

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**X VE KA BANT UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK KAZANÇ BANT GENİŞLİĞİNE
SAHİP İLETİ DİZİ ANTEN TASARIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMED MALKOÇ

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ SİBEL ÜNALDI

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. SİBEL ÇİMEN

BİLECİK, 2024

10460160

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**X VE KA BANT UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK KAZANÇ BANT GENİŞLİĞİNE
SAHİP İLETİ DİZİ ANTEN TASARIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMED MALKOÇ

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ SİBEL ÜNALDI

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. SİBEL ÇİMEN

BİLECİK, 2024

10460160

BEYAN

X ve Ka Bant Uygulamaları için Yüksek Kazanç Bant Genişliğine Sahip İletici Dizi Anten Tasarımları adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
☐		☒	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/....	

Öğrenci Adı ve Soyadı
Muhammed MALKOÇ

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Bu tez kapsamında X ve Ka Bant Uygulamaları için Yüksek Kazanç Bant Genişliğine Sahip İletici Dizi Anten Tasarımları yapılarak uygulamalarına yer verilmiştir. Ülkemizde bu konuda çalışacak araştırmacılara bu tezin faydalı olmasını temenni ederim.

Bu alanda bana çalışma fırsatı veren, lisans ve yüksek lisans eğitimimin her aşamasında bana yardımcı olan değerli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Sibel ÜNALDI'ya, tecrübe ve bilgileriyle bizlere yardımcı olan eş danışman hocam sayın Prof. Dr. Sibel ÇİMEN'e, her alanda benden yardımlarını esirgemeyen sevgili dostum Şener YILMAZ'a ve hayatım boyunca beni destekleyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Muhammed MALKOÇ

2024

ÖZET

X VE KA BANT UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK KAZANÇ BANT GENİŞLİĞİNE SAHİP İLETİ DİZİ ANTEN TASARIMLARI

Yüksek kazançlı antenler, günümüzde artan veri iletişimi ihtiyacını karşılamak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, İletî Dizi Anten (İDA) teknolojisi gibi yenilikçi çözümler ön plana çıkmıştır. İDA'lar, elektromanyetik dalgaları yeniden yönlendiren ve fazlarını ayarlayarak yüksek kazanç sağlayan düzlemsel yapılar olarak tanımlanabilir. İDA'ların temel dezavantajları olarak karmaşık tasarım ve üretim süreçleri ile bu süreçlere bağlı olarak artan üretim maliyetleridir. Bir diğer dezavantajı olarak dar bant genişliğine sahip olmaları söylenebilir.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak farklı amaçlara yönelik İDA'ların tasarımı için üç farklı birim hücre tasarımı yapılmıştır. Yapılan benzetimler sonucu bu tasarımlar, İDA kriterlerini karşıladığı görüldükten sonra İDA haline dönüştürülmüştür. Yöntem olarak, gereken faz gecikmesini sağlamak amacıyla birim eleman boyut değiştirme yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra 9 GHz, 10 GHz ve 28 GHz merkez frekanslarında 3 farklı İDA tasarımı yapılmıştır. “Tasarım 1 İDA” ve “Tasarım 2 İDA” isimli ilk iki tasarımda FR-4 dielektrik tabakası kullanılırken üçüncü tasarım olan “Tasarım 3 İDA” Rogers RT6002 kullanılarak tasarlanmıştır. Her üç tasarım da 4 katmanlıdır. Tasarım 1 İDA'nın 1- dB ve 3- dB kazanç bant genişlikleri sırasıyla %12,12 ve %49,43'tür. 9 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %21,3'tür. Tasarım 2 İDA'nın 1- dB kazanç bant genişliği %7,65; 3- dB kazanç bant genişliği ise %16,36'dır. 10 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %18,7 olarak elde edilmiştir. Tasarım 3 İDA'nın 1- dB kazanç bant genişliği %7,96 olarak elde edilmiştir. 28 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %30,84'tür. Prototipi üretilen ve ölçümleri yapılan Tasarım 1 İDA'nın ölçüm ve benzetim sonuçları iyi bir uyuma sahiptir.

Bu tezin hedefi karmaşık olmayan tasarımlar ve düşük maliyetli üretimler ile yukarıda anlatılan dezavantajları ortadan kaldırırken aynı zamanda geniş kazanç bant genişliği sağlamaktır. Bu doğrultuda tasarımların benzetimleri yapılmış, Tasarım İDA 1'nin prototipi üretilmiş ve ölçümler ise Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Mikrodalga ve Anten Laboratuvarında bulunan tam yansız odada alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Düşük Maliyet, Geniş Bant, İletî Dizi Anten.

ABSTRACT

TRANSMITARRAY ANTENNA DESIGNS WITH HIGH GAIN BANDWIDTH FOR X AND KA BAND APPLICATIONS

High-gain antennas play a critical role in meeting the growing demand for data communication in today's world. As a result, innovative solutions such as Transmitarray (TA) technology have come to the forefront. TAs can be described as planar structures that redirect electromagnetic waves and adjust their phases to provide high gain. However, TAs have certain disadvantages, including complex design and manufacturing processes, which lead to increased production costs. Another drawback is their limited bandwidth.

In this thesis, three different unit cell designs were initially developed for various TA applications. After simulations confirmed that these designs met TA criteria, they were transformed into TAs. The method employed involved varying the size of the unit elements to achieve the required phase delay. Subsequently, three different TA designs were created with center frequencies of 9 GHz, 10 GHz, and 28 GHz. In the first two designs, named "Tasarım 1 İDA" and "Tasarım 2 İDA," an FR-4 dielectric layer was used, while in the third design, referred to as "Tasarım 3 İDA" was designed using Rogers RT6002. All three designs consist of four layers. The 1-dB and 3-dB gain bandwidths of Tasarım 1 İDA are 12.12% and 49.43%, respectively, with an aperture efficiency of 21.3% at 9 GHz. The 1-dB gain bandwidth of Tasarım 2 İDA is 7.65%, and the 3-dB gain bandwidth is 16.36%, with an aperture efficiency of 18.7% at 10 GHz. The 1-dB gain bandwidth of Tasarım 3 İDA is 7.96%, with an aperture efficiency of 30.84% at 28 GHz. The prototype of Tasarım 1 İDA was produced, and its measurement and simulation results show good agreement.

The goal of this thesis is to address the aforementioned disadvantages while simultaneously providing wide gain bandwidth through simple designs and low-cost production. Simulations of the designs were conducted, the prototype of Tasarım 1 İDA was produced, and measurements were taken in the anechoic chamber at the Microwave and Antenna Laboratory of the Electronics and Communication Engineering Department at Kocaeli University.

Keywords: Low Cost, Wideband, Transmitarray Antenna

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1. Hüzme Yönlendiren İleti Dizi Antenler	6
2.2. Polarizasyon Kontrollü İleti Dizi Antenler	10
2.3. Hem Hüzme Yönlendiren Hem Polarizasyon Kontrollü İleti Dizi Antenler (Hibrit İleti Dizi Antenler).....	14
3. BİRİM HÜCRE TASARIMLARI	17
3.1. Tasarım 1.....	17
3.2. Tasarım 2.....	19
3.3. Tasarım 3.....	20
4. İLETİ DİZİ ANTEN TASARIMLARI	23
4.1. Tasarım 1 Birim Hücresi ile Oluşturulan İleti Dizi Anten	23
4.2. Tasarım 2 Birim Hücresi ile Oluşturulan İleti Dizi Anten	26
4.3. Tasarım 3 Birim Hücresi ile Oluşturulan İleti Dizi Anten	28
5. TASARIM 1 ÖLÇÜM SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ	31
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	35
KAYNAKÇA	37

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Tasarım 1 için Tasarım Parametreleri	18
Tablo 3.2. Tasarım 2 için Tasarım Parametreleri	20
Tablo 3.3. Tasarım 3 için Tasarım Parametreleri	21
Tablo 5.1. Performans Karşılaştırması	34



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yansıtıcı Dizi Anten Yapısı	3
Şekil 1.2. İletici Dizi Anten Yapısı	4
Şekil 2.1. Önerilen 8x8'lik Yapı	7
Şekil 2.2. I ve L Yuvalı Şekil	9
Şekil 2.3. Tek Dielektrik Tabakalı Yapı	12
Şekil 3.1. Tasarım 1 Birim Hücre Geometrisi (a) Ön Görünüm (b) Yan Görünüm	17
Şekil 3.2. Birim Hücre Sınır Koşulları	18
Şekil 3.3. Tasarım 1 Birim Hücresinin 9 GHz'deki İletim Katsayısı Grafiği	18
Şekil 3.4. Tasarım 1 Birim Hücresinin 9 GHz'deki İletim Fazı	19
Şekil 3.5. Tasarım 2 Birim Hücre Geometrisi (a) Ön Görünüm (b) Yan Görünüm	19
Şekil 3.6. Tasarım 2 Birim Hücresinin 10 GHz'deki İletim Kat Sayısı Grafiği	20
Şekil 3.7. Tasarım 2 Birim Hücresinin 10 GHz'deki İletim Fazı	20
Şekil 3.8. Tasarım 3 Birim Hücre Geometrisi (a) Ön Görünüm (b) Yan Görünüm	21
Şekil 3.9. Tasarım 3 Birim Hücresinin 28 GHz'deki İletim Katsayısı	22
Şekil 3.10. Tasarım 3 Birim Hücresinin 28 GHz'deki İletim Fazı	22
Şekil 4.1. Tasarım 1 İDA Eleman Faz Dağılımı	24
Şekil 4.2. Tasarım 1 ve 2 İDA'ların Beslemesinde Kullanılan Horn Anten Boyutları	24
Şekil 4.3. Horn Anten ile Beslenen Tasarım 1 İDA	25
Şekil 4.4. Tasarım 1 İDA için 9 GHz E ve H Düzlemi Işıma Örüntüsü	25
Şekil 4.5. Tasarım 1 İDA için Maksimum Kazanç Benzetim Sonucu	26
Şekil 4.6. Tasarım 1 İDA için Açıklık Verimliliği	26
Şekil 4.7. Tasarım 2 İDA Eleman Faz Dağılımı	26
Şekil 4.8. Horn Anten ile Beslenen Tasarım 2 İDA	27
Şekil 4.9. Tasarım 2 İDA için 10 GHz E ve H Düzlemi Işıma Örüntüsü	27

Şekil 4.10. Tasarım 2 İDA için Maksimum Kazanç Benzetim Sonucu.....	28
Şekil 4.11. Tasarım 2 İDA için Açıklık Verimliliği	28
Şekil 4.12. Tasarım 3 İDA Eleman Faz Dağılımı	29
Şekil 4.13. Tasarım 3 İDA Beslemesinde Kullanılan Horn Anten Boyutları	29
Şekil 4.14. Horn Anten ile Beslenen Tasarım 3 İDA.....	29
Şekil 4.15. Tasarım 3 İDA için 28 GHz E ve H Düzlemi Işıma Örüntüsü	30
Şekil 4.16. Tasarım 3 İDA için Maksimum Kazanç Benzetim Sonucu.....	30
Şekil 4.17. Tasarım 3 İDA için Açıklık Verimliliği	30
Şekil 5.1. Yansımaz Oda ve Ölçüm Düzeneği	31
Şekil 5.2. Üretilen Tasarım 1 İDA Beslemesinde Kullanılan Horn Anten	31
Şekil 5.3. Tasarım 1 İDA Üretilen Prototip ve Horn Anten ile Ölçüm Düzeneği	31
Şekil 5.4. Tasarım 1 İDA'ya ait E-Düzlemi Işıma Örüntüsü Benzetim ve Ölçüm Sonuçları (a) 8,5 GHz (b) 9 GHz (c) 9,5 GHz (d) 10 GHz (e) 10,5 GHz (f) 11 GHz (g) 11,5 GHz (h) 12 GHz	32
Şekil 5.5. Tasarım 1 İDA için Maksimum Kazancın Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	33
Şekil 5.6. Tasarım 1 İDA için Açıklık Verimliliği Ölçüm ve Benzetim Sonuçları	33

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

İDA: İleti Dizi Anten

YDA: Yansıtıcı Dizi Anten

GPS: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)

PIN: Positive- Intrinsic-Negative (Pozitif-İçsel-Negatif)

GHz: Giga Hertz

THz: Tera Hertz

dB: Desibel

λ : Serbest Uzay Dalga Boyu

FSY: Frekans Seçici Yüzey

TE: Transverse Electric (Enine Elektrik)

TM: Transverse Magnetic (Enine Manyetik)

CPFTA: Broadband Circularly Polarized Folded Transmitting Array Antenna (Geniş Bant Dairesel Polarize Katlanmış İletici Dizi Anteni)

PCM: Polarization Conversion Metasurface (Polarizasyon Dönüşüm Metayüzeyi)

LHCP: Left-Hand Circular Polarization (Sol El ile Dairesel Polarize)

RHCP: Right-Hand Circular Polarization (Sağ el ile dairesele Polarize)

AR: Axial Ratio (Eksenel Oran)

YYYDA: Yeniden Yapılandırılabilir Yansıtıcı Dizi Anten

YYİDA: Yeniden Yapılandırılabilir İleti Dizi Anten

YYKİDA: Yeniden Yapılandırılabilir Katlanmış Bir İleti Dizi Anteni

PRRA: Polarization Rotation Reflectarray (Polarizasyon Rotasyon Yansıtıcı Dizi)

ME: Manyetoelektrik

ϵ_r : Dielektrik Katsayısı

mm: Milimetre

5G: 5th Generation (5. Nesil)

G: Gain (Kazanç)

$D_{\max}$: Maximum Directivity (Maksimum Yönlülük)

PCB: Printed Circuit Board (Baskı Devre)

FTA: Folded Transmitarray (Katlanmış İleti Dizi Anten)

RFTA: Reconfigurable Folded Transmitarray (Yeniden Yapılandırılabilir Katlanmış İleti Dizi Anten)

PRMS: Polarization Rotating Metasurface (Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey ve Bir Polarizasyonu Döndüren Metayüzey)

LP: Linear Polarization (Doğrusal Polarizasyon)

CP: Circular Polarization (Dairesel Polarizasyon)

1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim veya algılama sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olan antenler, sinyalleri iletmek ve almak için elektromanyetik dalgaları kullanarak veri transferini sağlamaktadır. Bu sayede, antenler, cihazların geniş mesafeler arasında etkili bir şekilde iletişim kurmasına olanak tanımaktadır. Antenler, tasarım olarak sürekli gelişerek, kişisel iletişim, ev elektroniği, ulaşım ve savunma sanayi gibi birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır.

Anten tasarımlarındaki temel yönelimlerden biri, performansı artırıp desteklenen frekans bandı sayısını yükseltmektir. Uzun yıllar boyunca, antenler otomobillerdeki uzun monopol antenler ve evlerin arka bahçelerindeki büyük uydu çanakları şeklinde yaygın olarak kullanıldı. Ancak, teknoloji ilerledikçe antenler daha kompakt ve verimli hale geldi. Günümüzde modern cep telefonları, GPS navigasyon cihazları ve dizüstü bilgisayarlar daha küçük ve bütünleşmiş antenlerle donatılmıştır. Otomobil ve uçaklardaki antenler de araç gövdelerine entegre edilmiştir. Antenlerin gelişimi, sadece fiziksel boyutlarının küçülmesiyle değil, aynı zamanda daha geniş bant genişliklerini destekleyebilme ve daha yüksek performans sunma yetenekleriyle de ilerlemektedir. Bu gelişmeler, antenlerin daha çeşitli uygulamalarda kullanılmasına ve daha yüksek veri iletim hızlarına ulaşılmasına olanak sağlamıştır.

Elektromanyetik dalgaların, uydu ve noktadan-noktaya iletişim veya radar gibi uygulamalarda, alıcıya iletilen gücü maksimize etmek veya aynı frekans bandında çalışan diğer sistemlerle elektromanyetik girişimlerini azaltmak için belirli bir yönde odaklanması gerekebilir (Shen vd., 2024). Bu tür durumlarda, yüksek kazançla sahip antenlere ihtiyaç duyulmaktadır (Y. He vd., 2024) ve bu antenleri tasarlamak için genel olarak iki yaklaşım kullanılmıştır. İlk yaklaşım, geniş aydınlatılmış açıklıklar oluşturarak yüksek yönlülük elde eden açıklık antenleri kullanılmasıdır. Açıklık ne kadar büyük ve açıklık üzerindeki alan fazları ve genlikleri ne kadar homojen olursa, yönlülük de o kadar yüksek olur. Bu tür antenlere örnek olarak horn anteni ve geniş çaplı parabolik yansıtıcı anteni verilebilir. Diğer yaklaşım ise küçük anten dizisi kullanmaktır; dizinin her bir elemanının belirli bir fazla uyarıldığı bu antenler, etkili bir şekilde homojen alanlara sahip geniş bir açıklık oluşturur (Balasubramanian vd., 2024).

Uydu ve uzay iletişim sistemlerinde, uzun mesafeli iletişimin zorluklarının üstesinden gelmek için yüksek kazançlı antenler kritik bir işleve sahiptir (Guanxuan Li vd., 2024). Geleneksel olarak, uzun mesafe uygulamalarındaki yüksek kazanç gereksinimleri, anten

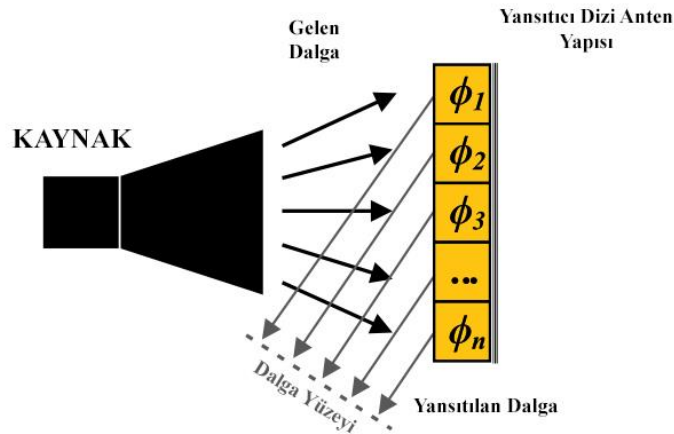
dizileri veya parabolik yansıtıcılar kullanılarak karşılanmaktadır. (Wei Zhang vd., 2024). Ancak, parabolik yansıtıcılar özellikle yüksek mikrodalga frekanslarında imalatı zordur. Bunun nedeni ise çanağın büyük kavisli yüzeyinin yüksek hassasiyetli bir imalat gerektirmesidir. (Cui vd., 2022). Öte yandan, faz dizili antenler, karmaşık hüzmeye şekillendirme ağ gereksinimleri nedeniyle karmaşık tasarım prosedürlerine sahiptir. (Ozzola vd., 2024). Son zamanlarda hem geleneksel dizilerin hem de parabolik yansıtıcılar dezavantajlarını azaltmak amacıyla yüksek kazançlı uygulamalar için “yansıtıcı dizi” ve “ileti dizi” adı verilen yeni ve kullanışlı bir anten türü sunulmuştur (Ning vd., 2024).

Faz dizileri, belirli fazlarla beslenen anten dizileri olarak tanımlanabilir ve yüksek yönlülük ve elektronik yeniden yapılandırılabilirlik elde etmek için iyi bir çözüm olarak önerilmiştir (M. Cai vd., 2024). Büyük yansıtıcı antenler veya horn antenlerinin aksine, faz dizisi tarafından üretilen hüzmeler çok hızlı bir şekilde elektronik olarak taranabilir (Ning vd., 2024). Faz dizileri elektronik hüzmeye yönlendirme için yaygın olarak kullanılmasına rağmen, besleme ağları oldukça kayıplıdır ve ön gerilim ağı büyük bir ayak izine sahiptir ve imalatı karmaşıktır (Baladi vd., 2023). İleti Dizi Anten (İDA) ve Yansıtıcı Dizi Anten (YDA) ise karmaşık besleme mekanizmalarına ihtiyaç duymadan uydu haberleşme sistemleri için yüksek kazançlı anten tasarım çözümleri sunmaktadırlar. Dizinin elemanları düzlemsel veya konformal düzenlemeler alabileceği için, faz dizileri genellikle diğer antenlere göre daha az hacimli olabilmektedir. (Guo vd., 2023). Ancak, faz dizileriyle ilgili temel zorlukluktan biri ölçeklenebilirliktir. Dizideki her bir elemanın ayrı ayrı uyarılması gerektiğinden, dizi boyutuyla karesel olarak artan iletim hatları uzunluğu gereklidir, bu durum, karesel olarak artan iletim hattı kayıpları ve alan gereksinimleriyle sonuçlanarak büyük bir dezavantaj oluşturur (Arruela vd., 2024). Bir dezavantajı da sınırlı tarama kapasitesidir, bu sınırlama, antenin yalnızca belirli bir açı aralığında etkili bir şekilde sinyal yönlendirebilmesi anlamına gelir. Bu durum, geniş bir alanda veya hızlı değişen sinyal yönlerine ihtiyaç duyulan uygulamalarda verimliliği azaltabilir ve esnekliği sınırlayabilir (Ansems vd., 2024). Besleme ağı ile ilişkilendirilen kayıplar ve karmaşıklık da önemli dezavantajlardır (Cheng vd., 2024).

YDA ve İDA olarak da adlandırılan lens dizileri, faz dizileri ve parabolik yansıtıcıların en iyi özelliklerini birleştirerek yüksek anten kazancı elde etmek için sunulan düzlemsel alternatiflerdendir (J. X. Wang vd., 2024). Bu yapılar, yansıtıcıların düz olmayan yüzeylerinden kaynaklanan imalat zorluklarını ortadan kaldırmaktadırlar. Basit bir besleme anteni, düz dizili baskı elemanlarının aydınlatılması ve uzamsal beslemelerinin kullanılması, faz dizilerindeki karmaşık besleme ağlarının kayıp ve parazit etkilerini yok etmektedir (Nam

vd., 2022). Ayarlanabilir elemanların entegrasyonuna izin verdiği için hüzme yönlendirmeyi uygulamak da mümkün olmaktadır (Weiquan Zhang vd., 2022). Ayrıca faz dizi antenleriyle kıyasladığımızda da YDA ve İDA'larda yüksek maliyetli faz dönüştürücüler yoktur (Luo vd., 2021). Parabolik yansıtıcılar, dielektrik mercekler ve faz dizileri gibi diğer seçeneklere kıyasla, yansıtıcı dizi ve ileti dizi, daha basit ve düşük kayıplı hüzme formu ağırlarıyla düzlemsel, hafif ve düşük hacimli bir çözüm sunan umut verici alternatiflerdir (W. Li vd., 2023).

Yansıtıcı diziler, genellikle Şekil 1.1'de de görüldüğü üzere bir dizi yansıtıcı antenin oluşturduğu yansıtıcı bir yüzey ve bu yüzeyi aydınlatan bir besleme anteninden oluşur (Reis vd., 2019). Yansıtıcı dizilerdeki her antenin yansıma fazı ve genliği, istenen ışınma örüntüsünü oluşturmak üzere uygun şekilde tasarlanmaktadır (N. Zhang vd., 2022). Bu anten yapısı hem faz dizilerinin hem de yansıtıcı antenlerinin avantajlarını bir araya getirmektedir (Z. Wang vd., 2023; B. J. Xiang vd., 2022). Ayrıca, YDA'lar, düşük profil, düşük maliyet ve çeşitlendirilmiş hüzmelendirme performans özellikleri göz önüne alındığında yansıtıcı antenlere karşı avantajlar sunabilir (L. Cai vd., 2023). Yansıtıcı diziler genellikle baskılı yapıları içerir ve geleneksel faz dizilerinde kullanılan karmaşık besleme ağlarına sahip değildirler. Bir büyük yansıtıcı açıklıkları, düz bir yansıtıcı dizi paneli tarafından kolayca gerçekleştirilebilir, bu da büyük/şekilli bir yansıtıcıya göre üretimi ve dağıtımı daha kolay hale getirir (Wu vd., 2023). Bu avantajlar, özellikle uzay uygulamaları için yansıtıcı dizileri iletişim uygulamaları için iyi bir aday yapar.

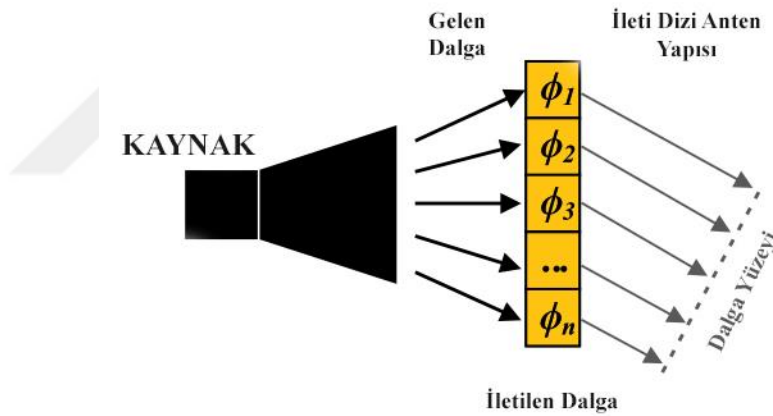


Şekil 1.1. Yansıtıcı Dizi Anten Yapısı

Kaynak: (Reis vd., 2019)

İDA'lar, elektromanyetik ışınımı odaklayarak yüksek kazançlı bir hüzme oluşturan, düzlemsel birim hücrelerden oluşan faz kaydırıcı yüzeylerdir. Bu antenler hem optik hem de

anten dizisi teorilerini birleştirir ve düşük profilli, yüksek kazançlı, yüksek ışıma verimliliği sağlayan, çok yönlü ışıma performansına sahip bir tasarım sunar. İDA'lar, özellikle milimetrik dalga frekanslarında yeniden yapılandırılabilir yüksek yönlendiriciliğe sahip anten tasarımları için önemlidir (Fan Yang, Atef Z. Elsherbeni ve Payam Nayeri, 2024). Şekil 1.2 bu yapıya örnektir. İDA, YDA'ya kıyasla birkaç avantaja sahiptir. İDA'lar, genellikle bir besleme kaynağı ve faz kaydırma yüzeylerinden oluşan, geleneksel faz dizilimlerine kıyasla hafif, düşük maliyetli ve yeniden yapılandırılabilirlik gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Y. Cai vd., 2024). Ayrıca, yansıtıcı dizilerde besleme anteni ışıma alanının aynı tarafında olduğu için besleme engeli bir zorluk oluştururken, ileti diziler için durum böyle değildir (Y. Gao vd., 2024). Aslında, besleme engelini ortadan kaldırılmasıyla, ileti diziler sadece uzak alanlarda hüzmeye üretmekle kalmaz, aynı zamanda yansıtıcılarda mümkün olmayan beslemeden kaynaklanan bir alanda hüzmeleri bir noktaya odaklamak için de kullanılabilir. İDA'lar ve YDA'lar aynı zamanda daha karmaşık yapılar oluşturmak için birleştirilebilir, bu da yansımali ve kırılmalı teleskoplardaki lensler ve aynalarda olduğu gibi yapılmıştır.



Şekil 1.2. İleti Dizi Anten Yapısı

Kaynak: (Reis vd., 2019)

Geleneksel yansıtıcılar ve merceklerle karşılaştırıldığında, ileti diziler ve yansıtıcı dizilerin önemli bir avantajı da düzlemsel olmalarıdır (T.-J. Li vd., 2022). Düzlemsel antenler, sadece duvarlar ve çatılar gibi günlük yapıların içine entegre etmekte daha kolay olmakla kalmaz, aynı zamanda taşınabilirlik açısından da avantaj sağlar; çünkü bunlar rulo halinde veya panellere ayrılarak kolayca sökülüp tekrar monte edilebilir (J. Wang vd., 2023). Eğer yeniden yapılandırılabilir olarak yapılmışlarsa, bir İDA'nın şeklindeki bozukluklar elektronik olarak düzeltilerek, anten uzaktaki bir konumda çalıştığında önemli bir avantaj sağlanabilir (Kabiri vd., 2023).

İDA tasarlarken genlik ve faz açısı olmak üzere çok önemli iki kriter bulunmaktadır. İDA birim elemanı 360° ya da daha fazla bir iletim faz açısına ve yüksek iletim genliğine sahip olması gerekmektedir (Tian, Lu, vd., 2022). Bu fazı sağlamak için genellikle kullanılan bazı yöntemler şöyledir; çok katmanlı Frekans Seçici Yüzey (FSY) tabanlı birim elemanın boyutu değiştirilebilir, yansıtan yama döndürülebilir, her bir birim hücredeki faz kayması elektronik olarak kontrol edilebilir, varaktör gibi analog ayarlama elemanı ya da PIN diyot ve radyo frekans mikroeletromekanik sistemler kullanılabilir (Nguyen vd., 2022). Çift bantlı İDA için temel zorluk, hücrelerin düşük iletim kaybıyla iki bantta iletim fazını bağımsız olarak değiştirmesini sağlamaktır. Bu özelliğe sahip tasarımlar geniş bir uygulama alanına sahiptir (L.-H. He vd., 2021).

Çok elemanlı yapıların kalınlığını azaltmak, anten tasarımlarında basit bir teknolojidir. Ancak, kalınlığın azaltılması anten verimliliğini düşürür ve bant genişliğini daraltır. Bu durum, eleman kaybının artmasına neden olur çünkü daha ince katmanlar elektromanyetik dalgaların etkili bir şekilde iletilmesini zorlaştırır ve bu da enerji kayıplarını artırır (X. Wang vd., 2023).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tezin ikinci bölümü olan literatür taraması kısmında, literatürde yer alan İDA tipleri; Hüzme Yönlendiren İleti Dizi Antenler, Polarizasyon Kontrol İleti Dizi Antenleri ve Hibrit (Hem Hüzme Yönlendirmeli Hem Polarizasyon Kontrollü) İleti Dizi Antenler olmak üzere üç temel başlık altında literatürdeki çalışmalarla örneklendirilerek inceleneceklerdir.

2.1. Hüzme Yönlendiren İleti Dizi Antenler

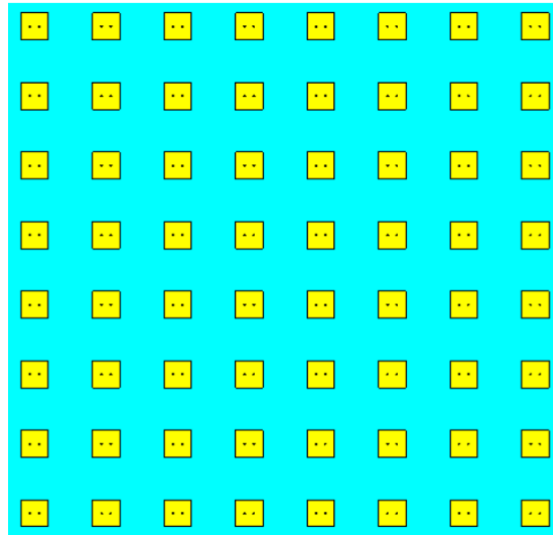
Hüzme yönlendiren iletici dizileri, iletilen elektromanyetik hüzmelerin yönlendirilmesi ve ayarlanması için tasarlanmış anten sistemlerini ifade etmektedir. Bu diziler, iletilen hüzmelerin yönlendirilmesi gereken hassas ve uyarlanabilir iletişim gerektiren uygulamalarda kullanılan gelişmiş anten sistemleridir. Bu bölümde hüzme yönlendirmeli İDA'ların literatürde yer alan örnekleri incelenecektir.

2024 yılında yapılan çalışma ile Li-Zhao Song ve diğerleri uydular arası iletişim için geniş açılı hüzme yönlendirmeye sahip bir tera hertz (THz) geniş bantlı iletici dizisi antenini sunmaktadır. Hüzme yönlendirme/çoklu hüzme iletici dizileri için besleme kaydırma temelli yeni bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. İki konjugat odakta gelen iki simetrik hüzmelerin teorik olarak analizi, istenen bir azimutal düzlemdeki İDA açıklığı üzerindeki faz telafilerini içermektedir. Üç odaklı dairesel bir besleme izi, odak noktasını değiştirerek geniş açılı ve düşük tarama kaybı hüzme yönlendirmeyi sağlar. Huygens meta yüzeyine dayanan tek bir dielektrik tabakaya sahip bir birim hücre modeli, düşük iletim kayıpları ile 360° aralığında fazı sürekli olarak ayarlayabilmektedir. THz iletici dizisi prototipi, geliştirilen hüzme yönlendirme yöntemi ve birim hücrelerle mühendislik yapılmıştır. Prototip, 180 ila 220 GHz arasında geniş bantlı kararlı bir hüzme yönlendirme performansına sahip geniş bir açı aralığında, $\pm 48^\circ$ ölçülen minimum tarama kaybı 1,4 dB'dir. Boresight hüzmesi ölçülen 3-dB kazanç bant genişliği ise %19,1'dir (L.-Z. Song vd., 2024).

Peicong Chen ve diğerlerinin 2023 yılında yaptıkları çalışmada yeni bir tam yönlü İDA önerilmiştir. Alıcı-verici birim hücresi, bir çift karşılıklı açılı dipol ve bir gecikme hattından oluşmaktadır. Birim hücre, verici biriminin yönünün dönebilme özgürlüğünü kullanarak $0^\circ/180^\circ$ faz kayması (1 bit) sağlar ve alıcı-verici hücreleri arasındaki ek gecikme hattı, $0^\circ/180^\circ$ arasında sürekli bir faz kayması sağlar. Ardından, 0° ile 360° arasında sürekli bir faz kayması olan 1 bit+ alıcı-verici birim hücreleri, tam yönlü bir dizi oluşturmak üzere bir araya getirilir. Ölçüm sonuçları, antenin çalışma bant genişliğinin %14,2 (26,1 ila 30,1 GHz arasında) olduğunu göstermektedir; bu bant içinde anten, yaklaşık 8,0 dB civarında yüksek bir

kazanç ve istikrarlı bir tam yönlü hüzme elde edebilir. İDA konseptini yüksek kazançlı bir tam yönlü antene nakleden bu tasarım, ilk kez bu çalışmada önerilmektedir. Önerilen tam yönlü İDA, dikkate değer yönlülük, geniş bant ve düşük çapraz polarizasyon seviyesi avantajlarını sergilemektedir (Chen vd. 2023).

Pooria Kabiri ve diğerlerinin 2023 yılında yaptıkları çalışmada 1-bit hüzme yönlendirme düzlemsel dizili antenlerdeki kuantizasyon lobunu azaltma yöntemi sunmuşlardır. Bu yöntem, dizinin merkezinden uzaklaştıkça fazın daha negatif hale gelmesi şeklindeki bir YDA besleme yönteminden esinlenmiştir. Bu tip eleman fazlama, kuantalama faz hatasının periyodunu bozar ve dolayısıyla kuantalama lobunu bastırır. Her 1-bit anten elemanı, iki simetrik besleme noktası aracılığıyla sağlanan ve iki PIN diyotu ile kontrol edilen 0° ve 180° olan iki faz durumuna sahiptir. Çalışmalarında önerilen düzlemsel dizinin 8×8 elemanlı bir örneği Şekil 2.1’de görüldüğü üzere 3,4 GHz’de üretilmiş ve test edilmiştir, bu da -45° ila $+45^\circ$ arasında ölçülen bir tarama aralığı, maksimum kuantalama lop seviyesi -9 dB ve 1,5 dB’lik bir kazanç değişimi göstermiştir. Önerilen 1-bit taramalı anten, diğer düzlemsel dizi antenlere kıyasla çok daha basit bir besleme ağına sahiptir. Önerilen dizi antenin toplam kalınlığı sadece $0,045\lambda_0$ ’dur (λ_0 serbest uzayda dalga boyu) ve aynı özelliklere sahip olan 1-bit YYIDA (Yeniden Yapılandırılabilir Yansıtıcı Dizi Anten) ve YYİDA’lara (Yeniden Yapılandırılabilir İletici Dizi Anten) kıyasla çok daha düşük bir profilde bulunmaktadır (Kabiri vd., 2023).



Şekil 2.1. Önerilen 8x8’lik Yapı

Kaynak: (Kabiri vd., 2023)

Peng Mei ve diğerlerinin 2021 yılında yaptıkları çalışmada iki farklı eleman, geniş bantlı davranışlara sahip bir İDA elde etmek için elemanların geometrik parametre yeniden

boyutlandırma sıkıntılarını önlemek amacıyla önerilmiştir. İki önerilen eleman da 24 ila 38 GHz arasında 1 dB' nin altında düşük ekleme kaybına sahiptir. Ayrıca, her iki eleman da boyutlarını yeniden boyutlandırmadan sırasıyla $\{-\pi, 0\}$ ve $\{-\pi/2, \pi/2\}$ ile iki set ayrık iletim fazını elde edebilmiştir. Yazarlar, önerdikleri iki elemana dayalı bir İDA prototipi tasarlamış ve üretmiştir. Ölçüm sonuçları, benzetim sonuçları ile uyum göstermiştir. Ölçülen 1 ve 3 dB kazanç bant genişlikleri sırasıyla 28,0–37,5 GHz (%29,0) ve 25,1–39,1 GHz (%43,7) olarak belirlenmiştir. 30 GHz' de elde edilen bir tepe açıklık verimliliği %44,7 ve 26,1 dB gerçekleşmiş kazanç ile deneysel olarak yazarların çalışmalarında elde edilmiştir (Mei vd., 2021).

FSY'nin geçiş bant özelliklerine dayanarak, Suyang Shi ve diğerleri 2022 yılında W-bandında lineer polarizasyon rotasyonu olan geniş bantlı bir İDA üzerine çalışma yapmışlardır. Birim hücrenin orta katmanı, gelen dalgayı 90° çevirebilen ok şeklinde bir yapıdır. Polarizasyon dönüş verimliliğini artırmak için bir çift paralel şerit polarizatör kullanılmıştır. 25×25 elemanlı İDA'nın prototipi standart baskı devre (PCB - Printed Circuit Board) teknolojisi ile üretilmiştir. %20'lik 3-dB kazanç bant genişliği içinde, ölçülen 28,7 dB'lik en yüksek kazanç ve buna karşılık gelen %38,2'lik açıklık verimliliği elde edilmiştir. Çalışmalarında benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırarak hata analizi de yapılmıştır. Önerilen İDA'nın performansı, milimetre dalga spektrumunda geniş bantlı ve düşük maliyetli uygulamalar için uygun bir çözüm olarak literatürde yerini almıştır (Shi vd., 2022).

FSY tabanlı İDA çalışmaları yapanlardan biri de Fuheng Zhang ve diğerlerindir. 2020 yılında yayınladıkları çalışmada, X-bandında çalışan bir FSY'ye sahip düşük profilli yüksek kazançlı bir İDA geliştirmişlerdir. Kullanılan FSY elemanı, yüksek iletim ve geniş açılı stabiliteye sahip üçüncü derece bir bant geçiren filtre gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Eleman döndürme teorisine dayanarak, FSY elemanları, istenen rotasyon açılarıyla düzenlenir ve gelen yarı küresel dalgayı çıkış düzlem dalgasına çevirmek için kullanılır; bu da ters polarizasyonlu, örneğin, bir sol el dairesel polarize (LHCP - Left-Hand Circular Polarization) dalgayı bir sağ el dairesel polarize (RHCP - Right-Hand Circular Polarization) dalgasına çevirir. Önerilen yapının odaklama yeteneğini ve geniş açılı hüzme kontrol yeteneğini deneysel olarak doğrulamak için prototipler tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, tam İDA'nın geniş taraftan %13,0 1-dB kazanç bant genişliği, %40,2 açıklık verimliliği ile %24,0 ve 3 dB eksenel oran (AR – Axial Ratio) bant genişliği elde edebildiğini göstermiştir. Ayrıca, önerilen yapı ile iyi bir dairesel polarizasyon

ışırma performansı, $\theta = 0^\circ$ ila 60° arasındaki hüzme eğme açılarında başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermişlerdir (F. Zhang vd., 2020).

Zheng Zhang ve diğerlerinin 2020’de yayınladıkları çalışmada, FSY tekniğini kullanarak tasarlanmış çift bant odaklı bir İDA önerilmektedir. Geleneksel İDA’ya göre, önerilen anten iki bantta elektromanyetik dalgayı odaklama yeteneği, kötü ölçüm ortamına yüksek direnç ve işlemesi kolay avantajlara sahiptir. İDA, dört adet birbirine benzeyen metal faz kayma katmanından oluşmaktadır ve her biri hava boşluğu ile ayrılmıştır. Metal katman üzerine dağıtılan elemanlar, merkezde I şeklinde bir yarığa ve merkezi simetriye sahip dört L şeklinde yuvadan oluşmaktadır (Şekil 2.2). I şeklindeki yuva uzunluğundaki değişiklik düşük frekans bandındaki faz değişikliğini etkilerken, L şeklindeki yuva uzunluğundaki değişiklik yüksek frekans bandındaki faz değişikliğini etkiler. İki tür yuva arasındaki karşılıklı etkileşim ihmal edilebilir. Önerilen anten, bir İDA ve bir besleme birimi içermektedir ve bu yapının benzetimi ve ölçümü yapılmıştır. Sonuçlar, 12 GHz’de ortalama odak noktası çapının (SD - Spot Diameter) 35,2 mm ve 18 GHz’de 24,5 mm olduğunu göstermektedir. Çift bant odaklı İDA, 11,8-12,2 ve 17,8-18,1 GHz olmak üzere iki frekans bandında çalışabildiğini hem benzetim hem de ölçüm sonuçları ile gösterilmiştir (Z. Zhang vd., 2020).



Şekil 2.2. I ve L Yuvalı Şekil

Kaynak: (Z. Zhang vd., 2020)

Álvaro F. Vaquero ve diğerlerinin 2023 yılında yayınladıkları bir çalışma, bu sapmaların tüm hüzme yönlendirmeleri arasında eşit bir dağılımı olan bir İDA faz düzeltme yöntemi için yeni bir tasarım yöntemi sunmaktadır. Bu önerilen yaklaşım, geleneksel tek odaklı faz düzeltme yaklaşımı ile karşılaştırıldığında önemli bir tarama performansı artışı sağlar. Önerilen yaklaşımın geçerliliğini doğrulamak için, Ka-bandında (30 GHz) $F/D \sim$

0,34 olan bir İDA tasarımını ele almışlardır. Çok odaklı bir İDA tasarımı, 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş birim hücreler kullanılarak imal edilmiştir. Önerilen konsepti vurgulamak için, anten konfigürasyonu minimuma indirgenmiştir. Besleme olarak kullanılan açık uçlu standart bir dalga kılavuzunun önünde düzlem içinde mekanik hareketlere sahip delikli bir dielektrik levha vardır. Bu anten, 30 GHz'de 25 dB kazanç, 2,5 dB tarama kaybı, Yan Lob Düzeyi (SLL – Side Lobe Level) <-10 dB ve %6,7 dB olan 1 dB bant genişliği ile 50°'ye kadar tarama yapabilmektedir (Vaquero vd., 2023)

Javid Ahmad Ganie ve Kushmanda Saurav'ın 2023 yılında yayınladıkları makale, milimetre dalga (26,3-29,3 GHz) uygulamaları için düşük profilli, iki boyutlu ve hüzmeye değiştirebilen bir ileti dizisi anteninin tasarımını sunmaktadır. İletim dizisi paneli, iki dielektrik tabaka polarizasyon döndürme faz kayma elemanı kullanılarak tasarlanmıştır. Faz kayma elemanı boyutları $0,22\lambda_0 \times 0,22\lambda_0 \times 0,14\lambda_0$ 'dır (λ_0 , 28 GHz frekansına karşılık gelir). İletim dizisi panelinin genel boyutu $5,6\lambda_0 \times 5,6\lambda_0$ 'dır ve odak-boyut (F/D – Focus to Diameter Ratio) oranı 0,5'tir, bu da tasarımlarını kompakt hale getirmiştir. Panel, 3×3 konfigürasyonda düzenlenmiş 9 portlu bir Yagi dizisi anteni ile beslenmektedir. Ofset antenler, ana hüzmeye 19,7 dB tepe kazanç ile 1,6 dB tarama kaybına uğrar. Farklı hüzmeler için elde edilen 9,8-11,2° 3-dB hüzmeye genişliği bulunmaktadır. Ofset antenlerin, ışıma örüntüsü odak antene göre $\pm 15^\circ$ eğimlidir, bu da 30°'lik bir ışıma kapsamı sağlar (Ganie ve Saurav, 2023).

Peng Mei ve diğerlerinin 2023 yılında yaptıkları bir çalışma, mekanik olarak yönlendirilebilen ileti dizisi antenlerinin performansını artırmak için ofset unifokal faz simetrisi konseptini sunmaktadır. Konseptin geçerliliğini doğrulamak amacıyla, ofset unifokal faz simetrisi kullanılarak yönlendirilebilen bir İDA performansı analiz edilmiş ve unifokal ile bifokal hüzmeye yönlendirme özelliklerine sahip İDA'lar karşılaştırılmıştır. Ölçülen sonuçlar, simüle edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiş ve ofset unifokal faz simetrisi tarafından etkinleştirilen hüzmeye yönlendirilebilen İDA'nın, tarama hüzmelerinin kazançlarını sürdürebildiğini, SLL bastırabildiğini ve hüzmeye tarama kapsamında kazanç düşüşünü azaltabildiğini göstermiştir. Ofset unifokal faz simetrisi, prensip olarak genelleştirilebilir bir yaklaşımdır (Mei vd., 2023).

2.2. Polarizasyon Kontrollü İletim Dizi Antenler

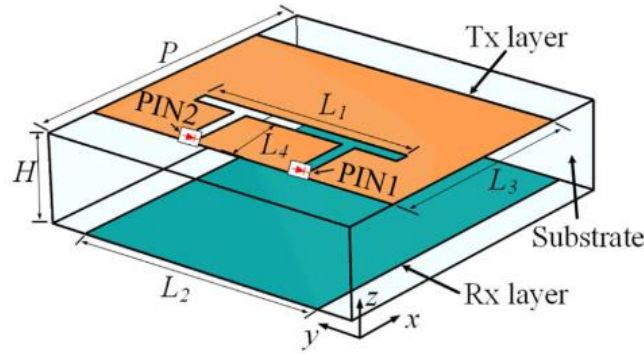
Polarizasyon kontrollü İDA, elektromanyetik dalgaların polarizasyon durumunu hassas bir şekilde manipüle etmek için tasarlanmış ileri düzey yapılandırmalardır. Bu yapılar,

dalga polarizasyonunun kontrolünü sağlayan tensor empedans yüzeylerini kullanır. Tensor empedans yüzeyleri, yüzey empedanslarının stratejik olarak ayarlanması yoluyla TE ve TM polarize dalgaların manipülasyonuna olanak tanır. Bu özellik, iletilen sinyallerin polarizasyon özelliklerinin çeşitli uygulamalar için özelleştirilmesine imkân verir. Yüzey empedanslarının ayarlanması, yansımanın kontrol edilmesi, TE ve TM polarize alanlar arasındaki fazın ve genliğin kontrol edilmesi gibi avantajlar sunar. Bu teknoloji, polarizasyon kontrolü için çok yönlü ve etkili bir çözüm sağlar (Selvanayagam ve Eleftheriades, 2016). Bu bölümde polarizasyon kontrol İDA'lar literatürdeki örnekleriyle çeşitlendirilerek incelenecektir.

2024 yılında Gao ve diğerlerinin literatürdeki örneklerine göre daha farklı bir anten çalışması yapmışlardır. Anten tasarımının benzersizliği, çapraz düzenlenmiş Huygens elemanları sayesinde elde edilen çift polarizasyon yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bu elemanlar, elektrik ve manyetik rezonans yapılarının bir kombinasyonunu içerir, böylece anten hem x hem de y polarizasyonlarında yüksek kazanç ve verimlilik sunar. İki farklı polarizasyonda eğriliklerin etkisi detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu inceleme antenin değişken eğriliklere karşı gösterdiği performansın anlaşılmasına olanak sağlamıştır. Ölçüm sonuçları, tasarımın simülasyonlarla tutarlı olduğunu ve antenin teorik olarak öngörülen yüksek performansı gerçek dünya koşullarında da sağlayabildiğini göstermektedir. 8 GHz frekansında, $0,24\lambda$ 'ye karşılık gelen 9 mm'lik bir dizi kalınlığı ve 300 mm'lik bir eğrilik yarıçapa sahiptir. Sonuç olarak, yazarlar tarafından önerilen bu çalışma, anten mühendisliği alanında önemli bir ilerlemeyi temsil etmekte ve çift polarizasyonlu, yüksek verimlilikli konformal iletici dizi antenlerin tasarımı ve uygulaması için yeni yollar sunmaktadır. (Gao vd. 2024).

Meng Xiang ve diğerlerinin 2023 yılındaki çalışmasında, iki dik mod üzerine dayalı yeni bir 1-bit çift katmanlı yeniden yapılandırılabilir İDA sunulmaktadır. Hüzme Yönlendirmeli İletici Dizi Anten geleneksel çok katmanlı tasarımların aksine, önerilen eleman Şekil 2.3'te görüleceği gibi tek bir dielektrik tabakası üzerine basılmış iki metal katmanı olan kompakt bir yapıya sahiptir. Yeniden yapılandırılabilir bir yapı elde etmek için, π şeklindeki yarı açıklığın her iki ucuna bir çift PIN diyot yerleştirilmiş (bir L şeklinde yarı açıklık ve ters L şeklinde yarı açıklık tarafından birleştirilmiştir) ve mod dönüşünün yönünü saat yönünde veya saat yönünün tersine değiştirebilirler. PIN diyotları kontrol etmek için bias ağı da iki metal katmana entegre edilmiştir. 16×16 elemanlı bir Yeniden Yapılandırılabilir İletici Dizi Anten (RTA - Reconfigurable Transmitarray) prototipi tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçülen RTA'nın 3 dB bant genişliği, 3,8 ila 4,7 GHz arasında %21,2'dir ve 4 GHz'de 18,2 dB

kazanç elde edilmiştir. Ayrıca, E- ve H-düzlemlerinde iyi bir hüzmeye tarama performansı da elde edilmiştir (M. Xiang vd., 2023).



Şekil 2.3. Tek Dielektrik Tabakalı Yapı

Kaynak: (M. Xiang vd., 2023)

Xiao-Feng Li ve diğerlerinin 2023 yılındaki çalışmalarında, kompakt ve düşük profil özelliklerine sahip geniş bant Dairesel Polarize Katlanmış İletici Dizi Anteni (CPFTA - Circularly Polarized Folded Transmitarray) tasarımı bildirilmektedir. Başlangıçta, y-polarize dalgaları yansıtan ve x-polarize dalgaları sağ el ile dairesel polarize dalgalarına dönüştüren çok modlu işletim özelliğine sahip geniş bant lineer-dairesel Polarizasyon Dönüşüm Metayüzeyi (PCM - Polarization Conversion Metasurface) alt yansıtıcı olarak geliştirilmiştir. Ek olarak, dairesel polarize vericiler döndürülerek, geometrik faz faz telafisi için kullanılabilir. Ardından, yüksek verimlilikli bir lineer-dan-lineer PCM, ana yansıtıcı olarak tasarlanmıştır. Doğrulama olarak, X bandında önerilen yüksek verimlilikli PCM'ler ile entegre geniş bant düzlem besleme kaynağına sahip bir CPFTA tasarlanmış, üretilmiş ve deneysel olarak karakterize edilmiştir. Ölçüm sonuçları, benzetim sonuçları ile iyi bir uyum göstermektedir ve -10 dB empedans bant genişliği %28,7, 3 dB kazanç bant genişliği %22,9 ve 3 dB AR bant genişliği %31,9 olarak ortaya çıkmıştır. Bu arada, 10,35 GHz'de elde edilen tepe kazanç 25,2 dB olup, maksimum açıklık verimliliği %28,3'tür. Geniş bant işletimi, düz kazanç ve entegrasyon kolaylığı avantajlarını birleştiren önerilen CPFTA, modern kablosuz iletişim için cazip bir adaydır (X.-F. Li vd., 2023).

Shuyang Yang ve diğerlerinin 2023 yılında yaptıkları çalışmada, doğrusal polarize beslemeli çift dairesel polarize çift hüzmeye ileten dizi (İD) tasarlama yöntemi sunulmuştur. Bir teoriye göre, Doğrusal Polarize (LP – Linear Polarization) dalga, LHCP ve RHCP dalgalarına ayrılabilir. LHCP ve RHCP fazı, elemanın başlangıç ve dönüş fazlarını ayarlayarak bağımsız ve eş zamanlı olarak telafi edilebilir, böylece İDA'nın LHCP ve RHCP hüzmeleri aynı anda

uzayda belirebilir ve bağımsız olarak kontrol edilebilir. Tasarlanan alıcı-verici eleman, yukarıdaki işlevleri gerçekleştirmek için tasarlanmış ve İDA üretilip ölçülmüştür. Çalışmadaki benzetim sonuçları deneysel sonuçlarla tutarlıdır (Yang vd., 2022).

Jun Hu ve diğerlerinin 2022 yılında yaptıkları çalışmada milimetre dalga uygulamaları için bir dizi doğrusal polarize besleme ile geniş bantlı Dairesel Polarize (CP – Circular Polarization) çok hüzmeli bir ileti dizisi tasarımını sunmaktadır. Bir besleme kaynağı olarak kullanılan LP bir dipol ve bir CP Manyetoelektrik (ME – Magnetolectric) dipolden oluşan yeni bir Alıcı/Verici (Tx) birim hücresi tasarlanmıştır. Bu birim hücre, LP kaynaktan gelen CP ışımaya dönüştürme yeteneğine sahiptir ve CP elementini döndürerek tam 360° geometrik faz kapsamı sağlama özelliğine sahiptir. Geometrik faz telafisi, Tx dizisi için uzaydan bağımlı bir döndürme açısı ayarlayarak gerçekleştirilir, böylece iyileştirilmiş bir AR performansına sahip yönlü CP ışıma üretirken geniş bir frekans tepkisi sergiler. Ayrıca, çok hüzmeli ileti dizisinin tasarımında küçük bir tarama kaybı elde etmek için bifokal bir strateji kullanılmıştır. Önerilen yöntemi doğrulamak için, yedi LP ME dipol kaynağı hüzmesiyle bir bifokal çok hüzmeli ileti dizisi prototipi üretilmiş ve ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, yedi hüzmenin $\pm 33^\circ$ 'lik bir aralığı kapsayabildiğini, 21,5 dB tepe kazanç ve 2 dB tarama kaybına sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, yansıma katsayısı ($|S_{11}| \leq -10$ dB), 3 dB AR ve yarı güç kazancı için örtüşen bant genişliği yaklaşık olarak %33,3'tür (23–32 GHz) (Hu vd., 2022).

2021 yılında Trung Kien Pham ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Ka-bandında Satcom yukarı-ve-aşağı bağlantılarda bağımsız ve geniş açılı tarama yeteneğine sahip bir çift bantlı İDA üzerine yapılan deneysel doğrulamayı sunmaktadır. İDA, iki alt diziden oluşmaktadır: biri 19,5 GHz'de merkezi frekansta aşağı bağlantıda çalışırken, diğeri 29 GHz'de merkezlenmiş bir şekilde yukarı bağlantıda çalışmaktadır. İDA düzeni, 1 bit birim hücrelerden oluşmakta olup, tasarımı hüzme tarama yeteneğini genişletmek için bifokal teknikten yararlanmaktadır. Önerilen bifokal prototip, 30×50 matriste düzenlenmiş 1500 yukarı bağlantı birim hücresi ve 31×51 dikdörtgen örgülü düzenlenmiş 1581 aşağı bağlantı birim hücresini içermektedir. 1-D tarama, besleme hornunun bir yönde kaydırılmasıyla doğrulanmıştır. Çalışma gösteriyor ki, İDA hüzmesi her iki bantta da bağımsız olarak $\pm 40^\circ$ ve $\pm 30^\circ$ aralıklarında tarama yapabilirken çok düşük bir tarama kaybını (< 2 dB) koruyabilir (Pham vd., 2021).

2.3. Hem Hüzme Yönlendiren Hem Polarizasyon Kontrollü İleti Dizi Antenler (Hibrit İleti Dizi Antenler)

Hibrit İDA'lar genellikle performans iyileştirilmesi amacıyla hüzme yönlendirme, polarizasyon kontrolü ve verimlilik gibi çeşitli teknoloji veya metodolojileri birleştiren yenilikçi tasarımları ifade etmektedirler. Bu diziler, mikroşerit yamalar, dielektrik mercekler ve muhtemelen diğer malzemeler veya yapılar gibi farklı elementlerin bir karışımını, tek bir sistem içinde entegre ederek kullanır. Hibrit yaklaşım, anten özelliklerinin optimizasyonunu amaçlar, örneğin belirli bir yönlü kazanç için gerekli olan eleman sayısını azaltmak veya bant genişliği ve polarizasyon kapasitelerini iyileştirmek gibi. Bu bölümde hibrit İDA' lar literatürdeki örnekleriyle birlikte incelenecektir.

Tang-Jing Li ve diğerlerinin 2023 yılında yayınladıkları çalışmada, tamamen düzlem yapılı bir yapıya sahip olan yeniden yapılandırılabilir katlanmış bir iletici dizi anteni (YYKİDA) sunulmaktadır. Bu çalışma, bir elektronik olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey ve Bir Polarizasyonu Döndüren Metayüzey (PRMS - Polarization Rotating Metasurface) içermektedir. 1-bit iletici faz yönlendirmesi gerçekleştirmek için yeniden yapılandırılabilir meta-atom üzerine bir çift PIN diyot anahtarı entegre edilmiş ve bir yama anteni, RFTA'yı (Reconfigurable Folded Transmitarray) beslemek için PRMS'nin ortasına entegre edilmiştir. Aynı zamanda, anten profilinin RTA'ya göre yaklaşık 1/3 oranında azaltıldığı görülmüştür. Yazarlar 12×12 elemanlı RFTA prototipi tasarlamış, üretmiş ve ölçmüştür. Çalışmanın deneysel sonuçları, 5,8 GHz'de 13,4 dB kazanç elde edildiğini ve iki boyutlu hüzme tarama açısının $\pm 60^\circ$ 'yi kapsadığını göstermektedir. Bu çalışma, geleneksel RTA'nın profilini önemli ölçüde azaltarak literatürde, sınırlı alanlı kablosuz iletişim sistemleri için umut vaat eden bir aday olarak yer almıştır (T.-J. Li vd., 2023).

2023 Şubat ayında yayınladıkları bir çalışmada Bin Xi ve diğerleri, düşük profil geniş bantlı 2-Bit yeniden yapılandırılabilir İDA ile 2-D hüzme tarama kapasitesine sahip katlanmış bir tasarım önerilmektedir. Tüm YİDA'nın (Yeniden Yapılandırılabilir İleti Dizi Anten) profilini azaltmak için hüzme izleme mekanizması ve besleme optimizasyonu tanıtılmıştır. Bir 1-Bit geniş bantlı YİDA elemanı, düzenli altıgen rezonant yama ve PIN diyotlara dayalı olarak, polarizasyon seçim fonksiyonu ve polarizasyon rotasyon fonksiyonu ile tasarlanmıştır. Ayrıca, YİDA elemanının performansını doğrulamak için özel olarak tasarlanmış bir dalga kılavuzu yapısı üretilmiştir. Düşük profil tasarımını gerçekleştirmek için yansıtıcı yüzey olarak görev yapan geniş bantlı Polarizasyon Rotasyon Yansıtıcı Dizi (PRRA - Polarization Rotation Reflectarray) elemanı önerilmiş ve horn yerine geçmesi için 2×2 U-çentikli

düzlemsel bir yama anteni tasarlanmıştır. Bu tasarımlarla, profil geleneksel uzay beslemeli mimariye kıyasla üçte ikisine kadar sıkıştırılabilir. 16×16 elemanlı düşük profil YİDA tasarlanmış ve üretilmiştir. Ölçülen ve benzetim ışıma desenleri iyi bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Ölçülen en yüksek kazanç 19,6 dB'dir, bu da bir enine açıklık verimliliğine karşılık gelir ve %13,8'dir ve ölçülen 3 dB kazanç bant genişliği %17,5'tir (15,1 ila 18 GHz arasında). Her iki ana düzlemde de $\pm 60^\circ$ tarama kapsamına sahip iyi bir tarama performansı elde edilmiş olup tarama kayıpları sırasıyla 3,97 ve 4,15 dB'dir. Ayrıca, ölçülen SLL ve çapraz polarizasyon seviyeleri, tüm hüzmeye yönlendirmelerinde sırasıyla -15 dB ve -20 dB'den daha iyi olduğu gözlenmiştir. (Xi vd., 2023).

Xuanfeng Tong ve diğerlerinin 2023 yılında yayınladıkları çalışmada, anizotropik empedans yüzeyleri (AISs - Anisotropic Impedance Surfaces) ve hibrit faz telafisi stratejisine dayanan çift-CP çok hüzmeli İDA önerilmiş ve gösterilmiştir. Sabit bir dinamik faz farkına sahip sekiz tamamen düzleştirilmiş İDA hücresi, $0,48\lambda_0 \times 0,48\lambda_0$ 'lık bir periyodisiteye ve $0,71\lambda_0$ toplam kalınlığa sahip olarak tasarlanmıştır, burada λ_0 merkez frekansta serbest uzay dalga boyudur. Tasarlanan sekiz hücre üzerinde Berry fazı belirleyen döndürme açıları tanıtarak, çift-CP iletim faz gecikmeleri bağımsız bir şekilde elde edilebilir. Ayrıca, düzlemsel çift-CP anten dizileri çok hüzmeli İDA'nın besleme kümesi olarak tasarlanmış ve kullanılmıştır. Bifokal çift-CP çok hüzmeli İDA anteni, sekiz RHCP hüzmeye ve sekiz LHCP hüzmeye üretir. Ölçülen tepe kazanç değerleri 21,1 ile 23,7 dB arasında değişmekte olup, AR değerleri tüm hüzmeler için 3 dB'nin altındadır (Tong vd., 2023).

2022 yılında Fan Wu ve diğerlerinin yayınladıkları çalışmada, her polarizasyon için geniş bant genişliğine ve bağımsız hüzmeye kontrolüne sahip çift polarizasyonlu İDA sunmaktadır. Ortak ışıma yapısı ve birbirine dik yerleştirilmiş besleme sondaları ile ME dipol kullanılarak geniş bantlı çift polarizasyonlu işletim sağlayan yeni düşük ekleme kaybı iletici dizi elemanı önerilmektedir; her polarizasyon için 1 bit faz ayarı, %23'lük bir fraksiyonel bant genişliği üzerinden çapraz polarizasyonun manipülasyonunda ek özgürlükler ile bağımsız olarak gerçekleştirilebilir. Farklı koşutlanmış hüzmeye demeti ve/veya çapraz polarizasyon manipülasyonu sağlayabilen üç iletici dizi, 23,5 ile 32,5 GHz arası kapsayan milimetre dalga frekanslarında tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Prototiplerin ölçüm sonuçları, simülasyonlarla makul derecede iyi bir uyum göstermekte olup, geniş bant işletimi ve bağımsız hüzmeye kontrollerini doğrulamaktadır (Wu vd., 2022).

2022 yayınladıkları bir çalışmada Myeongha Hwang ve diğerleri, S-bandı radar uygulamaları için miniyatürize birim hücrelerden oluşan çok işlevli bir İDA önerilmektedir.

Birim hücre boyutu $0,4\lambda_0 \times 0,4\lambda_0$ 'dır ve bir Alıcı (Rx) anteni, miniyatürize edilmiş indüktif yüklü yansıma tipi faz kaydırıcı, polarizasyon dönüşümü için bir PIN diyot anahtarı ve çift polarizasyonlu İletim (Tx) anteni içermektedir. Rx ve Tx anten türleri, birbirine bağlı yığılmış yama antenleridir. Tasarlanan yansıma tipi analog faz kaydırıcının alanı, geleneksel yansıma tipi hibrit bağlayıcı tabanlı faz kaydırıcıya göre %36 daha küçüktür. $0 \sim 330^\circ$ analog faz kaydırma ile gerçekleştirilen 3-bit faz kaydırma kabiliyetine sahiptir. Tasarlanan SPDT PIN diyot anahtarı, iletilen dalganın polarizasyonunu seçebilir ve 23 dBm yüksek giriş RF gücünü kabul edebilir. Birim hücresinden yapılmış önerilen 8×8 İDA, 0,33 F/D ile yaklaşık 7,9 dB kazanç sağlar ve merkez frekansta dikeyden yatay polarizasyona ve dikeyden dikeye polarizasyon dönüşümleri için 90° 2D hüzmeye yönlendirmesi gerçekleştirir (Hwang vd., 2022).

Guowei Li ve diğerlerinin 2021 yılındaki çalışmalarında, bifokal prensibe dayalı düşük profilli, tamamen düz Katlanmış Bir İletim Dizisi Anteni (FTA) olan çok hüzmeli bir anten önerilmektedir. Bu anten, bir yansıtıcı dizi, bir ileti dizisi ve bir grup aynı özelliklere sahip düzleme besleme anteninden oluşmaktadır. İletim dizisi, meta yüzey ile geliştirilmiş olup yüksek iletim verimliliği ve 3 boyutlu telafi fazlarına ulaşmaktadır. Besleme antenleri arasındaki izolasyonu artırmak için besleme elemanlarının çeşitliliğinden faydalanarak yeni bir teknik önerilmektedir. Çalışmada örnek olarak, Ku-bandında çalışan birçok hüzmeli FTA tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. DeneySEL sonuçlar, 22,7 dB'lik bir tepe kazanç ve $\pm 21^\circ$ tarama aralığı elde etmiş olup, maksimum besleme izolasyonu 24 dB'dir (Guowei Li vd., 2021).

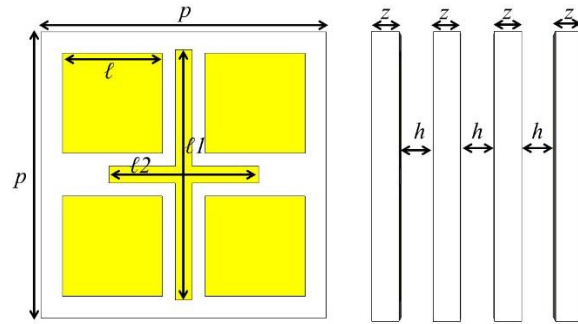
3. BİRİM HÜCRE TASARIMLARI

Bu bölümde, tezde sunulan İDA' lara ait birim hücre tasarımları verilerek bu tasarımlara ait benzetim sonuçları yorumlanmıştır. Tezde üç farklı İDA tasarımı için üç farklı birim hücre tasarlanmıştır ve bu tasarımlar; Tasarım 1 (9 GHz), Tasarım 2 (10 GHz) ve Tasarım 3 (28 GHz) isimleri ile ayrı konu başlıkları altında incelenmiştir.

Birim hücreler tasarlanırken, periyodik uzaklığın faz dağılımını etkilemesi nedeniyle, birim hücrenin boyutları yarım dalga boyuna yakın değerlerde seçilmelidir. Birim hücre tasarımında, geniş bant genişliği elde etmek için 360°'lik bir faz aralığı sağlamak oldukça önemlidir. Bu faz aralığı, birim hücrelerin bant genişliği ve performansını doğrudan etkiler (Huang vd., 2021).

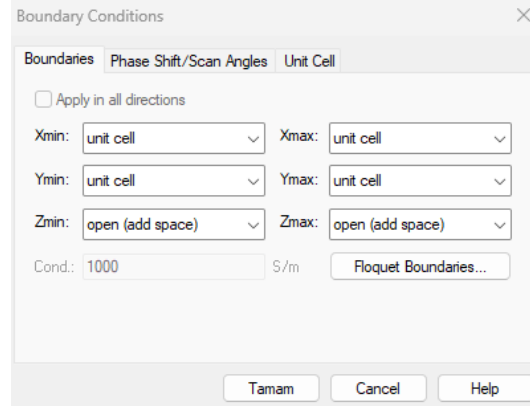
3.1. Tasarım 1

Tasarım 1'e ait birim hücrenin boyutları 17 mm × 17 mm'dir (9 GHz için yaklaşık olarak $0,51\lambda \times 0,51\lambda$). Birim hücre geometrisi Şekil 3.1 (a)'da görüldüğü üzere artı ve dört kare iletkenden oluşmaktadır. Bu artı ve karelerin uzunlukları ℓ boyutuyla orantılı olarak değişmektedir. Tasarımda ucuz ve mekanik olarak stabil olması nedeniyle (Selvanayagam & Eleftheriades, 2016) $\epsilon_r=4,3$ bağıl dielektrik katsayısına ve 1,6 mm kalınlığına sahip FR-4 dielektrik tabaka tercih edilmiştir. Birim hücre 4 katmandan oluşup her bir katman arasında 2 mm hava boşluğu bulunmaktadır (Şekil 3.1 (b)).



Şekil 3.1. Tasarım 1 Birim Hücre Geometrisi (a) Ön Görünüm (b) Yan Görünüm

Tasarımı yapılan Tasarım 1 birim hücrenin benzetimi CST Microwave Studio paket programında gerçekleştirilmiştir. Birim hücre analizleri yapılırken sınır koşulları olarak “Unit Cell” seçilmiştir (Şekil 3.2). Bu ayarlar, tasarımı yapılan diğer birim hücrelerde de aynıdır.



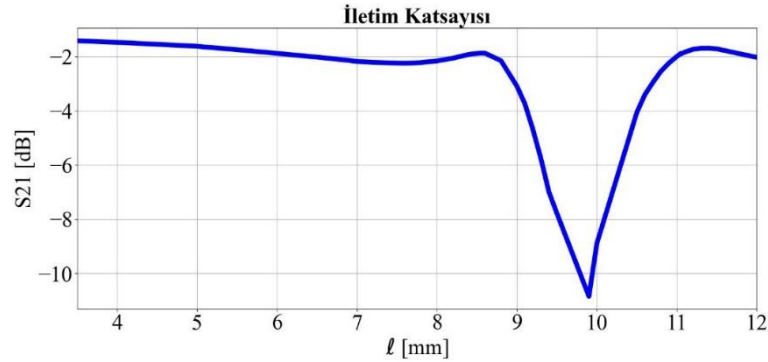
Şekil 3.2. Birim Hücre Sınır Koşulları

Birim hücrenin analizi yapılırken ℓ_2 parametresi, “parameter sweep” ile 3,5 mm’den 12’ye kadar yapılmıştır. Bu değerlerin seçilmesindeki amaç, birim hücrenin fazının 0 ile 360° olduğunu net olarak göstermek istenmesindendir. Tasarım 1 olarak isimlendirilen artı ve karelerden oluşan birim hücrenin parametre değerleri Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Tasarım 1 için Tasarım Parametreleri

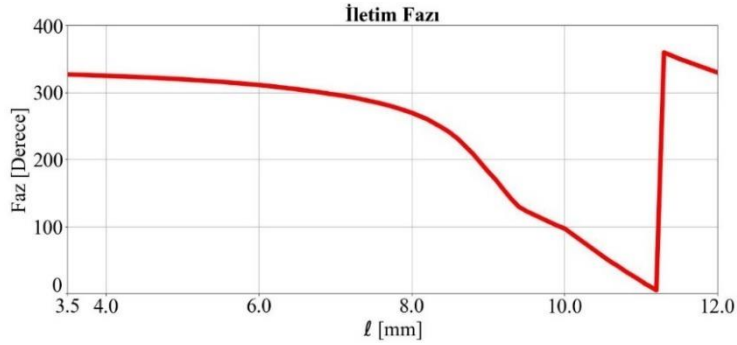
Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
p	17	ℓ_2	$\ell * 0,4$
ℓ	3,5 – 12 (değişken)	h	2
ℓ_1	$\ell * 0,6$	z	1,6

Tablo 3.1’de görüldüğü üzere ℓ_1 ve ℓ_2 değerleri ℓ değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Değişken parametre olan ℓ parametresine göre birim hücre iletim katsayısı grafiği Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tasarım 1 Birim Hücresinin 9 GHz’deki İletim Katsayısı Grafiği

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, birim hücre iletim fazı, ℓ parametresi 3,5 mm – 12 mm değerleri arasında değişirken 360°'lik bir faz farkı sağlamaktadır. Bu da İDA tasarımı için arzu edilen faz aralığını sağlamaktadır. Tasarlanan birim hücrenin değişken ℓ parametresine göre iletim fazı grafiği Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

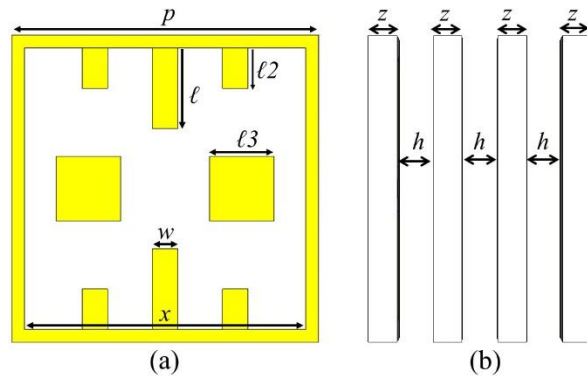


Şekil 3.4. Tasarım 1 Birim Hücresinin 9 GHz'deki İletim Fazı

3.2. Tasarım 2

Tez kapsamında tasarımı yapılan ikinci çalışmanın merkez frekansı 10 GHz'dir ve X-Band uygulamaları için tasarlanmıştır.

Önerilen birim hücre geometrisi, Şekil 3.5 (a)'dan görüldüğü üzere iki simetrik kare ile alt ve üst taraflarda toplamda altı adet simetrik çubuk içermektedir. Ortadaki çubuklar yanlardaki çubuklarla farklı uzunluklara sahiptir. Şekil 3.5 (b), birim hücrenin dört katmandan oluştuğunu göstermektedir. FR-4 dielektrik tabakası kullanılarak tasarlanan yapıda katmanların sadece ön yüzlerinde metalik yamalar bulunmaktadır. Her bir katmana ait dielektrik tabakanın kalınlığı 1,6 mm ve bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,3$ 'tür. Dielektrik tabakalar 2,4 mm'lik bir hava boşluğu ile ayrılmıştır. Tasarlanan bu birim hücre, özellikle X bandı içinde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Belirlenen merkez frekansı 10 GHz'dir. Birim hücre, 16,68 mm $\times$ 16,68 mm boyutlarındadır. Birim hücre tasarımı Şekil 3.5'te sunulmuş ve birim hücreye ait tasarım parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

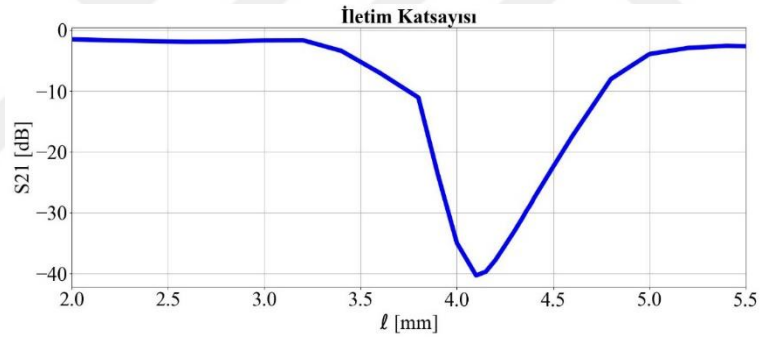
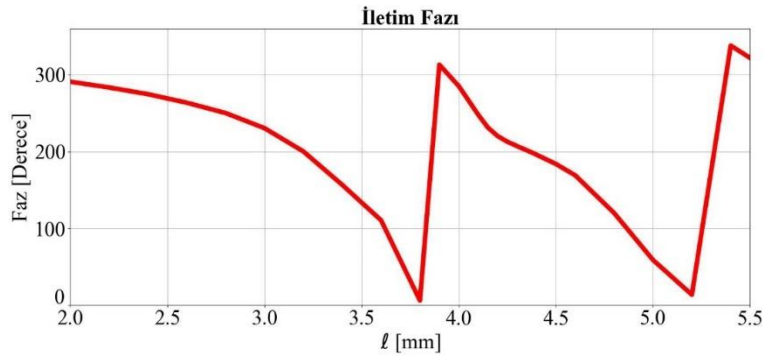


Şekil 3.5. Tasarım 2 Birim Hücre Geometrisi (a) Ön Görünüm (b) Yan Görünüm

Tablo 3.2. Tasarım 2 için Tasarım Parametreleri

Parametre	Uzunluk(mm)	Parametre	Uzunluk(mm)
p	16,68	$\ell 2$	$\ell * 0,5$
x	15,29	$\ell 3$	$\ell * 0,8$
w	1,39	z	1,6
ℓ	2 – 5,5 (değişken)	h	2,46

Tasarımı yapılan birim hücreye ait değişken ℓ parametresi için iletim katsayısı grafiği Şekil 3.6’da ve birim hücreye ait iletim fazı grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.7’de görüldüğü üzere, ℓ ’nin değişim aralığı için birim hücre 360° ’lik faz aralığı sağladığı görülmektedir ve İDA tasarımı için uygun olduğunu göstermektedir.

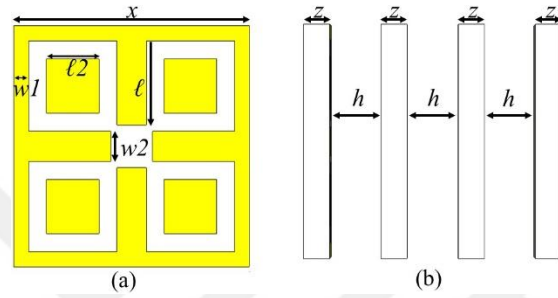
**Şekil 3.6.** Tasarım 2 Birim Hücresinin 10 GHz’deki İletim Kat Sayısı Grafiği**Şekil 3.7.** Tasarım 2 Birim Hücresinin 10 GHz’deki İletim Fazı

3.3. Tasarım 3

Tez kapsamında yapılan üçüncü tasarım çalışması, ITU (International Telecommunication Union, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği) standartlarına göre 5G

bantlarından olan n257 bandında yer alan 28 GHz frekansında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Önerilen birim hücrenin tek yüzünde iletken tabaka bulunmaktadır. Birim hücre geometrisi Dört kare döngü açıklığının ortada kare açıklık ile birleşmesi ile oluşturulmuştur. Önerilen yapı 4 özdeş katmandan oluşmaktadır (Şekil 3.8). Bu özdeş katmanlar 1 mm'lik hava boşluğu ile birbirinden ayrılmıştır. Birim hücre tasarımında dielektrik tabaka, kalınlığı 0,508 mm olan Rogers RT6002 kullanılmıştır. Birim hücrenin bir kenar uzunluğu 4 mm ($0,37\lambda_0$) ve toplam kalınlığı ise yaklaşık $0,37\lambda_0$ olarak tasarlanmıştır.



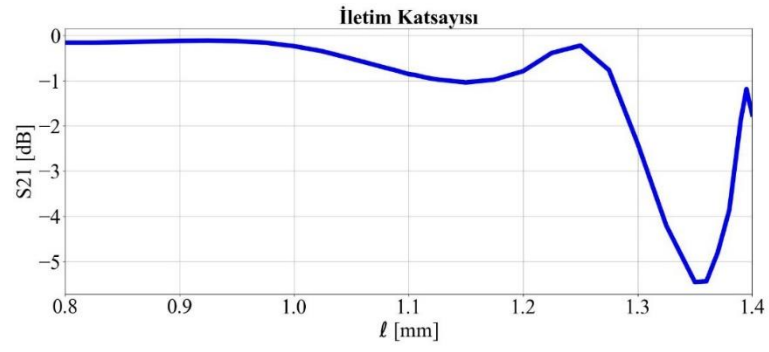
Şekil 3.8. Tasarım 3 Birim Hücre Geometrisi (a) Ön Görünüm (b) Yan Görünüm

Tablo 3.3. Tasarım 3 için Tasarım Parametreleri

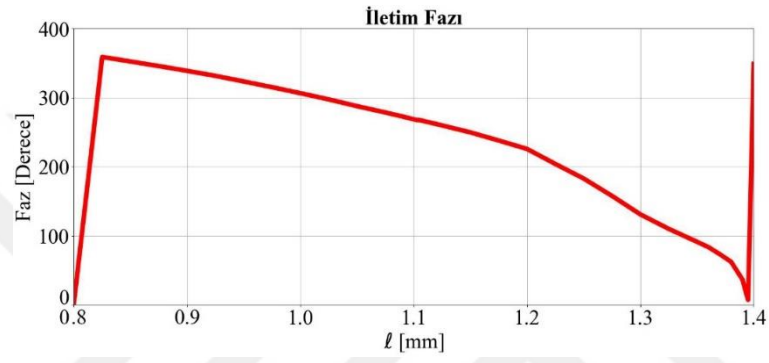
Parametre	Uzunluk(mm)	Parametre	Uzunluk(mm)	Parametre	Uzunluk(mm)
x	4	ℓ	0,8 – 1,375 (değişken)	z	0,508
$w2=2 * w1$	0,5	$\ell2$	$0,8 * \ell$	h	1

Birim hücre geometrisine ilişkin tasarım parametreleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Tablo 3.3’de gösterildiği üzere birim hücre geometrisine ilişkin bazı tasarım parametreleri denklemler kullanılarak birbiri ile ilişkilendirilmiştir, dolayısıyla ℓ parametresi değiştikçe tasarım parametreleri etkileneceği için geometri bu parametreye bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 3.9’da önerilen Tasarım 3 isimli birim hücreye ait ℓ tasarım parametresine bağlı olarak iletim katsayısı karakteristiği görülmektedir. Şekil 3.10 Tasarım 3 isimli birim hücre tasarımının ℓ tasarım parametresine göre iletim fazını vermektedir. Buradan görüldüğü üzere Tasarım 3 isimli birim hücre, ℓ parametresinin 0,8 mm ile 1,4 mm arasındaki değerlerinde 360° ’lik faz aralığını sağlamaktadır ve İDA tasarımı için istenen yapıdadır.



Şekil 3.9. Tasarım 3 Birim Hücresinin 28 GHz'deki İletim Katsayısı



Şekil 3.10. Tasarım 3 Birim Hücresinin 28 GHz'deki İletim Fazı

4. İLETİ DİZİ ANTEN TASARIMLARI

Tezim bu bölümünde, Bölüm 3'te tasarımları verilen birim hücrelerin dizi haline getirilerek CST Microwave Studio ile elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir.

Tasarımı verilen birim hücrelerde, her bir birim hücre için, kaynak antenin o hücreye olan faz gecikmesini telafi ederek belirli bir yönde hüzme odaklamak amacıyla belirli bir faz dağılımı oluşturulurken, gerekli iletim fazı, İDA'larda genel olarak şu şekilde hesaplanır:

$$\psi_{ij} = k (R_{ij} - \vec{r}_{ij} \cdot \hat{r}_0) + \psi_0 \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de ψ_{ij} ij'inci birim hücre için gerekli olan derece cinsinden iletim fazını, k serbest uzaydaki yayılım sabitini, R_{ij} ij'inci elemanın besleme anteninin merkezine olan metre cinsinden uzaklığını, $\vec{r}_{ij}$ ij'inci eleman için pozisyon vektörünü, $\hat{r}_0$ ana hüzme birim vektörünü ve ψ_0 derece cinsinden faz sabitini temsil etmektedir. Bu denklem kullanılarak Bölüm 3'te verilen her bir tasarım için genelleştirilmiş ve oluşturulan kod yardımı ile faz dağılımları hesaplanmıştır.

Tasarımları yapılan İDA'ların açıklık verimliliği genelleştirilmiş denklem (4.2) ile hesaplanmaktadır:

$$n_{ap} = \frac{G}{D_{max}}, D_{max} = \frac{4\pi A}{\lambda_0^2} \quad (4.2)$$

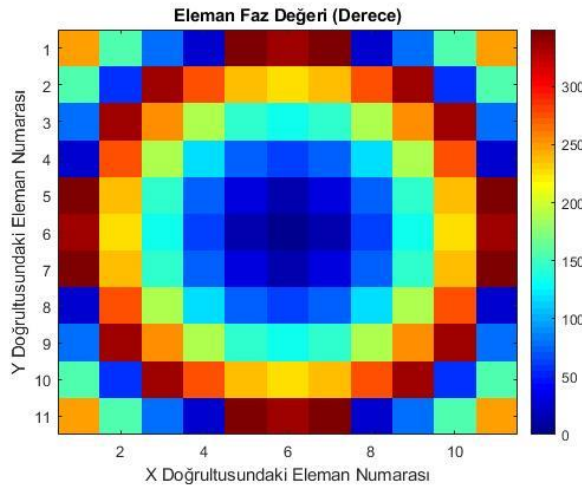
Burada G kazanç, D_{max} maksimum yönlülük, A antenin açıklık alanı, λ_0 serbest uzay dalga boyunu temsil etmektedir.

4.1. Tasarım 1 Birim Hücresi ile Oluşturulan İleti Dizi Anten

Dizide yer alacak her bir birim hücre için gerekli iletim fazı hesaplama formülü Denklem (4.1)'de verilmiştir. (0,0) koordinatındaki birim hücre için Denklem (4.1) kullanarak örnek bir faz hesabı yapacak olursak; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\lambda = \frac{3 \times 10^8}{9 \times 10^9} = 0,0333m$ olarak denklemde yerine yazıldığında $k = \frac{2\pi}{\lambda} = 185,5 \text{ rad/m}$ olarak elde edilir. R_{ij} burada R_{00} olarak seçilip merkezdeki dizi elemanının faz hesaplamasında kullanılacaktır. $R_{00} = A \times F/D = 187 \times 0,53 = 99,11 \text{ mm}$ olarak elde edilir. Burada R_0 , dizinin merkezinin besleme antenine olan uzaklığını ifade eden referans değeridir ve her koordinattaki birim hücre faz dağılımı hesabı yapılırken sabittir. Burada da R_{00} dizinin merkez hücresi olduğundan $R_0 = R_{00}$ yani 99,11 mm olarak alınır. ψ_0 faz sabiti olup 0 olarak alınır. (0,0) koordinatındaki eleman için gerekli olan faz hesabı şu hale gelir; $\psi_{00} = k (R_{00} - R_0) + \psi_0$. Dolayısıyla denklem şu şekilde sadeleşir; $\psi_{00} = k (99,11 - 99,11) + 0 = 0$. Sonuç olarak (0,0) koordinatındaki eleman için faz değeri 0

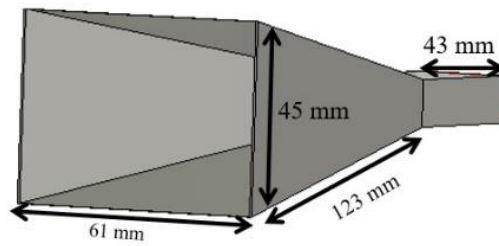
olarak hesaplanmıştır. Örnek olarak sunulan bu hesaplama her koordinattaki dizi elemanı için tekrarlanır ve faz dağılım diyagramı elde edilir.

Yapılan bu işlemler sonucunda $i=0$ ve $j=0$ olan eleman için 0 olarak hesaplanan faz değeri, Şekil 4.1’de verilen faz dağılımı grafiğinde de görülmektedir. Buradaki hesaplama örnek olarak yapılmıştır. Tüm dizi için hesaplama Denklem (4.2) kullanılarak oluşturulan MATLAB kodu yardımı ile iteratif olarak hesaplanmış ve Şekil 4.1’de verilen faz dağılımı oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. Tasarım 1 İDA Eleman Faz Dağılımı

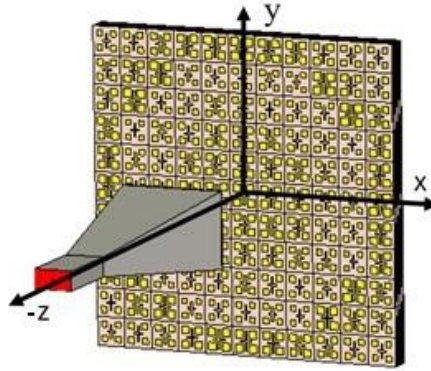
Yukarıda örneği verilen hesaplamalar ile elde edilen faz dağılımına göre dizi haline getirilen Tasarım 1 İDA'yı beslemek için uygun frekanslarda çalışan horn anten tasarlanmıştır. Tasarlanan horn antene ait boyutlar Şekil 4.2 de verilmektedir.



Şekil 4.2. Tasarım 1 ve 2 İDA'ların Beslemesinde Kullanılan Horn Anten Boyutları

Kaynak anteni İDA'dan 100 mm odak uzaklığına (F) yerleştirilmiştir. Böylece yaklaşık 0,53 (F/D) oranı ile yerleştirilmiştir. 11×11 elemanlı İDA antenin benzetim programındaki görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. Yapının özellikle 11×11 birim hücre sayısına sahip olacak şekilde tasarlanma sebebi, standart üretim boyutlarına uydurarak tasarımın performansı etkilenmeden daha uygun maliyetli fabrikasyon sürecidir. CST

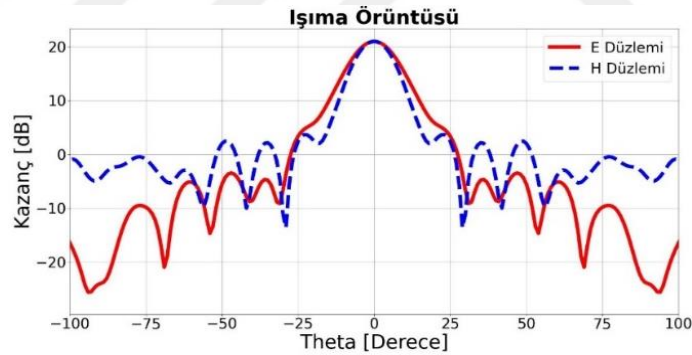
Microwave Studio paket programı ile yapılan benzetim süresini düşürmek amacı ile yapının dörtte birinin analiz edilebilmesi amacıyla simetri düzlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.3. Horn Anten ile Beslenen Tasarım 1 İDA

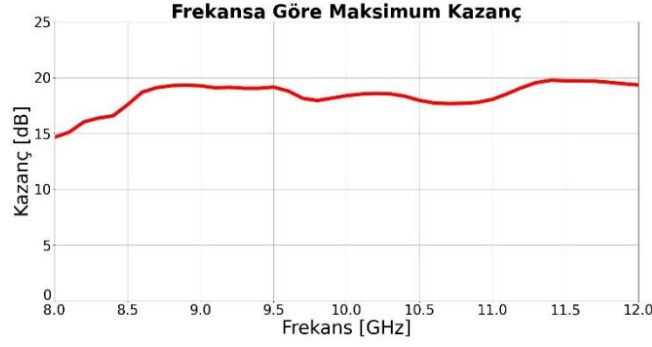
Tasarım 1'e ait birim hücre ile oluşturulan İDA'nın 9 GHz frekansındaki E-düzlemi ($\phi=0^\circ$) ve H-düzlemi ($\phi=90^\circ$) ışıma örüntü grafikleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, denklem (4.1) ile yapılan tasarım parametresi - faz dağılım hesaplamaları sonucunda ana hüznemin $\theta=0^\circ$ olması sağlanmıştır. E-düzleminde yan kulakçık seviyesi yaklaşık olarak -24,5 dB iken H-düzleminde yan kulakçık seviyesi -18,2 dB olarak gözlenmiştir.



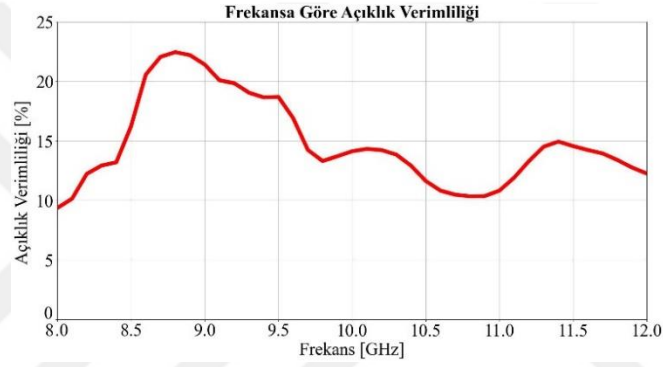
Şekil 4.4. Tasarım 1 İDA için 9 GHz E ve H Düzlemi Işıma Örüntüsü

Sonuç olarak elde edilen maksimum kazanç benzetim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Sunulan Tasarım 1 İDA'nın 1- dB ve 3- dB kazanç bant genişlikleri sırasıyla %12,12 ve %49,43 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.5'de görüldüğü üzere, Tasarım 1 İDA'nın 9 GHz frekansındaki kazancı 19,28 dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Tasarım 1 İDA için Maksimum Kazanç Benzetim Sonucu

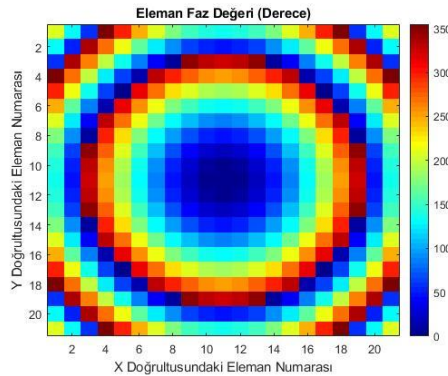
Bölüm 4'te verilen Denklem (4.2) kullanılarak açıklık verimliliği hesaplandığında, İDA'nın 9 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %21,3'tür. Denklem (4.2) kullanılarak oluşturulan frekansa göre açıklık verimliliği grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Tasarım 1 İDA için Açıklık Verimliliği

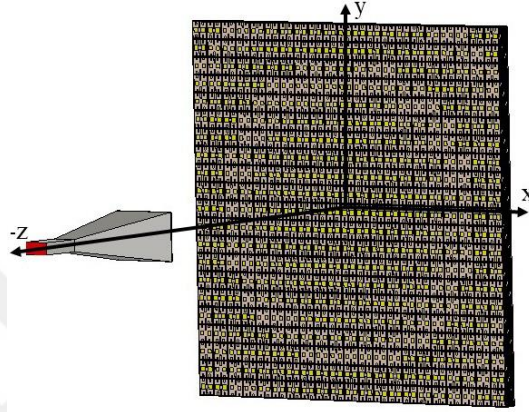
4.2. Tasarım 2 Birim Hücresi ile Oluşturulan İleti Dizi Anten

Bölüm 3'te anlatılan ve Tasarım 2 olarak isimlendirilen birim hücreye ait parametre – faz değişim grafiğinden elde edilen değerler kullanılarak Denklem (4.1) yardımı ile hesaplanmıştır. Anlatılan hesaplama MATLAB kodu yardımı ile dizi antenin her bir elemanı için iteratif olarak hesaplanmıştır. Böylece tasarlanan dizide yer alan her bir elemana ait faz dağılımı elde edilmiştir. (Şekil 4.7).



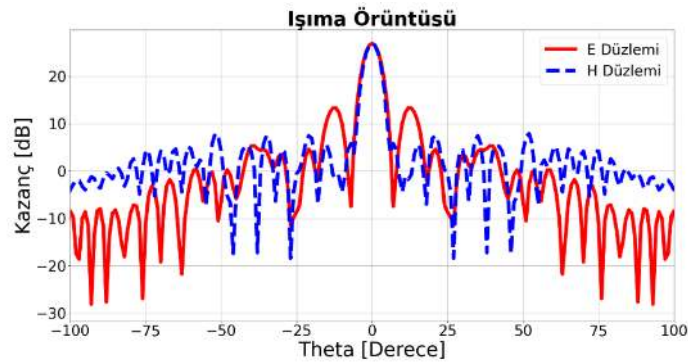
Şekil 4.7. Tasarım 2 İDA Eleman Faz Dağılımı

Tasarım 2 İDA'da besleme olarak kullanılan horn anten, Tasarım 1' de kullanılan besleme anteni olup Bölüm 4.1'de detaylı olarak tanıtılmış ayrıca Şekil 4.2'de boyutları verilmiştir. Kaynak anteni İDA'dan 332 mm odak uzaklığına (F) yerleştirilmiştir. Böylece yaklaşık olarak 0,95 (F/D) oranı tasarımda kullanılmıştır. 21×21 elemanlı İDA'nın besleme anteni ile benzetim programındaki görüntüsü Şekil 4.8'de verilmiştir. Benzetim analizlerinin süresini düşürmek amacı ile yapının dörtte biri analiz edilmiş yani simetri düzlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.8. Horn Anten ile Beslenen Tasarım 2 İDA

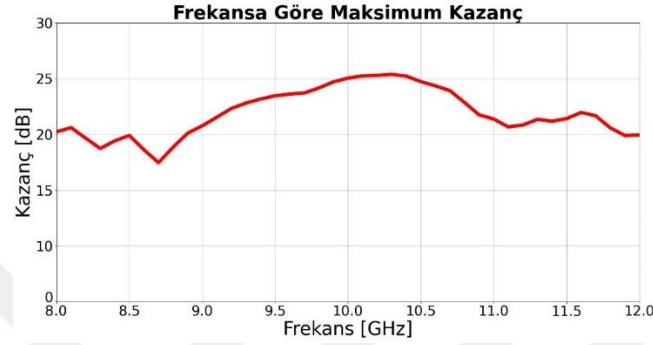
Tasarım 2'ye ait birim hücre ile oluşturulan Tasarım 2 İDA'nın 10 GHz frekansındaki E-düzlemi ($\varphi=0^\circ$) ve H-düzlemi ($\varphi=90^\circ$) ışınma örüntü grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Verilen Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, denklem (4.1) ile yapılan boyut - faz dağılım denklemleri sonucunda ana hüzenin $\theta=0^\circ$ olması sağlanmıştır. Tasarım 2 İDA için, E-düzleminde yan kulakçık seviyesi yaklaşık olarak -13,7 dB iken H-düzleminde yan kulakçık seviyesi -19 dB olarak gözlenmektedir.



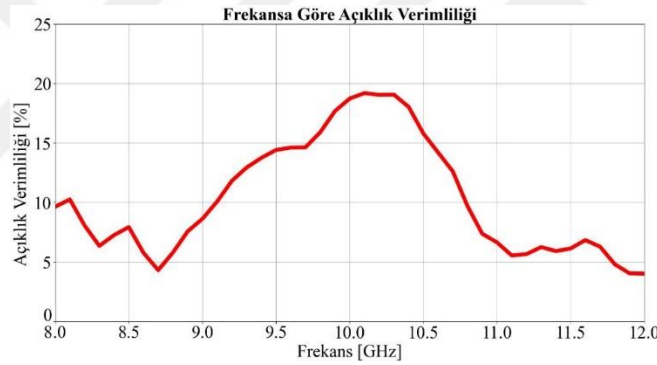
Şekil 4.9. Tasarım 2 İDA için 10 GHz E ve H Düzlemi Işınma Örüntüsü

Sonuç olarak elde edilen frekansa göre maksimum kazanç grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Tasarımı yapılan Tasarım 2 İDA'nın 1- dB kazanç bant genişliği %7,65; 3- dB kazanç bant genişliği ise %16,36 olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.10'da Tasarım 2 İDA'ya ait maksimum kazanç benzetim grafiği verilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, Tasarım 2 İDA'nın 10 GHz frekansındaki kazancı 25,05 dB olarak elde edilmiştir. Bölüm 4'te verilen Denklem (4.2) kullanılarak açıklık verimliliği hesaplandığında, İDA'nın 10 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %18,7 olarak elde edilmiştir. Denklem (4.2) kullanılarak oluşturularak frekansa göre açıklık verimliliği grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



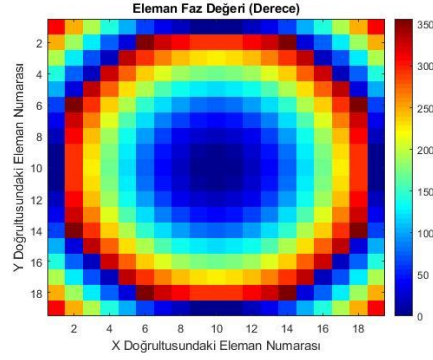
Şekil 4.10. Tasarım 2 İDA için Maksimum Kazanç Benzetim Sonucu



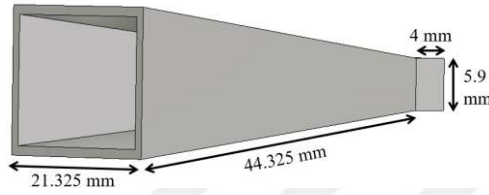
Şekil 4.11. Tasarım 2 İDA için Açıklık Verimliliği

4.3. Tasarım 3 Birim Hücresi ile Oluşturulan İletici Dizi Anten

Bölüm 3'te açıklanan Tasarım 3'e ait birim hücrenin ℓ parametresi-faz grafiğinden elde edilen değerler, faz dağılımının hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu hesaplama bölüm... da detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ele alınan değerler denklem (4.1) kullanılarak MATLAB kodu yardımı ile iteratif olarak her bir birim hücre için faz hesabını gerçekleştirilerek tasarlanan dizi için faz dağılımını Şekil 4.12 deki gibi vermektedir. İDA'da besleme anteni olarak kullanılan horn antenin boyutları Şekil 4.13'te açıkça gösterilmiştir. Tasarım 3'te diğer tasarımlardan farklı olarak bu antenin kullanılması sebebi Tasarım 1 ve Tasarım 2'de kullanılan antenin yalnızca X Bantta çalışıyor olması ve Tasarım 3'ün ise 28 GHz'te (Ka Bant) çalışıyor olmasıdır.

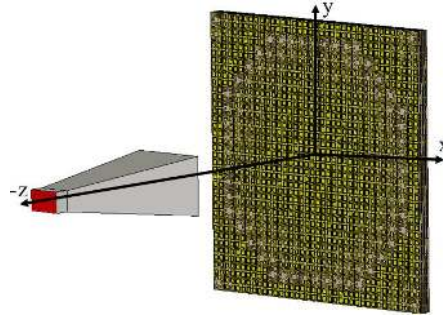


Şekil 4.12. Tasarım 3 İDA Eleman Faz Dağılımı



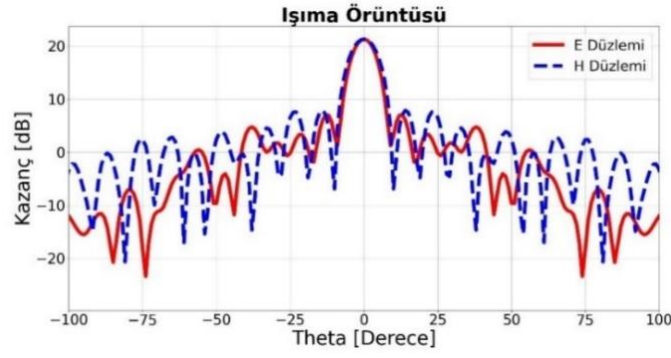
Şekil 4.13. Tasarım 3 İDA Beslemesinde Kullanılan Horn Anten Boyutları

Kaynak anteni Tasarım 3 İDA'dan 42 mm odak uzaklığına (F) yerleştirilmiştir. Bu da yaklaşık 0,55 (F/D) oranındadır. 19×19 elemanlı İDA ve besleme anteni ile benzetim programındaki görüntüsü Şekil 4.14'te verilmiştir. Benzetim analizlerinin süresini düşürmek amacı ile yapının dörtte biri analiz edilmiş yani simetri düzlemi uygulanmıştır.



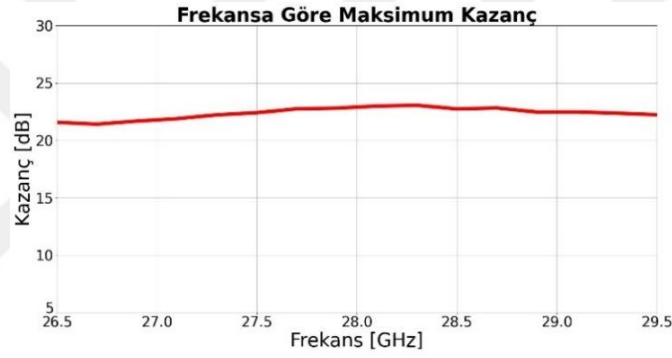
Şekil 4.14. Horn Anten ile Beslenen Tasarım 3 İDA

Tasarım 3'e ait birim hücre ile oluşturulan İDA'nın 28 GHz frekansındaki E-düzlemi ($\phi=0^\circ$) ve H-düzlemi ($\phi=90^\circ$) ışıma örüntü grafikleri Şekil 4.15'te verilmiştir. Verilen Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, denklem (4.1) ile yapılan boyut - faz dağılım denklemleri sonucunda ana hüzmenin $\theta=0^\circ$ olması sağlanmıştır. Tasarım 3 İDA için, E-düzleminde yan kulakçık seviyesi yaklaşık olarak -14,4 dB iken H-düzleminde yan kulakçık seviyesi -15,3 dB olarak gözlenmektedir.



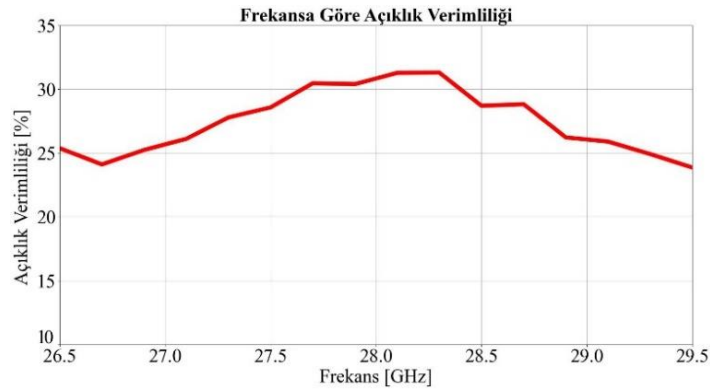
Şekil 4.15. Tasarım 3 İDA için 28 GHz E ve H Düzlemi Işıma Örüntüsü

Sonuç olarak elde edilen maksimum kazanç grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir. Tasarımı yapılan Tasarım 3 İDA’nın 1- dB kazanç bant genişliği %7,96 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.16’da görüldüğü üzere, Tasarım 3 İDA’nın 28 GHz frekansındaki kazancı 23,1 dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Tasarım 3 İDA için Maksimum Kazanç Benzetim Sonucu

Bölüm 4’te verilen Denklem (4.2) kullanılarak açıklık verimliliği hesaplandığında, Tasarım 3 İDA’nın 28 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %30,84 olarak gelmiştir. Denklem (4.2) kullanılarak oluşturulan açıklık verimliliği grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir.

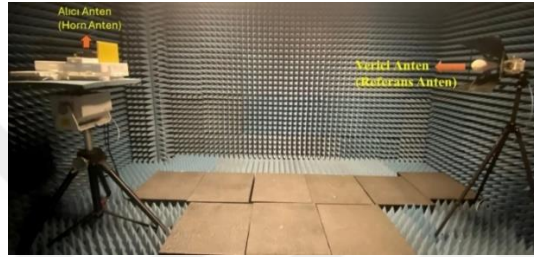


Şekil 4.17. Tasarım 3 İDA için Açıklık Verimliliği

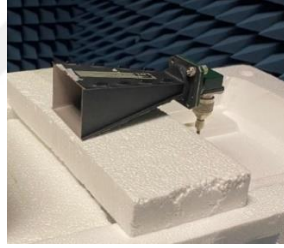
5. TASARIM 1 ÖLÇÜM SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Tezin bu bölümünde, tasarımı yapılan İDA'lar arasından benzetimi yapılan Tasarım 1 İDA seçilerek üretimi gerçekleştirilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ölçümler, Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Mikrodalga ve Anten Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1'de yansısız oda ve ölçüm düzeneğine yer verilmiştir. Ölçümlerde, taper uzunluğu 120 mm, açıklık boyutu 61 mm × 45 mm olan primidal horn anten kullanılmıştır (Şekil 5.2.). Ölçümler, 900 MHz – 20GHz frekans aralığı için tasarlanmış olan yansımaz odada yapılmıştır.

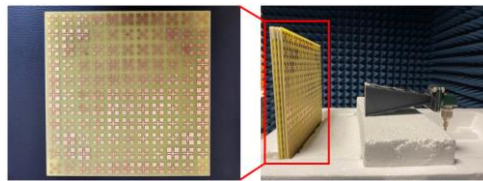


Şekil 5.1. Yansısız Oda ve Ölçüm Düzeneği

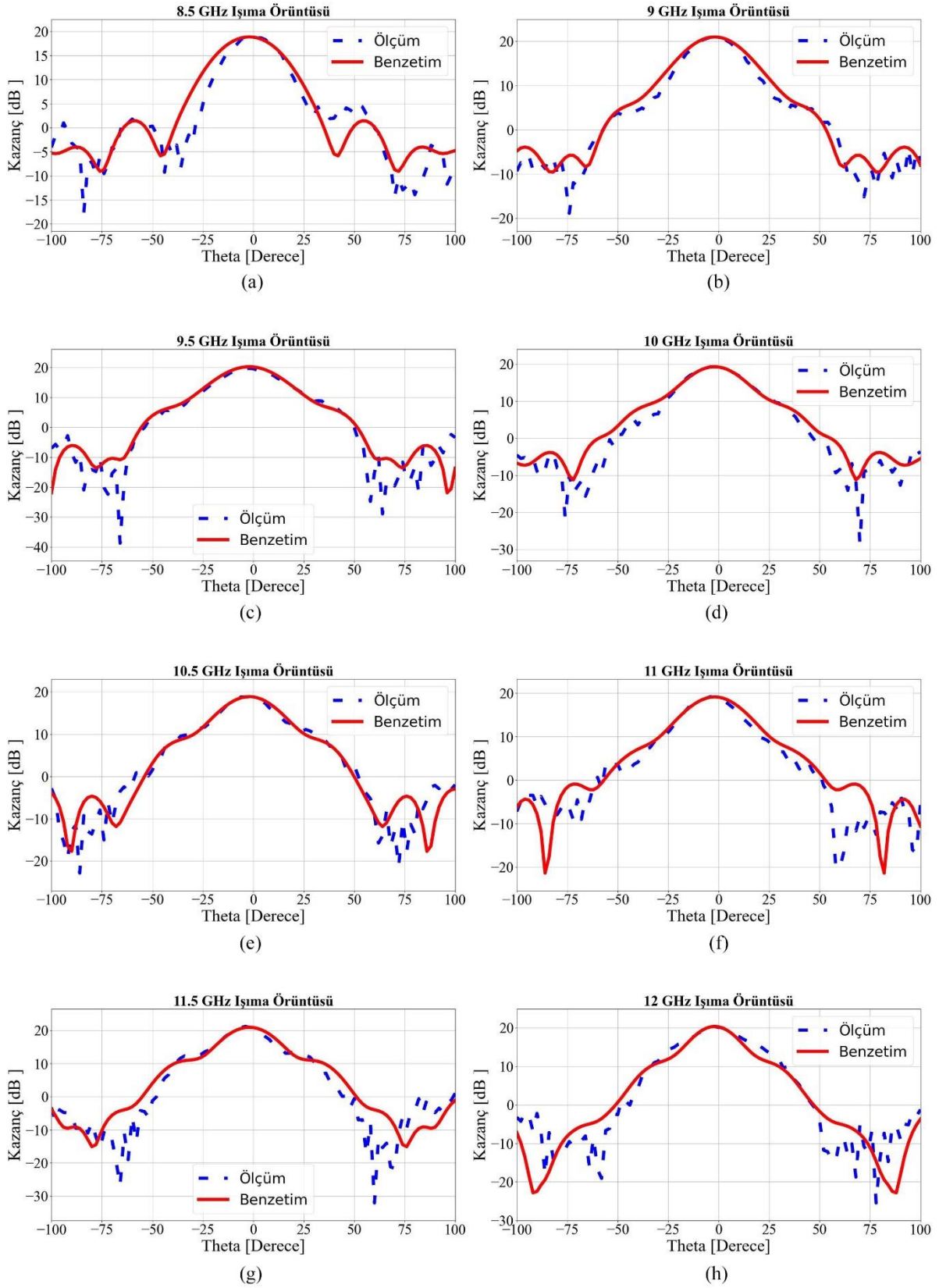


Şekil 5.2. Üretilen Tasarım 1 İDA Beslemesinde Kullanılan Horn Anten

Bölüm 3.1'de anlatılan ve Şekil 3.1'de birim hücre geometrisi verilen Tasarım 1 birim hücre kullanılarak oluşturulan Tasarım 1 İDA benzetimleri gerçekleştirildikten sonra prototipi üretilmiştir. Şekil 5.3'te görüldüğü üzere, 4 katmanlı yapı ve horn anten aralarında 100 mm mesafe olacak şekilde köpüğe sabitlenmiştir. 4 katmanlı yapının katmanları arasında 2 mm hava boşluğu bırakılarak ölçüm boyunca düzeneğin sabit kalması sağlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen yapının ışıma örüntüsü ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları Şekil 5.4'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

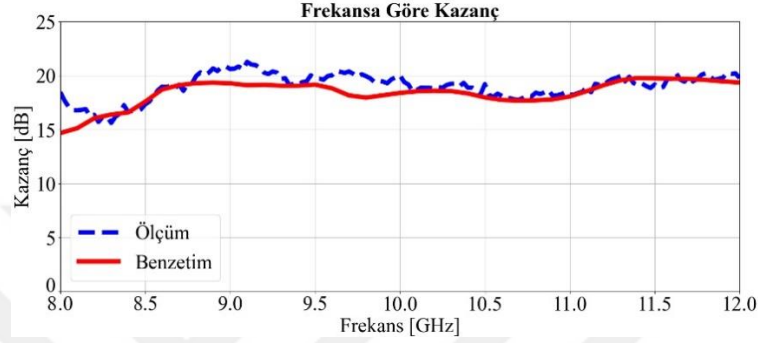


Şekil 5.3. Tasarım 1 İDA Üretilen Prototip ve Horn Anten ile Ölçüm Düzeneği

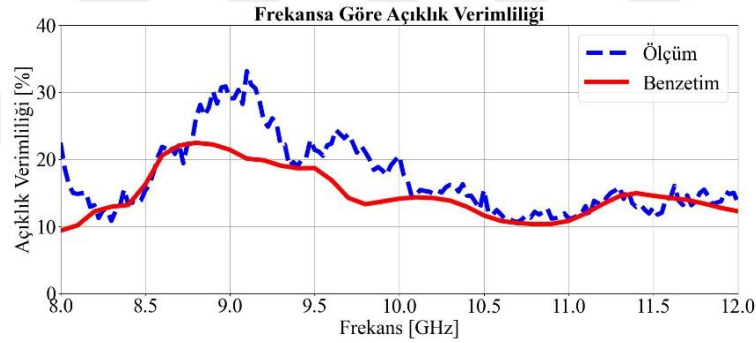


Şekil 5.4. Tasarım 1 İDA'ya ait E-Düzlemi Işıma Örüntüsü Benzetim ve Ölçüm Sonuçları (a) 8,5 GHz (b) 9 GHz (c) 9,5 GHz (d) 10 GHz (e) 10,5 GHz (f) 11 GHz (g) 11,5 GHz (h) 12 GHz

Üretilen yapıya ait bir diğer ölçüm, maksimum kazanç değerleridir. Frekansa göre maksimum kazanç ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırması Şekil 5.5'te verilmiştir. Yapının 1- dB kazanç bant genişliği 8,56 GHz ile 9,67 GHz frekansları arasında %12,12'dir. Bölüm 4'te açıklanan ve Denklem (4.2) ile verilen açıklık verimliliği formülü kullanılarak üretimi yapılan Tasarım 1 İDA için hem ölçüm hem de benzetim sonuçları ele alınarak gerekli hesaplamalar yapıp açıklık verimliliği grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafik, Şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.5. Tasarım 1 İDA için Maksimum Kazancın Ölçüm ve Benzetim Sonuçları



Şekil 5.6. Tasarım 1 İDA için Açıklık Verimliliği Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Denklem (4.2)'ye baktığımızda, açıklık verimliliği hesabındaki kazancın etkisinden ötürü, ölçüm ile benzetim sonuçlarındaki kazanç değerleri arasındaki küçük farklar dahi açıklık verimliliği değerlerinde büyük değişimler oluşturmaktadır. Şekil 5.6'daki uyumsuzluğun temel sebebi de buradan kaynaklanmaktadır. Tablo 5.1'de, gerçekleştirilen çalışmanın çeşitli özellikler bakımından literatürdeki çalışmalar ile performans karşılaştırması verilmiştir. Tablo 5.1 incelendiğinde, Sunulan tasarım (Tasarım 1 İDA) literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında hem 1-dB hem de 3-dB bant genişliğinin daha geniş olması, dizi boyutunun daha kompakt yapıda olması ve düşük maliyetli olması gibi avantajlara sahipken açıklık verimliliği bakımından dezavantajlı konumdadır. Bunun da başlıca sebebi dielektrik tabaka olarak, ilgili frekanslarda kayıplara sahip olan, FR-4 kullanılmasıdır. Dielektrik tabaka

olarak FR-4 kullanılması ve standart üretim boyutlarında bir prototip üretilmesinden ötürü çalışmanın maliyetini büyük ölçüde düşürülmüştür.

Tablo 5.1. Performans Karşılaştırması

Referans	Frekans (GHz)	Metal Katman Sayısı	F/D	Birim Hücre Boyutu (λ_0)	Dizi Boyutu	Faz Aralığı (°)	Via	1- dB / 3- dB Kazanç Bant Genişliği (%)	Açıklık Verimliliği (%)
(Jia vd., 2023)	10	3	0,25	0,47	$10,7\lambda_0 \times 10,7\lambda_0$	360	Hayır	24,5 (3- dB)	40
(Tian, Zhao, vd., 2022)	10	2	1,27	0,32	$6,08\lambda_0 \times 6,08\lambda_0$	360	Hayır	7,5 (1- dB)	58,5
(L. Song vd., 2024)	10	2	0,64	0,067	$9,5\lambda_0 \times 9,5\lambda_0$	360	Hayır	7 (1- dB)	42
(S. Gao & Wong, 2024)	9	3	0,56	0,54	$12,96\lambda_0 \times 12,96\lambda_0$	2-Bit	Hayır	8,1 (1- dB)	45
(Dicandia & Genovesi, 2024)	8	2	1,5	0,21	Net Değil	1-Bit	Evet	16,5 (3- dB)	30,4
(Tian, Lu, vd., 2022)	12	2	1,4	0,52	$5,72\lambda_0 \times 5,72\lambda_0$	360	Hayır	5,4 (1- dB)	44
Bu Çalışma	9	4	0,53	0,51	$5,61\lambda_0 \times 5,61\lambda_0$	360	Hayır	12,12 (1- dB) 49,43 (3- dB)	21,3

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında literatürde var olan İDA'lar ele alınarak 9 GHz, 10 GHz ve 28 GHz frekanslarında çalışan 3 farklı İDA tasarımı sunulmuştur. Bu doğrultuda, özgün İDA birim hücreleri tasarlanmış ve tasarım aşamaları detaylı anlatılmıştır. Bu tasarlanan birim hücreler ile eleman boyutuna göre faz bilgisinden yararlanılarak dizi haline getirilerek oluşturulan İDA tasarımları yapılmıştır. Verilen tasarımlardan 9 GHz frekansta çalışan Tasarım 1 İDA'nın pratiği yapılarak ışıma örüntüleri, maksimum kazanç ve açıklık verimliliği için ölçüm ile benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çalışmalara birim hücre tasarımları ve bunların analizleri ile başlanmıştır. Birim hücreyi oluşturan geometrilere ait parametreler birbirlerine denklemler ile bağlanmış ve seçilen bir parametre değiştirilerek faz değişim grafiği elde edilmiştir. Bu faz değişim grafiklerinin analizinde “floquet port” kullanılmıştır. Birim elemanın faz değişimi karakteristiğinin iki önemli özelliği, tasarımın temel unsurlarını oluşturur. İlk olarak, mutlak faz değişimi aralığının mümkün olduğunca 360°'den büyük olması hedeflenir. İkinci olarak ise, faz değişimi grafiğinin eğimi mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Bu eğim, geniş bantlı İDA tasarımlarının pratik uygulamalarında ortaya çıkan mekanik toleransı gösteren bir parametredir. Düşük eğim, pratik uygulamalardan kaynaklanan hataları en aza indirir aynı zamanda da tasarım bandının artmasına katkı sağlar.

Genel olarak bakıldığında, tasarımlara başlarken ilk önce birim eleman geometrisine karar verilmeli ve buna uygun bir dielektrik katsayısı ile kalınlığına sahip dielektrik tabaka seçilmelidir.

Bu tez çalışmasında, farklı amaçlara yönelik İDA'ların tasarımı için üç farklı birim hücre tasarımı yapılmış ve bu tasarımlarda iki farklı dielektrik tabaka kullanılmıştır. Yapılan benzetimler sonucu bu tasarımların İDA kriterlerini karşıladığı görüldükten sonra İDA haline dönüştürülmüştür.

Tasarımın bir sonraki aşamasında, birim hücrelerin dizi haline getirilmesidir. Bu aşamada dizinin kaç elemandan oluşacağına karar verilmelidir. Her bir koordinattaki birim hücreye gelecek olan dalganın faz ihtiyacı formüle edilerek faz bilgileri hesaplanmıştır. Birim hücrelere ait faz değişim grafikleri de kullanılarak MATLAB'da yazılan kod sayesinde her bir koordinattaki elemanın boyutları hesaplanmıştır.

Yöntem olarak, gereken faz gecikmesini sağlamak amacıyla birim eleman boyut değiştirme yöntemi kullanılmış ve İDA oluşturulmuştur. Oluşturulan İDA piramidal horn ile

beslenmiştir. Yapılan çeşitli tasarımlar ile arzu edilen hüzme yoğunlaşma açısına ve geniş bir 1- dB kazanç bant genişliğine ulaşılmaya çalışılmıştır.

Önerilen üç ayrı İDA tasarımlarından olan Tasarım 1 İDA isimli yapıya ait prototip üretilmiş ve ölçümleri Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Mikrodalga ve Anten Laboratuvarında bulunan tam yansız odada gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırılarak iyi bir uyuma sahip olduğu gözlenmiştir. Oluşan küçük farklılıkların üretim aşaması ve ölçüm hata payından oluşabileceği düşüncesine varılmıştır.

Tasarım 1 İDA'nın 1- dB ve 3- dB kazanç bant genişlikleri sırasıyla %12,12 ve %49,43 olarak elde edilmiştir. 9 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %21,3'tür. $0,51\lambda \times 0,51\lambda$ boyutlara ve $0,37\lambda_0$ kalınlığa sahiptir.

Tasarım 2 İDA'nın 1- dB kazanç bant genişliği %7,65; 3- dB kazanç bant genişliği ise %16,36 olarak elde edilmiştir. 10 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %18,7 olarak elde edilmiştir.

Tasarım 3 İDA'nın 1- dB kazanç bant genişliği %7,96 olarak elde edilmiştir. 28 GHz frekansındaki açıklık verimliliği %30,84'tür. $0,37\lambda_0 \times 0,37\lambda_0$ boyutlara ve $0,37\lambda_0$ kalınlığa sahiptir.

Tasarımlara genel olarak bakıldığında, Tasarım 1 İDA, bant genişlikleri, profil ve maliyet açısından avantajlı iken açıklık verimliliği bakımından dezavantajlı konumdadır. Bunun da başlıca sebebi dielektrik tabaka olarak, ilgili frekanslarda kayıplara sahip olan, FR-4 kullanılmasıdır. Tasarım 2 İDA, 1-dB bant genişliği açısından iyi bir değerde iken diğer parametrelerde değerleri çok iyi değildir. Tasarım 3 İDA ise hem düşük profil hem de dizi boyutu değeri olarak literatüre göre iyi bir yerdeyken bant genişliği bakımından ortalama düzeydedir.

Bu tez en iyi bilginimiz dahilinde ülkemizde lisansüstü tez çalışmaları kapsamında yapılan ve dizi olarak ele alınan “İleti Dizi Anten Tasarımı” konusundaki ilk tez olma özelliği taşıması ile ülkemizde yapılan çalışmalara etkili bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir. İDA'ların kazanç bant genişlikleri artırılması için anlatılan tasarım adımları göz önüne alınarak farklı yapılar oluşturulabileceğini ve iyi sonuçlar elde edilebileceğini önermekteyiz.

KAYNAKÇA

- Ansems, R., Federico, G., Smolders, A. B., & Caratelli, D.** (2024). Multimode Phased Antenna Array for mm-Wave User Terminals With Ultrawide-Angle Scanning Capabilities. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(1), 1021-1026. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3315843>
- Arruela, R., Varum, T., & Matos, J. N.** (2024). Design of a Compact Ka-Band Reflection-Type Vector Modulator Phase Shifter. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 34(1), 53-56. <https://doi.org/10.1109/LMWT.2023.3336519>
- Baladi, E., Sethi, G. S., Legay, H., & Hum, S. V.** (2023). Low-Profile True-Time-Delay Beamsteerable Leaky-Wave Antenna for Satellite Applications in the K Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(1), 236-249. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3218951>
- Balasubramanian, M., Campbell, S. D., Werner, D. H., & Hand, T. H.** (2024). A Shaped Reflector Antenna Design Approach for Contoured Beam Synthesis With Surface Curvature Constraints. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(2), 1297-1307. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3342633>
- Cai, L., Zhou, J., Hu, H., Xu, X., Jiang, Z. H., & Hong, W.** (2023). Indium-Tin-Oxide-Based Broadband Optically Transparent Reflectarray Antenna Using a Multilayer Hybrid Dielectric Substrate and Heterogeneous Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(11), 9101-9106. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3313183>
- Cai, M., Li, W., Shi, X., Zhang, Q., Liu, H., Li, Y., ... Gao, S.** (2024). Design and Simulations of a Novel Ka-Band Isoflux Scanning Phased Array Antenna for GEO Satellites. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(2), 738-742. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3335370>
- Cai, Y., Mei, P., Lin, X. Q., & Zhang, S.** (2024). A Generalized Method for Gain Bandwidth Enhancement of Transmitarray Antennas Considering Oblique Incidences. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 71(1), 121-125. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2023.3297393>
- Cheng, M., Wu, Q., Yu, C., Wang, H., & Hong, W.** (2024). Synthesis of a Thinned Prephased Electronically Steered Phased Array Using Excitation Control of Both the Small

Amplitude Dynamic Range Ratio and Low-Resolution Phase. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(1), 600-613. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3330344>

Cui, Y., Bahr, R., Nauroze, S. A., Cheng, T., Almoneef, T. S., & Tentzeris, M. M. (2022). 3D Printed “Kirigami”-Inspired Deployable Bi-Focal Beam-Scanning Dielectric Reflectarray Antenna for mm-Wave Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(9), 7683-7690. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3199501>

Dicandia, F. A., & Genovesi, S. (2024). Low Profile Dual Linearly Polarized 1-bit Transmitarray Exploiting Two Metallic Layers. *IEEE Access*, 12, 56872-56879. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3390775>

Ganie, J. A., & Saurav, K. (2023). Two-Dimensional Switchable Beam Transmitarray Antenna for mm-Wave Base Stations and Vehicular Networks. *IEEE Access*, 11, 34563-34574. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264721>

Gao, S., & Wong, H. (2024). Design of a Dual-Band Shared-Aperture Antenna Combining Fabry–Perot Cavity and Folded Transmitarray for X- and Ka-Bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(1), 323-331. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3336368>

Gao, Y., Wang, J., Wei, K., Hu, W., & Jiang, W. (2024). A High-Efficiency Dual-Polarized Conformal Transmitarray Antenna Based on Huygens Elements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(2), 813-817. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3336672>

Guo, L., Chen, Y., & Chen, X. (2023). A Metal-Only Folded Reflectarray Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(6), 1441-1445. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3245149>

He, L.-H., Ban, Y.-L., & Wu, G. (2021). Dual-Band Quad-Polarized Transmitarray for 5G Mm-Wave Application. *IEEE Access*, 9, 117520-117526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106949>

He, Y., Huang, J., Li, W., Zhang, L., Wong, S.-W., & Chen, Z. N. (2024). Hybrid Method of Artificial Neural Network and Simulated Annealing Algorithm for Optimizing Wideband Patch Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(1), 944-949. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3331249>

Hu, J., Wong, H., & Ge, L. (2022). A Circularly-Polarized Multi-Beam Magneto-Electric Dipole Transmitarray With Linearly-Polarized Feeds for Millimeter-Wave Applications.

IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 70(7), 6012-6017.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3161321>

Hwang, M., Kim, G., Kim, J., & Kim, S. (2022). A Simultaneous Beam Steering and Polarization Converting S-Band Transmitarray Antenna. *IEEE Access*, 10, 105111-105119.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3211303>

Jia, Q.-S., Zhang, W.-H., Han, X., Huang, Y.-M., Ding, S., Wang, B.-Z., & Bozzi, M. (2023). A Broadband Filtering Circularly Polarized Folded Transmitarray Antenna Based on Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(10), 2357-2361.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3288271>

Kabiri, P., Khalaj-Amirhosseini, M., & Pesarakloo, A. (2023). 1-Bit Reconfigurable Beam Steering Planar Array Antenna Based on Reflectarray Feeding. *IEEE Access*, 11, 88549-88557. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3306337>

Li, Guanxuan, Han, J., Ma, X., Wang, X., Liu, H., & Li, L. (2024). A Simplified, Double-Layer and Low-Profile 1-Bit Reconfigurable Reflectarray for 2-D Space-Time Beam Steering. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(2), 658-662.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3331721>

Li, Guowei, Ge, Y., & Chen, Z. (2021). A Compact Multibeam Folded Transmitarray Antenna at Ku-Band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(5), 808-812.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3064217>

Li, T.-J., Wang, G.-M., Guo, W.-L., Xin, K.-W., Han, J.-Q., & Li, H.-P. (2023). Reconfigurable Folded Transmitarray Antenna With Low-Profile Based on Metasurfaces. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(3), 611-615.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3219994>

Li, T.-J., Wang, G.-M., Li, H.-P., & Hou, H.-S. (2022). Circularly Polarized Double-Folded Transmitarray Antenna Based on Receiver-Transmitter Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(11), 11161-11166. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3188532>

Li, W., Tu, H., He, Y., Zhang, L., Wong, S.-W., & Gao, S. (2023). A Novel Wideband Tightly Coupled Dual-Polarized Reflectarray Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(6), 5422-5427. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3262969>

Li, X.-F., Wang, G.-M., Zou, X.-J., Li, T.-J., & Cai, T. (2023). Broadband circularly polarized folded transmitarray antenna based on polarization conversion metasurfaces. *AEU -*

International Journal of Electronics and Communications, 163, 154596.
<https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154596>

Luo, C.-W., Zhao, G., Jiao, Y.-C., Chen, G.-T., & Yan, Y.-D. (2021). Wideband 1 bit Reconfigurable Transmitarray Antenna Based on Polarization Rotation Element. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(5), 798-802.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3063539>

Mei, P., Pedersen, G. F., & Zhang, S. (2021). A Broadband and FSS-Based Transmitarray Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(1), 103-107. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3042295>

Mei, P., Pedersen, G. F., & Zhang, S. (2023). Performance Improvement of Mechanically Beam-Steerable Transmitarray Antennas by Using Offset Unifocal Phase Symmetry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(1), 1129-1134.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3218942>

Nam, I.-J., Lee, S., & Kim, D. (2022). Miniaturized Beam Reconfigurable Reflectarray Antenna With Wide 3-D Beam Coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(4), 2613-2622. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3083732>

Nguyen, M. T., Nguyen, T. T., & Nguyen, B. D. (2022). Wideband Transmitarray Unit-Cell Design With 1-Bit Phase Control and Twistable Polarization. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(6), 627-630. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2022.3146022>

Ning, Y., Zhu, S., Chu, H., Zou, Q., Zhang, C., Li, J., ... Li, G. (2024). 1-bit Low-Cost Electronically Reconfigurable Reflectarray and Phased Array Based on p-i-n Diodes for Dynamic Beam Scanning. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(2), 2007-2012. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3325650>

Ozzola, R., Neto, A., Imberg, U., & Cavallo, D. (2024). Connected Slot Array With Interchangeable ADL Radome for Sub-8 GHz 5G Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(1), 992-997. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3333541>

Pham, T. K., Guang, L., González-Ovejero, D., & Sauleau, R. (2021). Dual-Band Transmitarray With Low Scan Loss for Satcom Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(3), 1775-1780. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3031410>

Reis, J. R., Vala, M., & Caldeirinha, R. F. S. (2019). Review Paper on Transmitarray Antennas. *IEEE Access*, 7, 94171-94188. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924293>

- Selvanayagam, M., & Eleftheriades, G. V.** (2016). Design And Measurement of Tensor Impedance Transmitarrays For Chiral Polarization Control. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(2), 414-428. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2505718>
- Shen, Y., Pan, J., Xue, S., & Hu, S.** (2024). Wideband Folded Reflectarray With Integrated Single-Layer Differential Slot Feed. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(1), 74-78. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3317397>
- Shi, S., Lu, Q., Feng, W., & Chen, W.** (2022). Wideband Polarization Rotation Transmitarray Using Arrow-Shaped FSS at W-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(7), 6001-6005. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3140309>
- Song, L., Wang, Y., & Guo, L.** (2024). A Low-Cost Ultrathin Metal-Only Transmitarray Antenna at X-Band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3358763>
- Song, L.-Z., Zhang, T., Lai, J.-X., Yang, Y., & Du, J.** (2024). A 180-GHz to 220-GHz Wideband Transmitarray With Wide-Angle Beam Steering for Intersatellite Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(1), 950-955. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3324421>
- Tian, C., Lu, Y.-Q., Zhao, G., Jiao, Y.-C., & Guo, L.-X.** (2022). Double-Layer Transmitarray Antenna Using Specially Designed Substrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(3), 441-445. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3132680>
- Tian, C., Zhao, G., Du, R.-N., Zhang, Z., & Wang, Y.-W.** (2022). A High Efficiency Transmitarray Using Two-Layer Elements Etched on Compound Substrate. *IEEE Access*, 10, 40073-40078. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166164>
- Tong, X., Jiang, Z. H., Chen, H., Wu, F., Cao, J., Sauleau, R., & Hong, W.** (2023). A Dual-CP Multibeam Transmit-Array Antenna Based on Anisotropic Impedance Surfaces and Hybrid Phase Compensation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(5), 1144-1148. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3234699>
- Vaquero, Á. F., Teixeira, J., Matos, S. A., Arrebola, M., Costa, J. R., Felício, J. M., ... Fonseca, N. J. G.** (2023). Design of Low-Profile Transmitarray Antennas With Wide Mechanical Beam Steering at Millimeter Waves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(4), 3713-3718. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3243796>

- Wang, J. X., Wang, H. B., Cheng, Y. J., & Fan, Y.** (2024). A Single-Layer Broadband Linear-to-Circular Polarization Reflectarray With 45° Offset Feed for Ka-Band Communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(1), 354-358. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3324435>
- Wang, J., Zhang, X., Ding, J., Zhang, H., Chen, W., & Chen, C.** (2023). Characteristic Mode Inspired Broadband Circularly Polarized Folded Transmitarray Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(9), 7632-7637. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3284360>
- Wang, X., Qin, P.-Y., Song, L.-Z., Jin, R., & Guo, Y. J.** (2023). Tightly Coupled Huygens Element-Based Conformal Transmitarray for E-Band Airborne Communication Systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(3), 2467-2475. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3241044>
- Wang, Z., Zhang, R., Song, W., Lin, X., Xie, B., Wang, J., & Zhao, R.** (2023). W-Band Single-Layer Broadband Reflectarray Antenna. *IEEE Access*, 11, 66309-66317. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3290098>
- Wu, F., Wang, J., Xiang, L., Hong, W., & Luk, K.-M.** (2022). A Wideband Dual-Polarized Magneto-Electric Dipole Transmitarray With Independent Control of Polarizations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(9), 8632-8636. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3168678>
- Wu, F., Zhao, W.-G., Xia, X., Wang, J., Jiang, Z. H., Sauleau, R., & Hong, W.** (2023). A 2 bit Circularly Polarized Reconfigurable Reflectarray Using p-i-n-Diode-Tuned Crossed-Bowtie Patch Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(9), 7299-7309. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3291773>
- Xi, B., Xiao, Y., Dong, H., Xiang, M., Yang, F., & Chen, Z.** (2023). Low-Profile Wideband 1-bit Reconfigurable Transmitarray With 2-D Beam-Scanning Capacity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(4), 3228-3237. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3241338>
- Xiang, B. J., Dai, X., & Luk, K.-M.** (2022). A Wideband Low-Cost Reconfigurable Reflectarray Antenna With 1-Bit Resolution. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(9), 7439-7447. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3176868>

- Xiang, M., Xiao, Y., Xu, S., & Yang, F.** (2023). A Dual-Layer Reconfigurable Transmitarray Antenna Based on Two Orthogonal Modes. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(12), 3042-3046. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3309473>
- Yang, S., Yan, Z., Liu, P., & Li, X.** (2022). A Linearly-Polarized-Feed Dual-Circularly Polarized Dual-Beam Transmitarray With Independent Beam Control. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(7), 1497-1501. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3172368>
- Zhang, F., Yang, G.-M., & Jin, Y.-Q.** (2020). Low-Profile Circularly Polarized Transmitarray for Wide-Angle Beam Control With a Third-Order Meta-FSS. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(5), 3586-3597. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2964957>
- Zhang, N., Chen, K., Zhao, J., Hu, Q., Tang, K., Zhao, J., ... Feng, Y.** (2022). A Dual-Polarized Reconfigurable Reflectarray Antenna Based on Dual-Channel Programmable Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(9), 7403-7412. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3165872>
- Zhang, Wei, Peng, Y., & Zhang, Z.** (2024). Efficient Phase-Only Symmetric Pattern Synthesis for Linear and Circular Planar Arrays via Phase Perturbation in Low-Dimensional Space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(2), 1947-1952. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3345413>
- Zhang, Weiquan, Li, Y., & Zhang, Z.** (2022). A Reconfigurable Reflectarray Antenna With an 8 μm -Thick Layer of Liquid Crystal. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(4), 2770-2778. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3125378>
- Zhang, Z., Li, X., Sun, C., Liu, Y., & Han, G.** (2020). Dual-Band Focused Transmitarray Antenna for Microwave Measurements. *IEEE Access*, 8, 100337-100345. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998131>