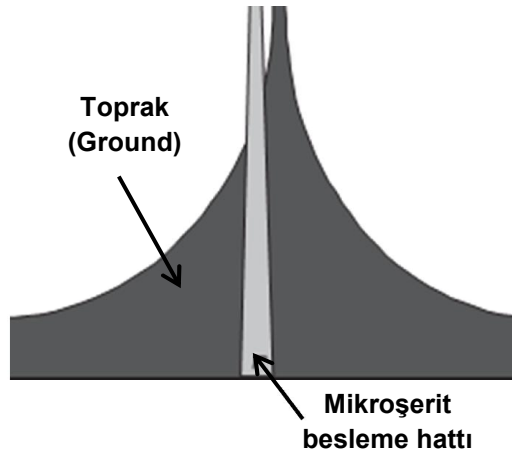
Şekil II.5 500 MHz - 8 GHz arası çalışan örnek bir AVA'nın ışıma elemanı ve tasarımı

Anten üzerindeki akım dağılımı incelendiğinde, akım yoğunluğunun daha çok iletken ışıma elemanlarının kenar kısımlarında toplandığı görülmektedir. Bundan dolayı istenilen yönlü örüntüyü elde edebilmek için ışıma eğrilerinin çok iyi tasarlanması gerekmektedir. Antipodal Vivaldi antenin genel ışıma prensibi Şekil II.6'da gösterilen iletken iki telin ışıma prensibine benzemektedir. Transmisyon hattı üzerindeki yüklerin artı kutuptan eksi kutba doğru hareketi ile oluşan elektrik alan telin eğimli ucuna geldiğinde yarım dalga boyuna ulaşır serbest uzaya yayılır. Antende ise, ışıma elemanının farklı noktalarında bulunan yükler arasındaki uzaklık farklı frekanslarda yarım dalga boyu uzunluğunu belirtmekte ve antenin geniş bantta çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil II.6 Işıma prensibi

AVA'da klasik Vivaldi antenlerden farklı olarak basit, tasarlanması kolay mikroşerit hat beslemesi kullanılmaktadır. Bu besleme şeklinde, simetrik ışıma elemanlarından çıkan birbirine paralel iki iletim hattı eliptik şekilde kalınlaşıp konektör ile birleşmekte ve anten uyumlaması sağlanmaktadır. Arka yüzdeki iletim hattının toprak yüzey olarak kullanılmasından dolayı daha geniş bir yapıda sonlanma gerçekleşmektedir (Şekil II.7).



Şekil II.7 Örnek bir mikroşerit besleme yapısı

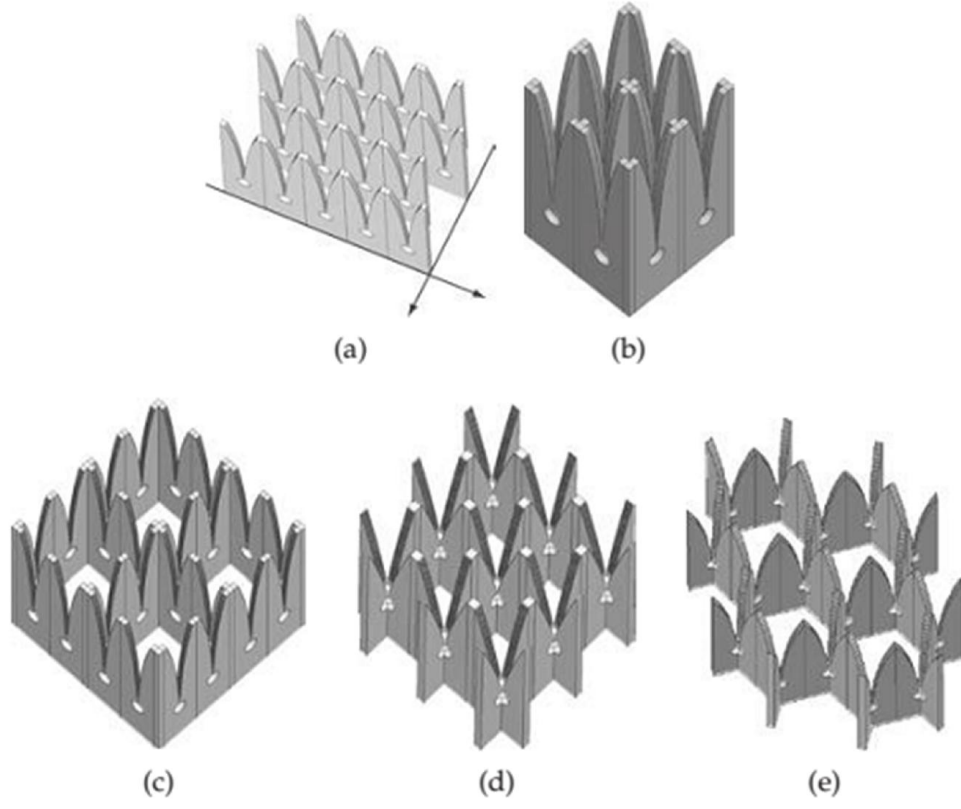
3. Vivaldi Anten Dizileri

Vivaldi anten dizileri ilk olarak 1980'lerin başında sunulmuş ancak geliştirilmesi ve sistemlerle birlikte kullanılması özellikle bilgisayara dayalı benzetim programlarının artması ile olmuştur. Bu anten dizileri bant

genişliğinin 2:1 oranından yüksek olması gerektiği ve geniş açılı tarama ihtiyacı olan uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu nedenle çok fonksiyonlu radar sistemleri ve elektronik harp sistemlerini içeren askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Askeri uygulamaların dışında ise astronomi teleskobu, Focal-plane reflektör sistemleri, geniş bant görüntüleme sistemleri (tıp alanında) ve farklı güçleri birleştirme sistemlerinde (spatial power combining systems) yararlanılmaktadır.

Vivaldi dizi antenin çalışma prensibinde, tüm faz dizili antenlerde olduğu gibi, dizi elemanları arasındaki kuplaj (coupling) son derece önemlidir. Karşılıklı kuplaj (mutual coupling) olarak da adlandırılan elemanlar arası bu etkileşim, elemanların giriş empedansını bozduğu gibi aynı zamanda dizi antenin toplam ışıma paternini de değiştirmektedir. Bu kuplaj etkisini azaltmak ve istenen bant genişliğinde başarılı bir geniş bant Vivaldi dizi anten tasarımı gerçekleştirmek için elemanlar arasındaki mesafenin çok iyi ayarlanması gerekmektedir. Diğer bir sorun ise yine elemanların arasındaki mesafeye bağlı olarak oluşan istenmeyen loblardır (grating lobes). Genel kabul olarak elemanlar arası mesafe yarım dalga boyundan daha az olması istenmeyen lobların oluşmaması için yeterlidir. Fakat bu mesafenin daha da azaltılması istenmeyen lobların oluşumunu engellerken, ışıma elemanlarının birbirlerine olan etkisini arttırmaktadır ve ışıma paternini bozmaktadır.

Vivaldi dizi anten konfigürasyonu elemanların dizilişine göre değişmektedir. Şekil II-8'de görüldüğü gibi elemanlar yan yana (1X4'lük dizi) ve arka arkaya (4x4'lük dizi) dizilebildikleri gibi aynı zamanda kare, dikdörtgen, dairesel, eliptik, üçgensel grid veya birbirlerine dik (dual polarizasyonlu) şekilde de yerleştirilebilirler [10].

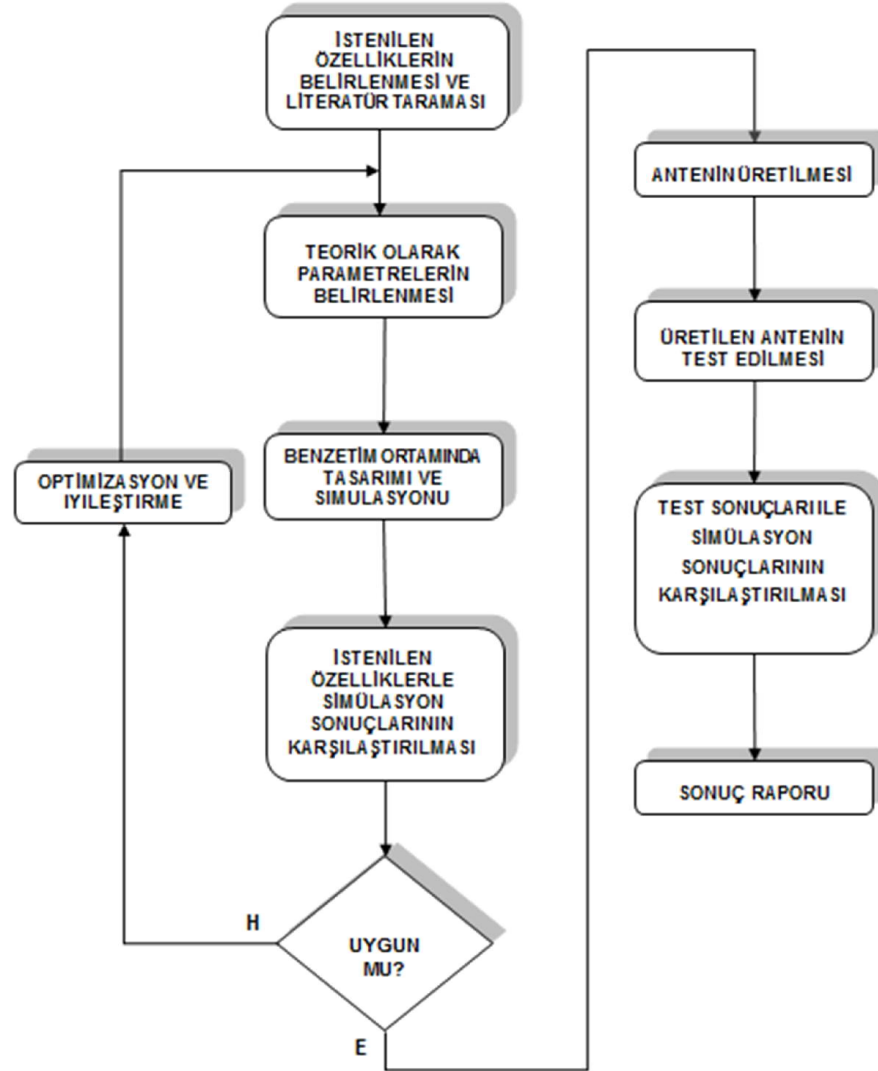


Şekil II.8 Tek ve dual polarizeli Vivaldi anten dizi düzenlemeleri

III. TASARIM

A. GİRİŞ

Bu bölümde AVA antenin tasarım gerekleri, tasarım yöntemi, anten parametreleri ve bu parametrelerin anten üzerindeki etkileri, tasarlanan tek antenin benzetim ve test sonuçları, bunların karşılaştırılması, dizi anten üretimi ve üretim sonucu elde edilen verilerden bahsedilmektedir. Anten tasarımında üç boyutlu bilgisayar benzetim programı CST MWS kullanılmıştır. Anten üretimi TUBİTAK BİLGEM (Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi) laboratuvarlarında yapılmıştır.



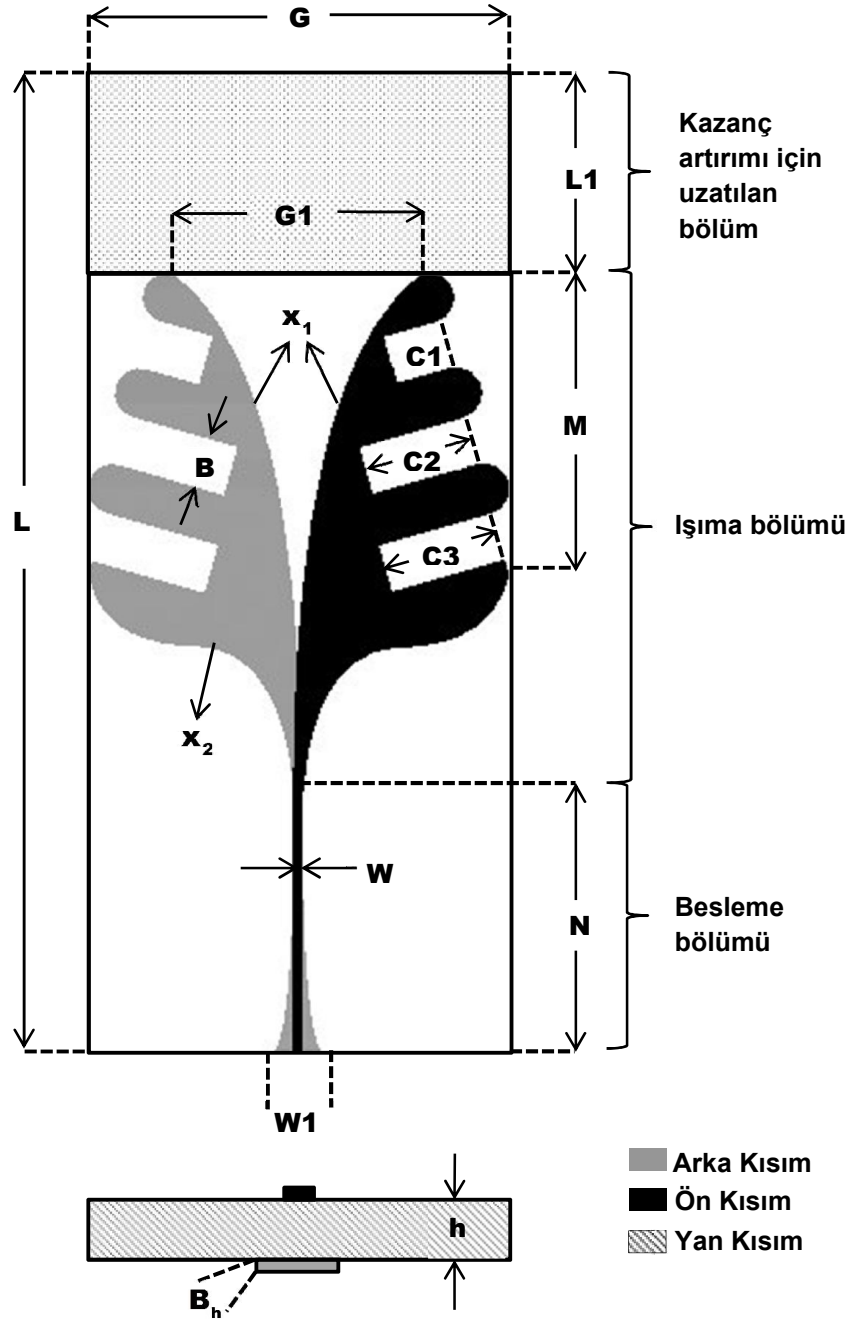
Şekil III.1 Anten tasarımı için izlenen akış diyagramı

Anten tasarımının uygun şekilde yapılabilmesi için Şekil III.1'deki akış diyagramı izlenmiştir. Diyagramda belirtilen adımlara göre yapılan çalışma kapsamında geniş bantlı anten tasarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bunun için öncelikle **çalışma frekansı, askeri sistem isterleri göz önünde bulundurularak 6-18 GHz** olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilecek antenin **uçan platform üzerinde geniş bantlı sistemlere entegre edilebilmesi için mikroşerit yapıda olması** tercih edilmiştir. Sistemin küçük boyutlu olması kritik bir ister olup $25 \times 25 \times 20 \text{ cm}^3$ 'lük bir hacim kısıtı konulmuştur. Yapılan literatür taraması neticesinde ve ikinci bölümde de bahsedilen avantajlarından dolayı üzerinde çalışılacak anten olarak antipodal Vivaldi anten çeşidi seçilmiştir. Buna göre yüksek kazançlı, yan lob seviyesi düşük, elektronik taramaya izin veren, aynı anda birden fazla huzme oluşturulabilen, yönlü ve dar bir huzme genişliğine sahip anten tasarımı için çalışılmıştır.

1. Kullanılan Baskı Devre Kartı Seçimi

Anten tasarımda ilk yapılması gereken mikroşerit antene uygun karakteristik özelliklere sahip baskı devre kartının (substrate) seçimidir. Çünkü, özellikle baskı devre kartın dielektrik sabiti ve kalınlığı antenden ışıyan elektromanyetik dalgaların faz hızını belirlemekte ve hassas dielektrik sabitine sahip iyi bir baskı devre kartı, elektromanyetik dalgaların iletken boyunca ilerlemesini ve antenin ışıma bölümünden (faz hızının ışık hızına eşit olması ile) ışıma yapmasını sağlamaktadır. Ayrıca yüksek verimli ve geniş bantlı bir anten tasarımında düşük dielektrik sabitli baskı devre kartı, anten boyunca daha az saçılmaya neden olmaktadır. Genel olarak dielektrik sabiti 2 ila 10, kalınlığı ise 0.2 ila 1 mm arasında değişen baskı devre kartlarından bu tasarım için, düşük dielektrik sabiti özelliği göz önünde bulundurularak Rogers RO4003C baskı devre kartı tercih edilmiştir. Kullanılacak olan bu kartın temel karakteristik özellikleri şu şekildedir:

Antenin görünümü ve anten parametreleri Şekil III.3'te belirtilmektedir.



Şekil III.3 AVA'nın parametreleri

AVA, dielektrik malzemenin ön ve arka yüzüne birbirlerine zıt ve simetrik (mirror) iki iletken ışıma elemanının yerleştirilmesinden oluşur. Her bir iletken parça birçok antende olduğu gibi **ışıma bölümü** ve **besleme**

bölümü olmak üzere iki bölümden meydana gelir. Işıma, istenen doğrultuda elektromanyetik dalgaların serbest uzaya yayıldığı, ışıma gücünü belirleyen bölüm; besleme ise ışıma bölümü ile antenin kullanılacağı sistem arasında empedans uyumlamasını sağlayan bölümdür.

1. Işıma Bölümü ve Parametreleri

Işıma bölümü tasarımını etkileyen önemli parametreler genel olarak; G , x_1 , x_2 , M , C ve $L1$ olarak verilebilir. Bu parametrelerin hepsi istenen bant genişliğini sağlamak, kazancı mümkün olduğunca yüksek tutmak, geri dönüş kaybını azaltmak, istenen doğrultuda ışıma sağlamak üzere incelenmiştir. Bu çalışmada;

- Bant genişliğini arttırmak için G ve x_1 ,
- İstenen doğrultuda ışıma sağlamak için x_2 ,
- Geri dönüş kaybını azaltmak için M ,
- Kazancı arttırmak için ise C ve $L1$ üzerinde detaylı incelemeler ve parametrik optimizasyonlar yapılmıştır.

Geliştirilen tasarım parametreleri anten boyutunun küçülmesini sağlamış ve literatüre katkı olarak yer almıştır. Aşağıda bu parametreler ve yapılan iyileştirmeler yer almaktadır.

AVA'larda anten genişliğinin (G) genel olarak yarım dalga ($\lambda/2$) boyunda olduğu kabul edilmektedir. Farklı tasarımdaki antenler için değişik formüller kullanılsa da bu tasarımda anten genişliği;

$$G = \frac{c}{f_1 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (III.1)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada c , ışık hızı; f_1 , bant genişliğindeki minimum frekans (6 GHz) ve ϵ_r , baskı devre kartın dielektrik sabitidir. İletken ışıma parçaları arasındaki genişlik ($G1$);

$$G1 = \frac{c}{2 \cdot f_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.2)$$

ifadesine göre bulunmaktadır. Buradaki baskı devre kartın efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) ise $\frac{W}{h} < 1$ olduğu için;

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\left(1 + 12 \frac{h}{B_h} \right)} \right) + 0,04 \left(1 - \frac{W}{h} \right) \quad (\text{III.3})$$

formülünden hesaplanmaktadır. G parametresi geniş bant antenlerde alt frekansı (f_l) belirlemede önemli role sahiptir. G değerinin artması antenin daha düşük frekanslarda ışıma yapmasını sağlamakta ve anten bant genişliğini arttırmakta iken aynı zamanda antenin boyutunu da büyötmektedir.

Antipodal Vivaldi antenlerin yapısındaki en önemli özellik aleve benzeyen ışıma parçasının eksponansiyel şekilde eğimli olması ve bu eğimli eğriler sayesinde antenin geniş bantlı ışıma yapmasıdır. Tasarlanan antendeki ışıma parçasında Şekil III.3'te gösterildiği gibi iki eğri kullanılmıştır; ışıma eğrisi (x_1 - radiation curve) ve yönlölük eğrisi (x_2 - directivity curve) [9]. x_1 'in hesaplanmasında;

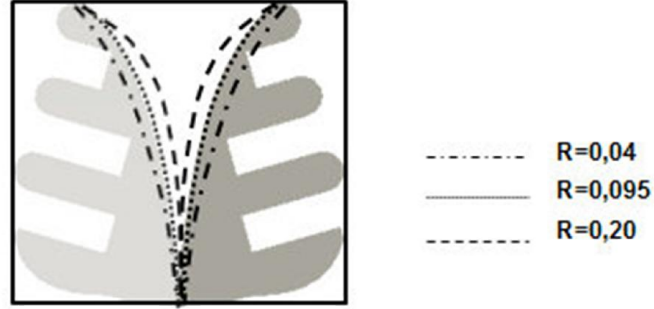
$$x_1 = A_1 e^{Rz} + A_2 \quad (\text{III.4})$$

$$A_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (\text{III.5})$$

$$A_2 = \frac{y_1 e^{Rz_2} - y_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (\text{III.6})$$

eşitliği kullanılmış olup (y_1, z_1) eksponansiyel eğrinin başlangıç noktasını, (y_2, z_2) bitiş noktasını, A_1 ve A_2 sabit bir sayıyı, R ise iki eğri arasında açıklık oranını ifade etmektedir [10]. Anten boyutunun belirli sınırlar içinde olması nedeniyle eğrinin başlangıç ve bitiş noktaları değişmeyeceğinden eşitlikte en önemli değişken eğimin miktarını belirleyen R'dir. Buna göre R değerinin arttırılması bant genişliğinin alt frekansını (f_l) düşürdüğü gibi aynı zamanda anten kazancını da önemli derecede azaltmaktadır. Bant genişliğinin artması istenen bir durum iken kazancın azalması istenmeyen bir durum olduğu için

aralarında ters ilişki yaratmaktadır. Örneğin $R=0.04$ 'de $f_1=4.5$ GHz iken kazanç 3 dB, $R=0.2$ 'de $f_1=7.5$ GHz iken kazanç 7.9 dB olmaktadır. R için 0.04-0.2 aralığında yapılan denemelerde en iyi değerin $R=0.095$ olduğu belirlenmiştir. R 'deki değişimin ışınlım eğrisi üzerindeki fiziksel etkileri Şekil III.4'te gösterilmiştir.



Şekil III.4 R değişkeninin ışınlım eğrisi üzerindeki fiziksel etkileri

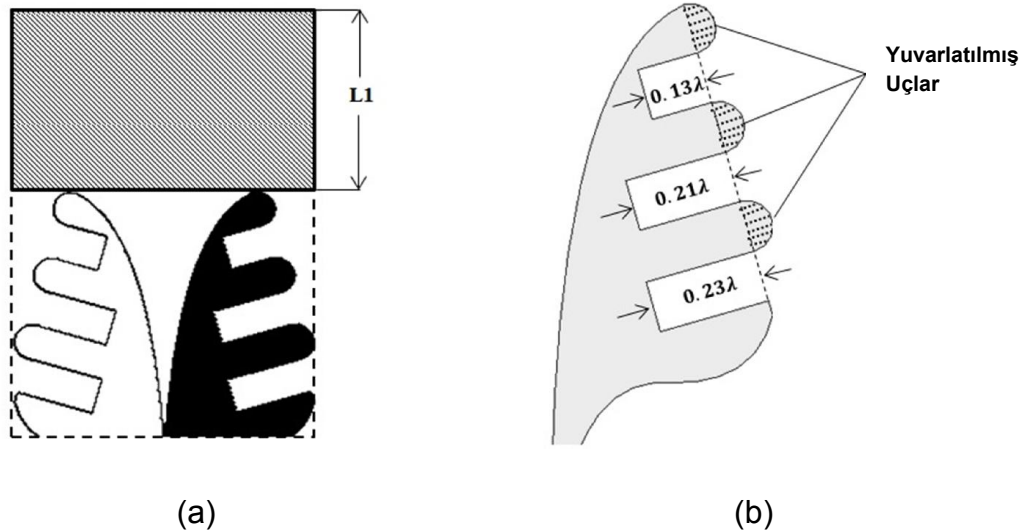
Literatürdeki AVA tasarımlarının birçoğunda yönlülük eğrisi (x_2) yerine Şekil II.3(b) ve Şekil II.4'te görüldüğü gibi yarım daire veya eliptik kesit kullanılmaktadır. Klasik tasarımların aksine iki dalgalı yönlülük eğrisinin kullanımı ile antenin ışıma yönü ve huzme genişliğinde iyileşme görülmektedir. Buna göre yarım daire eğrisi kullanılarak yapılan aynı antenin 6-8 GHz frekans aralığında ışıma yönü $\theta=78^\circ$ 'de ve huzme genişliği 87° iken iki dalgalı yönlülük eğrisi ile tasarlanan antenin ışıma yönü $\theta=90^\circ$ de ve huzme genişliği de 66° olmaktadır. Sonuç olarak yönlülük eğrisi ile huzme genişliği 11° daraltılmakta ve anten 6 GHz'de istenen yönde ışıma yapmaktadır.

Bir diğer önemli parametre ise anten ışıma parçasının yanal uzunluğudur (M). Her hangi bir formüle göre hesaplanmayan M değeri için 5-30 mm değer aralığında yapılan denemelerde;

- $M < 10$ mm olduğunda; alçak frekanslardaki bozulma nedeni ile bant genişliği daralmakta, aynı zamanda geri dönüş kaybı da artmakta yani kötüleşmekte,
- $25 \text{ mm} < M$ aralığında ise geri dönüş kaybı azalmakta ve kazanç değeri yüksek frekanslarda oldukça düşmektedir.

Bu bilgiler ışığında en uygun M değeri 19.26 mm olarak hesaplanmıştır.

Anten tasarımı esnasında bant genişliğinin alt sınırını 6 GHz'te tutabilmek ve bu frekanstaki kazanç değerini anten boyutunu büyültmeden arttırabilmek için bir takım çalışmalar yapılmıştır. Buna göre Şekil III.2'de görüldüğü gibi ikinci evreden üçüncü evreye geçişte iletken ışıma parçasından üçgen kesit, üçüncü evreden dördüncü evreye geçişte ise 3 adet farklı boyutta dikdörtgen yarık kenardan hizalanarak çıkartılmıştır [11]. Böylelikle yüzey akım yolunun efektif uzunluğu yarıklar sayesinde arttırılmış, yan kısımlar üzerinden akan akım yarıklar içinde kalmıştır. Bu da istemeyen yöndeki, $\theta=0^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ 'deki, ışıınımı azaltmıştır. Ayrıca G parametre değeri arttırılmadan 6 GHz'te kazanç 4.1 dB'den 5,6 dB'e yükseltilmiş, geri dönüş kaybı -10 dB'in altında tutulmuş, 5 GHz'de dahi ışıma $\theta=90^\circ$ 'de olmuştur. Ayrıca tüm bant genişliğindeki yan lob seviyeleri ise -9 dB'den -14 dB'e düşürülerek iyileştirilmiştir. İletken kısımdan çıkarılan yarıkların uzunlukları yukarıdan aşağı doğru, Slot-1 (C1) 6-8 GHz aralığında, slot-2 (C2) 10-14 GHz aralığında, slot-3 (C3) ise 16-18 GHz aralığında antenin ışıma karakteristiğini ve yönlülüğünü belirlemektedir.



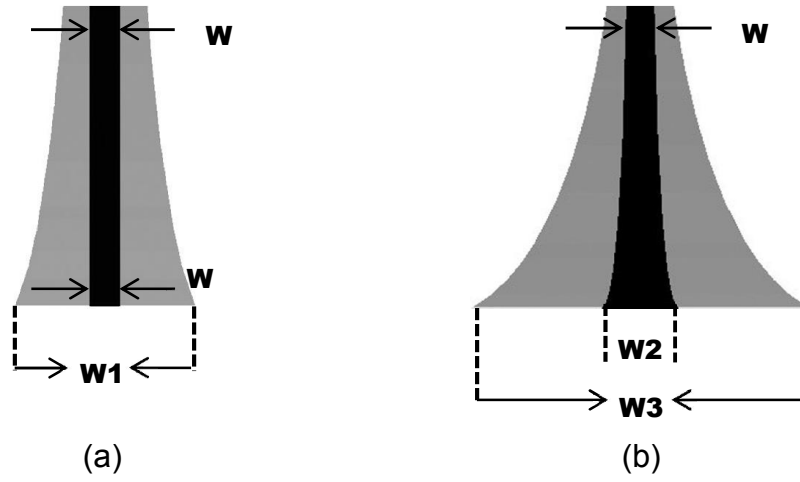
Şekil III.5 Kazancın arttırılması için; **(a)** Anten baskı devre kartının boyunun uzatılması, **(b)** Yuvarlatılmış uçların kullanılması

Boyutları benzer antenlere göre %66 oranında küçültülen bu antipodal Vivaldi antende, küçülmeden kaynaklı kazanç azalışını önlemek için baskı devre kartı uzunluğunun arttırılması yöntemi uygulanmıştır (Şekil III.5 (a)). [12]'de belirtilen üçgen yapının aksine dikdörtgen olarak baskı devre kartı boyunun uzatılması frekans bandı boyunca kazanç değerinde 0.4 dB ile 1.5 dB arasında bir artışa neden olmuş, aynı zamanda dizi anten çalışmasında da üçgen şeklinin yaratacağı yapısal bozulmanın önüne geçilmiştir. Ayrıca ışıma yönündeki sapmaların da (beam tilts) iyileştiği gözlemlenmiştir.

Kazanç artırımı için yapılan bir diğer çalışma ise, Şekil III.5 (b)'de gösterilen, anten ışıma parçasındaki yarıkların uçlarına yarım daire şeklinde iletken yüzey eklenmesidir. Daha önce literatürde denenmemiş bir yöntem olan bu çalışma ile toplam bant genişliğinde anten kazancının 5.6-9.7 dB'den 7.2-11.8 dB'ye yükselmesi sağlanmıştır.

2. Besleme Bölümü ve Parametreleri

Antendeki güç beslemesi mikroşerit hat tekniği kullanılarak dielektrik malzemenin iki yüzeyindeki birbirlerine simetrik iletken parçaların aynı anda beslenmesi ile yapılmıştır. Bu teknik ile ön ve arka yüzeydeki ışıma bölümünden uzanan birbirine paralel iletim hatları belirlenen empedans değerine göre genişletilerek empedans uyumlaması sağlanmaktadır. Buna göre daha geniş olan arka yüzey toprak görevini üstlenmektedir. Tez çalışması esnasında iki farklı empedans değerinde besleme tasarımı kullanılmış olup 50 ohm beslemeli tasarım tek antende, 100 ohm beslemeli anten tasarımı ise dizi antende kullanılmıştır. Genel itibariyle literatürdeki anten beslemelerinde 50 ohm değeri tercih edilse de gerek anten boyutunun küçük olması gerekse besleme hat genişliğinin (W) geri dönüş kaybı üzerindeki etkisi nedeniyle dizi antenlerde 100 ohm tercih edilmiştir (Şekil III.6(a)). Tek antende ise laboratuvar ortamında yapılacak testin uygulanabilirliği için W ve $W1$ değeri sırasıyla $W2$ ve $W3$ değerlerine genişletilerek 50 ohm'luk besleme yapısı oluşturulmuştur (Şekil III.6(b)).



Şekil III.6 Anten beslemesi **(a)** 100 ohm, **(b)** 50 ohm

Besleme hesaplamaları açık kaynaktan elde edilebilen TX-LINE (transmission line calculator - <http://www.awrcorp.com/products>) programı ile yapılmakla beraber asıl değerlere benzetim programında yapılan optimizasyon ile ulaşılmıştır. Optimizasyon neticesinde toprak yüzeyin genişliği (W_1, W_3) besleme hat genişliğinin (W, W_2) 3 katı genişlikte olduğu tespit edilmiştir ($W_1 = 3 \times W$).

Tasarım bölümü altında anlatılan bilgiler ışığında elde edilen antipodal Vivaldi antenin parametre değerleri Tablo III.2’de sunulmuştur.

Tablo III.2 AVA’nın parametre değerleri

Parametre	Değeri (mm)	Parametre	Değeri (mm)
G	27	L	63,5
G1	16	L1	13,5
B	3,2	N	16,5
W	0,5	M	19,26
W1	1,5	C1	1
W2	1,89	C2	1,85
W3	4,18	C3	2,15

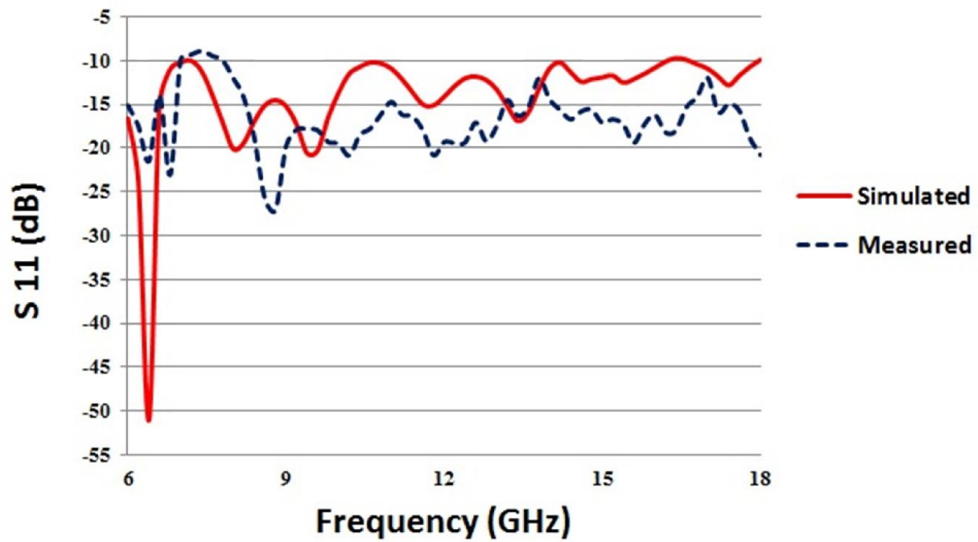
3. Tek Anten için Benzetim ve Test Sonuçları

CST MWS ile tasarlanan ve benzetimi yapılan anten TUBİTAK-BİLGEM laboratuvarlarında üretilip (Şekil III.7) gerekli testleri yapılmıştır.



Şekil III.7 Üretilen AVA

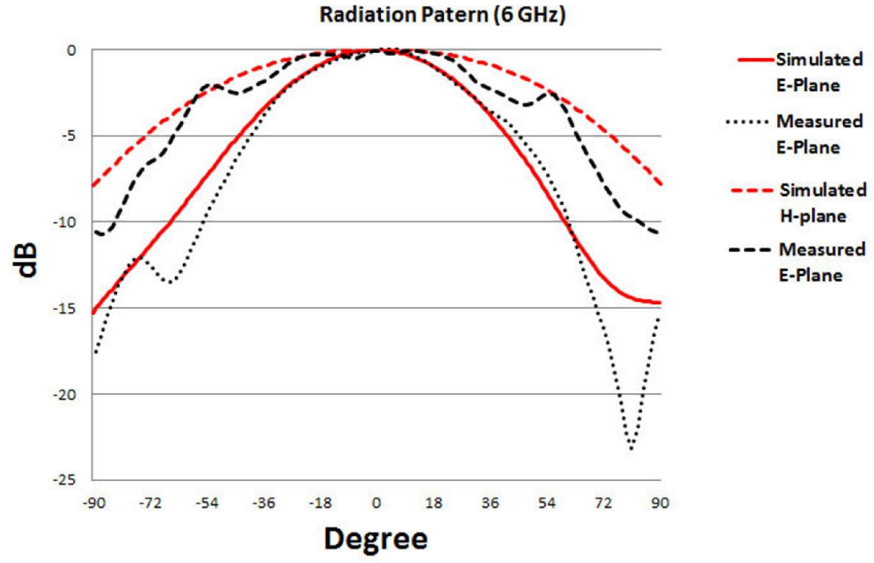
Yapılan testlerden elde edilen veriler ile benzetim sonucu elde edilen verilerin birbirleri ile iyi bir uyum sağladığı tespit edilmiştir. Şekil III.8’de antenin bant genişliği boyunca geri dönüş kaybının -10 dB’nin altında olduğu görülmektedir.



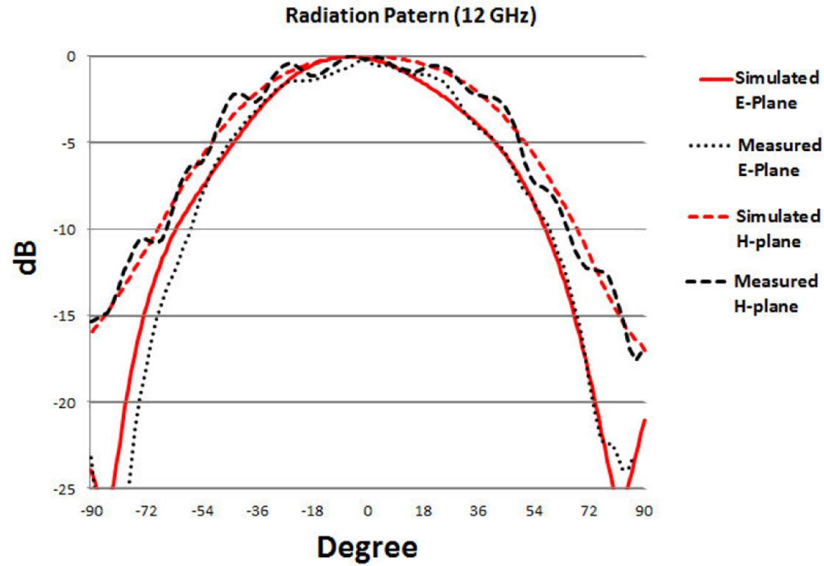
Şekil III.8 AVA’nın geri dönüş kaybı (S11)

Şekil III.9 ise sırasıyla 6, 12 ve 18 GHz’de benzetimi yapılmış ve test edilmiş antenin ışıma örüntüsünün karşılaştırılmalı verileri sunulmaktadır.

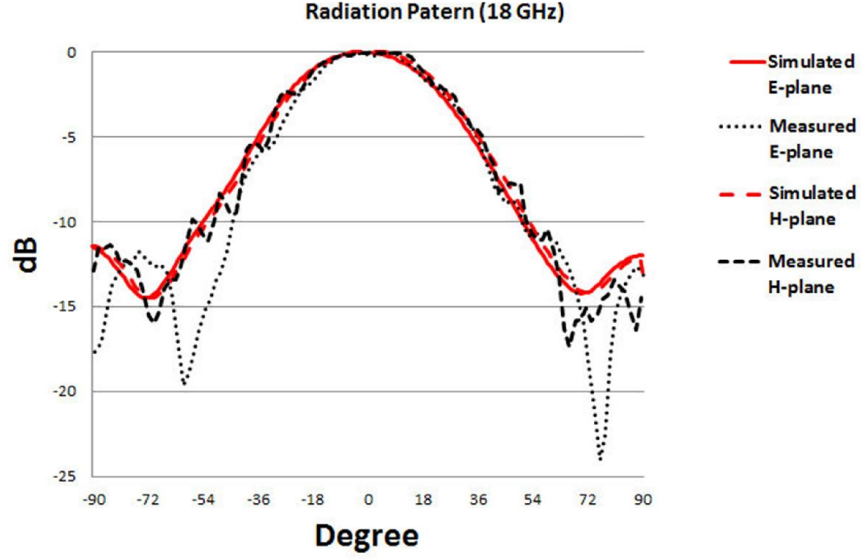
Buna göre antenin uçtan ışıma (end-fire radiation) yaptığı ve bant genişliği boyunca yan lob seviyesinin -12 dB altında olduğu görülmektedir. Test sonuçlarına göre antenin kazanç değeri 7.2 dB ile 12.1 dB arasında ölçülmüş olup daha büyük boyutlu benzer antenlere göre daha iyi kazanç elde edilmiştir [11]. Benzetim ve test sonuçlarında anten ışıma paterninin birbirleriyle tam uyumlu olduğu ve istenen doğrultuda ışıma sağlandığı görülmektedir.



(a) 6 GHz



(b) 12 GHz



(c) 18 GHz

Şekil III.9 AVA'nın ışıma paterninin benzetim ve test sonuçları; **(a)** 6 GHz, **(b)** 12 GHz, **(c)** 18 GHz

C. DİZİ ANTEN TASARIMI

Bölüm II.B.3'te verilen Vivaldi anten dizileri ile ilgili literatür bilgileri ışığında; Bölüm III.B'de tasarımı verilen tek antenin kazancını arttırmak, huzme genişliğini daha da daraltarak elektronik tarama yapmak amacıyla tezin bu bölümünde dizi anten tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Dizi anten çalışmaları tek boyutlu doğrusal dizi ve düzlemsel dizi olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. AVA Doğrusal Dizi Tasarımı

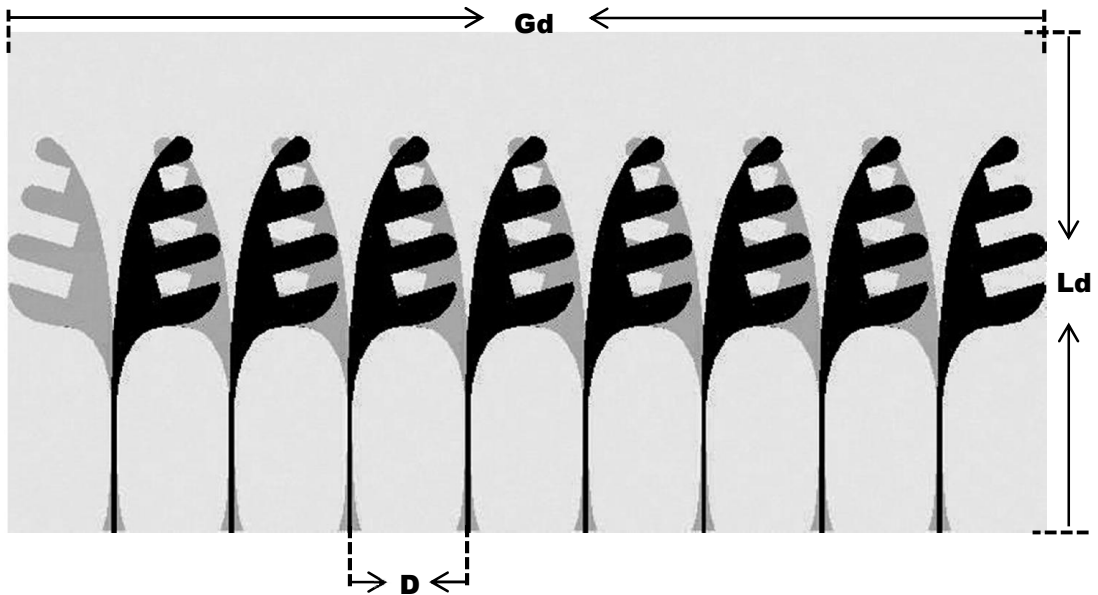
Tek boyutlu, küçük hacimli, geniş bantlı dizi anten çalışmasında 1x8 dizinin parametreleri incelenmiş ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu dizide Tablo III.2'de verilen AVA antenin tasarım parametreleri kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalarda doğrusal dizi antenin boyutunu küçültürken tasarım esnasında bazı problemlerle karşılaşmıştır. Bunlar sırasıyla,

elemanlar arasındaki mesafeye bağlı olarak oluşan kuplaj etkisi ve özellikle yüksek frekanslardaki ışıma oluşana istenmeyen loblardır. İstenmeyen lobları önlemek için [13],

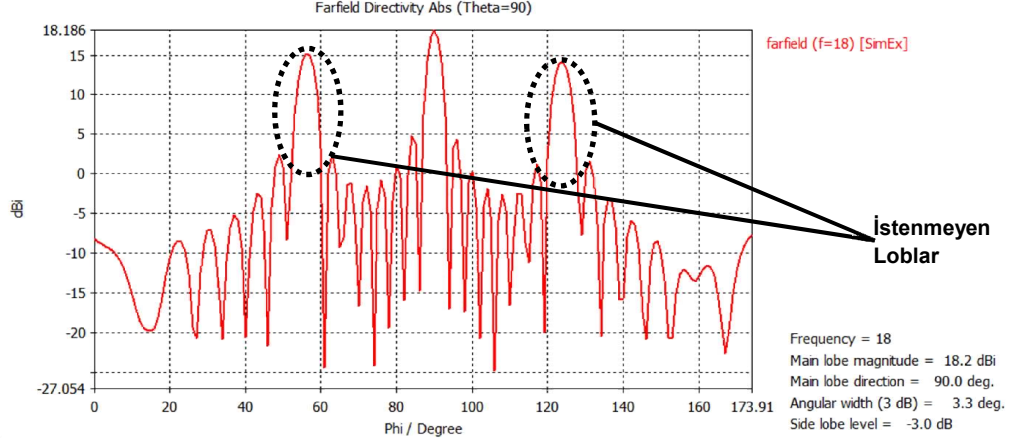
$$D < \frac{\lambda}{1 + |\cos \theta_0|} \quad (\text{III.7})$$

formülü kullanılmıştır. Burada D elemanlar arasındaki mesafeyi (Şekil III.10), θ_0 ise ana lobun ışıma yönünü belirtmektedir. Elemanlar arasındaki mesafenin hesaplanmasında en yüksek frekansın kullanılması alt frekanslar



Şekil III.10 Dizi anten parametreleri

için de istenmeyen lob koşulunu (III.7) sağlamaktadır. Buna göre $\theta_0 = 90^\circ$ ve $f_m = 18$ GHz'de $D < 16,6$ mm şartı tüm bant genişliğinde geçerli olmaktadır. Örnek olarak Şekil III.11'de $D = 30$ mm iken 18 GHz'de oluşan istenmeyen loblar gösterilmektedir. Elemanlar arası kuplaj etkisi ise, Tablo III.3'te de belirtildiği üzere, yapılan benzetimlerde $D < 15$ mm'nin altında artmakta, buna bağlı olarak kazanç düşmekte ve ışıma paterni bozulmaktadır. Bu şartlar altında en uygun elemanlar arasındaki mesafe $D = 15$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil III.11 D=30 mm olduğunda 18 GHz'te oluşan istenmeyen loblar

Tablo III.3 Karşılıklı kuplajın anten kazancı üstündeki etkisi

Frekans	Kazanç Değeri		
	D=13.8 mm	D=14.3mm	D=15 mm
14 Ghz	17.5 dB	17.8 dB	18.0 dB
16 GHz	17.4 dB	18.1 dB	19.0 dB
18 GHz	12.9 dB	15.8 dB	19.2 dB

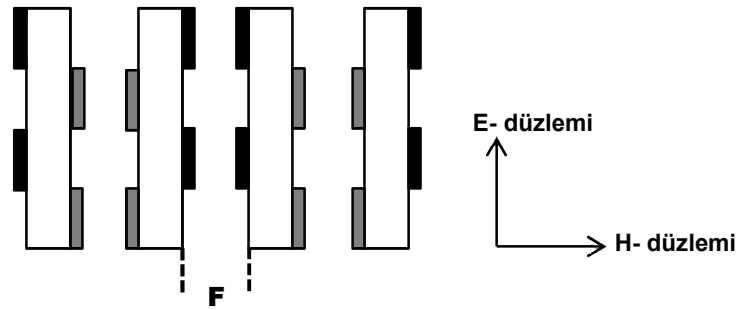
Yapılan hesaplamalar ve optimizasyonlarla elde edilen bilgilere göre Şekil III.10'da gösterilen 8 elemanlı anten dizisi tasarlanmış olup bu diziyeye ait parametre değerleri; D=15 mm, Gd=132 mm, Ld= 63.5 mm olarak belirlenmiştir.

2. AVA Düzlemsel Dizi Tasarımı

Bu bölümde; uçan platform üzerinde çalışabilecek, küçük hacimli, geniş bantlı, elektronik tarama kabiliyetine sahip 8x8 AVA dizinin parametreleri incelenmiş ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu dizide Tablo III.2'de verilen AVA antenin tasarım parametreleri kullanılmıştır.

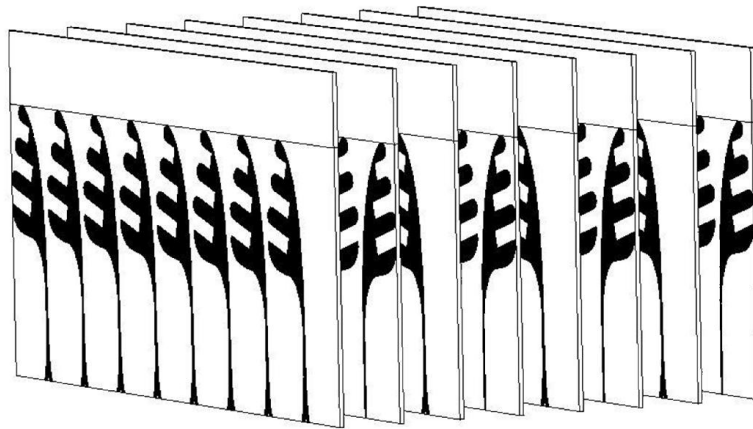
64 elemanlı bu dizi antende belirlenecek iki önemli nokta vardır; birincisi, elemanlar arası kuplajı ve istenmeyen lobların oluşumunu etkileyen diziler arası mesafe (F), ikincisi ise çapraz polarizasyona neden olan dizi elemanlarının yerleştirilme şeklidir.

1x8'lik diziler arası mesafe yapılan benzetimler sonucunda $F=13.5$ mm olarak tespit edilmiştir. Dizi elemanları ise E-düzleminde (1x8) yan yana dizilirken, H-Düzleminde (8x8) oluşacak çapraz polarizasyon etkisini en aza indirmek için [14]'de ayrıntılarıyla açıklanan ayna görüntüsü (mirror image) şeklinde yerleştirilmiştir (Şekil III.12).



Şekil III.12 Dizi elemanlarının H-düzleminde ayna görüntüsü ile yerleştirilmesi

Buna göre tasarlanan 64 (8x8) elemanlı antipodal Vivaldi dizi anteni Şekil III.13'te gösterilmektedir.



Şekil III.13 8x8'lik antipodal Vivaldi dizi anteni tasarımı

Buraya kadar bahsedilen çalışmada dizi anten beslemesi her bir eleman için ayrı ayrı olacak şekilde tasarlanmıştır. Fakat laboratuvar şartlarında elemanlar arası mesafe bu kadar dar ($D=15$ mm, $F=13.5$ mm) iken aynı anda 64 beslemeyi de birlikte yapmak çok zor olacağından ve henüz her bir elemana farklı faz ve genlik değişimini gerçekleştirecek donanım bileşenlerine sahip olunmadığı için tek noktadan besleme sağlayacak bir güç bölücü (power divider) ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

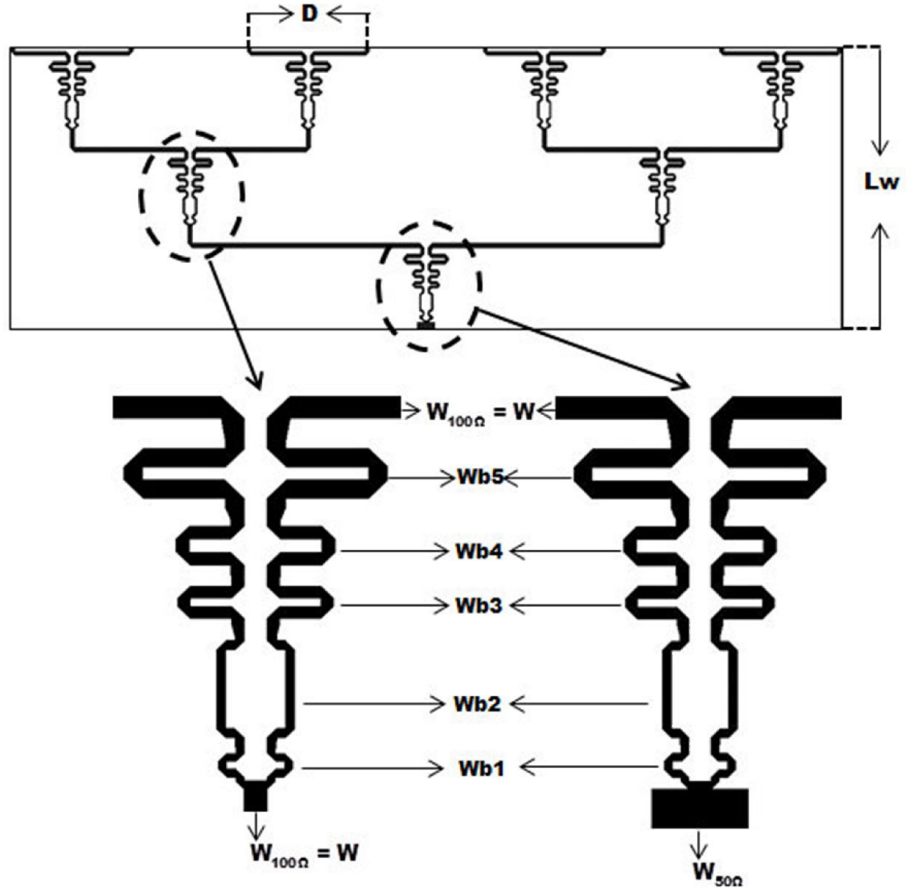
3. Güç Bölücü Tasarımı

Geniş bant teknolojisi, dizi anten tasarımının önemini arttırırken, dizi antenler için vazgeçilmez bir bileşen olan geniş bant güç bölücülerini de ön plana çıkarmıştır. Bu tez çalışmasında literatürde mevcut bulunan birçok farklı türdeki güç bölücüden;

- Tüm portlar arasında empedans uyumlaması yapıldığında kayıpsız olması,
- Yüksek izolasyon sağlaması,

nedeniyle Wilkinson güç bölücüsü (Wilkinson Power Divider – WPD) tercih edilmiştir.

Bu tercihteki amaç, WPD sayesinde 50 ohm empedanslı tek giriş ile 100 ohm empedansa sahip 8 adet AVA'yı aynı anda herhangi bir kayba maruz kalmadan ve ışıma paterninde bozulma olmadan beslemektir. Bunun için öncelikle giriş empedansı 50 ohm çıkış empedansı 100 ohm olan, 8 yollu, 6-18 GHz frekansında çalışan ve 1x8'lik dizi anten boyutları (G_d ve L_d) ile sınırlandırılan bir tasarım yapılmıştır. Bu şartlar altında çok bölmeli çeyrek dalga boyunda dönüştürücüler (ÇDBD) kullanılarak WPD'nin hem fiziksel boyutu küçültülmüş hem de istenen bant aralığında en az kayıpla çalışması sağlanmıştır [15].



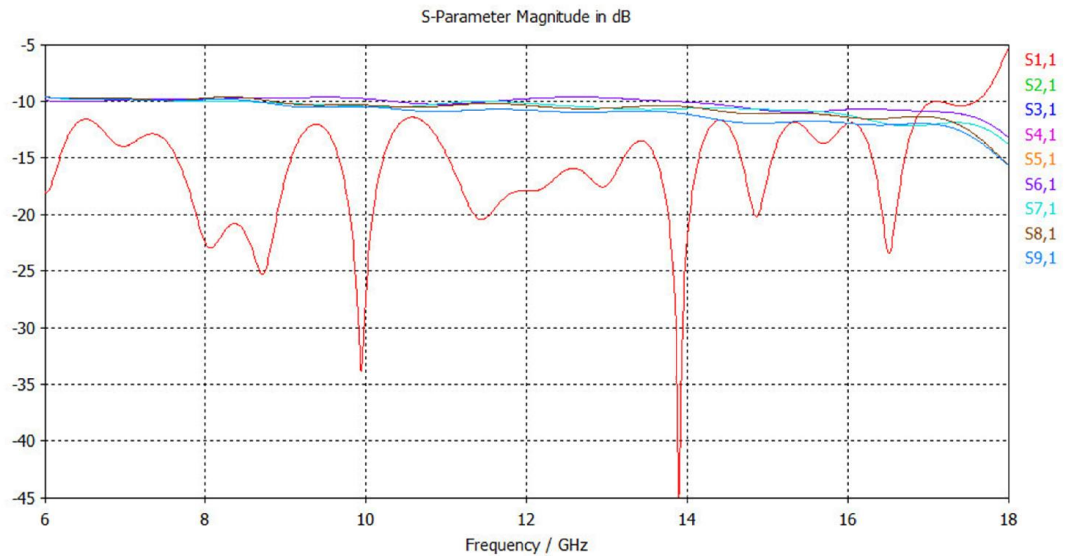
Şekil III.14 8 yollu WPD tasarımı ve parametreleri; 100-100 ohm 5 bölmeli ÇBDB (sol altta), 50-100 ohm 5 bölmeli ÇBDB (sağ altta)

Şekil III.14'te görüldüğü üzere, tasarlanan 5 bölmeli ÇBDB her girişi iki ayrı yola bölecek şekilde kullanılarak 8 yollu bir WPD elde edilmiştir. Giriş empedans değeri 50 ohm olacağından dolayı ilk dönüştürücü girişi ile diğerleri arasında oluşan mikroşerit hat genişliği farkı yine Şekil III.14'te ayrıntılarıyla gösterilmektedir. WPD'nin arka yüzeyi ise tamamen iletken olup toprak olarak kullanılmaktadır. Tasarlanan WPD'nin parametre değerleri Tablo III.4'te verilmiştir. W_b 'ler her bir boğumun mikroşerit hat genişliğini, $W_{50\Omega}$ ve $W_{100\Omega}$ ise giriş hat genişliklerini temsil etmektedir. Bu hat genişlik değerleri TX-LINE programı ile elde edilmekle birlikte kesin değerlere CST MWS ile yapılan elektromanyetik optimizasyon neticesinde ulaşılmıştır.

Tablo III.4 WPD'nin parametre değerleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
$W_{100\Omega} = W$	0.5 mm	Wb3	0.27 mm
$W_{50\Omega}$	2.2 mm	Wb4	0.30 mm
Wb1	0.18 mm	Wb5	0.41 mm
Wb2	0.21 mm	Lw	32.22 mm

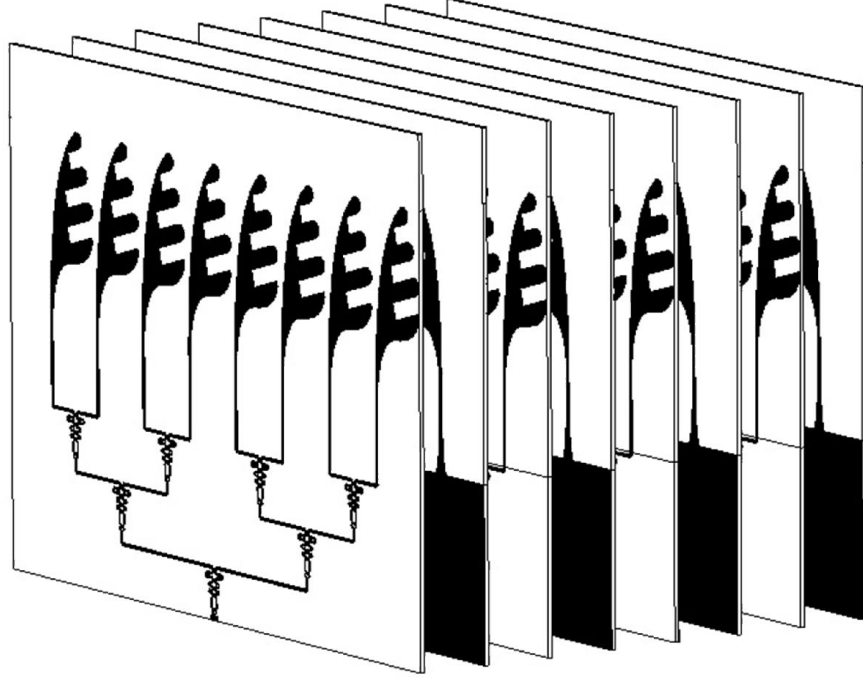
Wilkinson gc bölücü tsarmlarnda portlar arası izolasyonu sağlamak için DBD'lerde kullanılan dirençler benzetim lmleri sonunda portlar arasındaki izolasyon kayıplarına rağmen anten örüntüsünde ve kazancında çok büyük bir kayba neden olmadığı için ihmal edilmiştir.

**şekil III.15** WPD S-Parametre değerleri

şekil III.15'te görüldüğü üzere tasarlanan WPD'nin geri dönüş kaybı belirlenen bant genişliğinde -10 dB'nin altında elde edilmiştir. Ayrıca giriş portları ile çıkış portları arasındaki ideal ortamda her bir DBD'de -3 dB, toplamda -9 dB olması gereken araya girme kaybı (insertion loss – S.21; S.31 ...; S.81) toplamda -9.5 ile -11.5 dB arasında olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca toplam bant genişliğinde 17.5 GHz'den sonra kayıpların arttığı tespit edilmiştir.

Şekil III.16'da gösterildiği üzere 8 adet Wilkinson güç bölücü ile 1x8 elemanlı Antipodal Vivaldi anten dizisi birleştirilerek $13.2 \times 9.5 \times 11.8 \text{ cm}^3$ hacmindeki 64 elemanlı tasarımın son haline ulaşılmıştır.



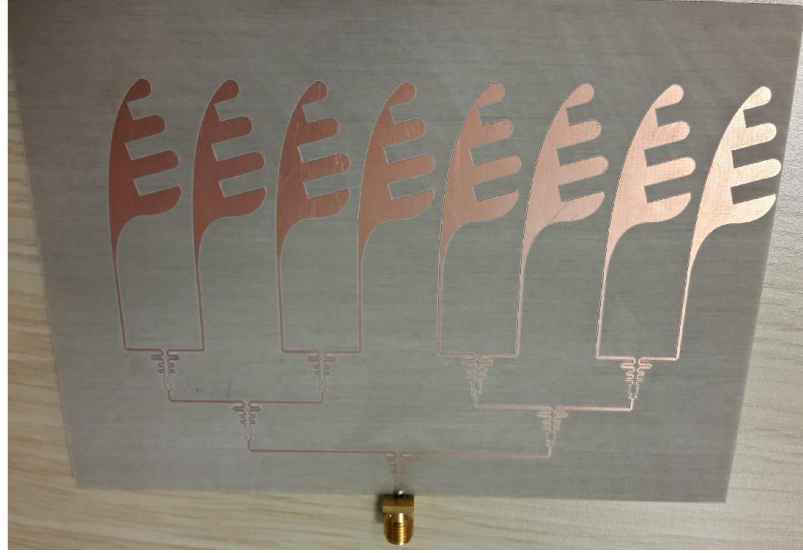
Şekil III.16 8x8 elemanlı AVA ve WPD dizisi

D. BENZETİM VE TEST SONUÇLARI

Benzetim ortamında tasarımı gerçekleştirilen dizi anten ve güç bölücü, LPKF ProtoMat C30s PCB kazıyıcı cihaz kullanılarak RO 4003C tipindeki PCB karta basılarak üretilmiştir. Üretilen elemanlar TUBİTAK-BİLGEM laboratuvarlarında geniş bant network analizörler ile test edilmiştir.

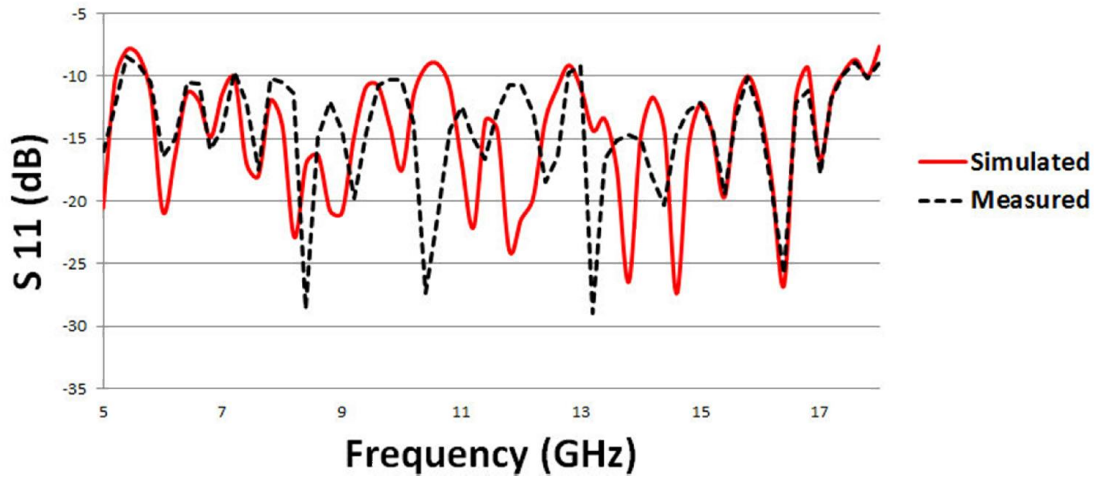
1. AVA Doğrusal Dizi

Tasarım bilgileri Bölüm III.C.1'de verilen 8 elemanlı antipodal Vivaldi doğrusal dizi antenin üretim modeli Şekil III.17'de ve test sonuçları Şekil III.18 ve 19 'da verilmiştir.



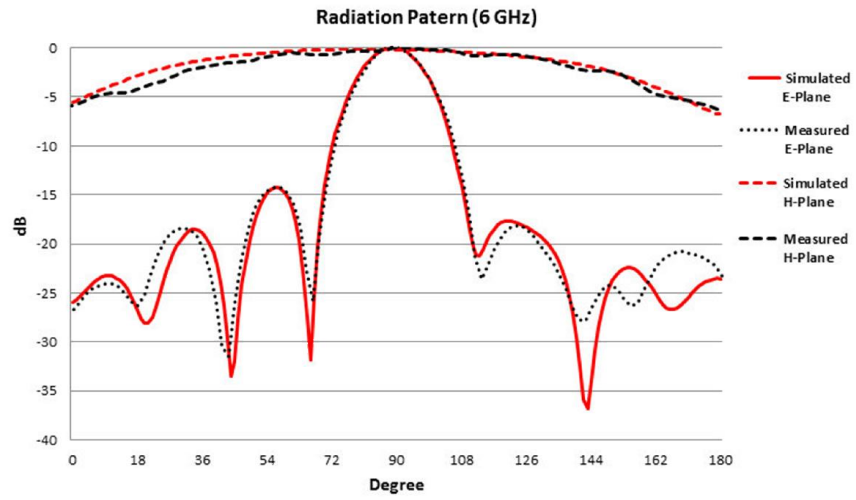
Şekil III.17 AVA doğrusal dizi üretim modeli

Şekil III.18’de benzetim ve test sonuçlarına göre 6-18 GHz frekans aralığında 50 Ohm giriş empedansı ile beslenen 8 elemanlı doğrusal dizi antenin geri dönüş kaybının yaklaşık olarak -10 dB’nin altında olduğu görülmektedir.

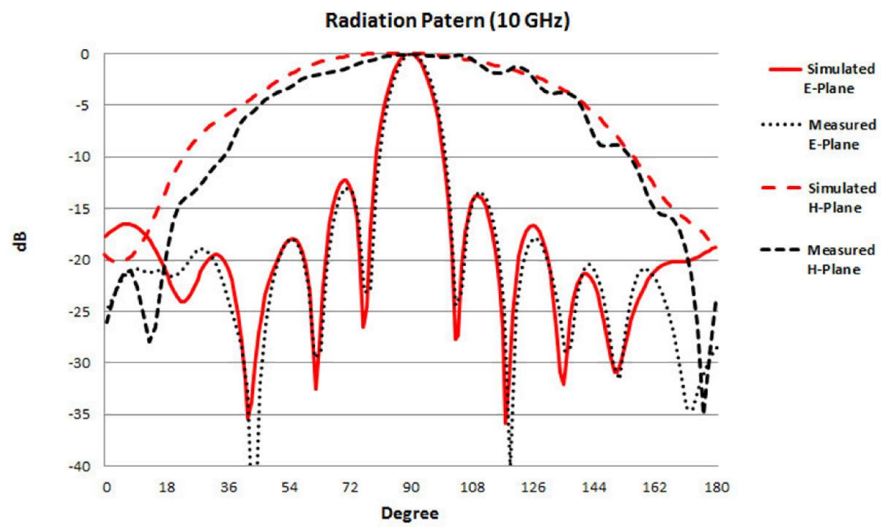


Şekil III.18 1X8 AVA doğrusal dizi geri dönüş kaybının benzetim ve test sonuçları karşılaştırması

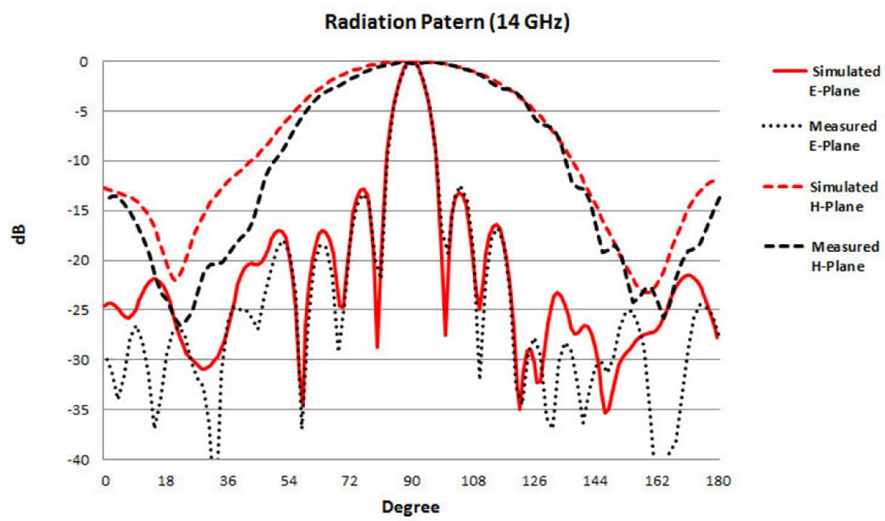
Şekil III.19 ise 6, 10, 14 ve 17 GHz frekanslarındaki anten ışıma paterninin benzetim ve test sonuçlarında birbirleriyle tam uyumlu olduğu ve istenen doğrultuda ışıma sağlandığı görülmektedir.



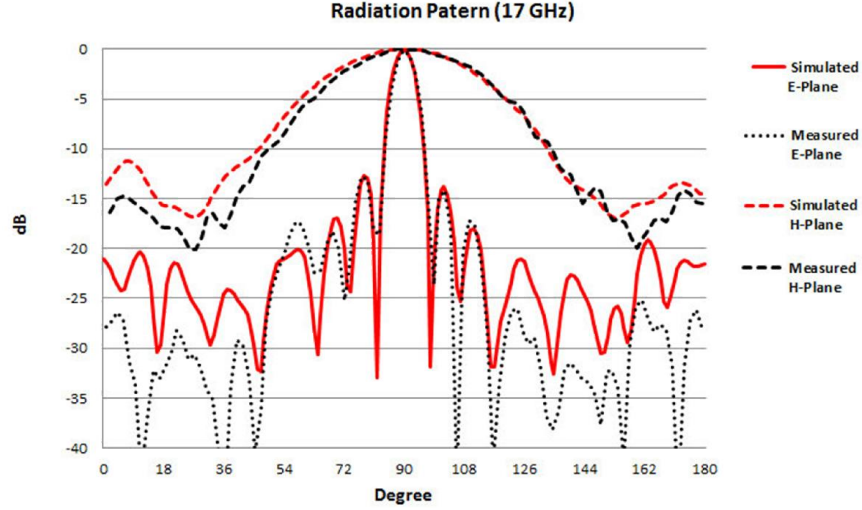
(a) 6 GHz



(b) 10 GHz



(c) 14 GHz



(ç) 17 GHz

Şekil III.19 1X8 AVA doğrusal dizi ışıma paterninin benzetim ve test sonuçları karşılaştırması; (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 14 GHz, (ç) 17 GHz

Benzetim ve test sonuçlarındaki kazanç değerleri 6-18 GHz frekans aralığında birbiriyle uyumludur. Ancak WPD'deki çeyrek dalga boylu dönüştürücülere dizi elemanları arasındaki izolasyonu sağlaması için yerleştirilmesi gereken dirençlerin kullanılmaması ve milimetrik iletim hatlarının üretiminde yaşanan sıkıntılar nedeniyle yüksek frekanslarda az da olsa bir kayıp söz konusudur.

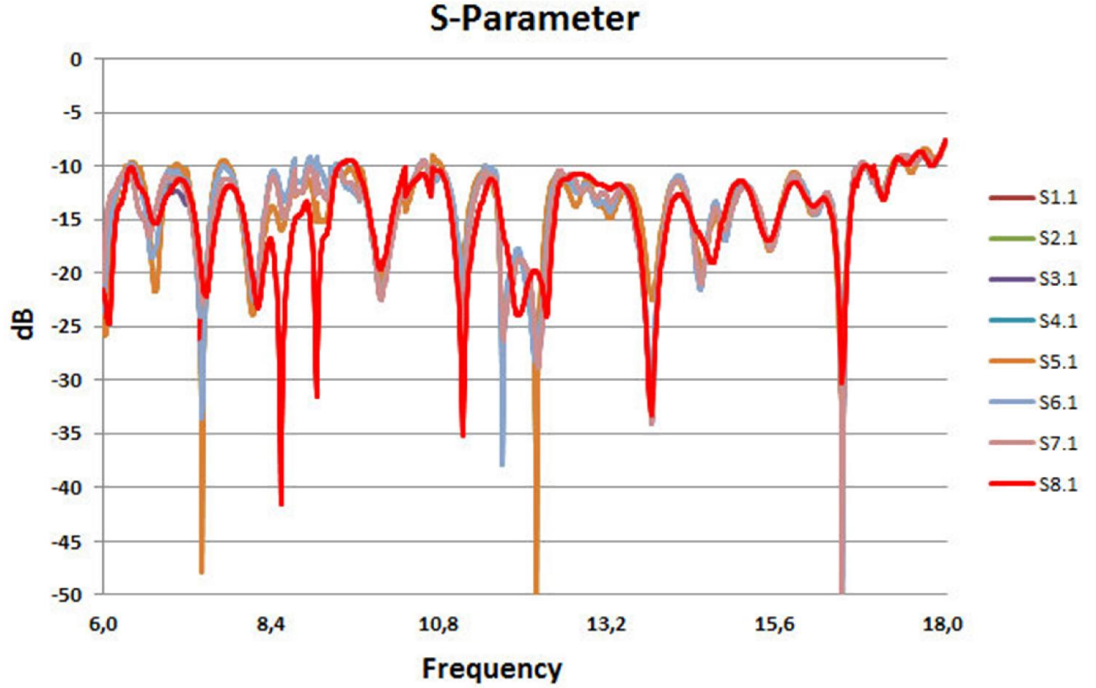
Tablo III.5 AVA doğrusal dizi kazanç değerlerinin benzetim ve test sonuçları

FREKANS	KAZANÇ	
	Benzetim	Test
6	10,720	9,947
10	14,220	13,852
14	16,500	15,982
17	16,600	14,487
18	15,620	14,272

Üretimi yapılan $13,2 \times 9,5 \text{ cm}^2$ boyutlarındaki 8 elemanlı AVA doğrusal dizi anten, literatürde yer alan yığın tekniğini kullanılarak (stacked array) dizilen benzerine [16] göre, doğrusal dizilişinden dolayı hacimsel büyüklüğü olmamasının yanında alansal olarak da yaklaşık olarak **%50 daha küçüktür**. Boyutunun küçültülmesine karşın benzerine kıyasla kazanç değerinde azalma gözlemlenmemiştir.

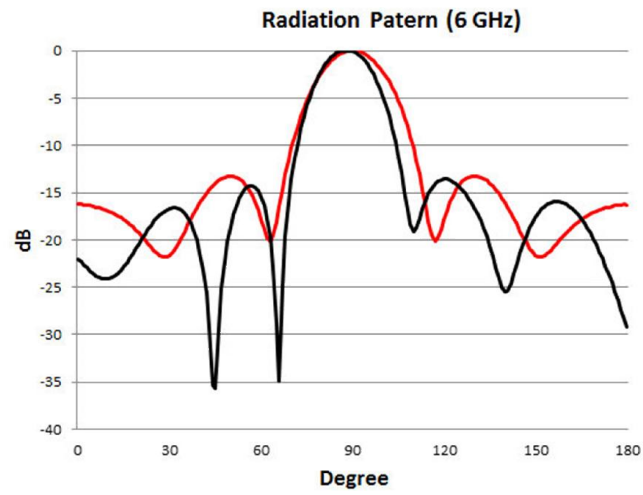
2. AVA Düzlemsel Dizi

Üretilen 8 elemanlı AVA doğrusal dizi anten verilerine göre tasarlanan ve şekil III.16'da tasarımı sunulan 64 elemanlı (8x8) AVA düzlemsel dizi antene ait benzetim sonuçları Şekil III.20 ve 21'de verilmiştir.

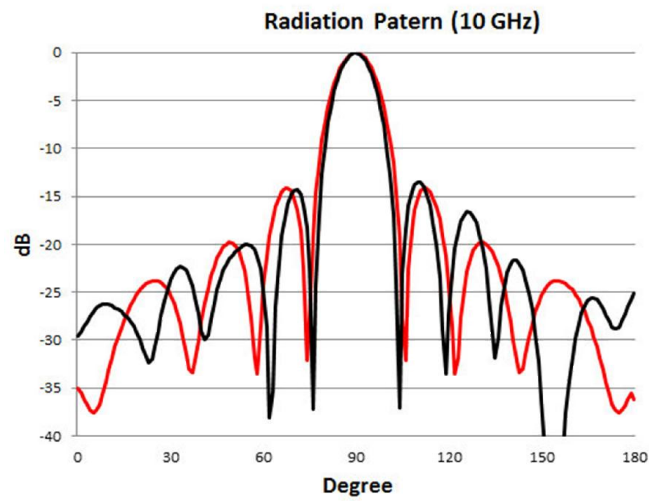


Şekil III.20 8X8 AVA doğrusal dizi geri dönüş kaybının benzetim sonuçları

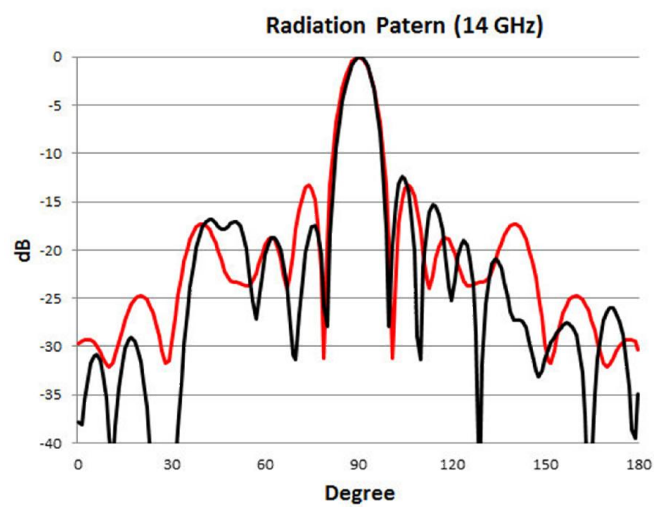
Şekil III.20'de sunulan benzetim sonuçlarına göre 6-18 GHz frekans aralığında aynı anda 50 ohm değerinde sekiz farklı giriş empedansı ile beslenen 64 elemanlı düzlemsel dizi antenin geri dönüş kaybının her bir giriş için -10 dB'nin altında olduğu görülmektedir.



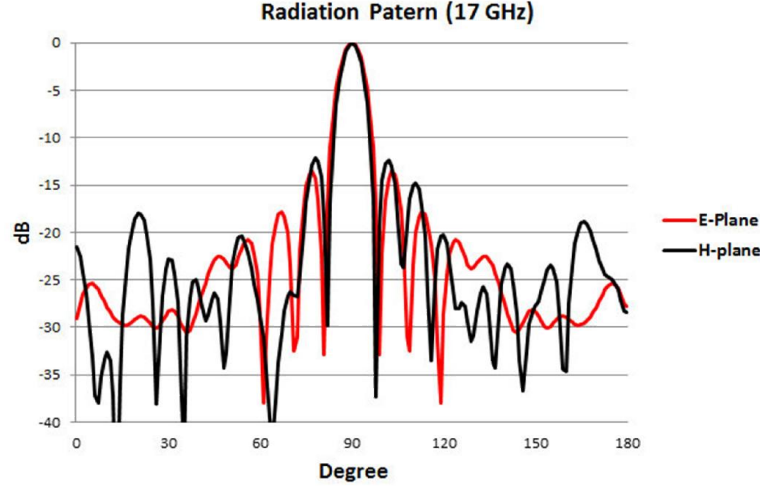
(a) 6 GHz



(b) 10 GHz



(c) 14 GHz



(ç) 17 GHz

Şekil III.21 8X8 AVA düzlemsel dizi ışıma paterninin benzetim sonuçları;
(a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 14 GHz, (ç) 17 GHz

Şekil III.21'deki benzetim sonuçlarına göre; 6-18 GHz frekans aralığında çalışan, istenen doğrultuda ışıma yapan, bant genişliği boyunca yan lob seviyesinin -13 dB'nin altında olan, $13.2 \times 9.5 \times 11.8 \text{ cm}^3$ 'lük hacme sahip, yüksek kazançlı (17.1 – 23.5 dB) anten benzetimi gerçekleştirilmiştir.

3. AVA Düzlemsel Dizide Aktif Elektronik Tarama

Aktif elektronik tarama dizileri birden fazla fonksiyonun yerine getirilmesi arzulanan uygulamalarda kullanılmaktadır. Sistemler aynı anda birden fazla huzme oluştururken, elektronik tarama ve takip özelliklerini de sağlamaktadırlar. Bu sistemlerin kullanılması ile dizi antenlerdeki iki önemli konu tartışılmaktadır: Yan lob seviyesinin (Side Lobe Level, SLL) bastırılması ve elektronik tarama açısının genişletilmesi. Bu bölümde geniş bantlı antende bu iki konu incelenmekte ve benzetim sonuçları sunulmaktadır.

a. Yan Lob Seviyesinin Bastırılması

Yan lob seviyesi (Side Lobe Level, SLL), en yüksek seviyedeki yan lobun ışıma şiddetinin ana huzmedeki ışıma şiddetine oranıdır. Dizi anten tasarımında bu seviye ne kadar düşük olursa o kadar tercih edilir. Özellikle radar sistemlerinde, düşük kestirilme olasılığı (low probability of intercept,

LPI) SLL'nin yeterince bastırılması ile doğru orantılıdır [17]. Bu tez çalışmasında da 1x8'lik dizi antenin farklı genlik değerleri ile beslenmesi sonucunda SLL'sinin azaldığı gözlemlenmiştir.

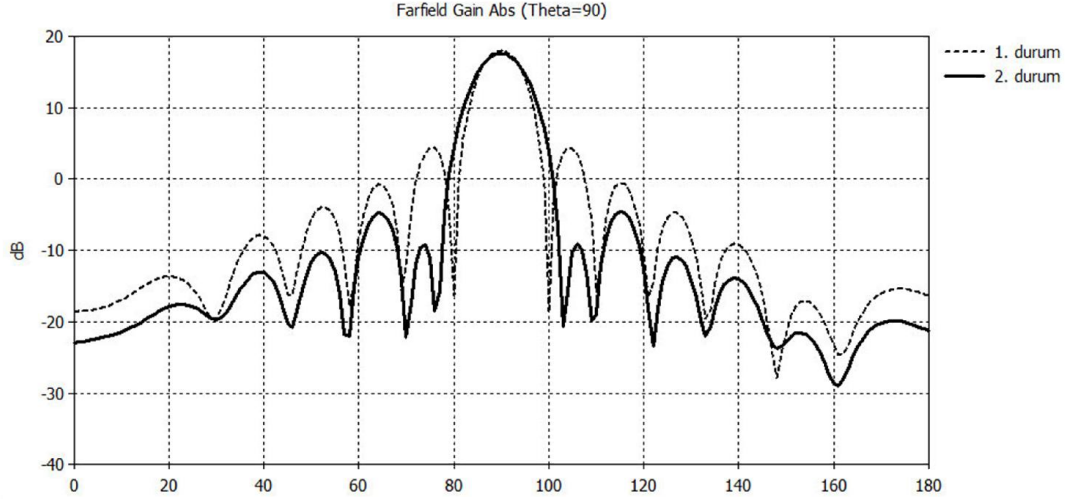
Tablo III.6 8 elemanlı anten için aynı ve farklı genlik besleme değerleri

	1. Anten	2. Anten	3. Anten	4. Anten	5. Anten	6. Anten	7. Anten	8. Anten
1. Durum Genlik (A)	1	1	1	1	1	1	1	1
2. Durum Genlik (A)	1.05	1.45	1.9	2.5	2.5	1.9	1.45	1.05

Tablo III.7 Aynı ve farklı genlik beslemeleri arasındaki SLL farkı

FREKANS (GHz)	6	8	10	12	14	16	18
SLL (dB) 1. Durum	-13.5	-13.0	-13.3	-13.6	-13.6	-14.4	-12.2
SLL (dB) 2. Durum	-28.6	-23.6	-22.8	-22.5	-22.3	-23.1	-23

Tablo III.6'da belirtilen; 1. durumda 8 elemanlı dizi antenin her bir elemanı 1 A ile beslenirken 6-18 GHz frekans aralığında ortalama SLL değeri -13.5 dB, 2. durumda her bir elemanın farklı genlik değeri ile beslenmesinde ortalama SLL değeri -23.5 dB olmakta ve SLL değerinin 10 dB kadar bastırıldığı Tablo III.7'de görülmektedir. Bastırılmış SLL'nin 14 GHz'deki anten örüntüsü Şekil III.22'de gösterilmektedir.



Şekil III.22 14 GHz için 1. durum ve 2. durum beslemede SLL değişimi

b. Antenin Alan Tarama Performansı

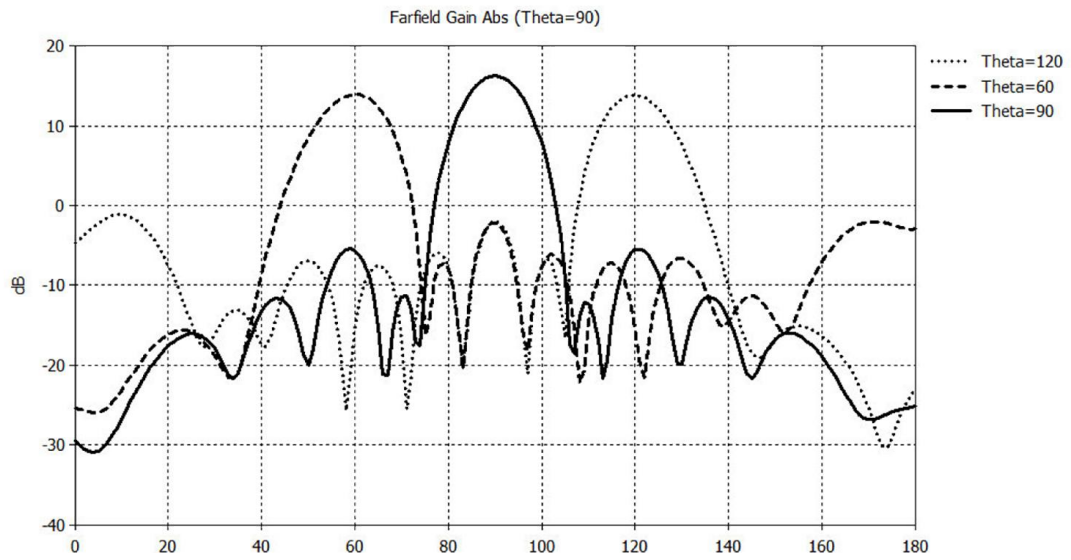
Radar ve elektronik harp uygulamalarında istenen diğer bir özellik ise anten örüntüsünün belirli bir alan içerisinde elektronik olarak tarayabilmesidir. Bu özelliğin sağlanabilmesi için anten dizinin her bir elemanına,

$$\beta = -k d \cos \theta \quad (\text{III.8})$$

formülünü [18] kullanarak farklı faz beslemeleri (açıları) verilmesi gerekir. Burada β , faz beslemesini; k , dalga sayısını ($2\pi/\lambda$); d , dizi elemanları arasındaki mesafeyi; θ ise örüntü açısını ifade etmektedir. Tasarlanan anten için $d=14.5$ mm, $\lambda_{6\text{GHz}} = 47.1\text{mm}$ ve Tablo III.6'daki 2. durum besleme değerlerinde 6-18 GHz bant genişliğinde (3:1) anten örüntüsü bozulmadan $\pm 20^\circ$ (toplam 40°) tarama yapılabilir. Tablo III.8'de de görüldüğü üzere dizi anten; 6-14 GHz frekans aralığında toplam 60° 'lik bir alanı ($\pm 30^\circ$), 6-12 GHz frekans aralığında (2:1 bant genişliğinde) toplam 70° 'lik bir alanı ($\pm 35^\circ$) elektronik tarama kabiliyetine sahiptir. $\pm 35^\circ$ 'den sonra alt frekanslarda anten huzme genişliğinin aşırı bozulduğu, $\pm 25^\circ$ 'den sonra ise üst frekanslarda istenmeyen lobların oluştuğu gözlemlenmiştir. Örnek olarak Şekil III.23'de 12 GHz için $\theta = 90^\circ \pm 30^\circ$ 'de AVA'nın tarama performansı gösterilmektedir.

Tablo III.8 Farklı faz açıları ile anten tarama aralığı

FRE. (GHz)	$\pm 20^\circ$		$\pm 25^\circ$		$\pm 30^\circ$		$\pm 35^\circ$	
	GAIN(dB)	SLL(dB)	GAIN(dB)	SLL(dB)	GAIN(dB)	SLL(dB)	GAIN(dB)	SLL(dB)
6	10.7	-20.7	10.5	-18.9	10.3	-18.1	10	-16.7
8	13.3	-21	13.2	-19.8	12.9	-18.7	12.4	-17.8
10	14.5	-19.4	14.1	-18.3	13.5	-17.1	13.1	-16.4
12	15.2	-18.5	14.6	-17.3	13.9	-16.3	13	-15
14	16.2	-17.6	15.5	-16.5	14.7	-12.7	13.6	-7.3
16	16.3	-17.2	15.2	-15.1	14.3	-9.3	13	-3.8
18	15.7	-11.7	14.2	-7.3	12.4	-4	11	-1.2



Şekil III.23 12 GHz için $\theta = 90^\circ \pm 30^\circ$ 'de AVA'nın benzetim örüntüsü

IV. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Geniş bant antenler geçmişten günümüze; askeri haberleşme, elektronik harp ve radar sistemlerinde yüksek kapasitesi, frekans karıştırmaya karşı dirençli olması, tespit edilmesinin zor oluşu nedeniyle ticari uygulamalara nazaran daha fazla kullanılmış ve özellikle bu uygulamalar için geliştirilmiştir.

Geniş bant antenlerin kendi içerisinde bir çok çeşidi bulunsa da bu tez çalışmasında boyutlarının küçük olması, taşınabilirliği, düşük üretim maliyetli oluşu, bant genişliği boyunca düzgün anten değerlerine sahip olması ve kullanım alanlarının genişliği nedeniyle bir düzlemsel geniş bant anten çeşidi olan Vivaldi anten tercih edilmiştir.

İlk olarak 1979 yılında sunulan Vivaldi antenler klasik, antipodal ve dengeli antipodal olmak üzere üç grubu ayrılmaktadır. Bu çalışmada klasik Vivaldi antendeki karmaşık besleme yapısından kaynaklanan bant genişliği kısıtlaması ile empedans uyumlaması sorununu yaşamamak için ve üretiminin dengeli antipodal Vivaldi antene göre daha kolay olması nedeniyle antipodal Vivaldi anten (AVA) çeşidi üzerinde çalışılmıştır.

Tez çalışmasında, askeri sistem istekleri göz önünde bulundurularak 6-18 GHz frekans bandında çalışan, uçan platform üzerinde sistemin diğer bileşenleri ile kolayca entegre edilebilmesi için mikroşerit yapıda, 25x25X20 cm³ 'lük bir hacim içine sığabilen küçük boyutlu, yüksek kazançlı, üretimi kolay, yan lob seviyesi düşük, elektronik taramaya izin veren, aynı anda birden fazla huzme oluşturulabilen, yönlü ve dar bir huzme genişliğine sahip antipodal Vivaldi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu tasarım için, düşük dielektrik sabiti özelliği göz önünde bulundurularak Rogers RO4003C baskı devre kartı tercih edilmiştir. Tasarımında üç boyutlu bilgisayar benzetim programı CST MWS kullanılmış, anten üretimi ve ölçümü TÜBİTAK BİLGEM (Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi) laboratuvarlarında yapılmıştır.

Çalışma sonucunda antipodal Vivaldi anten, 8 elemanlı AVA doğrusal dizi, 64 elemanlı AVA düzlemsel dizi ve dizi antenlerin beslemesinde kullanılması için Wilkinson güç bölücü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen hedefler doğrultusunda çalışmanın yapı taşı olarak 6-18 GHz frekans aralığında çalışan, bant genişliği boyunca geri dönüş kaybı -10 dB'nin altında olan, mikroşerit hat besleme yapısı ile giriş empedansı 50 ohm olan, uçtan ışıma yapan (end-fire radiation), bant genişliği boyunca yan lob seviyesi -12 dB'nin altında olan bir elemanlı AVA üretilmiştir. Yuvarlatılmış uçlar kullanılarak ve baskı devre kartı boyu uzatılarak anten kazancı ortalama 3 dB arttırılmıştır (6 GHz için 4.1 dB'den 7.2 dB'ye). Literatürdeki benzerleri [11] ile kıyaslandığında kazanç kaybı olmaksızın anten boyutu **%66 oranında** azaltılmıştır. Bu anten ile ilgili bildiri **uluslararası bir konferansta sunulmak üzere kabul edilmiştir** [19].

Dizi anten çalışmalarında 50 ohm empedanslı tek giriş ile 100 ohm empedansa sahip 8 adet AVA'yı aynı anda herhangi bir kayba maruz bırakmadan ve ışıma paterninde bozulma olmadan beslemek için Wilkinson güç bölücü üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarımda beş bölmeli çeyrek dalga boyunda dönüştürücüler (ÇDBD) kullanılarak WPD'nin hem fiziksel boyutu küçültülmüş hem de istenen bant aralığında en az kayıpla çalışması sağlanmıştır. Giriş empedansı 50 Ohm çıkış empedansı 100 ohm olan 8 yollu WPD'nin geri dönüş kaybı belirlenen 6-18 GHz frekans aralığında -10 dB'nin altında, giriş portları ile çıkış portları arasındaki araya girme kaybı (insertion loss – S.21; S.31 ...; S.81) ise -9.5 ile -11.5 dB arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bu WPD ile ilgili bildiri **uluslararası bir konferansta sunulmak üzere kabul edilmiştir** [20].

AVA'nın kazancını arttırmak, huzme genişliğini daha da daraltmak amacıyla 8 elemanlı AVA doğrusal dizi tasarımı ve üretimi güç bölücü ile aynı baskı devre kartı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Benzetim ve test sonuçlarına göre; 6-18 GHz frekans aralığında çalışan, 50 Ohm giriş empedansı ile beslenen, geri dönüş kaybının bant genişliği boyunca yaklaşık olarak -10 dB'nin altında olduğu, anten ışıma paterninin benzetim ve test sonuçlarında

birbirleriyle tam uyum sağladığı, istenen doğrultuda ışıma yapan, kazancı 10.7 – 16.6 dB arasında olan 8 elemanlı doğrusal dizi anten elde edilmiştir. Güç bölücü olmadan benzetim yolu ile tasarlanan 8 elemanlı doğrusal dizi anten ile kıyaslandığında anten örüntüsünde bozulma olmadığı ancak, anten kazancının ortalama 1.2 dB azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ise, üretim esnasında WPD'deki çeyrek dalga boylu dönüştürücülere dizi elemanları arasındaki izolasyonu sağlaması için yerleştirilmesi gereken dirençlerin temin edilmesinin zor olması nedeniyle koyulmaması ve milimetrik iletim hatlarının üretiminde yaşanan sıkıntılar olduğu düşünülmektedir. Boyutları **13,2 x 9,5 cm²** olan anten, yığın tekniğini kullanılarak (stacked array) dizilen benzerine [16] göre, doğrusal dizilişinden dolayı hacimsel büyüklüğü olmamasının yanında alansal olarak da yaklaşık olarak **%50 daha küçüktür**. Boyutunun küçültülmesine karşın benzerine kıyasla kazanç değerinde azalma gözlemlenmemiştir.

Üretimi gerçekleştirilen 8 elemanlı doğrusal dizi anten ve Wilkinson güç bölücü tasarımı kullanılarak, 64 elemanlı düzlemsel dizi benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre; 6-18 GHz frekans aralığında çalışan, istenen doğrultuda ışıma yapan, bant genişliği boyunca yan lob seviyesi -13 dB'nin altında ve geri dönüş kaybı her bir giriş için -10 dB'nin altında olan, 13.2 x 9.5 x 11.8 cm³'lük hacme sahip, yüksek kazançlı (17.1 – 23.5 dB) anten benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Aktif elektronik tarama dizileri birden fazla fonksiyonun yerine getirilmesi arzulanan uygulamalarda kullanılmaktadır. Dizi antenlerdeki iki önemli konu yan lob seviyesinin (Side Lobe Level, SLL) bastırılması ve elektronik tarama açısının genişletilmesidir. Tasarlanan 8 elemanlı doğrusal dizi anten üzerinde bu konuların benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Özellikle radar sistemlerinde, düşük kestirilme olasılığı (low probability of intercept, LPI) SLL'nin yeterince bastırılması ile doğru orantılıdır. Bu tez çalışmasında da 8 elemanlı doğrusal dizi antenin her bir elemanı 1 A ile beslenirken 6-18 GHz frekans aralığında ortalama SLL değeri -13.5 dB, her bir elemanın farklı genlik değeri ile beslemesi durumunda

ortalama SLL değeri -23.5 dB olmakta ve SLL değeri 10 dB kadar bastırılmaktadır.

Radar ve elektronik harp uygulamalarında istenen diğer bir özellik ise anten örüntüsünün belirli bir alan içerisinde elektronik olarak tarayabilmesidir. Benzetim sonuçlarına göre 8 elemanlı doğrusal dizi anten, her bir elemanın farklı genlik değeri ile beslenmesi durumunda, 6-18 GHz bant genişliğinde (3:1) anten örüntüsü bozulmadan $\pm 20^\circ$ (toplam 40°); 6-14 GHz frekans aralığında $\pm 30^\circ$ 'lik bir alanı (toplam 60°), 6-12 GHz frekans aralığında (2:1 bant genişliğinde) $\pm 35^\circ$ 'lik bir alanı (toplam 70°) elektronik tarama kabiliyetine sahiptir.

Yapılan çalışma neticesinde üretilen dizi antenin 6-18 GHz frekans aralığında çalışan geniş bant radar sistemlerinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda, literatürde kullanılan optimizasyon tekniklerinden faydalanılarak ayrıntılı programlama yöntemleri ile mevcut antenden daha iyi yan lob seviyesi ve daha iyi alan tarama performansı elde edilebilir. Yine aynı teknikleri kullanarak elektronik girişimi önlemek için anten huzmesinin sıfır ışıma yaptığı yöne döndürülmesi (null-steering beamformer) konusunda çalışmalar yapılması öngörülmektedir. Her bir antene farklı faz ve genlik sağlayacak donanım ve yazılım altyapısının oluşturulması ile söz konusu çalışmaların laboratuvar ortamında sınanması mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Reed Jeffrey H., *Introduction to Ultra Wideband Communication Systems*, 1st ed. Pearson, 2005, p. 672.
- [2] Jianxin Liang, "Antenna Study and Design for Ultra Wideband Communication Applications," University of London United Kingdom, 2006.
- [3] H. G. Schantz, "A brief history of UWB antennas," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 19, no. 4, pp. 22–26, Apr. 2004.
- [4] S. Zhong and X. Liang, "Progress in ultra-wideband planar antennas," *J. Shanghai Univ. (English Ed.)*, vol. 11, no. 2, pp. 95–101, Apr. 2007.
- [5] P. J. Gibson, "The Vivaldi Aerial," *9th Eur. Microw. Conf.* 1979, 1979.
- [6] E. Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna," *IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 135. p. 89, 1988.
- [7] J. D. S. Langley, P. S. Hall, and P. Newham, "Balanced antipodal Vivaldi antenna for wide bandwidth phased arrays," *IEE Proc. - Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 143, no. 2, p. 97, 1996.
- [8] "Antipodal" kelimesinin anlamı.[Online]. Available: <http://www.merriam-webster.com/>.
- [9] O. Javashvili and D. Andersson, "New method for design implementation of Vivaldi Antennas to improve its UWB behaviour (EuCAP 2010)," *Antennas Propag. (EuCAP), 2010 Proc. Fourth Eur. Conf.*, 2010.
- [10] Frank B. Gross, *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. New York: McGraw-Hill, 2011, pp. 127–136.
- [11] P. Wang, H. Zhang, G. Wen, and Y. Sun, "Design of Modified 6-18 Ghz Balanced Antipodal Vivaldi Antenna," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 25, pp. 271–285, 2012.

- [12] K. Kota and L. Shafai, "Gain and radiation pattern enhancement of balanced antipodal Vivaldi antenna," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 5, p. 303, 2011.
- [13] S. J. Orfanidis, "Electromagnetic Waves and Antennas," *Media*, vol. 2, pp. 880–882, 2008.
- [14] S. Kim and K. Chang, "A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation," *IEEE Antennas Propag. Soc. Symp. 2004.*, pp. 2269–2272 Vol.3, 2004.
- [15] F. Xu, G. Guo, E. Li, and J. Wu, "An ultra-broadband 3-dB power divider," *Proc. 2012 5th Glob. Symp. Millimeter-Waves*, no. Gsmm, pp. 347–350, May 2012.
- [16] H. Xu, G. Zhao, Z. Zhang, H. Sun, and X. Lv, "Antipodal Vivaldi antenna for phased array antenna applications," in *Proceedings of 2012 5th Global Symposium on Millimeter-Waves*, 2012, pp. 200–203.
- [17] Aytug Denk, "Detection and Jamming Low Probability of Intercept (LPI) Radars," Naval Postgraduate School, 2006.
- [18] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*. 2005, pp. 301–303.
- [19] M. Karahan and D. S. Armagan Sahinkaya, "A Reduced Size Antipodal Vivaldi Antenna Design for Wideband Applications," *2014 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet.*, 2014 (accepted).
- [20] M. Karahan, D. S. Armagan Sahinkaya, and E. Kurt, "Design of Multisection 1x8 Ultra-Wideband Wilkinson Power Divider," *2014 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet.*, 2014 (accepted).