

**T.C.
HALIÇ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
PROGRAMI**

KU BAND RF ÖN UÇ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hazırlayan
Ali ACABUGA**

**Danışman
Doç.Dr.Hamid TORPİ**

İstanbul – 2019

**T.C.
HALIÇ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
PROGRAMI**

KU BAND RF ÖN UÇ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hazırlayan
Ali ACABUGA**

**Danışman
Doç.Dr.Hamid TORPİ**

İstanbul – 2019

TEZ ETİK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “KU BAND RF ÖN UÇ TASARIMI” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç.Dr.Hamid TORPİ’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Ali ACABUGA

ÖNSÖZ

Dalga kılavuzu teorisi ve diğer anlatılan teorik temellerden başlangıç yapılarak uydu ile haberleşmede kullanılabilecek KU BAND‘ da çalışan ön uç tasarımının benzetim çalışması yapılmıştır.

Bu tasarım ile, dikey polarizasyonda gönderme (transmitting) işlemi yapılırken aynı anda alışı (receive) işlemi yapılabilmektedir. Bunun için ofset parabolik anten, horn anten, ve polarizasyon ayırıcı (OMT) elemanlarından oluşan RF ön uç sistemi için özgün tasarımlar yapılmıştır.

Bu tezimin her konusunda bana her zaman yardımcı olan, desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam sayın Doç.Dr.Hamid TORPİ’ye, sayın Öğr.Gör.Ramazan DAŞBASI’na ve çalışma sürem boyunca bana hep motivasyon sağlayan değerli ailem ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2019

Ali ACABUGA

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR.....	2
SEMBOLLER	3
ŞEKİLLER LİSTESİ	4
ÖZET	7
ABSTRACT.....	8
LİTERATÜR ÖZETİ	9
1. ELEKTROMANYETİK ALANLAR TEORİSİ.....	10
1.1. Coulomb Yasası ve Elektrik Alan Şiddeti	10
2. DALGA POLARİZASYONU	11
2.1 Doğrusal Polarizasyonlu Dalga	12
2.2 Eliptik Polarizasyonlu Dalga	13
2.3 Dairesel Polarizasyonlu Dalga	14
3. TEM, TE ve TM Dalgalar	17
3.1 TEM, TE ve TM Dalgalar İçin Genel Çözümler	18
3.1.1 Enine Elektromanyetik Dalgalar (TEM Dalgalar)	20
3.1.2 Enine Elektrik Alan (TE Dalgaları)	23
3.1.3 Enine Manyetik Alan (TM Dalgaları)	24
4. DALGA KILAVUZU TEORİSİ.....	25
4.1 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu	26
4.2 Dikdörtgen Koordinatlarda Dalga Eşitlikleri.....	28
4.3 Enine Manyetik (TM) Mod	31
4.4 Enine Elektrik (TE) Modu.....	35
5. KU BAND DİK MOD AYRIŞTIRICI VE OFSET ANTEN İLE BİRLİKTE SİMULASYONU	40
5.1 Dik Mod Ayrıştırıcı (KU BAND)	40
5.2 Dik Mod Ayrıştırıcı Tasarımı ve horn anten kullanılarak ofset parabolik anten yansımalarının sağlanması.....	42
SONUÇ.....	56
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	58

KISALTMALAR

TEM	: Enine elektromanyetik dalga
TE	: Enine elektrik dalgası
TM	: Enine manyetik dalga
OMT	: Ortho mod transducer (Dik mod ayrıştırıcı)

SEMBOLLER

$\vec{E}$	: Vektörel Elektrik Alan
$\vec{H}$	: Vektörel Manyetik Alan
E	: Elektrik alan
H	: Manyetik alan
q	: Faz yükü
t	: Zaman
ω	: Açısal hız
Hz	: Hertz
GHz	: GigaHertz

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 a) Doğrusal polarizasyon, b) Dairesel polarizasyon (sağa dönüşlü), c) Eliptik polarizasyon (sağa dönüşlü)	12
Şekil 2.2	13
(a) $E_z, t = E_0 e^{-\alpha_0 \cos(\omega t - \beta z)} a_x$ sadece x bileşenli doğrusal polarizasyonlu dalga, (b) $E_z, t = E_0 e^{-\alpha_0 \cos(\omega t - \beta z + \theta)} a_x + E_0 y e^{-\alpha_0 \cos(\omega t - \beta z + \theta)} a_y$ x ve y bileşenli başka bir doğrusal polarizasyonlu dalga.	13
Şekil 2.3	15
(a) $E_z, t = E_0 x e^{-\alpha_0 \cos(\omega t - \beta z + \theta x)} a_x + E_0 y e^{-\alpha_0 \cos(\omega t - \beta z + \theta x)} a_y$ sağa dönüşlü eliptik polarizasyonlu dalga, $E_0 x > E_0 y$, (b) θ_c ve θ_e polarizasyon açıları	15
Şekil 2.4	16
Sağa dönüşlü dairesel polarizasyonlu dalga.....	16
$E_z, t = E_0 e^{-\alpha z \cos(\omega t - \beta z + \theta x)} a_x + E_0 e^{-\alpha z \sin(\omega t - \beta z + \theta x)} a_y$	16
Şekil 3.1 Rastgele kesitli tek iletkenli bir dalga kılavuzu	18
Şekil 4.1	25
Çeşitli dikdörtgen dalga kılavuzları	25
Şekil 4.2 Dikdörtgen dalga kılavuzu	28
Şekil 4.3 TM ₁₁ modu alan konfigürasyonları	34
Şekil 4.4 (a) Bir prob ile TM ₁₁ uyarıtımı ve (b) Bir akım halkası ile TM ₁₁ uyarıtımı	34
Şekil (4.5), Şekil (4.6)	39
TE ₁₀ modu alan örüntüleri, TE ₁₀ uyarıtım şemaları	39
Şekil (5.1) Dik Mod Ayrıştırıcı Portları	41
Şekil (5.2) OMT S ₂ (1)1(1) Grafiği	43
Şekil (5.3) OMT S ₁ (1)2(1) Grafiği.....	43
Şekil (5.4) OMT S ₃ (1)1(2) Grafiği.....	43
Şekil (5.5) OMT S ₁ (2)3(1) Grafiği	44
Şekil (5.6) OMT S ₃ 2 Grafiği	44
Şekil (5.7) OMT S ₂ 3 Grafiği	44
Şekil (5.8) OMT Arka perspektif görünüşü (kapalı halde)	45
Şekil (5.9) OMT Arka perspektif görünüşü (Açık halde)	45
Şekil (5.10) OMT Önden perspektif görünüşü (kapalı halde).....	45
Şekil (5.11) OMT Önden perspektif görünüşü (Açık halde)	46
Şekil (5.12) OMT+HORN Arka perspektif görünüşü (Kapalı halde)	46
Şekil (5.13) OMT+HORN Arka perspektif görünüşü (Açık halde)	46
Şekil (5.14) 11.725 [1(1)] Dikey Polarizasyon.....	47

Şekil (5.15) 11.725 [1(2)] Yatay Polarizasyon.....	47
Şekil (5.16) 11.725 [2(1)] Yatay Polarizasyon.....	47
Şekil (5.17) 11.725 [2(2)] Dikey Polarizasyon.....	48
Şekil (5.18) 14.125 [1(1)] Dikey Polarizasyon.....	48
Şekil (5.19) 14.125 [1(2)] Yatay Polarizasyon.....	48
Şekil (5.20) 14.125 [2(1)] Yatay Polarizasyon.....	49
Şekil (5.21) 14.125 [2(2)] Dikey Polarizasyon.....	49
Şekil (5.22) 11.725 [1(1)] Dikey Polarizasyon.....	50
Şekil (5.23) 11.725 [1(2)] Yatay Polarizasyon.....	50
Şekil (5.24) 11.725 [2(1)] Yatay Polarizasyon.....	50
Şekil (5.25) 11.725 [2(2)] Dikey Polarizasyon.....	50
Şekil (5.26) 14.125 [1(1)] Dikey Polarizasyon.....	51
Şekil (5.27) 14.125 [1(2)] Yatay Polarizasyon.....	51
Şekil (5.28) 14.125 [2(1)] Yatay Polarizasyon.....	51
Şekil (5.29) 14.125 [2(2)] Dikey Polarizasyon.....	51
Şekil (5.30) OMT+Horn Anten+Ofset Parabolik Anten kombinasyonu.....	52
Şekil (5.31) Ofset parabolik anten lokasyon detayı	53

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge (5.1) frekans-Açı Genişliği İlişkisi.....	52
---	----

ÖZET

KU BAND RF ÖN UÇ TASARIMI

Bu tez, beş bölümden oluşmakta olup, her bir bölümün içerikleri ayrı ayrı incelenmiştir.

Birinci bölümde, elektromanyetik alanlar ile ilgili bilgiler verilmiş olup tezin giriş niteliini taşımaktadır.

İkinci bölümde, dalga polarizasyonu hakkında bilgiler verilmiş olup bu bağlamda doğrusal polarizasyonlu dalga, eliptik polarizasyonlu dalga ve dairesel polarizasyonlu dalga tipleri üzerinde incelemeler yapılmış ve açıklamalarda bulunulmuştur.

Üçüncü bölümde, TEM, TE ve TM dalgaları incelenmiş ve açıklamalarda bulunulmuştur.

Dördüncü bölümde, dalga kılavuzu teorisi konusu işlenmiş ve bu bağlamda, dikdörtgen dalga kılavuzu, dikdörtgen koordinatlarda dalga eşitlikleri, enine manyetik (TM) modu ve enine elektrik (TE) modu incelenmiş ve açıklamalarda bulunulmuştur.

Son ve esas bölümü olan beşinci bölümde ise, KU BAND frekansında 10.7 GHZ ile 14.5 GHZ arasında çalışacak bir dik mod ayrıştırıcı tasarımı konusu incelenmiş ve ayrıca tasarlanan bu dik mod ayrıştırıcının ortak ucuna dizayn edilmiş bir horn anten eklenerek sistemin bir ofset parabolik antenle birlikte çalışması incelenmiştir. Burada 10.7 GHZ ile 12.75 GHZ arası alım bandı, 13.75 GHZ ile 14.5 GHZ arası ise iletim bandıdır.

Bu tasarım ile, dikey polarizasyonda gönderme (transmitting) işlemi yapılırken aynı anda alış (receive) işlemi yapılabilir.

Anahtar Kelimeler: Dik mod ayrıştırıcı, ofset parabolik anten, TE, TM, TEM.

ABSTRACT

KU BAND RF FRONT END DESIGN

This thesis consists of five chapters and the contents of each chapter are examined separately.

In the first chapter, information about electromagnetic fields is given and it is an introduction.

In the second chapter, information about wave polarization is given and in this context, linear polarized wave, elliptic polarized wave and circular polarized wave types are examined and explained.

In the third section, TEM, TE and TM waves are examined and explanations are given.

In the fourth chapter, the subject of waveguide theory is studied and in this context, rectangular waveguide, wave equations in rectangular coordinates, transverse magnetic (TM) mode and transverse electric (TE) mode are examined and explained.

In the last and main section, the fifth section is a KU BAND orthomode transducer design between 10.7 GHZ and 14.5 GHZ is examined, and also a designed horn antenna is added to common end of this orthomode transducer to work with an offset parabolic antenna. Here, the receive band is between 10.7 GHZ and 12.75 GHZ and the transmission band is between 13.75 GHZ and 14.5 GHZ.

With this design, at the same time, transmitting in vertical polarization and receiving is possible.

Keywords: Orthomode transducer, offset parabolic antenna, TE, TM, TEM

LİTERATÜR ÖZETİ

Mehmet Salih BOSTAN, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ İstanbul, 2011 Canlı yayın araçlarına yönelik ku band dalga kılavuzlu bileşen tasarımı;

Bu tezde, SNG araçlarında elektromanyetik işaretin anten vasıtası ile alınması ve uyduya yollanması konusunda bazı elektromanyetik tasarımlar yapılmıştır.

Oğuz DEMİR, ORTADOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ Ankara, 2017, Küresel-dikdörtgensel baskı anten ve anten dizilerinin kovuk yöntemiyle analizi;

Bu tezde, küresel alt katmanlar üzerine konumlandırılmış olan baskı anten ile anten dizileri incelenmiştir. Çözüm mantığı olarak kovuk modeli öngörülmüştür. Farklı biçimlerdeki küresel antenlerin ve dizi yapılarının yayılım deseni oluşturulmuş ve simülasyonlarla karşılaştırılmıştır.

Harun MECİDOĞLU, HALIÇ ÜNİVERSİTESİ İstanbul, 2018, KA band RF ön uç tasarımı;

KA BAND dik mod ayırıştırıcı tasarımı konusu incelenmiş ve ayrıca tasarlanan bu dik mod ayırıştırıcının ortak ucuna dizayn edilmiş bir horn anten eklenerek sistemin bir ofset parabolik antenle birlikte çalışması incelenmiştir.

1. ELEKTROMANYETİK ALANLAR TEORİSİ

Elektromanyetik'in temeli, elektrik ve manyetik alan kavramını anlamaktan geçmektedir. Bununla birlikte, elektromanyetik alanları incelemekten önce, öncelikle bir alanın ne anlama geldiğinin tanımlanması gereklidir. Bir alan, uzayda bulunan bir bölge ile ilişkilidir ve o bölgedeki noktalarla ilişkili fiziksel bir olgu varsa, bölgede bir alanın var olduğunu söylenebilmektedir. Başka bir deyişle, miktarın alan bölgesinde bir noktadan diğerine nasıl değiştiğinin bir açıklaması olarak herhangi bir fiziksel nicelikten bahsedilebilmektedir. Örneğin, dünyanın yerçekimi alanı bilinmektedir. Ancak alan görülmemektedir, ancak var olduğu, verilen kütlelerin nesnelerinin yerçekimi kuvveti tarafından etkilenmekte olduğundan bilinmektedir.

1.1. Coulomb Yasası ve Elektrik Alan Şiddeti

Newton'un evrensel kütle çekim yasasına bilinmektedir. Bu, evrendeki her m kütlesi nesnesinin birbirini etkilediğini belirtmektedir.

m kütlelerinin çarpımı ile doğrudan orantılı olan ve aralarındaki R mesafesi karesi ile ters orantılıdır,

$$F = G \frac{mm'}{R^2} a \quad (1.1)$$

Burada G, yerçekimi sabitidir ve a, iki kütleyle bağlanan düz çizgidir. Yukarıdaki denklem, basitçe, verilen kütlelerin gövdeleri arasında çekim kuvvetinin olduğu ve bu kuvvetin iki kütleyi birleştiren hat boyunca olduğu anlamına gelir. Benzer bir şekilde, elektrik alanı olarak bilinen bir güç alanı, yüklenen gövdelerle ilişkilidir.

(Iskander, 1992)

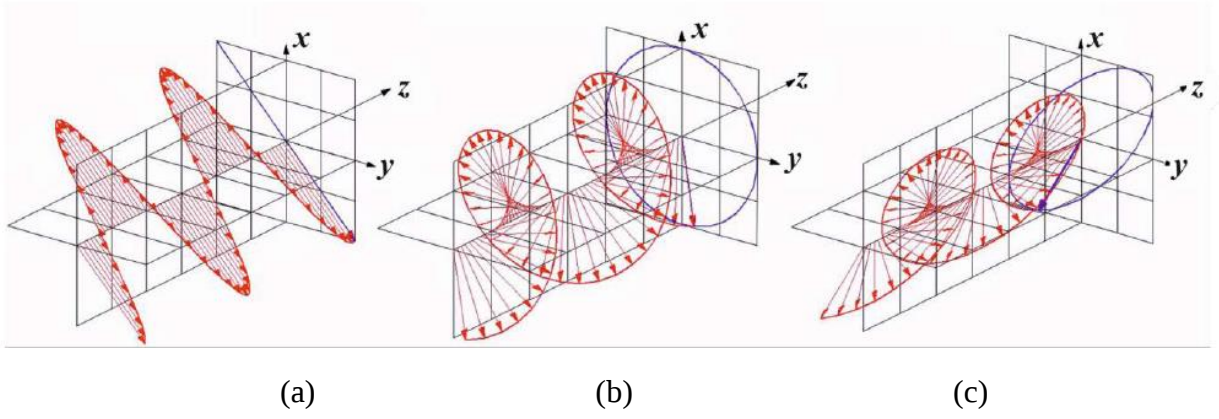
2. DALGA POLARİZASYONU

Elektromanyetik dalgalar bir elektrik alan ve bir manyetik alandan oluşmaktadır. Elektromanyetik dalgalar polarizasyonu veya kutuplanması ile tanımlanabilmektedirler.

Dalgaya ait elektrik alan bileşeni polarizasyon düzleminin tanımlanmasında kullanılmaktadır zira yaygın elektromanyetik dalga dedektörleri manyetik kuvvetlere tepki vermezler ancak malzemenin elektronlarındaki elektriksel kuvvetlere tepki vermektedirler. Bir dalganın polarizasyonu zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilen bir noktada elektrik alanının uç kısmının (loku) gezenegi olarak tanımlanmıştır. Aynı frekansta iki yada daha fazla dalga aynı yönde yayıldığında polarizasyon, tüm dalgaların toplamı ile elde edilmekte olan kompozit bir dalga ile ifade edilmektedir. Ortamdaki bir noktada elektrik alanı zamanın bir fonksiyonu olarak doğru bir çizgi boyunca osilasyon yaptığında bu dalga doğrusal polarizasyonlu olarak isimlendirilir. Elektrik alanının ucunun bir çember çizmesi durumunda dalgaya dairesel polarizasyonlu dalga denir. Elektrik alanının ucunun bir eliptik yol çizmesi durumunda ise dalgaya eliptik polarizasyonlu dalga denir. Işık dalgası gibi polarize olmamış bir dalga çoğunlukla rasgele polarizeli dalga olarak isimlendirilir.

Dalğanın polarizasyonu (anten gibi) verici kaynağa bağlı olmaktadır. Standart yayın frekansında dikey anten yer dalgasının iletimi için tasarlanmıştır zira $\vec{E}$ alanı antenden yere dikey olmaktadır. Diğer uygulamalarda antenler yatay polarizasyonlu dalgaların iletimi için yatay bir düzleme yerleştirilmiştir. Dikey polarizasyonlu ve yatay polarizasyonlu dalgalar doğrusal polarizasyonlu dalga örneklerini oluşturmaktadır.

(Gürdal, 2015)



Şekil 2.1 a) Doğrusal polarizasyon, b) Dairesel polarizasyon (sağa dönüşlü), c) Eliptik polarizasyon (sağa dönüşlü) (Gürdal, 2015)

2.1 Doğrusal Polarizasyonlu Dalga

Zaman domeninde üniform düzlem dalganın iletken ortamdaki elektrik alan şiddeti;

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \vec{a}_x \quad (2.1)$$

$\vec{E}$ alanı x yönünde sürekli z sabit düzleminde olduğu için doğrusal polarizasyonlu dalgayı göstermektedir.

$z = 0$ ise elektrik alan şiddeti;

$$\vec{E}(0, t) = E_0 e^{-\alpha 0} \cos(\omega t - \beta 0) \vec{a}_x = E_0 \cdot \cos \omega t \vec{a}_x \text{ 'dir (şekil 2.2(a)).} \quad (2.2)$$

Elektrik alan bileşenleri ve üniform bir dalga ele alınırsa;

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_x) \quad (2.3)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_y) \quad (2.4)$$

$z = 0$ düzleminde ise;

$$E_x(0, t) = E_{0x} \cos(\omega t + \theta_x) \quad (2.5)$$

$$E_y(0, t) = E_{0y} \cos(\omega t + \theta_y) \quad (2.6)$$

olmaktadır.

İki bileşenin aynı fazda olduğu durumda;

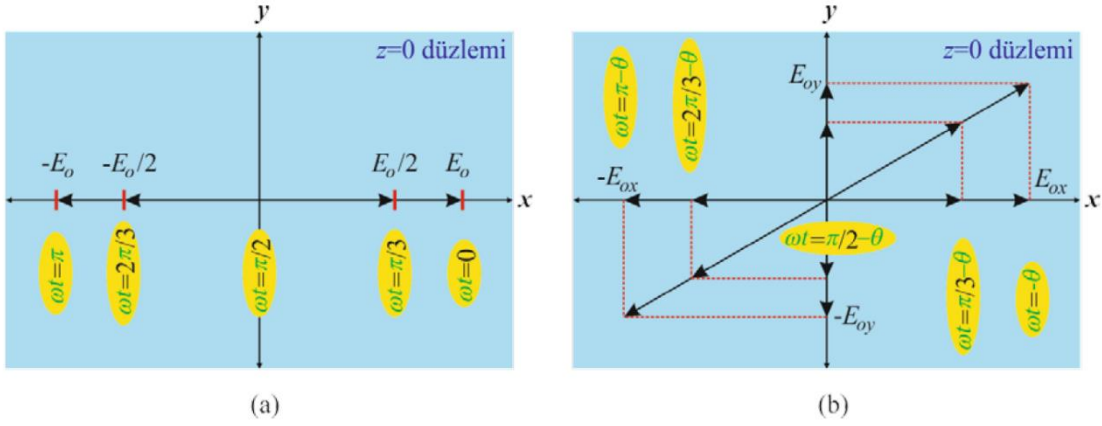
$$\theta_x = \theta_y = \theta$$

$$E_x(0, t) = \frac{E_{0x}}{E_{0y}} E_y(0, t) \quad (2.7)$$

bulunur.

Bu eşitlik iki bileşen arasında doğrusal bir ilişkiyi göstermektedir.

$\theta_x = \theta_y$ olduğunda; (2.3) ve (2.4) ile ifade edilen iki elektrik alanı bileşeninden meydana gelen dalga da doğrusal polarizasyonlu dalga olmaktadır.



Şekil 2.2

(a) $\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \vec{a}_x$ sadece x bileşenli doğrusal polarizasyonlu dalga, (b) $\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta) \vec{a}_x + E_{0y} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta) \vec{a}_y$ x ve y bileşenli başka bir doğrusal polarizasyonlu dalga. (Gürdal, 2015)

2.2 Eliptik Polarizasyonlu Dalga

(2.3) ve (2.4) denklemleri ile ilgili alan bileşenleri çeyrekte $\theta_y = \theta_x - \pi/2$ ise iki eşitlik;

$$E_z(z, t) = E_{0x} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_x) \quad (2.8)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \beta z + \theta_y) \quad (2.9)$$

$z = 0$ düzleminde (2.8) ve (2.9) alan bileşenleri,

$$\frac{E_{x(0,t)}}{E_{0x}} = \cos(\omega t + \theta_x) \quad (2.10)$$

$$\frac{E_{y(0,t)}}{E_{0y}} = \sin(\omega t + \theta_x) \quad (2.11)$$

bulunmaktadır.

(2.10) ve (2.11)' in karelerinin alınıp toplanması ile;

$$\frac{E_x^2(0, t)}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2(0, t)}{E_{0y}^2} = 1 \quad (2.12)$$

$z = 0$ düzleminde bir elipsi ifade etmektedir (şekil 2.3a)

$$E_{ox} > E_{oy}$$

İken ana (majör) eksen $2E_{ox}$ ve küçük (minör) eksen $2E_{oy}$ ve $E_{ox} > E_{oy}$ olduğunda bunun tersidir. t' nin artan değerlerinin (2.10) ve (2.11)' in de kullanılması ise $\vec{E}$ alanının ucunun saatin tersi yönünde döndüğü görülür. Sağ elin başparmağı dalganın yayılma (z) yönünde uzatıldığı zaman sağ elin parmaklarının $\vec{E}$ alanının dönüşü yönünde kıvrıldığı görülür. Bu sebeple (2.8) ve (2.9) denklemleri sağa dönüşlü eliptik polarizasyonlu dalgayı ifade etmektedir.

Bununla birlikte;

$$\theta_y = \theta_x + \frac{\pi}{2}$$

olduğunda sola dönüşlü eliptik polarizasyonlu dalga oluşturulmaktadır.

Şekil (2.3b)' de elipsin şeklini belirleyen θ_c eliptiklik açısı ve orjin etrafında θ_c dönüş açılarından meydana gelen polarizasyon açıları ve şekil (2.3c)' de θ_c ve θ_e polarizasyon açılarına göre polarizasyon durumları gösterilmiştir. (Gürdal, 2015)

2.3 Dairesel Polarizasyonlu Dalga

Denklem (2.3) ve (2.4) dikkate alındığında;

$$E_{0x} = E_{0y} = E_0$$

ve

$$(\theta_y = \theta_x - \frac{\pi}{2})$$

Elektrik alan bileşenleri;

$$E_x(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_x) \quad (2.13)$$

$$E_y(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \beta z + \theta_y) \quad (2.14)$$

$z = 0$ düzleminde denklem (2.13) ve (2.14) iki bileşen;

$$E_x(0, t) = E_0 \cos(\omega t + \theta_x) \quad (2.15)$$

$$E_y(0, t) = E_0 \sin(\omega t + \theta_x) \quad (2.16)$$

olmaktadır.

Bu eşitliklerini karelerinin alınıp toplanması ile;

$$E_x^2(0,t) + E_y^2(0,t) = E_0^2 \quad (2.17)$$

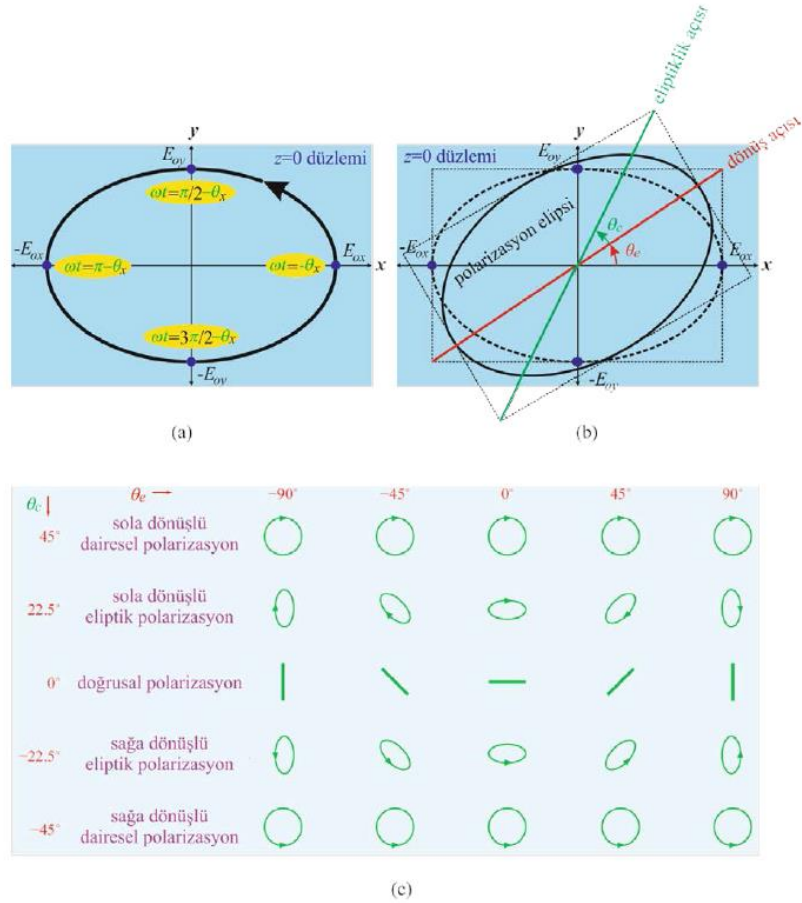
bir çember eşitliğini ifade etmektedir.

t 'nin çeşitli değerleri dikkate alındığında (2.15) ve (2.16)'nın değerlendirilmesiyle sağa dönüşlü dairesel polarizasyonlu dalga oluşturulmaktadır.

$$\theta_y = \theta_x - \frac{\pi}{2}$$

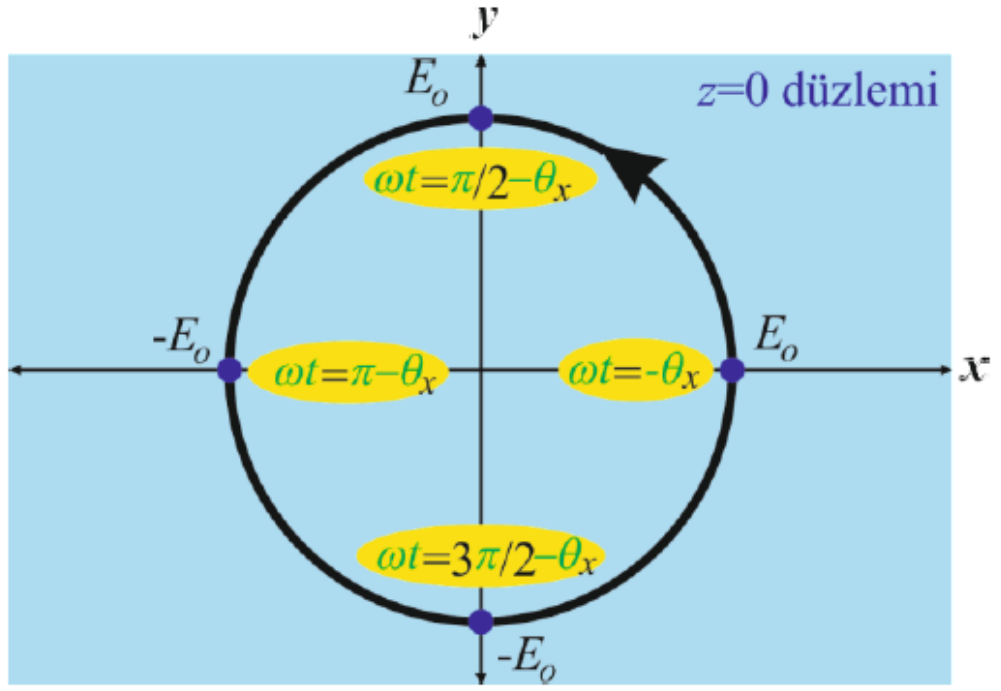
olduğunda ise sola dönüşlü dairesel polarizasyonlu dalga oluşturulmaktadır.

(Gürdal, 2015)



Şekil 2.3 (Gürdal, 2015)

(a) $\vec{E}(z,t) = E_{0x}e^{-\alpha_0} \cos(\omega t - \beta z + \theta_x)\vec{a}_x + E_{0y}e^{-\alpha_0} \cos(\omega t - \beta z + \theta_y)\vec{a}_y$ sağa dönüşlü eliptik polarizasyonlu dalga, $E_{0x} > E_{0y}$, (b) θ_c ve θ_e polarizasyon açıları ve (c) Çeşitli θ_c ve θ_e polarizasyon açılarına göre polarizasyon durumları



Sağa dönüşlü dairesel polarizasyonlu dalga.

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_x) \vec{a}_x + E_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \beta z + \theta_x) \vec{a}_y$$

(Gürdal, 2015)

3. TEM, TE ve TM Dalgalar

Düzlem dalganın boyuna elektrik ve manyetik bileşenleri yoktur. Bu nedenle düzlem dalgalara enine elektromanyetik dalgalar denir.

Bu dalgaların iletkenler ile sınırlandırılmış bölgelerde bulunabileceği durumunda bu dalgalara kılavuzlu dalgalar denilmektedir. Bu dalgaların üç çeşidi mevcuttur;

Enine elektromanyetik dalga,

Enine elektrik dalgası,

Enine manyetik dalga,

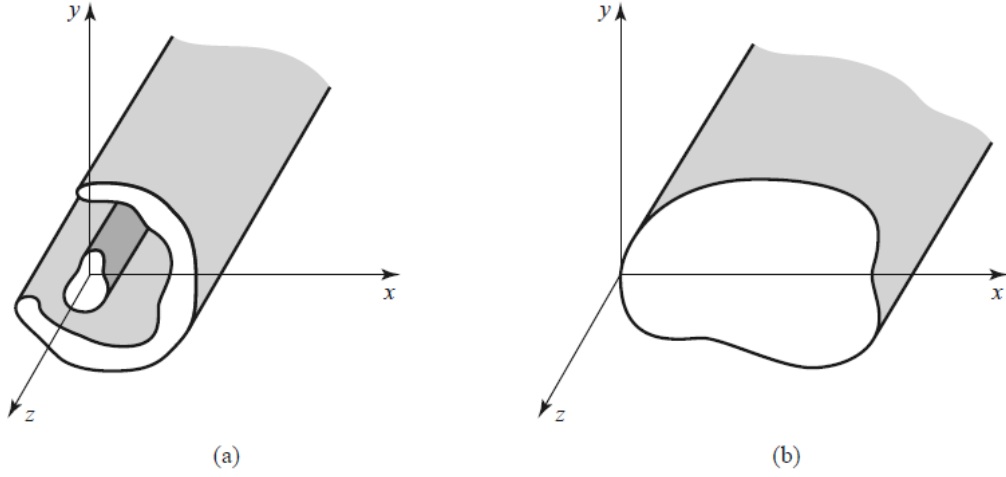
Kılavuzlu dalgalar, mevcut olabilmeleri için iletkenlere gereksinim duyarlar ve iletkenler boyunca yayılmaktadırlar.

Bir kılavuzlu dalganın manyetik alanı enine yöndeki diğer bileşenlerine ilave olarak yayılım yönünde bir bileşeni bulunduğunda ve elektrik alanı tümüyle enine yönde olduğunda kılavuzlu dalga (Transverse Electric) enine elektrik dalgası olarak adlandırılır (TE). Kılavuzlu dalga, manyetik alan tamamen enine yönde olduğunda ve elektrik alanının yayılım yönünde bileşeni mevcut olduğunda (Transverse Magnetic) enine manyetik dalgası olarak isimlendirilmektedir (TM). TE ve TM dalgaları içi boş bir iletkende bulunabilmektedir.

TEM dalgasına ana dalga da denilmektedir (ana mod). Bu dalganın mevcut olabilmesi için iki veya daha fazla iletken gerekli olmaktadır. Bu dalganın elektrik ve manyetik alanları tümüyle yayılım yönünde çapraz şekilde veya enine olarak iletkenler boyunca yayılmaktadır. Elektrik alanın da manyetik alanın da bu dalganın yayılım yönünde bileşeni bulunmamaktadır. Bir düzlem dalgasına benzemekte olan bu şekilde bir dalga, her frekansta uyartılabilmektedir ve iletim hatları boyunca sinyallerin iletimi için kullanılmaktadır.

(Gürdal, 2015)

3.1 TEM, TE ve TM Dalgalar İçin Genel Çözümler



Şekil 3.1 Rastgele kesitli tek iletkenli bir dalga kılavuzu (Pozar, 1998)

Keyfi bir geometrisi olan bir iletim hattı veya dalga kılavuzu, z eksenine paralel iletken sınırlar ile karakterize edilmiş olarak şekil 3.1’ de gösterilmiştir. Bu yapıların sonsuz uzunlukta oldukları ayrıca şekil ve boyutta tek tip olduğu varsayılmıştır. Bu iletkenlerin başlangıçta mükemmel iletken oldukları varsayılmıştır.

$e^{j\omega t}$ ile ilişkili zamana bağlı alanlar ve z eksenindeki dalga yayılımı varsayılmıştır. Bu durumda elektrik ve manyetik alanlar aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\vec{E}(x, y, z) = [\vec{e}(x, y) + \hat{z}e_z(x, y)]e^{-j\beta z} \quad (3.1)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = [\vec{h}(x, y) + \hat{z}h_z(x, y)]e^{-j\beta z} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki formüllerde $\vec{e}(x, y)$ $\vec{h}(x, y)$ $(\hat{x}, \hat{y})$ enine elektrik ve manyetik alan bileşenlerini göstermektedir. e_z, h_z ise boyuna elektrik ve manyetik alan bileşenlerini ifade etmektedir. Bu dalganın yayılım yönü +z yönüdür. β ile $-\beta$ ’nın yer değiştirmesi ile -z yayılım yönü elde edilebilir. Eğer iletken veya dielektrik kayıp var ise, yayılım sabiti karmaşık olmaktadır. Bu durumda $j\beta$ ile $\gamma = \alpha + j\beta$ ile yer değiştirmelidir. Kaynaksız iletim hattı veya dalga kılavuzu bölgesi varsayıldığında, Maxwell denklemleri şu şekilde yazabilir:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\mu\vec{E} \quad (3.4)$$

$e^{-j\omega t}$ Bağımlılığından dolayı, her bir vektörün üç bileşeni aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir;

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu H_z \quad (3.5)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (3.8)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon E_y \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (3.10)$$

Bu altı eşitlik çözülerek E_z, H_z için dört enine bileşen oluşturulabilir.

$$H_x = \frac{j}{k_c^2} \left(\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

$$H_y = \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (3.12)$$

$$E_x = \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.14)$$

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2 \quad (3.15)$$

k_c , kesim dalga sayısını ifade etmektedir.

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.16)$$

k , dalga kılavuzu veya iletim hattı bölgesini dolduran malzemenin dalga sayısını ifade etmektedir.

3.11 ve 3.14 denklemleri çeşitli dalga kılavuzlama sistemlerine uygulanabilmekte olan genel sonuçlardır.

(Pozar, 1998)

3.1.1 Enine Elektromanyetik Dalgalar (TEM Dalgalar)

Enine elektromanyetik dalgalar, $E_z = 0$ ve $H_z = 0$ olan durumlarda yani yayılım yönünde elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin olmadığı durumlardır. Denklem 3.11 incelendiğinde; , $E_z = 0$ ve $H_z = 0$ olduğu durumda $k_c^2 = 0$ olduğu durum hariç, tüm enine alan bileşenlerinin sıfır olduğu görülür. $k_c^2 = 0$ ise $k^2 = \beta^2$ olmaktadır. Bu durumda belirsiz bir sonuç elde edilmiş olur. Ancak, $E_z = 0$ ve $H_z = 0$ olduğu durumlar uygulanırsa H_x 'e bağlı denklemler düzenlenir ise;

$$\beta^2 E_y = \omega^2 \mu \epsilon E_y \quad (3.17)$$

Ya da

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = k \quad (3.18)$$

Olur.

Bu sonuç denklem 3.6 ve 3.8 den de incelenebilir. Kesim dalga sayısı

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2$$

TEM dalgaları için sıfır olmaktadır ($k_c = 0$).

E_x için Helmholtz dalga denklemi;

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) E_x = 0 \quad (3.19)$$

Ancak, $e^{-j\beta z}$ bağımlılığından sebebiyle,

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) E_x = -\beta^2 E_x = -k^2 E_x \quad (3.20)$$

olmaktadır. Sadeleştirme yapıldığında;

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_x = 0 \quad (3.21)$$

Bulunur.

Denklem 3.1 de $\vec{E}$ formunu kullanarak E_x için elde edilen benzer sonuç E_y ’ ye de uygulanabilir.

$$\text{Bu durumda; } \nabla_t^2 \vec{e}(x, y) = 0 \quad (3.22)$$

$$\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3.23)$$

Enine laplasyen operatörünü ifade etmektedir.

TEM dalgaının yatay elektrik alanları $\vec{e}(x, y)$ laplace denklemini sağlamadığı görülmektedir. Aynı yöntemle, yatay manyetik alanların da laplace denklemini sağladığı görülebilir. Bu durumda;

$$\nabla_t^2 \vec{h}(x, y) = 0 \quad (3.24)$$

TEM dalgalarının enine alanları, iletkenler arasında mevcut olabilecek statik alanlarla aynıdır. Elektrostatik durumda, statik elektrik alanın, skaler potansiyelin gradyanı olarak ifade edilebildiği bilinmektedir, $\phi(x, y)$;

$$\vec{e}(x, y) = -\nabla_t \phi(x, y) \quad (3.25)$$

Burada;

$$\nabla_t = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} \quad (3.26)$$

İfadesi iki boyut için enine gradyan operatörünü ifade etmektedir.

3.25’ de yer alan eşitliğin doğru olması için, $\vec{e}$ nin rotasyoneli sıfıra eşit olmalıdır.

$$\nabla_t \times \vec{e} = -j\omega\mu h_z \hat{z} = 0 \quad (3.27)$$

Bu gerçeği kullanarak;

$$\nabla \times \vec{D} = \epsilon \nabla_t \cdot \vec{e} = 0 \quad (3.28)$$

Eşitliği 3.25 ile kullanıldığında $\phi(x, y)$ nın laplace denklemini sağladığı görülür.

$$\nabla_t^2 \phi(x, y) = 0 \quad (3.29)$$

İki iletken arasındaki gerilim;

$$V_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.30)$$

ϕ_1, ϕ_2 ;

Sırasıyla iletken 1 ve iletken 2' nin potansiyellerini ifade etmektedir. Ampere yasası kullanılarak iletken üzerinden akan akım bulunabilmektedir.

$$I = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (3.31)$$

TEM tipi dalgalar, iki veya daha fazla iletken için mevcut olmaktadır. Düzlem dalgalarda TEM dalgası örneğidir çünkü yazılım doğrultusunda alan bileşeni bulunmamaktadır. Bu durumda, iletim hattı iletkenlerinin, sonsuz derecede büyük ve sonsuzluğa ayrılmış, iki plaka olduğu düşünülebilir. Yukarıdaki denklemlerden de anlaşılacağı üzere, bir kapalı iletken (örneğin dikdörtgensel daire kılavuzu) TEM dalgaları destekleyemezler. Çünkü böyle bir bölgede, karşılık gelen statik potansiyel sıfır olacaktır (yada muhtemelen bir sabit) sıfıra giden $\vec{e} = 0$. TEM modunun dalga empedansı ise; enine elektrik alanının ve enine manyetik alanın oranından bulunmaktadır.

$$Z_{TEM} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \eta \quad (3.32)$$

ve,

$$Z_{TEM} = -\frac{E_y}{H_x} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \eta \quad (3.33)$$

3.32 ve 3.33'ün birleştirilmesi sonucunda enine alanlar için bir genel ifade oluşmaktadır;

$$\vec{h}(x, y) = \frac{1}{Z_{TEM}} \hat{z} \times \vec{e}(x, y) \quad (3.34)$$

(Pozar, 1998)

3.1.2 Enine Elektrik Alan (TE Dalgaları)

TE dalgaları yayılım yönünde elektrik alan bileşenlerinin olmadığı fakat manyetik alan bileşenlerinin olduğu dalga tiplerine denir. Yayılım yönünün z olduğu varsayılırsa $E_z = 0$, $H_z \neq 0$ dır. Denklem 3.11 dikkate alınarak;

$$H_x = \frac{-j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (3.35)$$

$$H_y = \frac{-j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3.36)$$

$$E_x = \frac{-j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3.37)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (3.38)$$

Bu durumda, $k_c \neq 0$ ve yayılım sabiti;

$$\beta^2 = \sqrt{k^2 - k_c^2} \quad (3.39)$$

Genellikle frekansın bir fonksiyonu ve hattın yada kılavuzun bir geometrisi olmaktadır. 3.34 denklemini uygulamak için; H_z , Helmotz dalga denkleminde bulunmalıdır.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) H_z = 0, \quad (3.40)$$

$$H_z(x, y, z) = h_z(x, y)e^{-j\beta z} \quad (2.41)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2 \right) h_z = 0, \quad (3.42)$$

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2 \quad (3.43)$$

Böylece, TE dalga empedansı aşağıdaki şekilde bulunabilmektedir;

$$Z_{TE} = \frac{E_z}{H_y} = \frac{-E_y}{H_z} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{k\eta}{\beta} \quad (3.44)$$

Frekansa bağlı olduğu görülmektedir. TE dalgaları kapalı iletkenler içinde ve iki veya daha fazla iletken arasında desteklenebilmektedir.

(Pozar, 1998)

3.1.3 Enine Manyetik Alan (TM Dalgaları)

TM dalgalar, yayılma yönünde manyetik alan bileşeninin olmadığı fakat elektrik alan bileşenlerinin olduğu dalga tipleridir. Yayılma yönünün z olduğu varsayılırsa, $E_z \neq 0$, $H_z = 0$ dır. Denklem 3.11 dikkate alınarak;

$$H_x = \frac{-j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.45)$$

$$H_y = \frac{-j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.46)$$

$$E_x = \frac{-j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.47)$$

$$E_y = \frac{-j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.48)$$

TE durumundaki gibi; Bu durumda, $k_c \neq 0$ ve yayılım sabiti;

$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$ frekansın bir fonksiyonu ve hattın yada kılavuzun bir geometrisi olmaktadır. E_z , Helmutz dalga denkleminde bulunmaktadır.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) E_z = 0 \quad (3.49)$$

$$E_z(x, y, z) = e_z(x, y)e^{-j\beta z} \quad (3.50)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) e_z = 0 \quad (3.51)$$

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2$$

Böylece, TM dalga empedansı aşağıdaki şekilde bulunabilmektedir;

$$Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{-E_y}{H_x} = \frac{\beta}{\omega\epsilon} = \frac{\beta\eta}{k} \quad (3.52)$$

Frekansa bağlı olduğu görülmektedir. TM dalgaları kapalı iletkenler içinde ve iki veya daha fazla iletken arasında desteklenebilmektedir.

(Pozar, 1998)

4. DALGA KILAVUZU TEORİSİ

Bir iletkenin direnci sinyal frekansının artması ile artmaktadır. Bu durum hat boyunca güç kaybı artışına sebebiyet vermektedir. Bu kayıp güç mikrodalga frekanslar için (GHZ aralıkta) ihmal edilememektedir. Bundan dolayı iletim hattı pratik olmaktan uzaklaşır. Bu şekildeki frekanslarda dalga kılavuzu denilen içi boş iletkenler elektrik sinyallerinin verimli bir şekilde kılavuzlanması amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 4.1

Çeşitli dikdörtgen dalga kılavuzları (Gürdal, 2015)

Dalga kılavuzu içi boş bir iletkenidir bundan dolayı TEM dalgasını desteklememektedir. Dalga kılavuzu enine elektrik (TE) ve enine manyetik dalgaları desteklemektedir. Bu dalgalar bazı şartlarda içi boş iletkende bulunabilir. TM ve TE dalgaları paralel plakadan oluşan iletim hattı ile sınırlanmış bir bölgede de yayılabilmektedir; Bu iki paralel plaka, paralel plakalı dalga kılavuzu olarak isimlendirilmektedir.

Dalga kılavuzu içinde elektromanyetik dalganın yayılım biçimi TEM dalgasının yayılım biçiminden çok farklıdır.

Dalga kılavuzunun bir ucundan bir dalga verildiğinde, bu dalga, dalga kılavuzunun duvarına her çarpmasında yansımaktadır.

Dalga, iletken duvarlarla tamamen kapalıdır. Bundan dolayı dalga, dalga kılavuzu boyunca ilerlediğinde çok fazla yansıma gerçekleşmektedir. Bu

yansımakta olan çeşitli dalgalar mod isimli sonsuz sayıda ayrık karakteristik örüntüleri üretmekte ve birbiri ile etkileşmektedir. Ayrık modun varlığı;

- Dalga kılavuzunun biçimi ve boyutu
- Dalga kılavuzunun içindeki ortam
- Çalışma frekansına bağlıdır.

TM ve TE modlarının yayılması, bu modların dalga frekanslarının kesim frekansından yüksek olması durumunda mümkün olabilmektedir. Kesim frekansı, her mod için farklılık göstermektedir. Dalganın çalışma frekansının en düşük modun kesim frekansından farklı olması durumunda dalga, zayıflamaya başlamaktadır ve kısa bir mesafe yol katettikten sonra yok olmaktadır. Diğer yandan bütün modlar, çalışma frekansından daha düşük kesim frekanslarıyla dalga kılavuzu içinde eş zamanlı olarak bulunabilmektedir. Çoklu moddan kaçınmak amacıyla dalga kılavuzu, en düşük ve sonraki en düşük mod frekansları arasında çalıştırılmaktadır. Bu durumda en düşük mertebeli mod yayılmakta ve diğer tüm modlar zayıflamaktadır.

Mikrodalga frekanslarda, uzunlukları boyunca sinyallerin kılavuzlanması konusunda, iki tür dalga kılavuzu yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi dikdörtgen kesitlidir ve şekli gereğince dikdörtgen dalga kılavuzu olarak isimlendirilmiştir. Diğeri ise yuvarlak kesitlidir ve şekli gereğince silindirik dalga kılavuzu olarak isimlendirilmiştir.

(Gürdal, 2015).

4.1 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

Dalga kılavuzu açıklanırken; dalga kılavuzunun dört kenarının mükemmel iletken duvarlar ile sınırlandırılmış olduğu ve mükemmel iletken duvarlar ile sınırlandırılmış ortamın da mükemmel dielektrik özellikte olduğu kabul edilecektir;

Bu kabuller sayesinde mükemmel dielektrik ortamda $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alanları ile dalga eşitliklerinin geliştirilmesi kolaylaşacaktır. Bu dalga eşitliklerinin her birinin çözümü dalga kılavuzunun sahip olduğu dört duvarının her birinde sınır koşullarını doyurması gerekmektedir. Mükemmel iletken duvarlar kabulü, sınır koşullarını son derece basitleştirmiş olur. Bu varsayım mecburi değildir zira ya dalga kılavuzu

bakır veya pirinç gibi yüksek iletkenlikte malzeme oluşturulmuştur veya dalga kılavuzunun iç duvarlarına ince bir gümüş tabaka ile kaplama yapılmıştır.

Alanların dalga kılavuzu boyunca yayılma sürecinde mükemmel iletken duvarlardan ileri ve geri yansımından dolayı alanların enine düzlemde duran dalga örüntüleri (sinüsoidal değişim) meydana getirmesi beklenmektedir. Bununla birlikte dalganın kılavuzun boyuna yönde ($e^{-j\omega t}$) yayılması beklenmektedir. Bu bakış açısından dolayı dalga kılavuzu içinde dalga eşitliklerinin çözümü araştırılacaktır. Çözümlerden bir tanesi enine manyetik (TM) moda ve diğeri ise enine elektrik (TE) moda yapılacaktır.

TM modunda manyetik alan tümüyle enine düzlemde olmaktadır ve boyuna (yayılma) yönünde bileşeni bulunmamaktadır. Elektrik alan bileşenleri her yönde olabilmektedir. Elektrik alanının boyuna bileşeni dalga kılavuzunun tüm duvarlarına teğet olduğu için dalga eşitliğinin bu bileşeninin bir çözümü araştırılacaktır zira dört sınır şartı basitçe uygulanabilecektir. Daha sonra Maxwell eşitlikleri kullanılmak suretiyle enine alan bileşenleri çözülecektir.

Dalga kılavuzu TE modunu desteklerken elektrik alanı, tümüyle enine düzlemde olmaktadır. Manyetik alan bileşenleri bu durumda her yönde olabilmektedir. Dalga eşitliğinin bir çözümü manyetik alanın boyuna bileşenleri için araştırılacaktır. Bilinmeyen sabitler elektrik alanının teğet bileşenleri için sınır koşulları uygulanmak suretiyle belirlenecektir. Bu sebeple elektrik alanının enine bileşenleri manyetik alanın boyuna bileşenleri ile ifade edilmesi gereklidir. Bu sabitler bilinmesinin ardından diğer bileşenler Maxwell eşitlikleri kullanılarak bulunabilir.

(Gürdal, 2015)

4.2 Dikdörtgen Koordinatlarda Dalga Eşitlikleri

Ortam mükemmel dielektrik ortam olarak kabul edilerek; $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon E_x \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon E_y \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon E_z \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon H_x \quad (4.4)$$

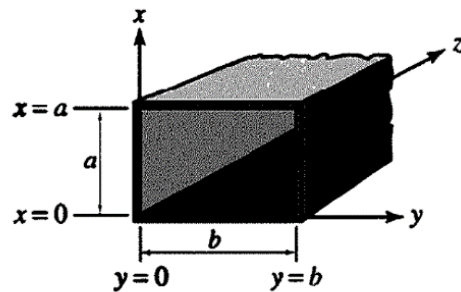
$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon H_y \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon H_z \quad (4.6)$$

$E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ elektrik ve manyetik alan bileşenlerini ifade etmektedirler.

Bu dalga eşitlikleri şekil 4.2’ de görülmekte olan dalga kılavuzu içinde yer alan alanları doyurmaktadır. Mükemmel iletken duvarlarla dikdörtgen dalga kılavuzu, tercihen en az zayıflama miktarı ile sinyalin boyuna (z) yönde taşınması amacı taşımaktadır. Böylece, en başta, dalga kılavuzu içindeki her alanın $e^{-\hat{\gamma}z}$ ile değiştiği varsayılabilmektedir.

$\hat{\gamma} = \alpha + j\beta$ yayılma sabitidir. α : zayıflama sabitidir, β : faz sabitidir.



Şekil 4.2 Dikdörtgen dalga kılavuzu (Gürdal, 2015)

Sadece ileri dalga dikkate alındığında;

$\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alanları şu şekilde yazılabilmektedir;

$$\vec{E}(x, y, z) = E_x(x, y)e^{-\hat{y}z}\vec{a}_x + E_y(x, y)e^{-\hat{y}z}\vec{a}_y + E_z(x, y)e^{-\hat{y}z}\vec{a}_z \quad (4.7)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = H_x(x, y)e^{-\hat{y}z}\vec{a}_x + H_y(x, y)e^{-\hat{y}z}\vec{a}_y + H_z(x, y)e^{-\hat{y}z}\vec{a}_z \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)E_x \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)E_y \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)E_z \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)H_x \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)H_y \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)H_z \quad (4.14)$$

Bu eşitlikler diğerlerine benzediğinden dolayı çözümleri de benzerlik göstermelidir. Alan bileşenlerinin de Maxwell eşitliklerini doyurması gerektiği için bir alan bileşeni ile bir eşitliğin çözümü kalan alan bileşenlerinin belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Bu yaklaşım, dalga kılavuzu içindeki alan bileşenlerinin belirlenmesinde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Aşağıda alan bileşenlerinin birbiri ile nasıl ilişki içinde oldukları belirlenmiştir.

İleriye ilerlemeyen dalga için;

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (4.15)$$

Maxwell eşitliği skaler şekilde aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + \hat{y}E_y = -j\omega\mu H_x \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} + \hat{y}E_x = j\omega\mu H_y \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (4.18)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{E} \quad (4.19)$$

Maxwell eşitliği skaler şekilde aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \hat{y} H_y = j\omega \epsilon E_x \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} + \hat{y} H_x = -j\omega \epsilon E_y \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega \epsilon E_z \quad (4.22)$$

Bu şekilde; z bileşenleri ile elektriksel ve manyetik alanların x ve y bileşenleri aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir;

$$E_x = -\frac{1}{\hat{y}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} \left(\hat{y} \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (4.23)$$

$$E_y = \frac{1}{\hat{y}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} \left(-\hat{y} \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (4.24)$$

$$H_x = \frac{1}{\hat{y}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} \left(-\hat{y} \frac{\partial H_z}{\partial x} + j\omega \mu \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (4.25)$$

$$H_y = -\frac{1}{\hat{y}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} \left(\hat{y} \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\omega \mu \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (4.26)$$

İşlemlere devam edildiğinde;

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} X(x)Y(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} X(x)Y(y) = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2)X(x)Y(y) \quad (4.27)$$

yada;

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} = -(\omega^2 \mu \epsilon + \hat{y}^2) \quad (4.28)$$

Denklem (4.28) de Sol taraf iki terimin cebirsel toplamını oluşturmaktadır. Her biri sadece bir değişkenin fonksiyonudur ve toplamı bir sabite eşit olmaktadır. Böylelikle, her bir terim aşağıda belirtildiği şekilde bir sabit olmalıdır (M ve N keyfi sabitlerdir);

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = -M^2 \quad (4.29)$$

ve,

$$\frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} = -N^2 \quad (4.30)$$

$$M^2 + N^2 = \omega^2 \mu \epsilon + \hat{\gamma}^2 \quad (4.31)$$

yada;

$$Y = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - (M^2 + N^2)} \quad (4.32)$$

$$X(x) = \hat{C}_1 \sin(Mx) + \hat{C}_2 \cos(Mx) \quad (4.33)$$

$$Y(y) = \hat{C}_3 \sin(Ny) + \hat{C}_4 \cos(Ny) \quad (4.34)$$

$\hat{C}_1, \hat{C}_2, \hat{C}_3, \hat{C}_4$ sınır koşullarından belirlenecek keyfi kompleks sabitlerdir.

İleri ilerleyen dalga için E_z ,

$$E_z(x, y, z) = [\hat{C}_1 \sin(Mx) + \hat{C}_2 \cos(Mx)] X [\hat{C}_3 \sin(Ny) + \hat{C}_4 \cos(Ny)] e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.35)$$

H_z manyetik alanın z bileşeni için;

$$H_z(x, y, z) = [\hat{K}_1 \sin(Mx) + \hat{K}_2 \cos(Mx)] X [\hat{K}_3 \sin(Ny) + \hat{K}_4 \cos(Ny)] e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.36)$$

Elde edilmektedir.

$\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4$ bilinmeyen kompleks sabitlerdir.

(Gürdal, 2015)

4.3 Enine Manyetik (TM) Mod

Manyetik alanın TM modunda sadece enine düzlemde (xy) bileşenleri bulunmaktadır. Diğer bir deyişle; manyetik alanın boyuna bileşeni H_z sıfırdır. E_x, E_y, E_z 'nin hepsi mevcut olabilmektedir.

E_z 'nin genel çözümü dalga kılavuzunun dört mükemmel iletken duvarının hepsinde sınır koşullarını doyurması gereklidir. E_z , her bir sınırdaki teğet alanı ifade etmektedir. $\vec{E}$ alanının teğet bileşenleri sürekli olmalıdır ve mükemmel iletken duvar içindeki $\vec{E}$ alanı sıfırdır. Buna göre E_z , her sınırdaki sıfır olacaktır. Böylelikle dört sınır koşulu aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$x=0 \text{ da } E_z(0, y, z) = 0$$

$$y=0 \text{ ' da } E_z(x, 0, z) = 0$$

$$x=a \text{ ' da } E_z(a, y, z) = 0$$

$$y=b \text{ ' de } E_z(x, b, z) = 0$$

$x=0$ ve $y=0$ ve denklem 4.35' de sınır koşulları uygulanacak olursa;

$\hat{C}_2 = 0$ ve $\hat{C}_4 = 0$ bulunur. Buna istinaden;

$$E_x(x, y, z) = \hat{C}_1 \hat{C}_3 \sin(Mx) \sin(Ny) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.37)$$

veya;

$$E_x(x, y, z) = E_{zm} \sin(Mx) \sin(Ny) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.38)$$

dir.

$\hat{E}_{zm} = \hat{C}_1 \hat{C}_3 = E_{zm} \angle \phi$, E_{zm} , $\hat{E}_{zm}$ 'nin genliğidir.

$x=a$ ' da sınır koşullarının uygulanması;

$$\sin(Ma) = 0$$

ya da;

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots \text{ için}$$

$$M = \frac{n\pi}{a} \quad (4.39)$$

$y=b$ ' da sınır koşullarının uygulanması;

$$\sin(Nb) = 0$$

ya da;

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots \text{ için}$$

$$N = \frac{n\pi}{b} \quad (4.40)$$

Dalga kılavuzu içinde yer alan elektrik alanının z bileşeni şöyle yazılabilmektedir.

$$E_z = E_{zm} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.41)$$

TM modu için diğer alan bileşenleri şöyle ifade edilebilmektedir..

$$E_x = -\frac{\hat{\gamma}}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} M \hat{E}_{zm} \cos(Mx) \sin(Ny) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.42)$$

$$E_y = \frac{\hat{\gamma}}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} N \hat{E}_{zm} \sin(Mx) \cos(Ny) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.43)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} N \hat{E}_{zm} \sin(Mx) \cos(Ny) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.44)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} M \hat{E}_{zm} \cos(Mx) \sin(Ny) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.45)$$

$$\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon = M^2 + N^2 \quad (4.46)$$

olmaktadır.

Bu eşitliklerden görülebileceği gibi, bir dikdörtgen dalga kılavuzu, her m ve n tamsayısı için sonsuz sayıda TM modlarını destekleyebilmektedir. Bu modlar, TM_{mn} ile ifade edilmektedir. Bununla birlikte eğer ya m ya da n sıfır ise denklem 4.41' den anlaşılacağı üzere dalga kılavuzunda hiç alan bulunmayacaktır.

Bu durumda göre en düşük olası TM modu TM_{11} modudur; TM_{11} 'in alan çizimleri ve uyartım şemaları şekil (4.3) ve şekil (4.4)' de görülmektedir.

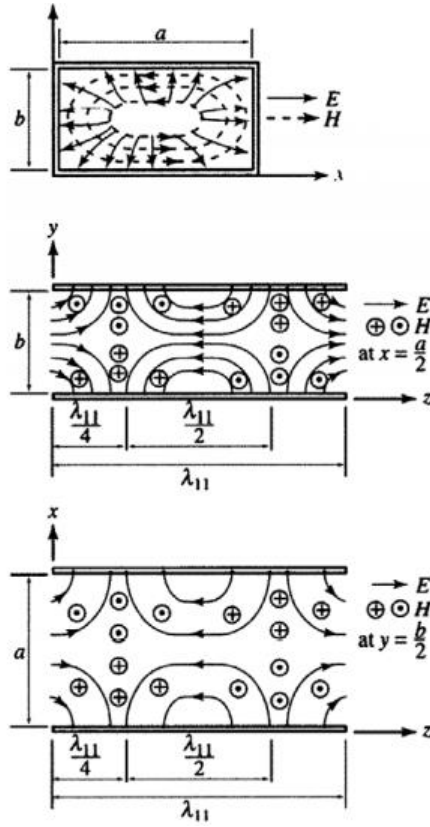
Dalga kılavuzunda özel bir modun uyartımı dikkate alındığında, dalga kılavuzunda ilgili alanların en yüksek olduğu lokasyonlarda ya bir prob (anten) kullanılmak suretiyle elektrik alanı kuplajı ya da bir akım halkası (halka anteni) aracılığı ile manyetik alan kuplajı ile sağlanabilir (şekil 4.4a ve 4.4b).

Denklem (4.32)' den yayılma sabitinin genel ifade şekli şöyledir;

$$\hat{\gamma}_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn} \quad (4.47)$$

olmaktadır.

TM_{mn} modu için α_{mn} ve β_{mn} zayıflama ve faz sabitlerini ifade etmektedir. Denklem 4.42 den eğer $\hat{\gamma}_{mn}$ reel yani $\hat{\gamma}_{mn} = \alpha_{mn}$ ise dalga kılavuzu içinde yer alan elektrik ve manyetik alanlar keskince zayıflayacağından dolayı hiç dalga yayılımı olmayacaktır. Diğer taraftan eğer $\hat{\gamma}_{mn}$ imajiner yani $\hat{\gamma}_{mn} = j\beta_{mn}$ ise elektromanyetik dalgalar, dalga kılavuzu boyunca zayıflama olmadan ilerleyecektir



Şekil 4.3 TM_{11} modu alan konfigürasyonları (Gürdal, 2015)



Şekil 4.4 (a) Bir prob ile TM_{11} uyarıtımı ve (b) Bir akım halkası ile TM_{11} uyarıtımı (Gürdal, 2015)

$\hat{\gamma}_{mn}$ 'nin reel veya imajiner olması için denklem (4.42)' deki karakök fonksiyonu argümanı sırasıyla pozitif veya negatif olması gereklidir. Bu durumda; $\omega = \omega_{cmn}$ frekansında, argüman sıfır yani;

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega_{cmn}^2 \mu \epsilon = 0 \quad (4x48)$$

olmaktadır

Bu durumda sonucunda;

$$\omega_{cmn} = u_p \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (4.49)$$

bulunmaktadır.

$\omega_{cmn} = 2\pi f_{cmn}$ açısal frekansı TM_{mn} modunun açısal kesim frekansı ve $u_p = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}}$ sınırsız ortamda faz hızıdır.

$$f_{cmn} = \frac{u_p}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (4.50)$$

Şeklinde de ifade edilebilmektedir.

f_{cmn} , TM_{mn} modunun kesim frekansını ifade etmektedir.

f_{cmn} , kesim frekansı olarak isimlendirilir çünkü bu frekansın üstünde dalga kılavuzunda elektromanyetik dalganın yayıldığı frekanstır.

(Gürdal, 2015)

4.4 Enine Elektrik (TE) Modu

Dikdörtgen dalga kılavuzunda uyartılabilecek başka bir mod ise TE modudur. Bu modda elektrik alanı daima yayılma yönüne çapraz olmaktadır. Yani E_z bileşeni dalga z yönünde yayılırken sıfırdır ancak manyetik alan bileşenleri her yönde bulunmaktadır.

Şekil 4.2' deki dikdörtgen dalga kılavuzu dikkate alınırsa; H_z nin genel çözümü; $\hat{H}_z$ elektrik alanın x bileşeni;

$$E_x = -\frac{j\omega\epsilon}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2\mu\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (4.51)$$

dır.

Sınırlarda E_x sıfır olması için; $y = 0$ ve $y = b$ de;

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad (4.52)$$

H_z ' nin y'ye göre diferansiyeli ile;

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = [\hat{K}_1 \cdot \sin(Mx) + \hat{K}_2 \cdot \cos(Mx)]X[\hat{K}_3 \sin(Ny) - \hat{K}_4 \cdot N \cos(Ny)]e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.53)$$

Bulunur.

$y = 0$ ’ da sınır koşulu ile;

$$\hat{K}_3 = 0 \text{ bulunur.}$$

N sıfır olmayan değerler alabileceği için; $y = b$ de sınır koşullarının uygulanması ile,

$$\sin(Nb) = 0$$

ya da;

$$n = 1, 2, 3, \dots \text{ için}$$

$$N = \frac{n\pi}{a} \text{ bulunur.} \quad (4.54)$$

H_z ise şöyle ifade edilebilmektedir;

$$H_z(x, y) = [\hat{K}_1 \cdot \sin(Mx) + \hat{K}_2 \cdot \cos(Mx)]X\left[\hat{K}_3 \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\right]e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.55)$$

$$E_y = \frac{j\omega v}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (4.56)$$

ve;

$x = 0$ ve $x = a$ da E_y sıfır olması gereklidir. Bu ihtiyaç;

$$x = 0 \quad x = a \text{ da;}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0$$

olması demektir. Denklem (4.49)’ a göre diferansiyeliyle;

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = [\hat{K}_1 \cdot M \cos(Mx) - \hat{K}_2 \cdot \sin(Mx)]X\left[\hat{K}_4 \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\right]e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.57)$$

ve $x = 0$ da sınır koşulu uygulanarak;

$$\hat{K}_1 = 0 \text{ elde edilmektedir.}$$

M sıfır olmayan değerler alabileceği için; $x = a$ da sınır koşullarının uygulanmasıyla;

$$\sin(Ma) = 0$$

ya da

$$n = 1, 2, 3, \dots \text{ için}$$

$$M = \frac{n\pi}{a} \quad (4.58)$$

Bulunmaktadır.

Son olarak;

TM_{mn} modu için manyetik alanın z bileşenini tam ifadesi şöyledir;

$$H_z(x, y, z) = \hat{H}_{zm} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.59)$$

$$\hat{H}_{zm} = \hat{K}_1 \hat{K}_4 \text{ dir.}$$

TE modu için diğer alan bileşenleri aşağıdaki gibi bulunabilmektedir;

$$H_x = \frac{\hat{\gamma}}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} M \hat{H}_{zm} \sin(M_x) \cos(N_y) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.60)$$

$$H_y = \frac{\hat{\gamma}}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} N \hat{H}_{zm} \cos(M_x) \sin(N_y) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.61)$$

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} N \hat{H}_{zm} \cos(M_x) \sin(N_y) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.62)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{\hat{\gamma}^2 + \omega^2 \mu \epsilon} M \hat{H}_{zm} \sin(M_x) \cos(N_y) e^{-\hat{\gamma}z} \quad (4.63)$$

Denklem 4.52' den görüleceği üzere;

$H_z(x, y, z)$ m ve n'nin ikisi birden sıfır olsa bile mevcut olmaktadır. Ancak böyle bir durumda denklem (4.53)' den görüleceği gibi diğer alan bileşenleri kaybolacaktır.

Böylece;

TE_{00} modu bir dalga kılavuzunda bulunamaz. TM_{01} ve TM_{10} modlarının alan bileşenleri ise şöyledir;

TE_{01} modu;

$$H_x = 0, \hat{E}_y = 0, E_z = 0$$

$$H_y = j \frac{\beta_{01} b}{\pi} \hat{H}_{zm} \sin\left(\frac{\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_{01} z} \quad (4.64)$$

$$H_z = \hat{H}_{zm} \cos\left(\frac{\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_{01} z} \quad (4.65)$$

$$E_x = j \frac{\omega \mu b}{\pi} \hat{H}_{zm} \sin\left(\frac{\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_{01} z} \quad (4.66)$$

TE_{01} modu için;

$$H_y = 0, E_x = 0, E_z = 0$$

$$H_x = j \frac{\beta_{10} a}{\pi} \hat{H}_{zm} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{-j\beta_{10} z} \quad (4.67)$$

$$H_z = \hat{H}_{zm} \cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{-j\beta_{10} z} \quad (4.68)$$

$$E_y = -j \frac{\omega \mu a}{\pi} \hat{H}_{zm} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{-j\beta_{01} z} \quad (4.69)$$

TE_{01} modu için;

E_x ve H_y alan bileşenlerinin mevcut olması güç akışının z yönünde olabileceğini göstermektedir. Bu mod dalga kılavuzunda bulunabilmektedir. Benzer biçimde; TM_{01} modu için E_y ve H_x bileşenleri (uygun bir mod olduğunu önererek) z yönünde güç akışını sağlar.

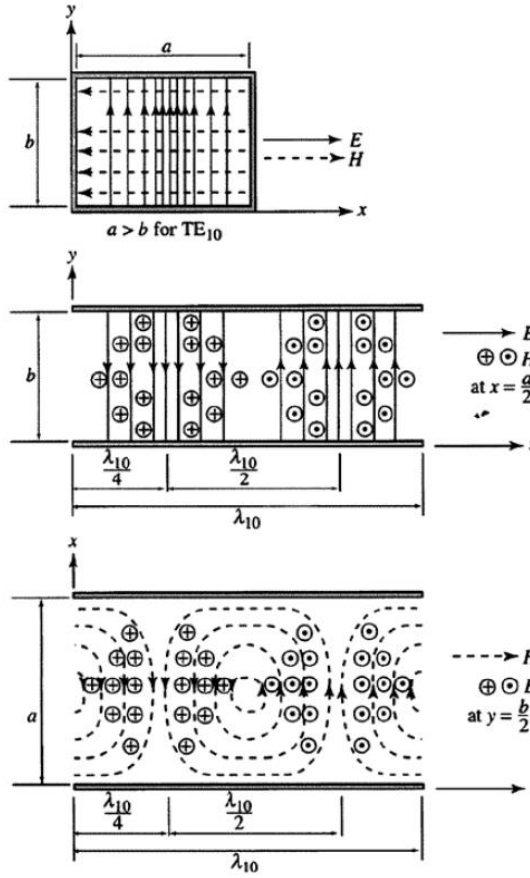
Bu durumda;

TE_{mn} modu için ya m veya n sıfır (ikisi birden değil) olabilmektedir. Eğer $a > b$ ise TM_{10} en düşük mertebeli mod olmaktadır. TM_{01} ise sonraki en düşük moddur.

f_{cmn} değeri ise;

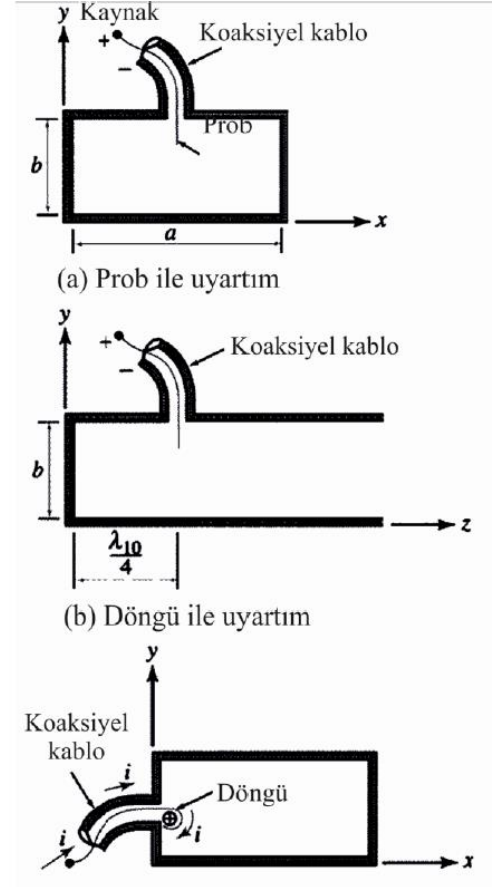
$$f_{cmn} = \frac{u_p}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (4.70)$$

(Gürdal, 2015)



Şekil (4.5)

TE_{10} modu alan örüntüleri (Gürdal, 2015)



Şekil (4.6)

TE_{10} uyartım şemaları (Gürdal, 2015)

5. KU BAND DİK MOD AYRIŞTIRICI VE OFSET ANTEN İLE BİRLİKTE SİMULASYONU

5.1 Dik Mod Ayrıştırıcı (KU BAND)

Bir elektromanyetik dalga'nın polarizasyonu elektrik alan vektörü olan $\vec{E}$ 'nin yönüne bağlı olmaktadır. z yönünün propagasyon yönü olduğu düşünüldüğünde, dalga'nın ilerleme doğrultusuna dik olduğu X Y düzleminde polarizasyon lineerdir.

$$\vec{E}_x|E| = e^{j(\omega t - kz)} \quad (5.1)$$

Keyfi bir E alan dik bileşenlerine ayrılabilir. Elektrik alanın Y düzleminde bileşeni bulunmuyorsa polarizasyon yatay olmaktadır. Elektrik alanın X düzleminde bileşeni bulunmuyorsa polarizasyon dikey olmaktadır.

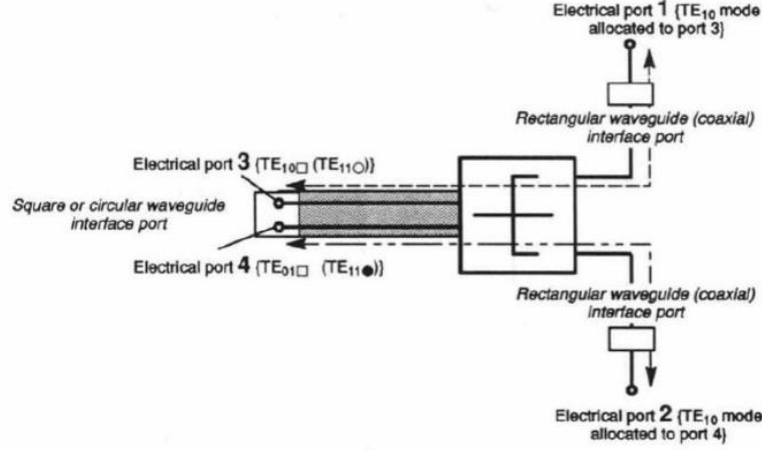
Yatay ve dikey polarizasyon, ortogonalite özelliğinden faydalanılarak birbirinden bağımsız olarak iletilebilmektedir.

$$|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (5.2)$$

Dairesel polarizasyonda ise E vektörü z yönünde sarmal bir yön çizmektedir. Bu sarmal yapı saat yönünde ise RHCP (Right Hand Circular Polarization), saat yönünün tersi istikamette ise LHCP (Left Hand Circular Polarization)' dir. Dairesel polarize bir dalga eşit genlikli iki lineer ortogonal alan bileşeni ile birlikte matematiksel yöntemlerle ifade edilebilmektedir.

$$|E_x| = |E_y| \quad (5.3)$$

Dik mod ayrıştırıcı elektriksel olarak dört portludur, ancak pratikte üç porta sahiptir. Dört portlu olarak kabul edilmesinin nedeni, ortak port olarak kullanılan port içerisinde, birbirine dik iki farklı işareti aynı anda iletilebilmesi özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu port genellikle dairesele veya karesel kesit alanına sahip olmaktadır. Karesel kesit alanı dikkate alındığında TE_{10} ve TE_{01} modlarının tetiklenmesi sağlanabilmektedir. Dairesel kesit alanı dairesele polarizasyonda iletim yapmakta olduğundan, bu polarizasyonda iki lineer polarizasyon bileşeni mevcut olmaktadır. Dört porta sahip ideal bir dik mod ayrıştırıcı' nın S parametre matrisi aşağıdaki gibidir;



Şekil (5.1) Dik Mod Ayırıştırıcı Portları (Bostan, 2011)

Aşağıdaki matriste 1 ve 3 portları $e^{j\phi_1}$, 2 ve 4 portları $e^{j\phi_2}$ ile gösterilmektedir. Bu matrsten de görüleceği şekilde dik mod ayırıştırıcı çift tarafa sahip (reciprocal) bir cihazdır. Dik mod ayırıştırıcı'nın dört portlu bir cihaz olarak kabul edilmesi S matrisinden anlaşılabilmektedir. Üç porta sahip bir mikrodalga sistemin S matrisinin kayıpsız özelliğe sahip olması, devre çift taraflı (reciprocal) olmadığından dolayı teorik olarak mümkün olmamaktadır. Çift tarafa sahip bir devre olan dik mod ayırıştırıcı cihazında ise teoride kayıpsız iletim yapılabilmektedir.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{j\phi_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{j\phi_2} \\ e^{j\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\phi_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dik mod ayırıştırıcı tasarımında süreksizlikler veya izolasyon sorunları yüksek modları (Higher order modes) tetiklemektedir. Bu nedenden dolayı anten ışıma diyagramında da istenmeyen değişiklikler oluşabilmektedir.

(Bostan, 2011)

5.2 Dik Mod Ayırıştırıcı Tasarımı ve horn anten kullanılarak ofset parabolik anten yansımalarının sağlanması

Dik mod tasarımı yapılırken aşağıda belirtilen esaslar dikkate alınmıştır;

Ortak Port olarak, WC69 dairesel port kullanılmıştır. İletim ve alım portları ise WR75 portları kullanılmıştır.

Buna göre;

Ortak port yarıçapı;

$r=8.737$ mm dir.

İletim ve alım portlarında ise a uzun kenar b ise kısa kenar olmak üzere;

$a= 19.05$ mm

$b= 9.525$ mm ölçülerindedir.

Dik mod ayırıştırıcının tasarımı yapıldıktan sonra ortak port'a 1, iletim portuna 2 ve alım portuna ise 3 numara olarak isimlendirme yapılmıştır.

Dizaynı yapılan dik mod ayırıştırıcının çalışma prensibi aşağıda açıklanmıştır;

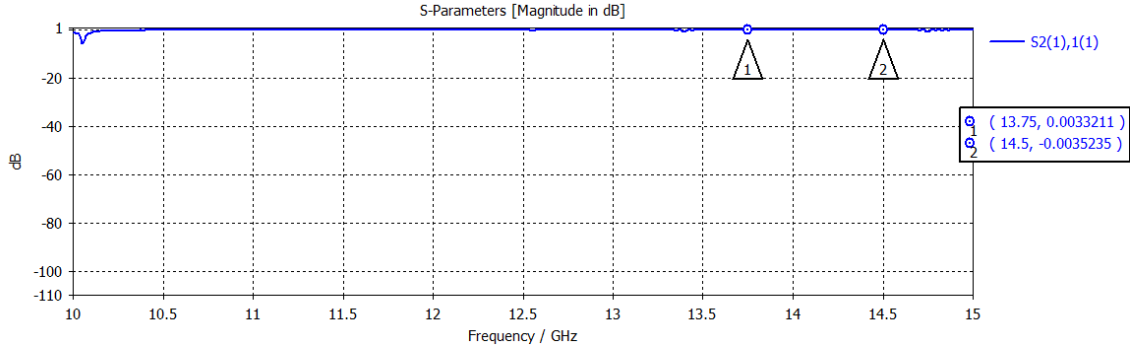
Buna göre;

1 numaralı port ortak portudur ve ve hem dikey ve yatay polarizasyonda çalışmaktadır.

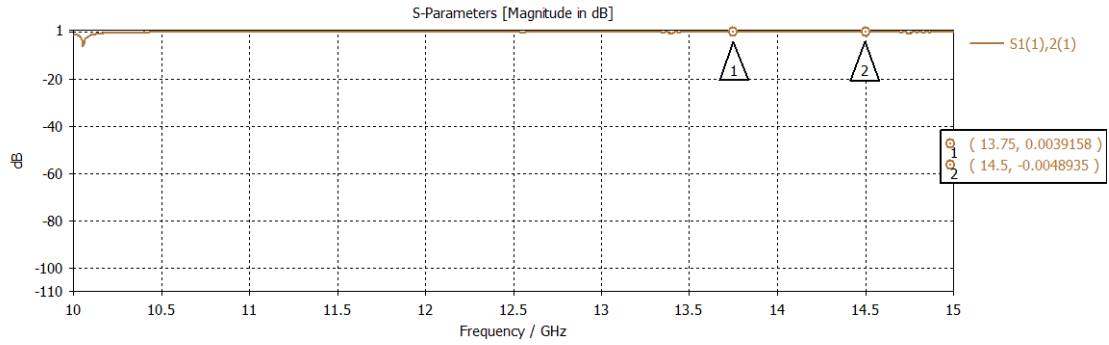
2 numaralı port iletim porttur ve dikey polarizasyonda 13.75 GHZ ile 14,5 GHZ arasında çalışmaktadır.

3 numaralı port ise alım portudur ve yatay polarizasyonda 10.7 GHZ ile 12.75 GHZ arasında çalışmaktadır.

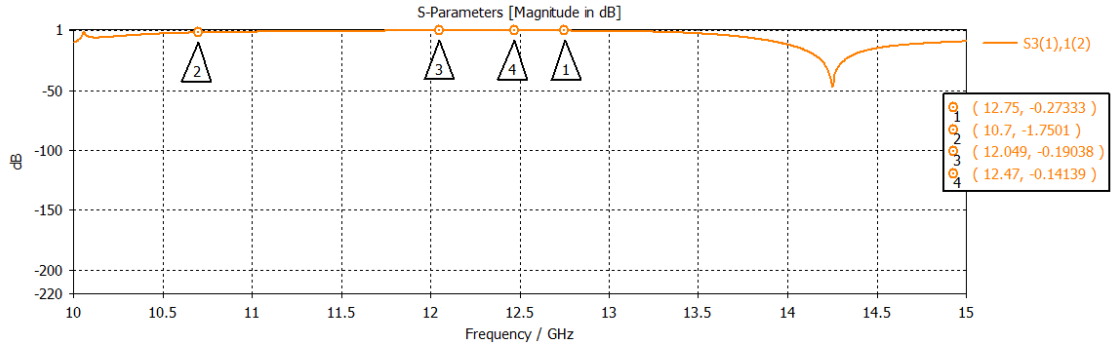
Benzetim çalışması sonucunda dik mod ayrıştırıcının S parametreleri incelendiğinde elde edilen değerler aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Dik mod ayrıştırıcı aşağıda grafikleri verilen S parametre sonuçlarına göre 10.7 GHZ ile 12.75 GHZ arasında alım, 13.75 GHZ ile 14.5 GHZ arasında ise iletim yapmaktadır. Aynı şekilde izolasyon değerleri de aşağıdaki grafiklerde yer almaktadır.



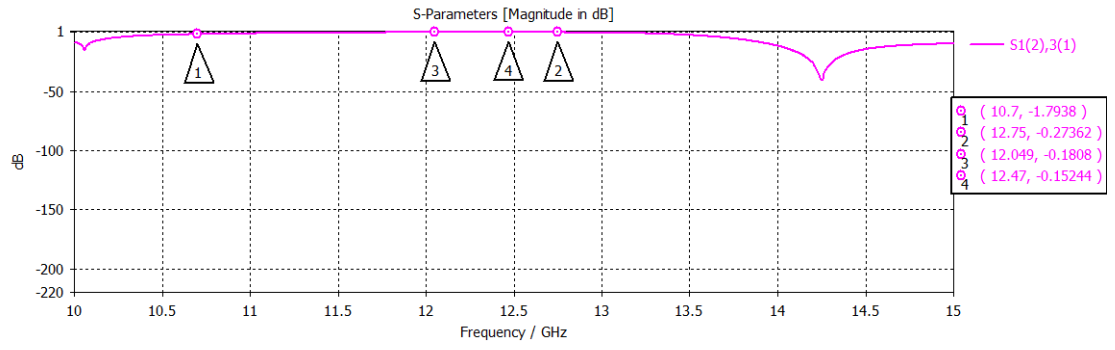
Şekil (5.2) OMT S2(1)1(1) Grafiği



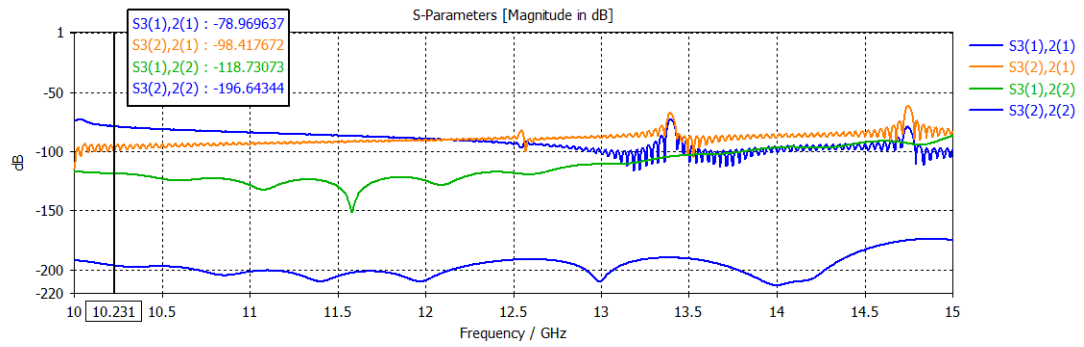
Şekil (5.3) OMT S1(1)2(1) Grafiği



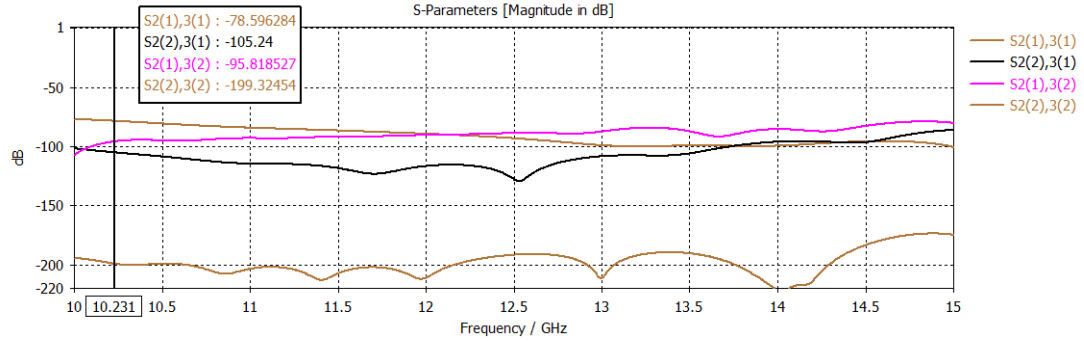
Şekil (5.4) OMT S3(1)1(2) Grafiği



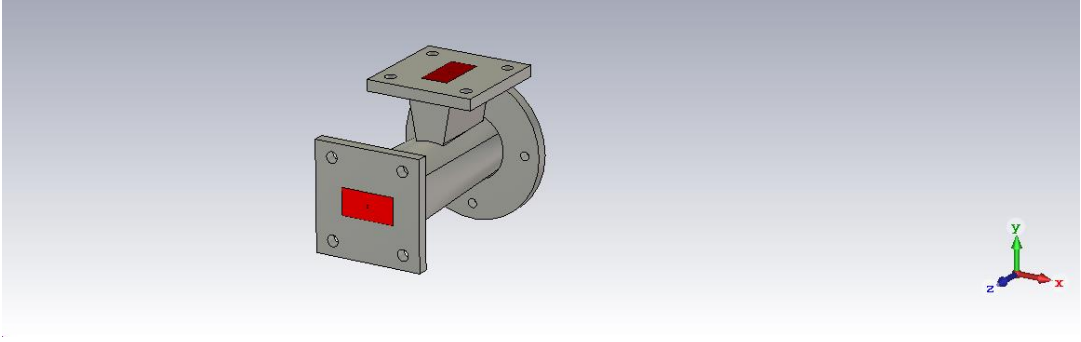
Şekil (5.5) OMT S1(2)3(1) Grafiği



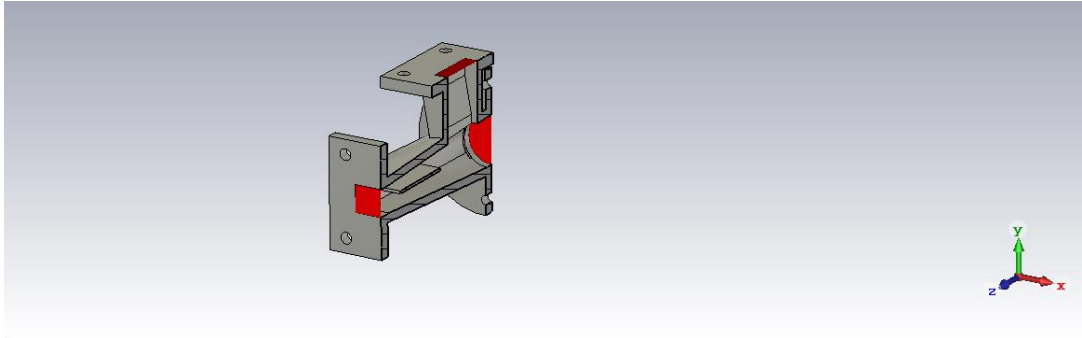
Şekil (5.6) OMT S32 Grafiği



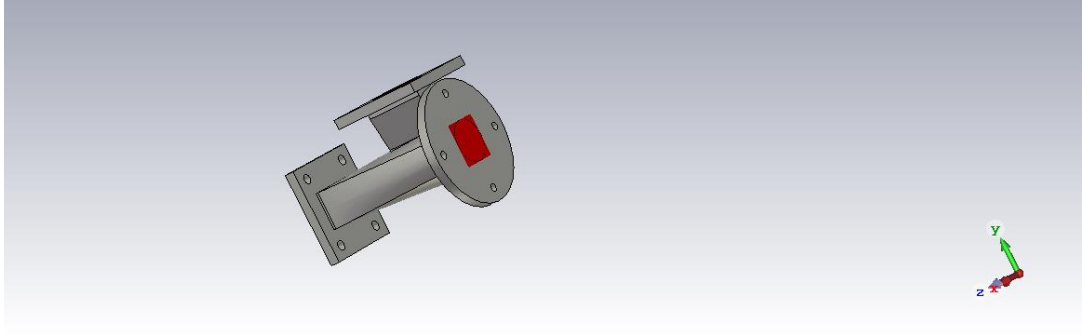
Şekil (5.7) OMT S23 Grafiği



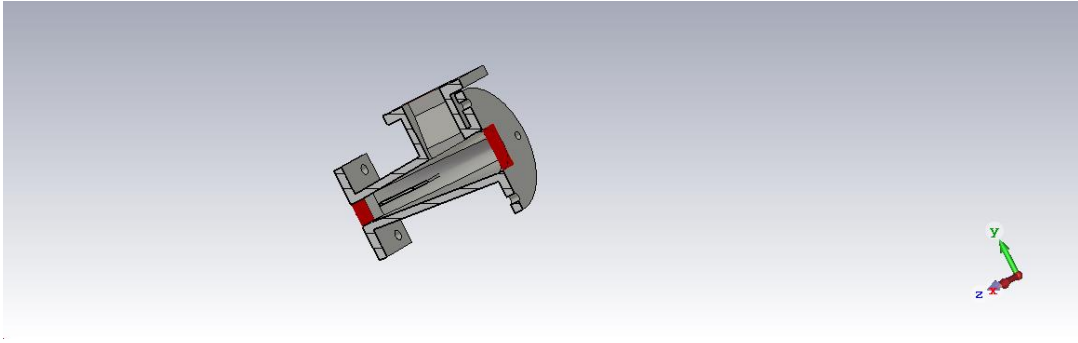
Şekil (5.8) OMT Arka perspektif görünüşü (kapalı halde)



Şekil (5.9) OMT Arka perspektif görünüşü (Açık halde)



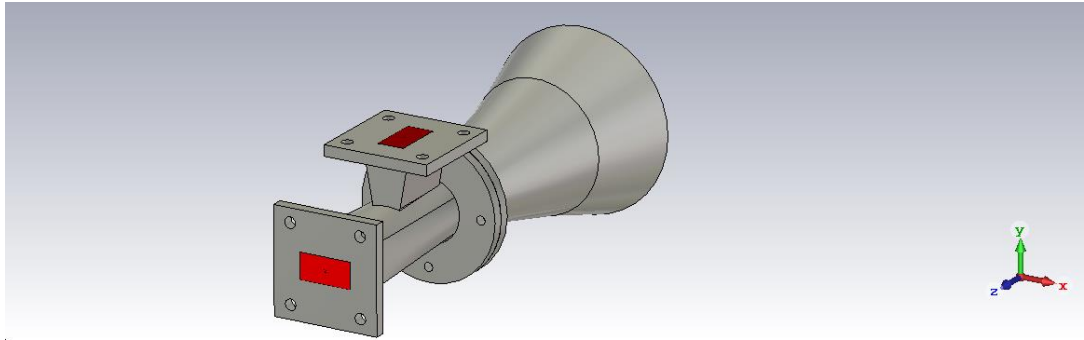
Şekil (5.10) OMT Önden perspektif görünüşü (kapalı halde)



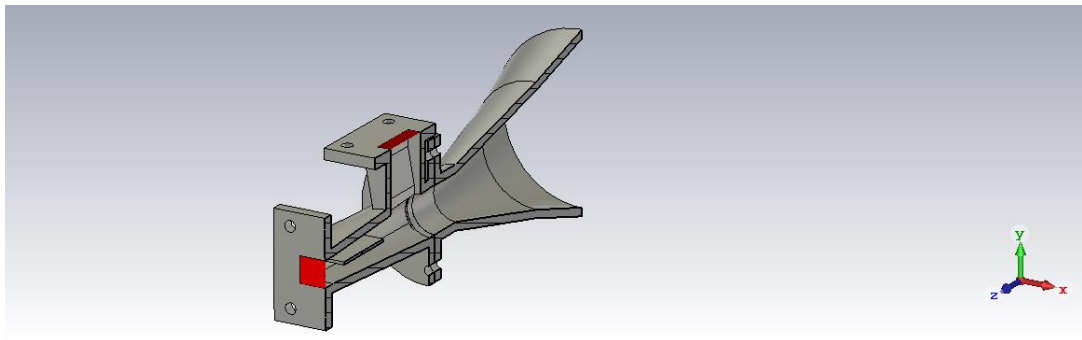
Şekil (5.11) OMT Önden perspektif görünüşü (Açık halde)

KU BAND dik mod ayrıştırıcının tasarımından sonra, cihazın ortak ucuna dairesel horn anten eklenmiştir.

Dairesel horn antenin ortak port' a eklenmesi ile oluşan sistemden ortak port (1 numaralı port) kaldırılmış ve sistem sadece iletim ve alım bandında yer alan iki porttan kullanılmıştır. Bu portlar, iletim portu 1 ve alım portu 2 numaradır.



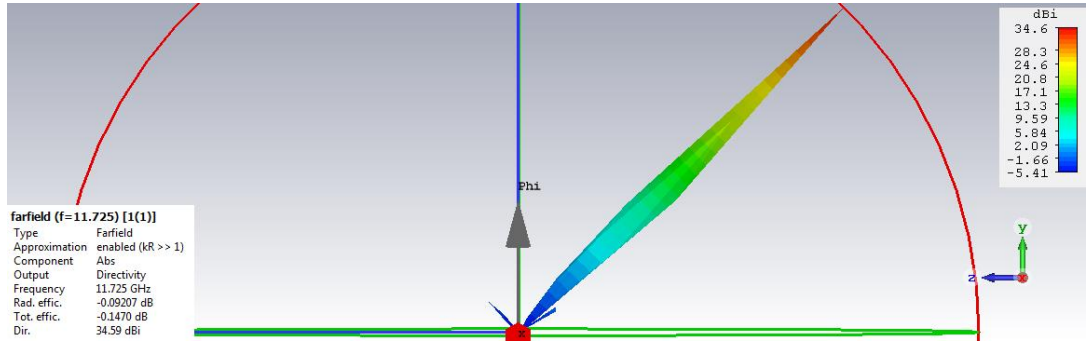
Şekil (5.12) OMT+HORN Arka perspektif görünüşü (Kapalı halde)



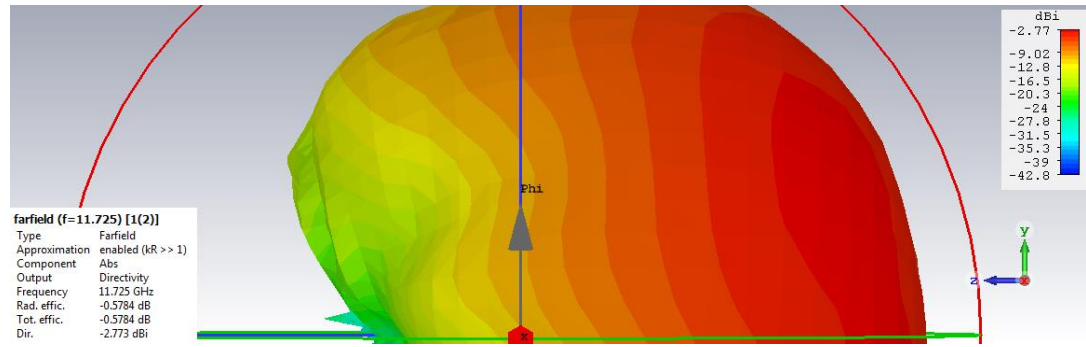
Şekil (5.13) OMT+HORN Arka perspektif görünüşü (Açık halde)

Oluşan son sistemin bir ofset parabolik antenle olan ilişkisi incelenmiştir.

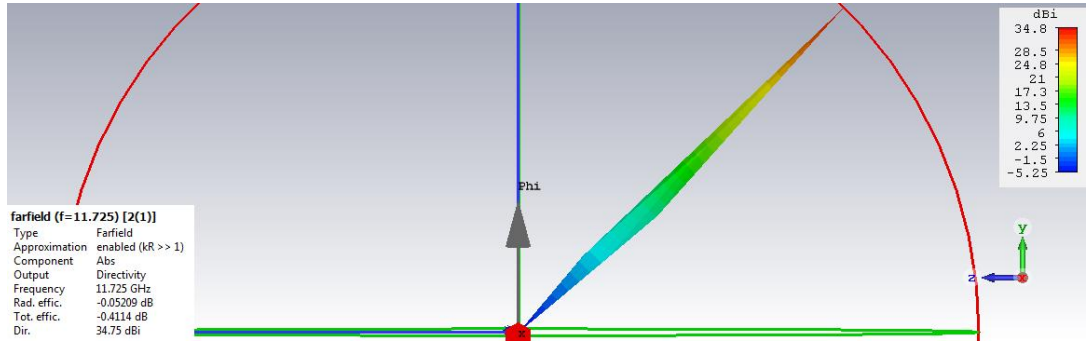
Elde edilen dalga şekilleri aşağıda verilmiştir;



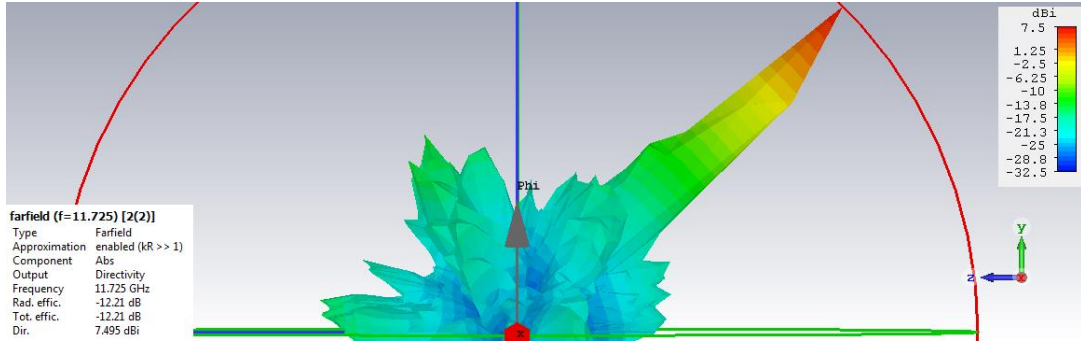
Şekil (5.14) 11.725 [1(1)] Dikey Polarizasyon



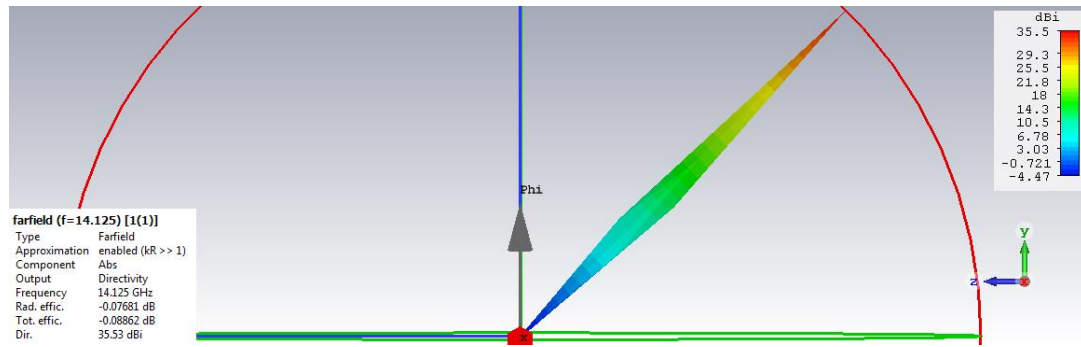
Şekil (5.15) 11.725 [1(2)] Yatay Polarizasyon



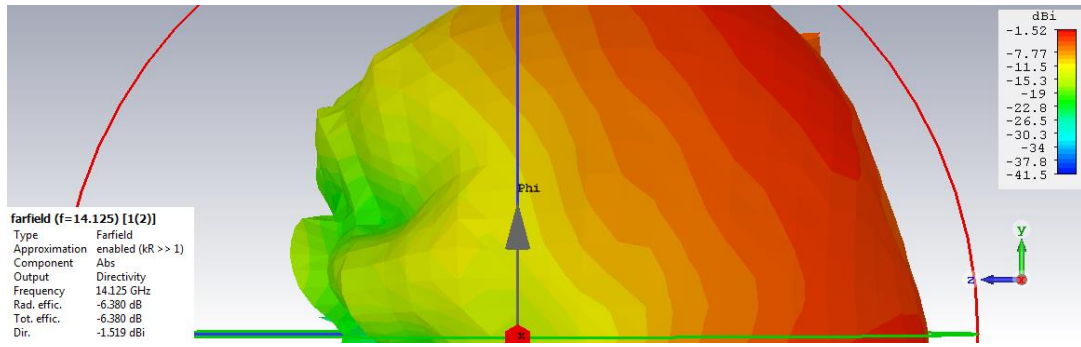
Şekil (5.16) 11.725 [2(1)] Yatay Polarizasyon



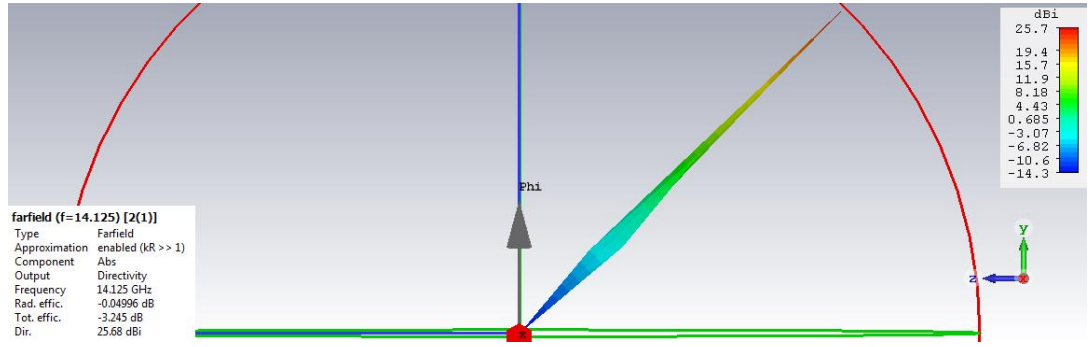
Şekil (5.17) 11.725 [2(2)] Dikey Polarizasyon



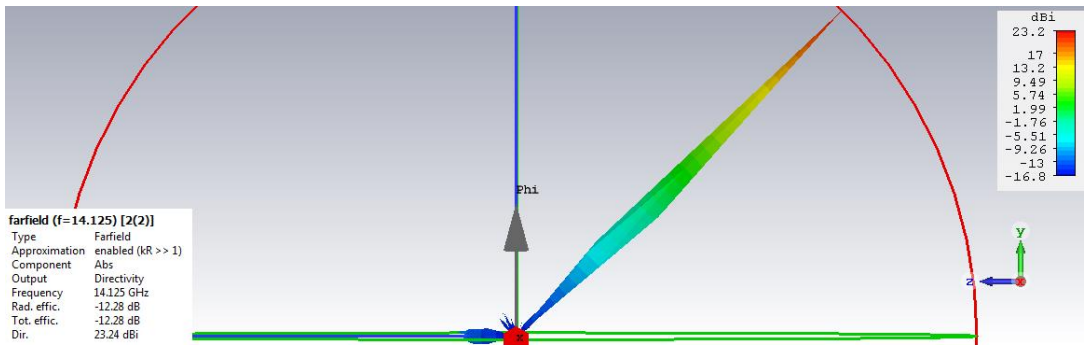
Şekil (5.18) 14.125 [1(1)] Dikey Polarizasyon



Şekil (5.19) 14.125 [1(2)] Yatay Polarizasyon

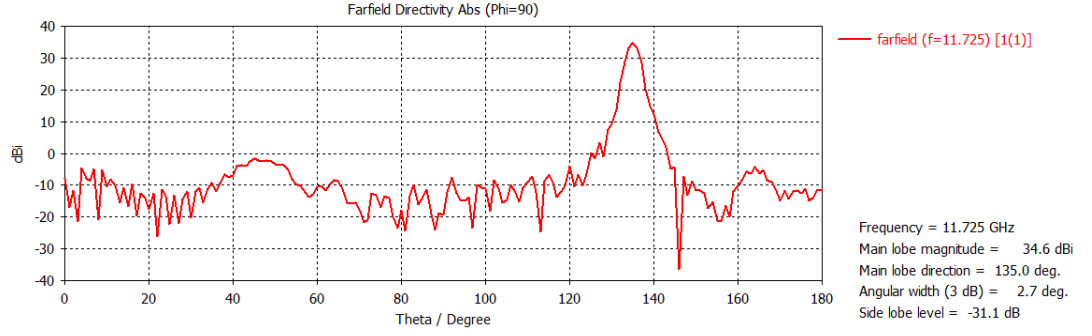


Şekil (5.20) 14.125 [2(1)] Yatay Polarizasyon

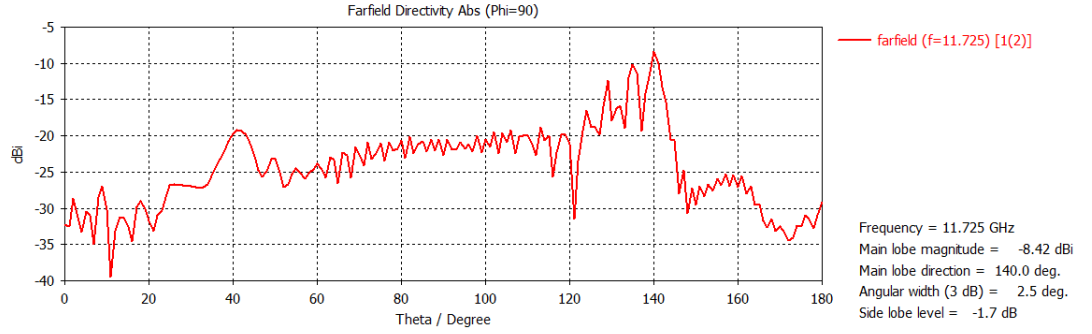


Şekil (5.21) 14.125 [2(2)] Dikey Polarizasyon

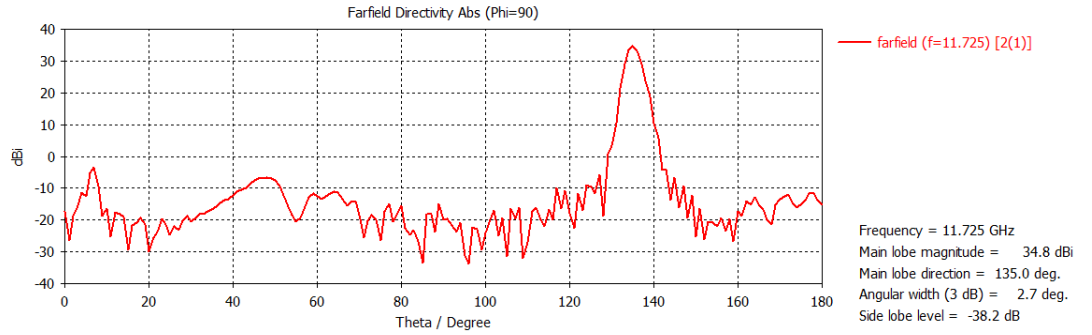
Elde edilen rectangular plot çıktıları aşağıda verilmiştir.



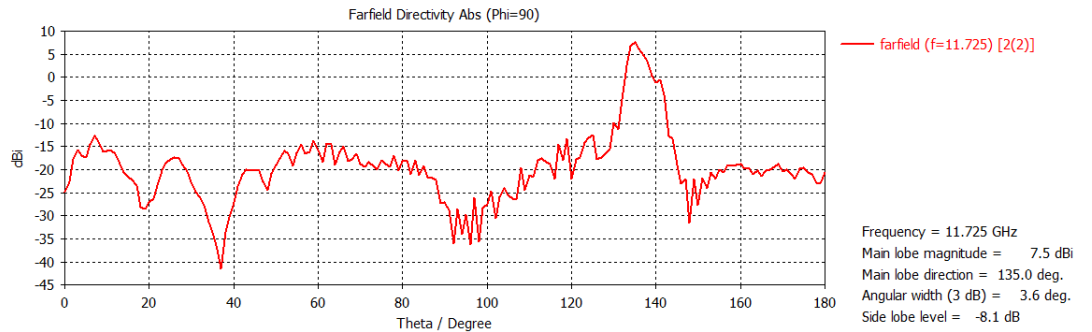
Şekil (5.22) 11.725 [1(1)] Dikey Polarizasyon



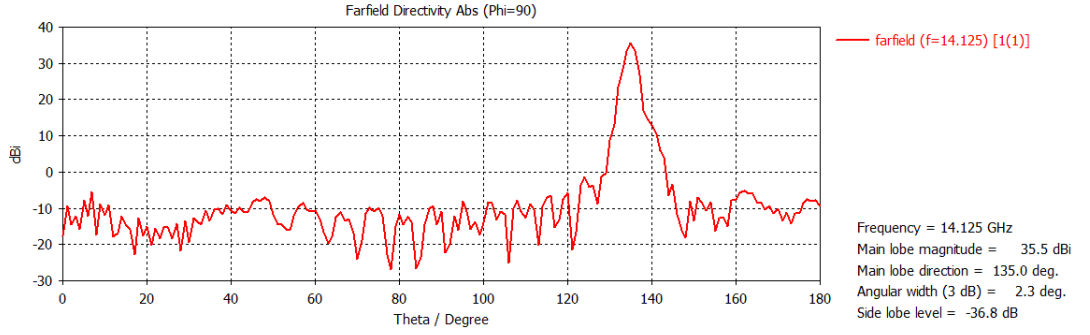
Şekil (5.23) 11.725 [1(2)] Yatay Polarizasyon



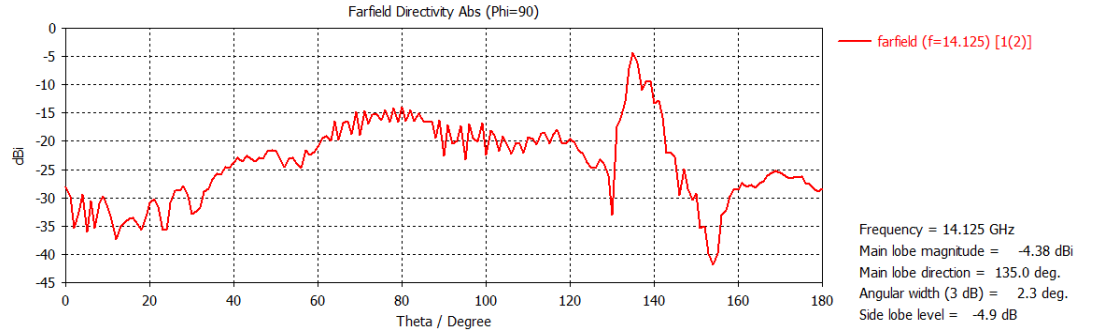
Şekil (5.24) 11.725 [2(1)] Yatay Polarizasyon



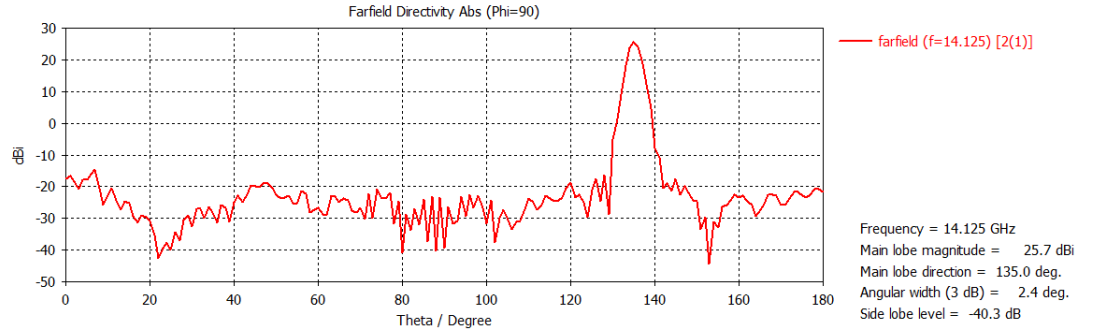
Şekil (5.25) 11.725 [2(2)] Dikey Polarizasyon



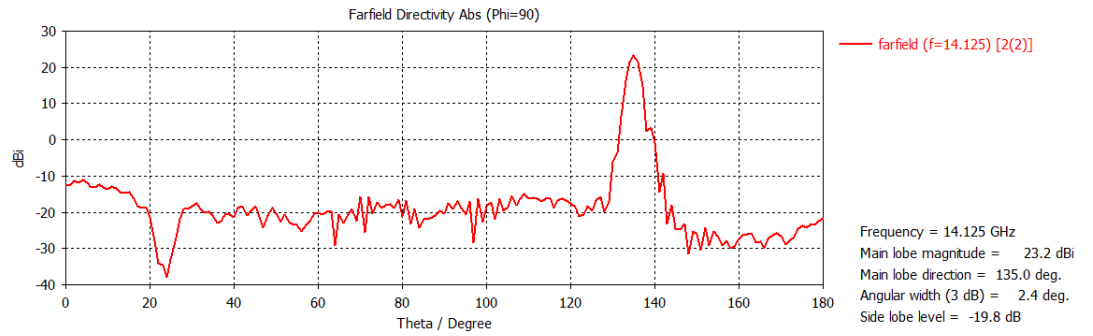
Şekil (5.26) 14.125 [1(1)] Dikey Polarizasyon



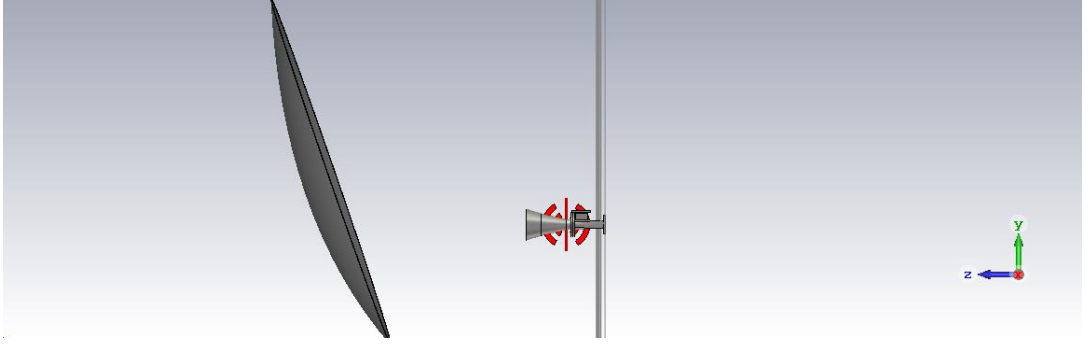
Şekil (5.27) 14.125 [1(2)] Yatay Polarizasyon



Şekil (5.28) 14.125 [2(1)] Yatay Polarizasyon



Şekil (5.29) 14.125 [2(2)] Dikey Polarizasyon



Şekil (5.30) OMT+Horn Anten+Ofset Parabolik Anten Kombinasyonu

Elde edilen simülasyon sonuç çıktıları CST STUDIO programında koşturulmuştur.

Ofset parabolik antenin yerleştirilmesi için aşağıda verilen yöntem kullanılmıştır (bir örnekle desteklenerek). Bu yöntemde matlab programından yararlanılarak anten lokasyonu belirlenmiş ve yerleşimi yapılmıştır.

Frekans	Angular With (3dB)
11.725 [1(1)]	2.7
11.725 [1(2)]	2.5
11.725 [2(1)]	2.7
11.725 [2(2)]	3.6
14.125 [1(1)]	2.3
14.125 [1(2)]	2.3
14.125 [2(1)]	2.4
14.125 [2(2)]	2.4

Çizelge (5.1) Frekans-Açı Genişliği İlişkisi


```

fprintf('odak uzakligi=%f\n\n',f)
fprintf('odak noktasinin parabolik reflektorun alt ucuna uzakligi=%f ',gL)
fprintf('odak noktasinin parabolik reflektorun üst ucuna uzakligi=%f\n',gU)
fprintf('odak noktasinin parabolik reflektorun görüntü merkezine (zC)
uzakligi=%f\n\n',gU)
fprintf('offset antenin alt ucunun z1 e karsi gelen x degeri=%f\n',Dsup)
fprintf('parabolik reflektorun alt ucunun z eksenine izdusumu=%f\n',z1)
fprintf('parabolik reflektorun ust ucunun z eksenine izdusumu=%f\n',z2)
fprintf('H yüksekligine ait z degeri zC=%f\n',zC)
fprintf('H=x=D/2+D' noktası=%f\n\n',H)
fprintf(' offset acısının tumleyeni=%f\n ',fiC)
fprintf('parabolik reflektorun alt ucunu odaga baglayan dogrunun (gL) z eksenini ile
yaptigi aci=%f\n',fiL)
fprintf('z dogrultusunun x=D/2+D' noktasından odak noktasına cizilen dogruyla
yaptigi aci=%f\n',fiF)
fprintf('odak noktasinin parabolik reflektorun üst ucuyla yaptigi aci=%f\n',fiU)
fprintf('offset anteni besleyen koninin tepe acısının yarısı =%f\n',fiE)
fprintf('offset anteni besleyen koninin tam ortasından gecen dogrultunun (max
ışım dogrultusu) z eksenini ile yaptigi aci=%f\n\n',fi0)
% parabol testi odaktan çıkan ışınların z eksenine dik herhangi bir
% eksenden geçerken kat ettikleri mesafe eşit olmalı
disp(' if the program works properly following number must be all same')
gL+f-z1
gU+f-z2
gC+f-zC
disp('path losses are given for upper tip and lower tip consequently in dB')
ETU=20*log(gC/gU)
ETL=20*log(gC/gL)

```

Program çıktısı.

yansitılan dalgaın olusturdugu daire seklindeki goruntusunun capı=1500.000000
antenin gercek fiziksel capı=1585.136035 odak uzakligi=1200.000000

odak noktasinin parabolik reflektorun alt ucuna uzakligi=1201.020833 odak
noktasinin parabolik reflektorun üst ucuna uzakligi=1713.520833

odak noktasinin parabolik reflektorun görüntü merkezine (zC)
uzakligi=1713.520833

offset antenin alt ucunun z1 e karsi gelen x degeri=70.000000

parabolik reflektorun alt ucunun z eksenine izdusumu=1.020833

parabolik reflektorun ust ucunun z eksenine izdusumu=513.520833

H yüksekligine ait z degeri zC=140.083333

'H=x=D/2+D' noktası=820.000000

offset acısının tumleyeni=71.136412

parabolik reflektorun alt ucunu odaga bağlayan doğrunun (gL) z eksenine ile yaptığı
aci=3.341307

z doğrultusunun $x=D/2+D'$ noktasından odak noktasına çizilen doğruyla yaptığı
aci=37.727175

odak noktasının parabolik reflektorun üst ucuyla yaptığı aci=66.382748

offset anteni besleyen koninin tepe açısının yarısı =31.520721

offset anteni besleyen koninin tam ortasından geçen doğrultunun (max ışıma
doğrultusu) z eksenine ile yaptığı aci=34.862027

if the program works properly following number must be all same

ans =

2400

ans =

2.4000e+003

ans =

2400

path losses are given for upper tip and lower tip consequently in dB

ETU =

-4.9164

ETL =

2.1912

SONUÇ

Dalga kılavuzu teorisi ve diğ er anlatılan teorik temellerden başlangıç yapılarak uydu ile haberleşmede kullanılabilcek KU BAND‘ da çalışan  n uç tasarımınn benzetim çalışması yapılmıştır.

Bu tasarım ile, dikey polarizasyonda gönderme (transmitting) işlemi yapılırken aynı anda alış (receive) işlemi yapılabilmektedir. Bunun için ofset parabolik anten, horn anten, ve polarizasyon ayırıcı (OMT) elemanlarından oluşan RF  n uç sistemi için özgün tasarımlar yapılmıştır.

KAYNAKLAR

Bostan, Mehmet S. (2011), *Canlı yayın araçlarına yönelik KU band dalga kılavuzlu bileşen tasarımı*, İstanbul

Gürdal O (1998). *Elektromanyetik Dalga Teorisi*, Bursa.

Iskander, Magdy F., (1992), *Elektromagnetic fields and waves*, New Jersey

Pozar, D., (1998), *Microwave Engineering*, John Wiley and Sons Inc.,
Massachusetts

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2008 yılında NİĞDE ÖMER HALİS DEMİR Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu.

2009 yılında askerlik görevini tamamladı.

2010 yılında bir şirkette mühendis olarak göreve başladı halen bu şirkette görevine devam etmektedir.