

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKROŞERİT TABANLI REFLEKTOMETRE
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkin HALAÇLI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Osman ÇEREZCİ

Ocak 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROŞERİT TABANLI REFLEKTOMETRE
TASARIMI


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Erkin HALAÇLI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRRONİK

Bu tez 23/01./2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


.....
Jüri Başkanı
Prof. Dr. Osman Gereze

Doc. Dr. Cemil ÖZ
.....
Üye


Yrd. Doç. Dr. Murat YILDIZ
.....
Üye


ÖNSÖZ

Mikrodalga temelli araştırmalar tüm dünyada diğer popöler bilim alanlarına göre fazla rağbet görmemesine rağmen teknolojik gelişmede çok önemli bir göstergedir. Bu çalışma alanında ileri gitmiş ülke ve topluluklar savunma ve saldırı sanayisinde birçok ülkenin başedemeyeceği teknolojilere sahip olarak dünya dengelerini kendi lehlerine çevirmişlerdir. Ne yazık ki ülkemizde, mikrodalga mühendisliği henüz başlardadır ve istenilen ivmeyi yakalayamamıştır. Bu alandaki ilerlemeler, bölgesel savunma teknolojilerini geliştirerek ve ülke savunmasını güçlendirerek diğer ülke ve topluluklara caydırıcı etki yapabilir. O yüzden bu alanda daha fazla çalışmalar yapılmalı, üniversiteler ve özel şirketler ortak çalışmalarla teknolojik bağımsızlığa katkıda bulunmalıdır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
ÖZET.....	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. REFLEKTOMETRE TEKNİĞİNE GİRİŞ	3
2.1. Mikrodalga Ağ Teorisi	3
2.1.1. Güç ve yansıma.....	3
2.1.2. Saçılma parametreleri	6
2.2. Mikrodalga Devreleri Tasarım Teknolojileri	8
2.2.1. Mikrodalga iletim hatları	8
2.2.2. Mikrodalga pasif devreler	10
2.2.2.1. Wilkinson güç bölücü	10
2.2.2.2. Yönlü kuplör	11
2.2.2.3. 90 ⁰ hibrit kuplör.....	12
2.2.2.4. 180 ⁰ hibrit kuplör	13
2.2.3. Üretim teknolojileri.....	13
2.3. 6-Port Tekniği.....	15
2.3.1. 6-Port ölçüm tarihi	15

2.3.2.	Kullanım alanları	16
2.3.2.1.	Mikrodalga ađ ölçümleri.....	17
2.3.2.2.	Kablosuz uygulamalar	20
2.3.2.3.	Mikrodalga uygulamaları.....	20
BÖLÜM 3. 6-PORT REFLEKTOMETRE TASARIMI		22
3.1.	Giriş	22
3.2.	6-Port Reflektometre Analizi	22
3.2.1.	6-Port reflektometrenin ikinci dereceden modeli	25
3.3.	Hata Hesaplama.....	27
3.4.	6-Port Reflektometre Tasarım Kriterleri	28
3.4.1.	Optimum 6-Port reflektometre.....	29
3.5.	Mikroşerit Tabanlı Reflektometre Simülasyonu	29
3.5.1.	6-port reflektometre simülasyon şeması	31
3.5.2.	Simülasyon sonuçları	32
BÖLÜM 4. REFLEKTOMETRE GERÇEKLENMESİ		35
4.1.	Giriş	35
4.2.	Devrenin Üretilmesi	35
4.3.	Devrenin Analizi	37
4.4.	Devrenin Kalibrasyonu.....	40
4.5.	Devrenin Testleri	41
4.5.1.	Simülasyon sonuçları ile karşılaştırma	44
4.5.2.	Örnek bir uygulama olarak reflektometrenin malzeme içi görüntüleme amacıyla kullanılması	44
BÖLÜM 5. SONUÇ.....		47
KAYNAKLAR		48
ÖZGEÇMİŞ		50

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ADS	: Advanced design system
Γ	: Yansıma katsayısı
Z_0	: Karakteristik empedans
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
ϵ_{eff}	: Efektif dielektrik sabiti
λ	: Dalga boyu
DUT	: Device under test
IF	: Intermediate frequency
MHMIC	: Monolithic hybrid microwave integrated circuit
MIC	: Microwave integrated circuits
MMIC	: Monolithic microwave integrated circuit
NBS	: National bureau of standards
NIST	: National institute of standards and technology
RF	: Radyo frekansı
SDR	: Software defined radio
SMA	: SubMiniatur type a
UWB	: Ultra wide band
VNA	: Vektor network analyser

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Tek portlu ağda kuplör kullanarak gelen ve yansıyan dalgaların çıkarımı.....	4
Şekil 2.2.	İki portlu ağda kuplör kullanarak gelen ve yansıyan dalgaların çıkarımı.....	6
Şekil 2.3.	N-portlu mikrodalga ağı.....	7
Şekil 2.4.	Çeşitli mikrodalga iletim hatları.....	9
Şekil 2.5.	Sonlandırılmış bir iletim hattı.....	9
Şekil 2.6.	Wilkinson güç bölücü.....	10
Şekil 2.7.	Yönlü kuplör.....	12
Şekil 2.8.	90 ⁰ hibrit kuplör.....	12
Şekil 2.9.	180 ⁰ hibrit kuplör.....	13
Şekil 2.10.	MIC teknolojisi ile yapılmış bir güç yükselteci.....	14
Şekil 2.11.	MHMIC teknolojisi ile yapılmış ve entegre güç dedektörlü 6-portlu jonksiyon.....	14
Şekil 2.12.	MMIC teknolojisi ile yapılmış 6-portlu jonksiyon.....	15
Şekil 2.13.	Direkt çevrim alıcısı olarak reflektometre.....	16
Şekil 2.14.	Bir vektör ağ analizörünün blok şeması.....	17
Şekil 2.15.	Ağ analizörü ile ileri saçılma parametreleri ölçümü.....	18
Şekil 2.16.	Ağ analizörü ile geri saçılma parametreleri ölçümü.....	18
Şekil 2.17.	Otomatik ağ analizörü.....	19
Şekil 2.18.	6-port direkt çevrim alıcısı.....	20
Şekil 2.19.	6-port teknolojisi ile bir radar uygulaması.....	21
Şekil 3.1.	6-port reflektometre.....	23
Şekil 3.2.	6-port durum denklemlerin grafiksel çözümü.....	27

Şekil 3.3.	Gerçek bir reflektometrenin hata kutusu ağının eklenmesi ile modellenmesi.....	27
Şekil 3.4.	Bir aşamalı wilkinson güç bölücü s-parametrleri.....	30
Şekil 3.5.	İki aşamalı wilkinson güç bölücü s-parametrleri.....	31
Şekil 3.6.	Tasarlanan reflektometrenin ADS simülasyonu devre şeması.....	32
Şekil 3.7.	ADS’te tasarlanan reflektometrenin simülasyon sonuçları.....	34
Şekil 4.1.	Yansıma katsayısının reel kısmını ölçen reflektometre.....	36
Şekil 4.2.	Yansıma katsayısının imajiner kısmını ölçen reflektometre.....	37
Şekil 4.3.	Birinci devre için reflektometrede güç akışı.....	38
Şekil 4.4.	İkinci devre için reflektometrede güç akışı.....	39
Şekil 4.5.	Üretilen devrenin portlarının ağ analizörü ile ölçülen parametreleri.....	42
Şekil 4.6.	Devrenin ölçüm sonuçları.....	43
Şekil 4.7.	Reflektometrede alınan ağ analizörü ölçümü.....	43
Şekil 4.8.	Malzeme içi görüntüleme test düzeneği.....	45
Şekil 4.9.	Malzeme içi görüntüleme test sonuçları.....	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Reflektometre, 6-port jonksiyonu, Güç bölücü

Yüksek frekanslı mikrodalga devrelerin yansıma katsayısı ölçülerinde reflektometreler kullanılabilir. Reflektometreyi diğer ölçüm cihazlarından ayıran, faz bilgisini sadece genlik ya da güç ölçümü yaparak elde edebilmesidir. Diğer önemli avantajı ise pahalı ve karmaşık aktif devreler içermemesi ve ölçüm sonuçlarının yeterli olmasıdır.

Tezde, ölçüm portuna takılan cihazın yansıma katsayısının bulunması amacıyla geniş bantlı mikroşerit tabanlı bir reflektometre tasarlanmıştır. Tasarımda yalnızca wilkinson güç bölücüleri ve gecikme hatları kullanılarak devrenin üretimi kolaylaştırmak amaçlanmıştır. Devre üretilmeden önce ADS'te simüle edilmiş ve başarılı sonuç elde edilmiştir. Ardından FR-4 malzemeye basılmış ve test edilmiştir. Test sonuçları simülasyon sonuçlarıyla benzerlik oluşturmuştur.

DESIGN OF A WIDEBAND REFLECTOMETER BY USING MICROSTRIP LINES

SUMMARY

Key words: Reflectometer, 6-port junction, Power divider

Reflectometers can be used to measure reflection coefficient of microwave devices. The distinction point of the reflectometer is to gain phase information through using only amplitude or power measurement. Maintaining a highly accurate result although it does not contain costly and complex active circuits is another advantage of the reflectometer.

In order to measure reflection coefficient of a device under test, a wideband reflectometer is designed by using microstrip transmission lines. The goal of the design is to make produce process simpler and for that, it is only used wilkinson power dividers and delay lines. Circuit is simulated by ADS before the production and the simulation results are satisfied. Then circuit is printed on to FR-4 substrate and tested. Imperfections are calibrated. Compared to the simulation, good results are obtained.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Altı portlu reflektometreler genellikle yüksek frekanslı elektronikte kullanılan ölçüm aletleridir. Hem iki elektromanyetik dalga arasındaki faz farkını hem de genliğini ölçebilir. Test edilen cihazın kompleks yansıma katsayısının ölçülmesi reflektometrenin genel kullanım amacıdır. Buradaki kompleks ifadesi hem genlik hem de faz bilgisini içermesinden dolayıdır. Ayrıca söz konusu yansıma katsayısı test edilen cihazın giriş empedansı ile doğrudan ilgilidir.

Altı portlu reflektometreyi özel yapan, faz bilgisinin, iki elektromanyetik dalganın dört farklı lineer kombinasyonunun sadece genlik (ya da güç) ölçümü ile elde edilmesidir. Bu da genel olarak 6 portlu reflektometrenin iki giriş ve dört çıkış portlu pasif bir lineer devre olması demektir ki bu dört çıkış portundan, giriş portlarından gelen farklı lineer kombinasyonlar üretilir.

Altı portlu reflektometre, 70'lerin başlarında, Glenn F. Engen ve şimdiki ismi National Institute of Standards and Technology (NIST) olan Ulusal Standartlar Bürosu (National Bureau of Standards, NBS) çalışanları tarafından geliştirildi [1]. Bu ilk çalışmadan sonra temel prensip, gerilim, akım, empedans ve faz karakterizasyonu yönünde gelişmiş [2] ve alternatif bir ağ analizörü yaklaşımı olarak sonuçlanmıştır [3]. Reflektometre prensibi mikrodalga ağlarını analiz etme amacıyla kullanılmasının yanında malzeme davranışının tespitinde de kullanılır. Örneğin bağıl elektriksel geçirgenlik [4], adaptif yük ve kaynak çekimi [5] ya da anten yakın alan karakterizasyonu gibi [6]. Reflektometrenin diğer tekniklere göre büyük avantajlarından en önemlisi yüksek güçlü işaretlerle çalışabilme kabiliyetidir [7]. Örnek olarak güç yükselteçleri ya da yarı iletken devrelerin yüksek işaret analiz sistemlerinde kullanımı verilebilir [8]. Reflektometre konsepti hassas faz ölçümüne olanak tanımaktadır. Bu özellik kullanılarak otomobil radar sensörleri [9], [10] ya da gelen dalganın açısının tespiti konusu [11-14] reflektometre ile gerçekleştirilmiştir.

En büyük avantajı altı portlu reflektometrenin nispeten sade yapısıdır. Geleneksel ağ analizörleri frekans çevrimi ve faz ölçümü için yüksek kaliteli ve pahalı komponent gerektirirken bir altı portlu reflektometre basit pasif lineer devre ile birkaç güç dedektörüne ihtiyaç duyar.

Bir diğer avantajı ölçüm laboratuvarları için önemlidir. Altı portlu reflektometre ile ölçüm yapılırken, her yapılan ölçümün doğruluğunu kestirecek fazla bilgiler de elde edilir. Ayrıca altı portlu reflektometre yüksek güçlü işaretler altında çalışan devrelerin davranışlarını ölçmek için de çok faydalıdır. Yüksek güçlü işaret ölçümünde, güç ölçümü cihazlarını tasarlamak geleneksel ağ analizörlerinde kullanılan devreleri tasarlamaktan çok daha kolaydır.

Temel olarak test altındaki cihazların giriş portundaki yansımayı genlik ve faz bazında ölçen altı portlu reflektometreler bu özelliği ile ağ analizörlerin bu amaçla kullanıldığı her yerde daha sade, ucuz ve küçük yapısıyla kullanılabilir. Literatürde mikrodalga görüntüleme için kullanılan makalelere rastlanmakla birlikte örnek olarak kanser tespiti verilebilir. Ayrıca malzeme içi görüntülemeye esas olan gönderilen işaretin yansıması bilgisi altı portlu reflektometre ile de elde edilebildiğinden pahalı çözümlerin yanında etkili bir alternatif oluşturabilir.

BÖLÜM 2. REFLEKTOMETRE TEKNİĞİNE GİRİŞ

2.1. Mikrodalga Ağ Teorisi

Mikrodalga frekanslarında, gerilim ve akım değerleri ölçülmek istendiğinde pratikte bazı engellerle karşılaşılır. Bu engellerin aşılması için gelen ve yansıyan güçler ve bunların parametreleri ölçülür. Direkt olarak tamamen güç ölçmeyle ilgili olan saçılma parametreleri mikrodalga devreleri ve ağlarını karakterize etmek amacıyla kullanılır.

2.1.1. Güç ve yansıma

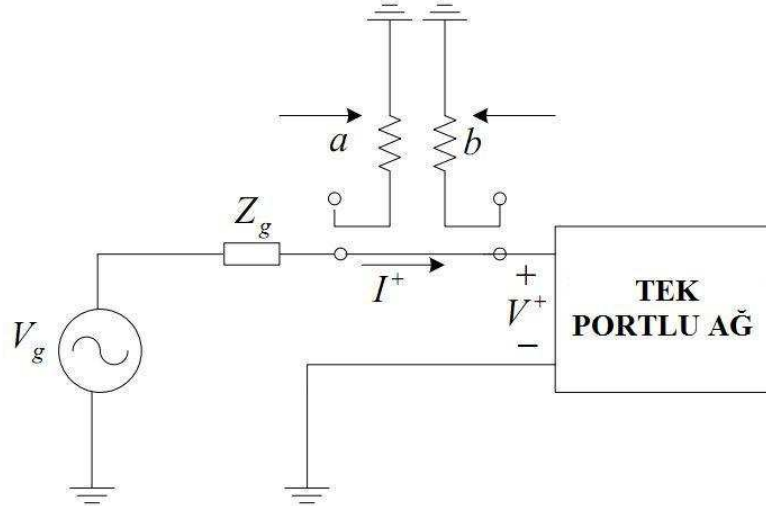
Resim 2.1, Z_g empedanslı V_g gerilim kaynağına bağlı Z empedanslı bir portlu bir ağı göstermektedir. Güç, gerilim kaynağından tek portlu ağı aktarılmaktadır. Uçtaki akım ve gerilim değerleri

$$i = \frac{V_g}{Z_g + Z} \quad (2.1)$$

ve

$$v = \frac{ZV_g}{Z_g + Z} \quad (2.2)$$

şeklinde olur.



Şekil 2.1. Tek portlu ağda kuplör kullanarak gelen ve yansıyan dalgaların çıkarımı

Gerilim kaynağından maksimum güç elde etmek amacıyla yük tarafında $Z = Z_g^*$ eşlenik (conjugate) eşitlik durumu sağlanmalıdır. Eğer $Z_g = R_g + jX_g$ olduğunu varsayarsak, bu koşullarda gelen akım ve gerilim değerleri [15]'de anlatılmıştır:

$$I^+ = \frac{V_g}{Z_g^* + Z_g} = \frac{V_g}{2R_g} \quad (2.3)$$

ve

$$V^+ = \frac{Z_g^* V_g}{Z_g^* + Z_g} = \frac{Z_g^* V_g}{2R_g} \quad (2.4)$$

Gelen akım ile gelen gerilim arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir:

$$V^+ = Z_g^* I^+ \quad (2.5)$$

Elde edilebilecek maksimum güç aşağıdaki gibidir. Buradaki akım ve gerilim değerleri RMS değerlerdir.

$$P_A = \text{Re}(VI^+) = \frac{|V_g|^2}{4R_g} \quad (2.6)$$

(2.4) ve (2.5) denklemlerinde görüldüğü üzere gelen gerilim ve akım değerleri tek portlu ağın empedansından bağımsızdır. Resim 2.1'e göre uç gerilim ve akımı şu şekildedir:

$$V = V^+ + V^- \quad (2.7)$$

$$I = I^+ + I^- \quad (2.8)$$

Verilen gerilim kaynağından maksimum elde edilebilen güç, aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_{inc} = \text{Re} \left[V^+ (I^+)^* \right] = \frac{|V_g|^2}{4R_g} \quad (2.9)$$

(2.4) kullanılarak gelen güç şu şekilde yazılabilir:

$$P_{inc} = \frac{|V^+|^2 R_g}{|Z_g^*|^2} \quad (2.10)$$

Normalize edilmiş gelen dalganın genliği olan a ve yansıyan dalga olan b , gelen ve yansıyan gücün karekökü olarak şu şekilde tanımlanabilir:

$$|a| = \sqrt{P_{inc}} = \frac{V^+ \sqrt{R_g}}{Z_g^*} = I^+ \sqrt{R_g} \quad (2.11)$$

$$|b| = \sqrt{P_r} = \frac{V^- \sqrt{R_g}}{Z_g^*} = I^- \sqrt{R_g} \quad (2.12)$$

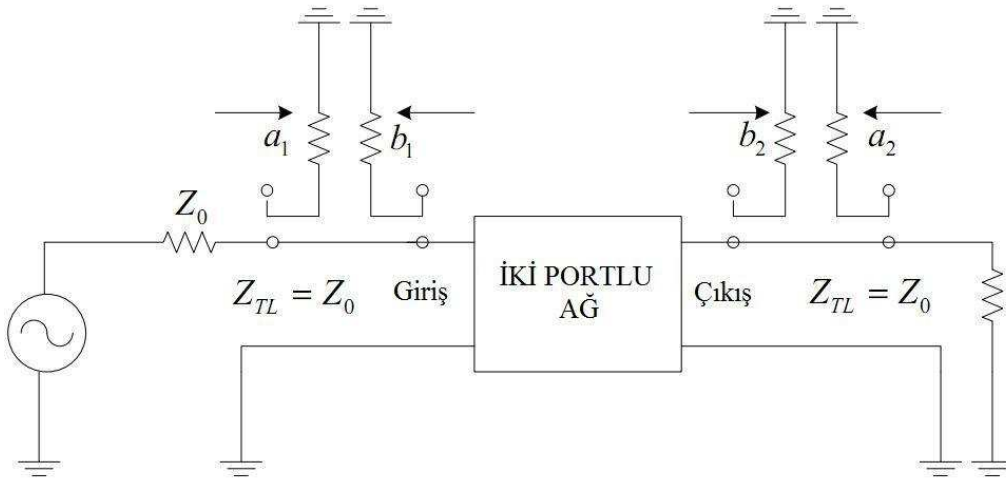
a ve b birimi gücün karekökü olan değerlerdir. Direkt olarak güç aktarımı ile ilişkilidirler. Tezde ölçmeye çalışılan, normalize yansıyan dalganın normalize gelen dalgaya oranı olan yansıma katsayısıdır:

$$\Gamma = \frac{b}{a} \quad (2.13)$$

2.1.2. Saçılma parametreleri

Normalize edilmiş gelen dalga ile yansıyan dalga saçılma matrisi ile alakalıdır. Saçılma matrisi, bir mikrodalga ağını verilen bir frekansta ve çalışma koşullarında tanımlar. Şekil 2.2'deki iletim hatlarının empedansının Z_0 olduğu varsayılırsa, o zaman iki portlu mikrodalga ağının saçılma matrisi şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$



Şekil 2.2. İki portlu ağda kuplör kullanarak gelen ve yansıyan dalgaların çıkarımı

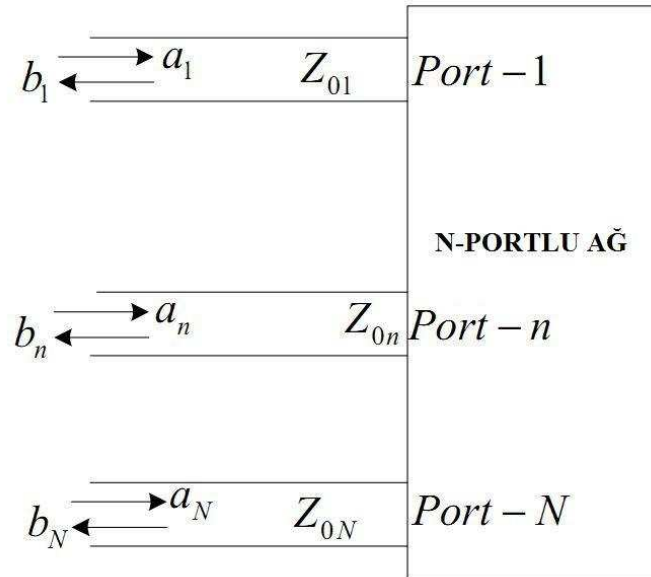
Burada $|s_{11}|^2 + |s_{11}|^2 = 1$, çıkış Z_0 ile sonlandırıldığında giriş yansımaya katsayısı; $s_{21} = b_2 / a_1 |_{a_2=0}$, ileri iletim katsayısı; $s_{12} = b_1 / a_2 |_{a_1=0}$, çıkış iletim katsayısı ve $s_{22} = b_2 / a_2 |_{a_1=0}$ da giriş Z_0 ile sonlandırıldığında çıkış yansımaya katsayısıdır. Eğer ağ kayıpsız ve pasif ise giriş porta uygulanan güç ya aktarılır ya da geri yansır. Yani iletilen güçle yansıyan güç gelen güce eşittir:

$$|s_{11}|^2 + |s_{11}|^2 = 1 \quad (2.15)$$

Saçılma parametrelerinin avantajı tüm ağın portlarına yönlü kuplör konarak değerlerin hesaplanabilmesidir. Yönlü kuplörler gelen ve yansıyan dalgaların gücünü ayırarak ölçme işlemini basitleştir. Bunun yanında, s-parametreleri ölçmek için portlardaki iletim hatları uygun şekile sonlandırılmalıdır [16].

Saçılma parametreleri N pozitif bir tamsayı olmak üzere herhangi N-portlu ağ tanımlamak için kullanılabilir. Farklı portların karakteristik empedansları aynı olabilir. Bu durum bir çok pratik uygulamalarda görülebilir. Bunun yanında, saçılma matrisi farklı portlarda farklı karakteristik empedanslar için genelleştirilebilir [17].

Şekil 2.3'te a_n n. portta giden dalga ve b_n de n. portta yansıyan dalga olmak üzere N-portlu bir ağ gösterilmektedir.



Şekil 2.3. N-portlu mikrodalga ağ

Saçılma parametresi yada kısa ifadeyle [S] matrisi giden ve yansıyan dalgalar arasındaki ilişkiye göre şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1N} \\ s_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ s_{N1} & \cdots & \cdots & s_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

[S] matrisin özel bir elemanı şu şekilde tanımlamıştır:

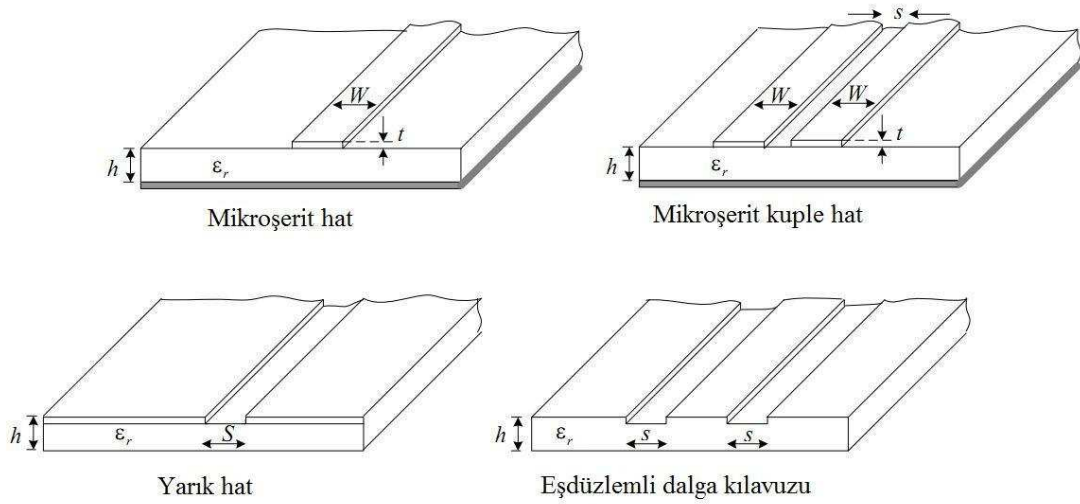
$$s_{i,j} = b_i / a_j \big|_{a_k=0 \text{ for } k \neq j} \quad (2.17)$$

Bir VNA (Vektör Network Analyzer) genellikle saçılma parametreleri ölçmek amacıyla kullanılır. VNA, basit ifadeyle, bir mikrodalga ağda iletilen ve yansıyan dalgaların genliğini işleyen dört kanallı mikrodalga alıcısıdır ve genel olarak üç ana bölümden oluşur: RF kaynak, test seti, IF (Intermediate Frequency) ve sayısal işleme. Bir DUT'in saçılma parametrelerini ölçmek için RF kaynağı belirli bir bantta tarama yapar, dört portlu reflektometre gelen, yansıyan ve iletilen RF dalgaları örnekler ve bir anahtar da ağın DUT'in hangi porttan sürüleceğini sağlar.

2.2. Mikrodalga Devreleri Tasarım Teknolojileri

2.2.1. Mikrodalga iletim hatları

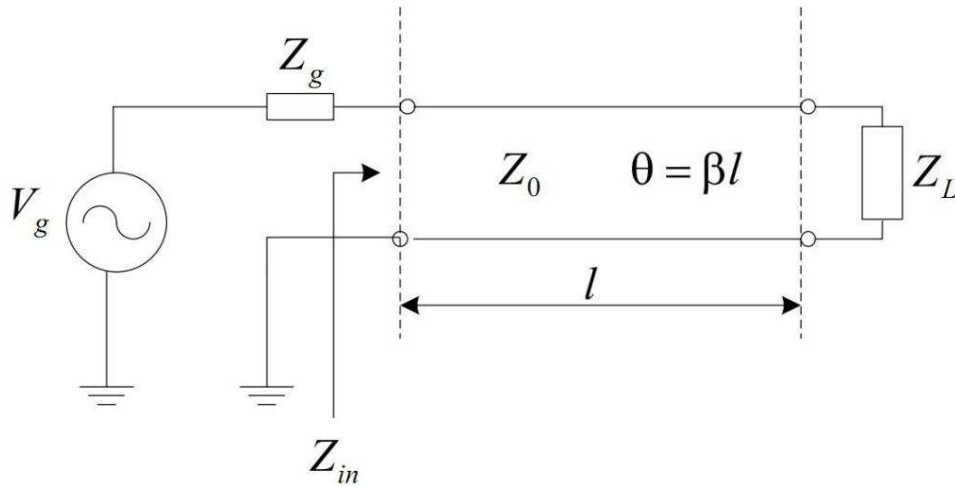
İletim hatları, mikrodalga devre tasarımının temel pasif elemanlarıdır. Yönlü kuplör, 180° hibrit ve filtreler gibi pasif mikrodalga devrelerin gerçekleştirilmesinde ve işaretlerin iletilmesi amacıyla kullanılırlar. Bir iletim hattı, karakteristik empedans, Z_0 ve elektriksel uzunluk, $\theta = \beta_g l$ terimleriyle tanımlanır. Burada $\beta_g = 2\pi\sqrt{\epsilon_{eff}} / \lambda$ iletim hattı boyunca yayılma sabiti, ϵ_{eff} , hattın efektif dielektrik sabiti, λ serbest uzay dalga boyu ve l de iletim hattın fiziksel uzunluğudur. Mikrodalga devrelerde yaygın olarak kullanılan iletim hatları şerit hat, yarık hatları ve eşdüzlemli dalga kılavuzlarıdır [17]. Şekil 2.4 bazı iletim hattı çeşitlerini göstermektedir:



Şekil 2.4. Çeşitli mikrodalga iletim hatları

θ uzunluğuna sahip, kayıpsız ve uyumlu iki portlu bir iletim hattın saçılma parametreleri şu şekildedir:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\theta} \\ e^{-j\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$



Şekil 2.5. Sonlandırılmış bir iletim hattı

Pratikte bir iletim hattı bir yük ile sonlandırılır. Sonlandırılmış bir iletim hattı şekil 2.5'te verilmiştir. Yükün empedansı Z_L , hattın fiziksel uzunluğu l ve iletim hattın

karakteristik empedansı Z_0 olarak varsayarsak klasik iletim hattı teorisine göre kayıpsız ve sonlandırılmış bir hattın giriş empedansı şu şekildedir [17]:

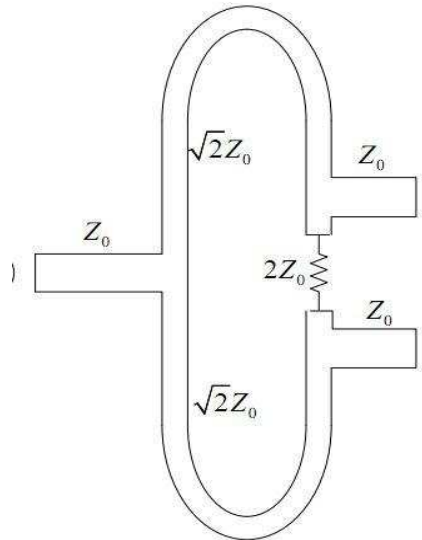
$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (2.19)$$

2.2.2. Mikrodalga pasif devreler

Bir mikrodalga alt sistemi iletim hatları, pasif devreler ve aktif devreler içerir. Pasif devreler mikrodalga işaret işlemede çok büyük bir öneme sahiptir. Bu devreler genellikle ayırık elemanlar ve iletim hatları kullanılarak gerçekleştirilir.

2.2.2.1. Wilkinson güç bölücü

Bir wilkinson güç bölücü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu bölücüler gücü aynı fazda bölerler. İstenilen oranda güç bölümü yapabilen bu güç bölücüler genel olarak eşit oranda güç bölmek amacıyla kullanılırlar.



Şekil 2.6. Wilkinson güç bölücü

Genellikle mikroşerit ya da şerit hatlarla yapılırlar. İdeal bir wilkinson güç bölücünün saçılma parametreleri şu şekildedir:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & -j/\sqrt{2} & -j/\sqrt{2} \\ -j/\sqrt{2} & 0 & 0 \\ -j/\sqrt{2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.2.2.2. Yönlü kuplör

Bir yönlü kuplör tüm portları uyumlu bir dört-portlu devredir. Simetrik bir yönlü kuplörün saçılma parametreleri şu şekildedir:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & j\beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & j\beta \\ j\beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & j\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Burada α ve β arasında aşağıdaki şekilde bir ilişki vardır:

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1 \quad (2.22)$$

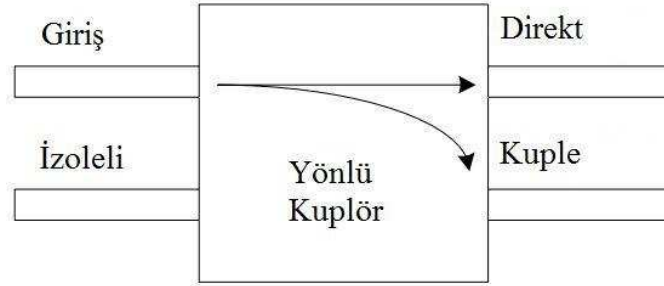
Yukarıdaki saçılma parametresinden de anlaşılacağı üzere, 1. porttan gönderilen güç 3. porta $|s_{13}|^2 = \beta^2$ kuplaj faktörü ile kuplör olur. Kalan güç ise 2. porta $|s_{12}|^2 = \alpha^2 = 1 - \beta^2$ katsayısı ile iletilir. İdeal bir yönlü kuplörde 4. porta güç iletimi olmaz. Burada port 1 kuplörün giriş portu iken, port 2 direkt (through) port, port 3 kuplör port ve port 4 ise izole port olarak isimlendirilir. Aşağıdaki ifadeler de bir yönlü kuplörün karakterini özetlemektedir:

$$Kuplaj = C = 10 \log \frac{P_1}{P_3} = -20 \log \beta \text{ dB} \quad (2.23)$$

$$Yönlülük = D = 10 \log \frac{P_3}{P_4} = 20 \log \frac{\beta}{|s_{14}|^2} \text{ dB} \quad (2.24)$$

$$\text{İzolasyon} = I = 10 \log \frac{P_1}{P_4} = -20 \log |s_{14}|^2 \text{ dB} \quad (2.25)$$

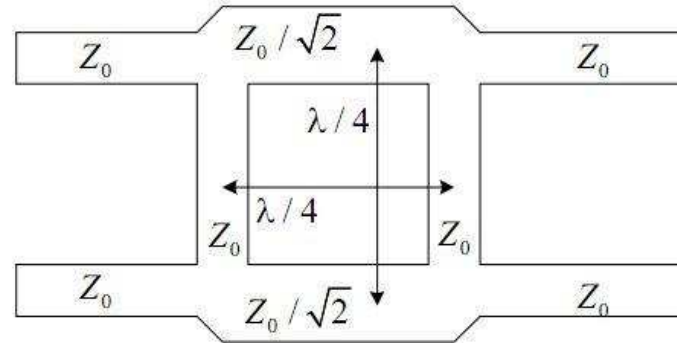
Aşağıda örnek bir yönlü koplör görülebilir:



Şekil 2.7. Yönlü koplör

2.2.2.3. 90° hibrit koplör

Hibrit koplörler koplaj faktörleri 3 dB olan yönlü koplörlerin özel bir halidir. Bir 90° hibrit koplör aşağıdaki şekilde görülmektedir:



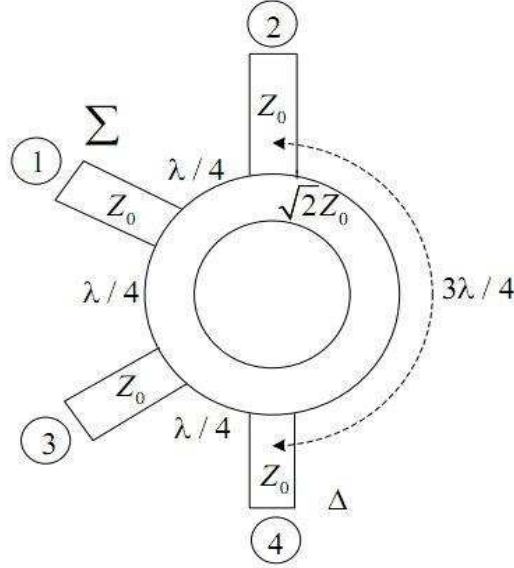
Şekil 2.8. 90° hibrit koplör

Bu koplörler isimlerini iki çıkış portları arasında 90 derece faz farkı olduğu için almışlardır: Saçılma parametrleri şu şekildedir:

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & j & 0 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 0 & j & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.2.2.4. 180° hibrit kuplör

Aşağıda şekli verilen bu kuplörlerde port-4'ten beslendiğinde çıkış portları port-2 ve port-3 arasında 180 derece faz vardır.



Şekil 2.9. 180° hibrit kuplör

Saçılma parametreleri aşağıdaki şekildedir:

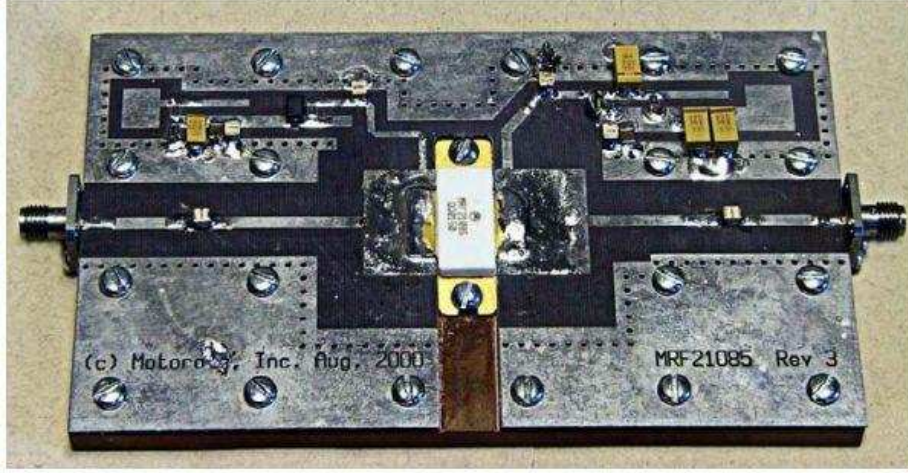
$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2.2.3. Üretim teknolojileri

Mikrodalga ve RF pasif ve aktif devreleri; iletim hatları, mikrodalga pasif devreleri ve katı hal aygıtlarla gerçekleştirilir. Bilindiği üzere, kablosuz ve mikrodalga sistemleri küçük, hafif ve ucuz olmayı gerektirir. Mikrodalga katı hal aygıtlar farklı üretim teknolojileri kullanarak teknoloji ilerlemesinde etkin rol üstlenir. Modern mikrodalga devreleri genellikle mikrodalga entegreli devreleri (MIC), monolitik hibrit mikrodalga entegre devreleri (MHMIC) ve monolitik mikrodalga entegre devreleri (MMIC) kullanmaktadır.

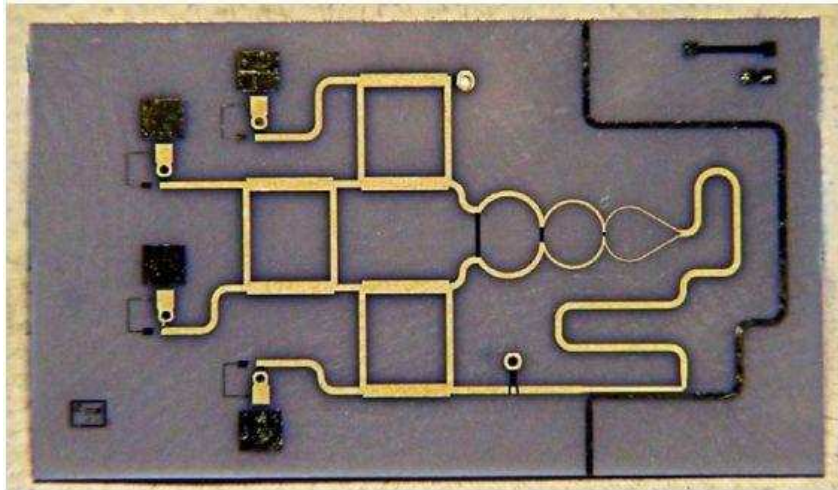
MIC teknolojisinde ayırık katı hal aygıtlar ve pasif komponentler bir dielektrik malzemeye konur. Sonra bunlar da aynı malzemede iletim hatları ile başka pasif

devrelerle birleştirilir. Malzeme olarak genel olarak RT-Duroid gibi kayıpsız plastik materyal seçilir. Bu teknoloji 20 GHz'e kadar kullanıma olanak tanır. Aşağıda bu teknoloji ile yapılmış bir yükselteç görülebilir:



Şekil 2.10. MIC teknolojisi ile yapılmış bir güç yükselteci

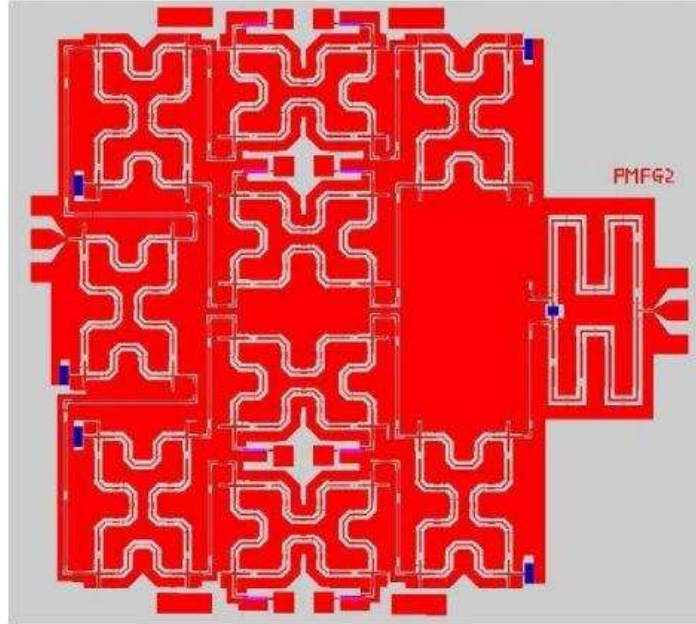
MHMIC teknolojisinde, malzeme genellikle alumina olur, çünkü elektriksel geçirgenliği fazladır (yaklaşık 10) ve kaybı düşüktür. Bu teknoloji ile yapılmış çipler ve devreler hem dağıtımlı hemde ayrıık elemanlarla gerçekleştirilir. Bu teknoloji ile yapılmış devrelerin boyutları küçüktür ve ortalama bir masraf gerektirir. 50 GHz'e kadar kullanılabilir. Aşağıda bu teknoloji kullanılarak yapılmış bir devre görülebilir:



Şekil 2.11. MMIC teknolojisi ile yapılmış ve entegre güç dedektörlü 6-portlu jonksiyon

MMIC teknolojisinde, silicon GaAs ya da SiGe fabrikasyon süreçleri, aktif devreler malzeme üzerinde üretilebilir ve pasif devreler bu malzemeye basılabilir. Uyumlandırma devreleri çip üzerinde ayrıık yada dağıtımlıdır. Devre boyutları

oldukça küçüktür ve yüksek adetler için masraf azdır. Güç tüketimi de ortalama düzeyindedir. 100 GHz'e kadar kullanılabilir. Aşağıda bu teknoloji ile üretilmiş 6-portlu bir jonksiyon görülebilir.



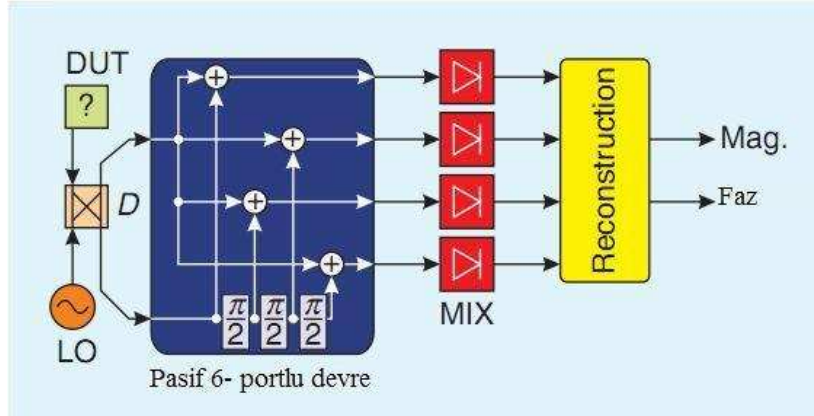
Şekil 2.12. MMIC teknolojisi ile yapılmış 6-portlu jonksiyon

Yukarıdaki entegre Ku bandında çalışan 6-port joksiyonu kullanarak gerçekleştirilmiş bir I-Q vektör modülatörüdür.

2.3. 6-Port Tekniği

2.3.1. 6-Port ölçüm tarihi

6- port tekniği ilk kez 1970'li yılların başında G. Engen ve C. Hoer tarafından ([1]-[3]) basit ve güvenilir bir güç ölçüm cihazı olarak tasarlanmıştır. Bu çalışma ilk kez yayımlandıktan kısa bir süre sonra gerilim, akım, empedans ve faz bilgileri geliştirilerek alternatif bir ağ analizörü yaklaşımı sağlanmıştır. Bu tekniklere dayanarak çeşitli farklı uygulamalar önerilmiş ve 6-port tekniğinin genel özellikleri ortaya konulmuştur. Teknik, iki farklı şekilde kullanılabilir. Bir taraftan bir reflektometre olarak 6-porta dayanan çeşitli ölçüm cihazları vardır.



Şekil 2.13. Direkt çevrim alıcısı olarak reflektometre

Diğer taraftan teknik, yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi haberleşme için bir direkt çevrim alıcısı olarak kullanılır. Her iki yaklaşımda da kompleks olan işaretin genliğini ve fazını kolayca ve kesin olarak elde edebilme avantajına sahiptirler. Reflektometre için, test edilmekte olan bir cihazın kompleks yansıma katsayısı Γ belirlenebilir. Haberleşme alıcısı için, module edilmiş I-Q (in-phase, quadrature) işaretler hesaplanabilir.

1990'lı yıllarda 6-port tekniği, bir haberleşme alıcısı olarak ilk kez J. Li, R. Bosisio ve K. Wu tarafından sunulmuştur. Bu uygulama dijital işaret işleme alanındaki büyük gelişmeler sayesinde mümkün olmuştur. 6-port ile ilgili yayınlanmış ilk makalesinde [1] G. Engen, hesaplama gücünün yetersizliğinin bu yapı ile ilgili bir problem olduğu üzerinde durmuştur. Günümüzde ise, gerekli matematiksel işlemler standart dijital donanımlar yardımıyla çözülebilmektedir. Yayınlanan 6-port haberleşme alıcı topolojilerinin tamamı G. Engen tarafından önerilen prensibe dayanmaktadır.

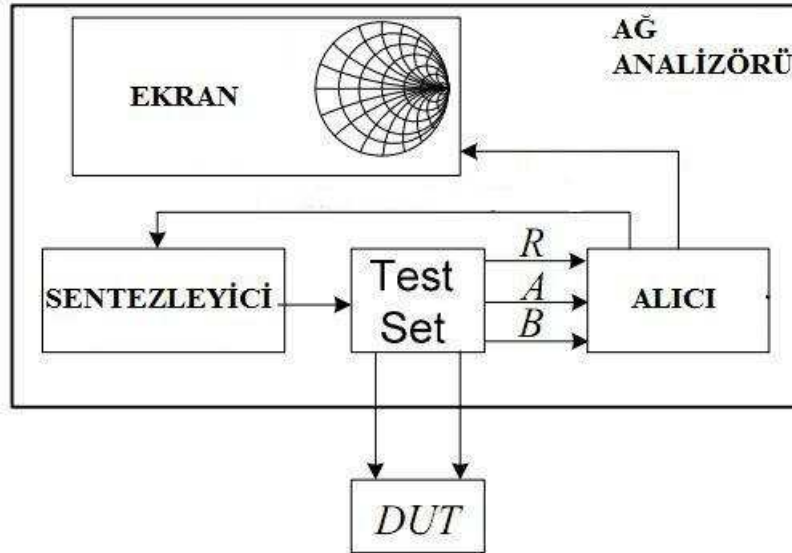
2.3.2. Kullanım alanları

Reflektometre prensibi, sadece mikrodalga ağlarının analizi için kullanılmaz, aynı zamanda bağıl elektriksel geçirgenlik ve ölçüm teknolojisinin diğer alanları gibi (örneğin: anten yakın-alan karakterizasyonu) malzemelerin davranışına karar vermek için de kullanılır. 6-port teknolojisinin diğer tekniklere göre önemli bir avantajı, yüksek güç işaretlerini kullanabilme yeteneğidir ki güç kuvvetlendiricisi ve yarıiletken devreleri için geniş işaret analiz sistemlerinin kurulmasına imkan verir. 6-port tekniği, alınan bir dalganın geliş açısı tespiti için ya da otomotiv radar sensörleri

(algılayıcı) için faz ölçümlerinin hatasız yapılmasını sağlar. Bu algılama işlevi, 6-port tekniği için özellikle ilgi çeken bir uygulama alanıdır.

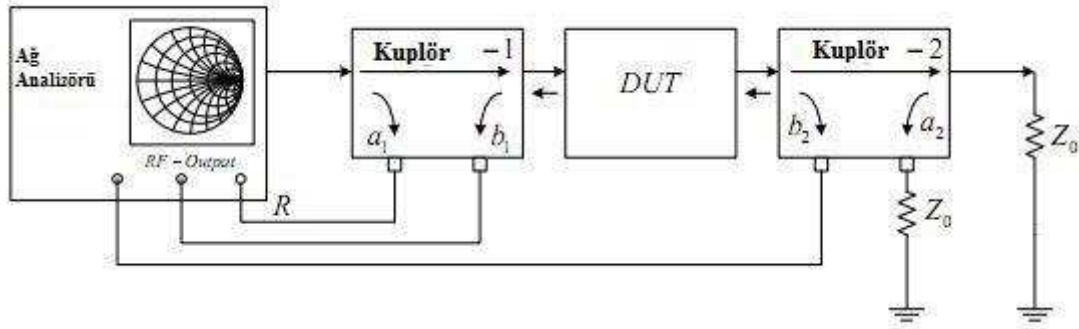
2.3.2.1. Mikrodalga ağ ölçümleri

Mikrodalga ve kablosuz teknolojilerinin temelini mikrodalga ağ ölçümleri oluşturur. Bir mikrodalga ağ analizörü, bir sentezleyici kaynağına sahip bilgisayar kontrollü otomatik ölçüm düzeneği, bir test seti, bir alıcı ve işleme ve gösterme birimlerinden oluşur. Ağ analizörü, gerekli yönlü kuplörler ve anahtarlara sahiptir ve bunlar bir ya da iki portlu ağları ölçmek için kullanılırlar. Bir vektör ağ analizörünün ana blok şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir:



Şekil 2.14. Bir vektör ağ analizörünün blok şeması

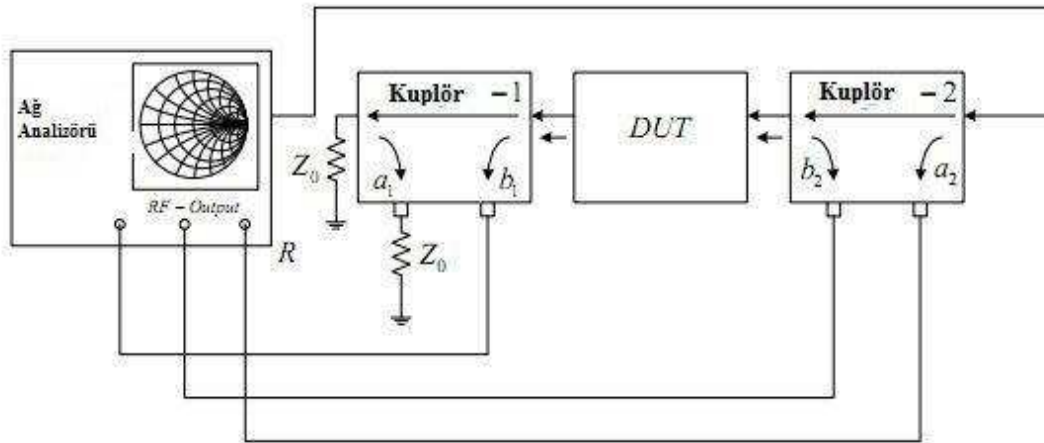
Temel bir ağ analizörü Z_0 çıkış empedansına sahip sentezlenmiş RF kaynağına ve üç RF giriş portuna sahiptir. Bu üç porttan port-R (Referans), uygulanan RF işaretin ve diğer iki gelen ve yansıyan dalgaların gerilimini ölçmek için kullanılır. Port-1'den yansıma, s_{11} , ve iki portun ileri saçılma parametreleri, s_{21} , aşağıdaki düzenek kullanılarak bulunur:



Şekil 2.15. Ağ analizörü ile ileri saçılma parametreleri ölçümü

Yönlü kablolar Z_0 karakteristik empedansa sahiptir. Bundan dolayı test altındaki cihaz (DUT) da dahil portlar Z_0 sonlandırılmasına sahiptir. Port-1'deki yansıma, s_{11} , karmaşık olan b_1/a_1 oranı ile hesaplanır. Kaynaktan yüke ileri iletim ise b_2/a_1 oranı s_{12} ile hesaplanır.

Port-2'deki yansıma, s_{22} ve geri iletim parametresi, s_{12} , aşağıdaki şekildeki düzenekle hesaplanır:

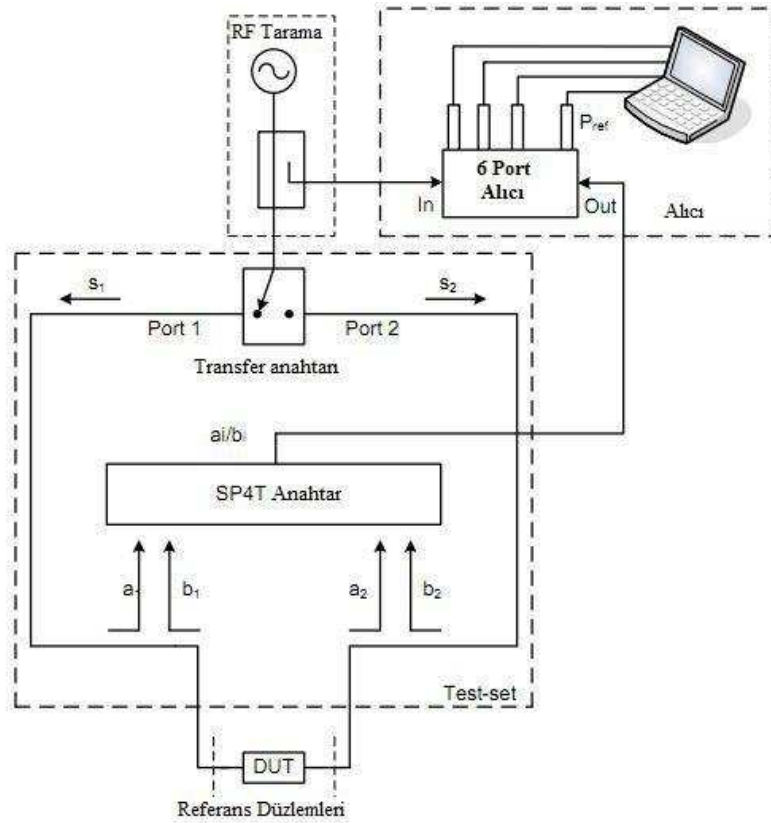


Şekil 2.16. Ağ analizörü ile geri saçılma parametreleri ölçümü

Yukarıdaki düzenekte DUT'in girişi bir numaralı kablolu vasıtasıyla Z_0 ile sonlandırılırken işaret uygulanmaktadır. Çıkış portun yansıması b_2/a_2 oranı ile elde edilir. Geri iletim ise b_1/a_2 oranı ile hesaplanır.

Bir ağ analizörünün yerine getirilmesindeki anahtar nokta, hem faz hem de genlik bilgisini tespit edebilmesidir. Bu tespit kısmı ticari olarak heterodin mimarili alıcılarla, çok sayıda frekans çevrimi ve yerel osilatör kullanımı ile yapılmaktadır. Bu komponentler ölçme sistemini nispeten karmaşık ve pahalı hale getirmektedir. Fakat, bir heterodin vector ağ analizörü (VNA), homodin VNA'ye göre daha iyi dinamik aralık sağlamaktadır. Bunların yanında, 6-port tekniği hem faz hem de genlik ölçümünü daha az masraflı olarak ek dedektörlerle sağlamaktadır. Ayrıca, 6-port, ağ parametrelerinin yanında güç ölçümü de yapmaktadır. 6-port ismi, güç dedektörleri tarafından sonlandırılmış dört adet port, giriş portu ve DUT'un takılacağı portların toplamı altı adet port olmasından gelmektedir.

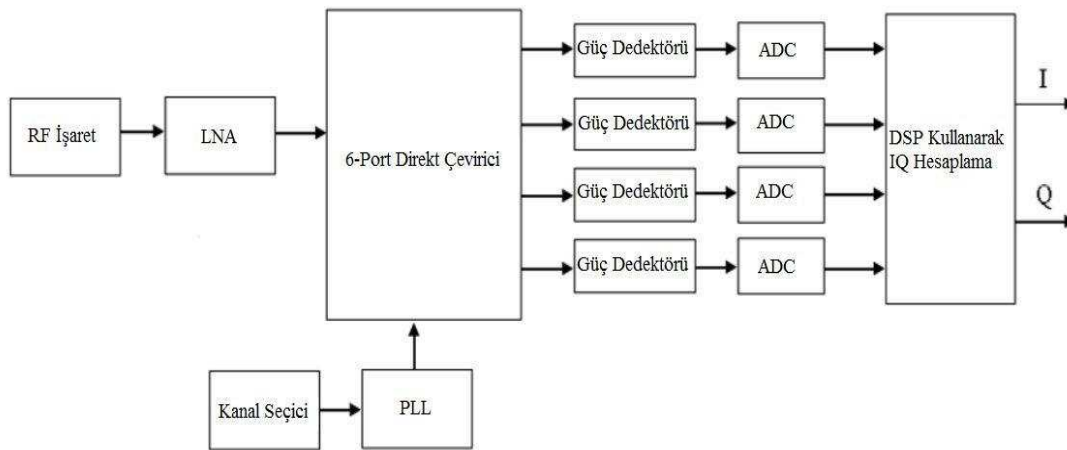
6-port kullanılarak aynı anda güç akışı ve empedans hesabı yalnızca genlik ölçümü yapılarak, faz bilgisine gerek kalmadan elde edilir. Bir ya da iki adet 6-portun uygun test seti ve kalibrasyonlarla kullanılması ile herhangi iki portlu DUT'in saçılma parametreleri tespit edilebilir. Aşağıda bir otomatik ağ analizörünü genel blok şeması gösterilmiştir:



Şekil 2.17. Otomatik ağ analizörü

2.3.2.2. Kablosuz uygulamalar

Kablosuz teknoloji alanında giderek artan daha basit ve daha az güç harcayan tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca geniş bantlı, küçük boyutlarda ve düşük maliyetli dijital alıcı-vericiler kablosuz haberleşmenin büyümesi için gerekmektedir. Bu günlerde 6-port teknolojisi temelli bazı direkt çevrimli alıcı vericiler sunulmakta ve bu konuda çalışmalar yapılmaktadır. 6-port homodin tekniği, mikserler yerine güç dedektörleri kullanmayı gerektirir ki bu, devrelerin daha basit olmasını sağlar. Bu tarz bir yaklaşımın çok sayıda faydası vardır. İlk olarak genişbant gereklilikleri pasif elemanlarla kolaylıkla sağlanabilir. Ayrıca 6-port homodin yapısı daha masraflı alıcı-vericilerden kaçınılabilmeyi sağlar. bir homodin 6-port alıcının blok şeması aşağıda sunulmuştur:



Şekil 2.18. 6-port direkt çevrim alıcısı

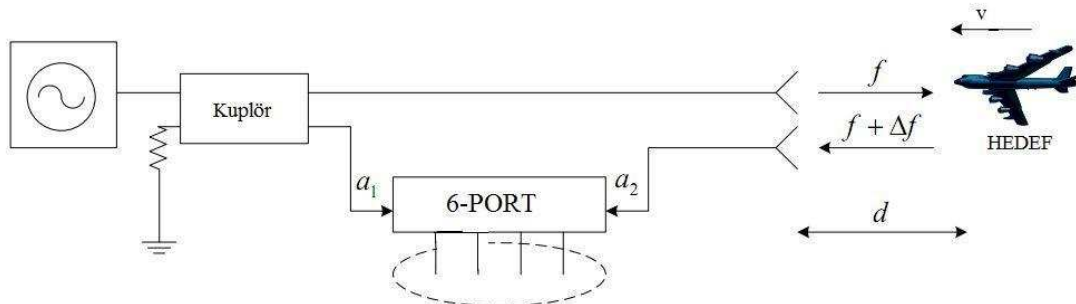
6-portun ana avantajı RF devrelerin oldukça yüksek frekans band genişliğidir. Diğer avantajı ise sıfır ara frekansı mikser tabanlı alıcıya benzerdir (örneğin tek yerel osilatör ve hayal bastırma filtresiz). 6-port alıcı-verici yapısı, yazılım tabanlı telsiz (SDR ultra geniş bantlı sistem (UWB) ve milimetre dalga gibi bir çok uygulamaların gerçekleşmesini sağlamaktadır.

2.3.2.3. Mikrodalga uygulamaları

6-port tekniği, mikrodalga işaretlerin faz ve genliğinin ölçülmesi gerekli olduğu mikrodalga uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir. En yaygın uygulama bir

DUT'un yansıma katsayısının hesaplanmasıdır. Gelen bir işaretin yön bilgisini elde etmek de bir başka uygulamadır.

Aşağıda 6-port tekniğini kullanan bir radar uygulaması vardır. Bu teknoloji düşük masraflı ve yüksek performanslı radar için ve özellikle otomobil endüstrisinde kullanılabilir. Ayrıca, yakın alan ve polarizasyon ölçümünü kapsayan anten ölçümleri, 6-port teknolojisiyle gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.19. 6-port teknolojisi ile bir radar uygulaması

Yüksek güç uygulamalarında, bu teknoloji yapısı itibari ile ilgi çekmektedir. Bunun yanında optik sistemlerde de 6-port yapısının kullanıldığı uygulamalar mevcuttur.

BÖLÜM 3. 6-PORT REFLEKTOMETRE TASARIMI

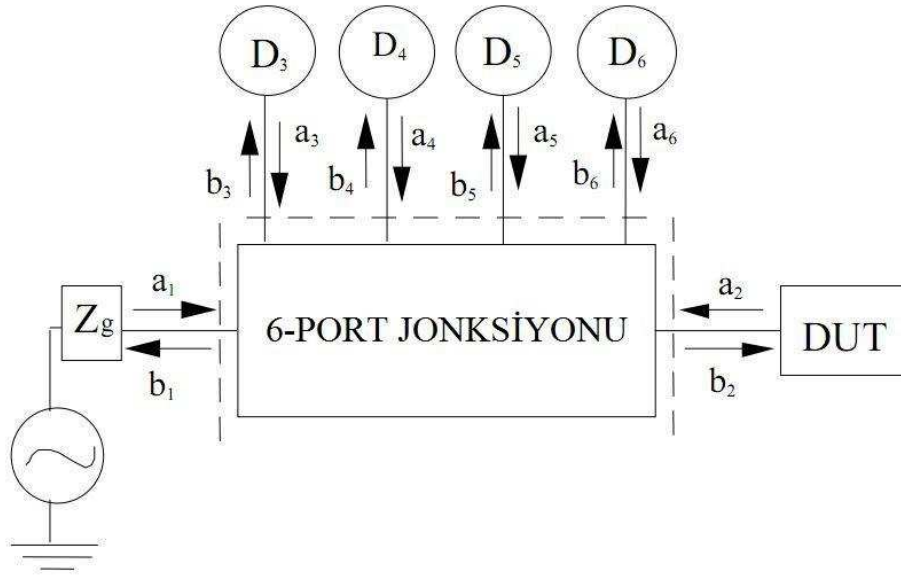
3.1. Giriş

6-port tekniği ile ilgili çalışmalar ilk olarak 1970 senesinde Engen ve Hoer tarafından başlatıldı. O zamandan beri bir çok araştırmacı 6-port tekniği konusunda teoritik ve pratik olara araştırmaya dahil oldu. Bu tekniğin ana avantajı empedans ölçümünü güç ve gerilim gibi sadece skalar ölçüm ile gerçekleştirebilmesidir. Faz ölçümüne gerek yoktur ve bu sayede frekans indirgemesine de gerek yoktur. Bu basitlik donanım gerekliliklerini minimize eder ve masrafı azaltır. Ayrıca 6-port tekniği ile çok portlu ölçümler yapılabilir ve bunun yanında güç ölçümleri de gerçekleştirilir.

3.2. 6-Port Reflektometre Analizi

Aşağıdaki şekilde analizi yapılmak için basitleştirilmiş temel bir 6-port reflektometre görülmektedir. 6-port reflektometre, 1. portu mikrodalga kaynağına, 2. portu testi yapılmak istenen cihaza (DUT) ve diğer 4 portuna da D3, D4, D5, D6 güç dedektörlerinin bağlandığı genellikle sıradan, zamana bağımlı olmayan lineer ve pasif mikrodalga jonksiyonudur.

Aşağıdaki şekilde a_i ve b_i , $i = 1, 2, \dots, 6$ olacak şekilde 6-port jonksiyonunda sırasıyla normalize edilmiş gelen ve yansıyan gerilimleri ifade etmektedir.



Şekil 3.1. 6-port reflektometre

. a_i ve b_i 6-port jonksiyonun saçılma parametreleri ile şu yolla ilişkidir:

$$\underline{b} = S \underline{a} \quad (3.1)$$

Burada S 6x6'lık kompleks sayılardan oluşan matris iken, $\underline{b} = (b_1, b_2, \dots, b_6)$ ve

$\underline{a} = (a_1, a_2, \dots, a_6)$ şeklindedir. Yanıma katsayısı aşağıdaki şekildedir:

$$\Gamma_i = \frac{a_i}{b_i}, i = 3, 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.2)$$

(3.2), (3.1) denkelemi ile birleştirildiğinde ve bazı cebirsel işlemler sonucunda aşağıdaki elde edilir:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13}\Gamma_3 & s_{15}\Gamma_4 & s_{15}\Gamma_5 & s_{16}\Gamma_6 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23}\Gamma_3 & s_{24}\Gamma_4 & s_{25}\Gamma_5 & s_{26}\Gamma_6 \\ s_{31} & s_{32} & (s_{33}\Gamma_3 - 1) & s_{34}\Gamma_4 & s_{35}\Gamma_5 & s_{36}\Gamma_6 \\ s_{41} & s_{42} & s_{43}\Gamma_3 & (s_{44}\Gamma_4 - 1) & s_{45}\Gamma_5 & s_{46}\Gamma_6 \\ s_{51} & s_{52} & s_{53}\Gamma_3 & s_{54}\Gamma_4 & (s_{55}\Gamma_5 - 1) & s_{56}\Gamma_6 \\ s_{61} & s_{62} & s_{63}\Gamma_3 & s_{63}\Gamma_4 & s_{65}\Gamma_5 & (s_{66}\Gamma_6 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki matrisin çözümü aşağıda verilmiştir:

$$a_1 = m_{11}b_1 + m_{12}b_2 \quad (3.4a)$$

$$a_2 = m_{21}b_1 + m_{22}b_2 \quad (3.4b)$$

ve

$$P_i = |b_i|^2 = |A_i a + B_i b|^2 = P_0 |A_i|^2 |\Gamma - q_i|^2 \quad (3.5)$$

Burada m_{ij} , (3.3)'te tanıtılan matrisin tersidir. Port 2'ye bağlanmış DUT'in yansımaya katsayısı şu şekildedir:

$$\Gamma = \frac{a_2}{b_2} \quad (3.6)$$

(3.4) denklemini kullanılarak (3.5), (3.6) ile değiştirilirse,

$$b_i = h_i \left(\Gamma + \frac{k_i}{h_i} \right) b_2 = h_i (\Gamma - q_i) b_2, i = 3, 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.7)$$

elde edilir ki burada bilinmeyen katsayılar aşağıdaki şekildedir:

$$h_i = \frac{m_{i1}}{m_{21}}, k_i = m_{i2} - \frac{m_{22}m_{i1}}{m_{21}} \text{ ve } q_i = -\frac{k_i}{h_i} \quad (3.8)$$

D_i güç dedektörleri tarafından absorbe edilen güç şu şekilde hesaplanabilir:

$$P_i = v_i (|b_i|^2 - |a_i|^2) \quad (3.9)$$

$$P_i = v_i (1 - |\Gamma_i|^2) |h_i|^2 |\Gamma - q_i|^2 |b_2|^2 = \alpha_i^2 |\Gamma - q_i|^2 |b_2|^2$$

Yukarıdaki denklemde v_i dedektörü karakterize eden bir skaler parametredir ve

$$\alpha_i = |h_i| \sqrt{v_i (1 - |\Gamma_i|^2)}, i = 3, 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir.

(3.9) numaralı denklem ikinci dereceden bir denklemdir ve her bir güç okuması vasıtasıyla DUT'in yansıma katsayısı Γ ilişkilendirilir. Bu denklemler aynı zamanda kalibrasyon tekniklerinin başlama noktalarını oluştururlar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bu denklemler, zamandan bağımsız, pasif ve lineer 6-port jonksiyonu ile ve güç dedektörlerinin giriş empedansı ve kaynağın iç empedansı gibi kısıtlamalar olmadan elde edilmiştir.

Güç dedektörlerinin 6-port jonksiyonun çıkış portları ile mükemmel şekilde uyumlandığı durumda ($\Gamma_i = 0$), q_i nokta değerleri 6-port jonksiyonun S parametreleri kullanılarak doğrudan hesaplanabilir. Bu durumda aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2 \quad (3.11)$$

Genel ifade ile

$$b_i = s_{i1}a_1 + s_{i2}a_2, i = 3, 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.12)$$

$a_2 = \Gamma b_2$ olduğunu bilindiğinden (3.12) denklemindeki a_1 (3.11) kullanılarak elimine edilebilir. Ardından (3.7) bilgisi ile aşağıdaki denkelem elde edilir:

$$h_i = \frac{s_{i2}s_{21} - s_{22}s_{i1}}{s_{21}} \text{ ve } q_i = \frac{s_{i2}}{s_{22}s_{i1} - s_{i2}s_{21}} \quad (3.13)$$

3.2.1. 6-Port reflektometrenin ikinci dereceden modeli

Aşağıda basit bir 6-port reflektometrenin dört güç dedektöründen okunan değer verilmiştir:

$$P_i = \alpha_i^2 |\Gamma - q_i|^2 |b_2|^2, i = 3, 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.14)$$

P_4 , P_5 ve P_6 ; P_3 ile normalize edildiğinde üç tane bağımsız güç denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$P_i = \frac{P_i}{P_3} = \mu_i^2 \left| \frac{\Gamma - q_i}{\Gamma - q_3} \right|^2, i = 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.15)$$

Burada

$$\mu_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_3} \quad (3.16)$$

şekindedir.

(3.15) denkleminde anlaşılacağı üzere tam bir 6-port reflektometre modellemek için 11 adet gerçel ve birbirinden bağımsız parametreler gereklidir. Ayrıca burada görüleceği üzere Γ , 3 adet 2 bilinmeyenli denklemin çözümüdür.

(3.15) denklemi alternatif olarak aşağıdaki şekilde yazılabilen bir çember denklemdir [18]:

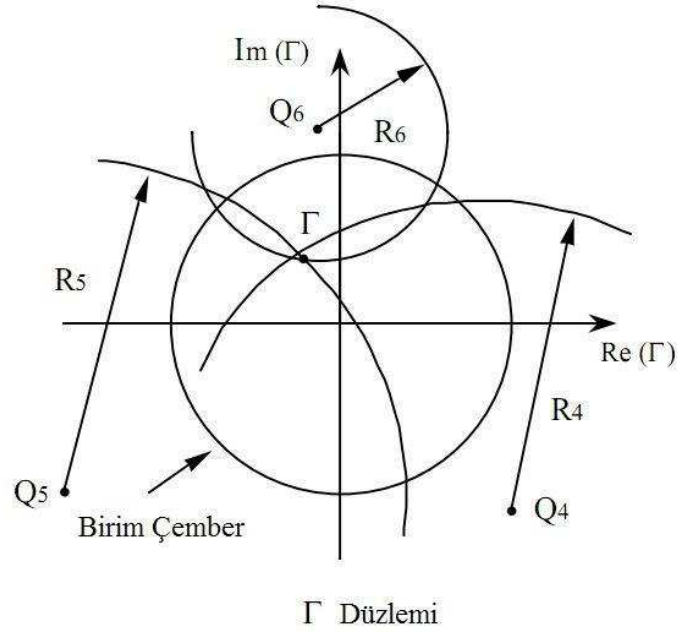
$$R_i^2 = |\Gamma - Q_i|^2, i = 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde Γ düzleminde çemberin merkezi ve yarıçapı sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$Q_i = \frac{\frac{P_i}{q_3^*} - \frac{\mu_i^2}{|q_3|^2} q_i}{\frac{P_i}{|q_3|^2} - \frac{\mu_i^2}{|q_3|^2}} \quad (3.18a)$$

$$R_i^2 = \frac{P_i \left| \frac{\mu_i}{q_3} + \frac{q_i \mu_i}{|q_3|^2} \right|^2}{\left(\frac{\mu_i^2}{|q_3|^2} - \frac{P_i}{|q_3|^2} \right)^2} \quad (3.18b)$$

Aşağıdaki şekil (3.15) denkleminin grafiksel bir gösterimidir. Yansıma katsayısı Γ , merkezi ve yarıçapı sırasıyla Q_i ve R_i olan üç adet çemberin kesişme noktasıdır.

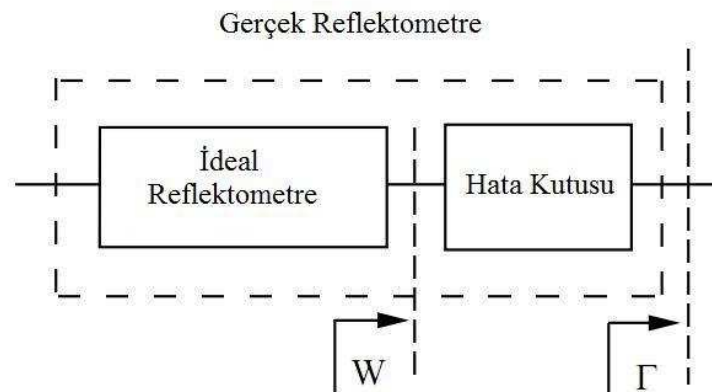


Şekil 3.2. 6-port durum denklemlerin grafiksel çözümü

(3.25) denklemlerinden anlaşılacağı üzere sıradan bir 6-port reflektometre için, reflektometre karakterize eden üç adet Q_i noktaları, Γ düzleminde gerçekleştirilen güç okumalarıdır. Bu güç okumaları 2. porta takılan DUT ile doğrudan ilişkilidir.

3.3. Hata Hesaplama

Gerçek bir reflektometre aşağıdaki şekilde verildiği üzere ideal bir reflektometreye bir hata kutusu ağının eklenmesi ile elde edilebilir.



Şekil 3.3. Gerçek bir reflektometrenin hata kutusu ağının eklenmesi ile modellenmesi

Gömülü yansıma katsayısı w , yalın yansıma katsayısı Γ ile şu şekilde ilişkidir:

$$w = \frac{d\Gamma + e}{c\Gamma + 1} \quad (3.19)$$

Burada $d = -(s_{11}s_{22} - s_{21}s_{12})$, $e = s_{11}$ ve $c = -s_{22}$ 'dir ve bu d , e ve c katsayıları iki portlu ağı kompleks parametreleridir ve bunlar yukarıdaki şekilde gösterildiği üzere ideal bir 6-port reflektometrenin ölçüm düzlemi ile gerçek bir 6-port reflektometrenin ölçüm düzlemi arasında geçişi modeller.

Pratikte kısa devre-açık-yük tekniği (SOLT) genellikle 6-port reflektometrenin ölçüm düzlemi terminalinin koaksiyel olduğu durumlarda kullanılır. Üç adet hata kutusu parametresinin bir fonksiyonu olarak yalınlaştırılmış yansıma katsayısı ifadesi şu şekildedir:

$$\Gamma = \frac{e - w}{cw - d} \quad (3.20)$$

3.4. 6-Port Reflektometre Tasarım Kriterleri

Önceki bölümlerde ifade edildiği gibi 6-port reflektometre, mikrodalga işaret kaynağı, 6-port jonksiyon ve dört adet güç dedektörünü içerir. 6-port jonksiyonu bir referans portunu içerdiği durumlarda reflektometrenin işlevini yöneten temel ilişki şu şekildedir:

$$p_i = \frac{P_i}{P_3} \mu_i^2 |\Gamma - q_i|^2, i = 4, 5 \text{ ve } 6 \quad (3.21)$$

Burada p_i , normalize edilmiş okunmuş güç değeri; μ_i^2 ve q_i ise 6-port reflektometreyi karakterize eden parametreler ve Γ da DUT'in kompleks yansıma katsayısıdır. Ayrıca bunlar kalibrasyon parametreleriyle de ilişkilidir.

6-port jonksiyonu tasarılmanın ilk adımı μ_i^2 değerlerinin ve Γ düzleminde q_i 'nin pozisyonlarının seçilmesidir. (3.28) denkeleminde açıkça görüleceği üzere μ_i^2 , güç

dedektörlerinin girişindeki güç seviyelerini belirleyen oransal faktördür. Genellikle bu parametreler 6-port jonksiyonun dört ölçüm portlarına yerleştirilmiş güç dedektörlerinin güç dinamik aralığını sağlayacak şekilde ayarlanır. Bu yüzden 6-port jonksiyonu tasarımında en önemli hedeflerden birisi Γ düzleminde q_i noktalarının pozisyonlarının seçimidir [19].

3.4.1. Optimum 6-Port reflektometre

Simetrik ayarlamalara göre tercih edilen 6-port jonksiyonun q_i noktalarının sabit ölçüm doğruluğu sağlayan optimal pozisyonları, merkezi Γ düzleminin merkezinde olan bir eşkenar üçgenin köşeleridir. Bu durumda şu elde edilir:

$$|q_4| = |q_5| = |q_6| \quad (3.22)$$

ve q_i noktaları arasındaki bağıl faz farkı 120^0 olmalıdır. Sadece q_i noktalarının genliğinin belirlenmesinde bir serbestlik mevcuttur. Yansıma katsayısı Γ , üç tane çemberin kesişmesiyle belirlendiğinden bu çemberleri merkezleri çok büyük ya da çok küçük olması durumunda hatalı sayısal durumlara sebep olur. Bunun yanında q 'nun Smith abağının içinden seçilmesi $\Gamma = q_i$ durumunda teklilik ve ölçüm problemlerine sebep olur. Bunlardan dolayı 6-port jonksiyonun optimal tasarımı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$q_4 \approx 1.5 \angle \theta_0^o \quad (3.23a)$$

$$q_5 \approx 1.5 \angle (\theta_0^o + 120^o) \quad (3.23b)$$

ve

$$q_6 \approx 1.5 \angle (\theta_0^o - 120^o) \quad (3.23c)$$

Burada θ_0 , rastgele bir faz referans noktasıdır.

3.5. Mikroşerit Tabanlı Reflektometre Simülasyonu

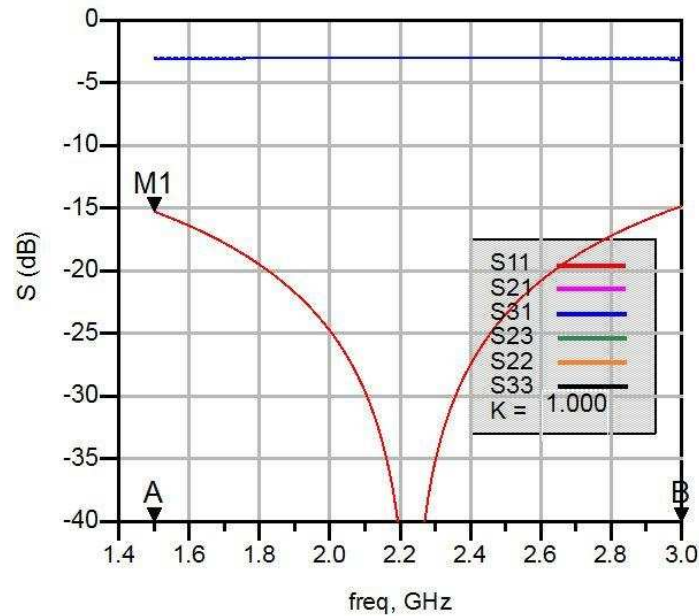
Önceki bölümlerde analizi yapılmış 6-port reflektometre, ölçüm portuna DUT takılırken cihazın kompleks yansıma katsayısını sadece güç ölçümü yaparak

hesaplayabilmektedir. Gerçekleştirilecek reflektometrenin simülasyonu yapılarak üretim öncesi karşılaşılabilecek problemler önceden belirlenebilir ve iyileştirmeler yapılabilir.

Bu amaçla reflektometrenin simülasyonu için Agilent firmasının Advanced Design System (ADS) programı kullanılmıştır. ADS, diğer bazı muadil programlara göre kullanıcıya hem ideal ortamı hem de gerçek ortamı simüle etme olanağı verirken oldukça geniş komponent ve cihaz kütüphanesine sahiptir.

Gerçeklenecek reflektometre hem test aşaması daha basit hem de üretimi daha sade olması amacıyla ikiye bölünmüştür. Birinci bölüm DUT'in reel kısmını ikinci bölüm ise imajiner kısmını hesaplamaktadır. Tasarlanan reflektometre sadece wilkinson güç bölücüleri kullanılarak tasarlanmıştır. Gerekli faz kaymaları için ise gecikme hatları olarak mikroşerit hatlar kullanılmıştır.

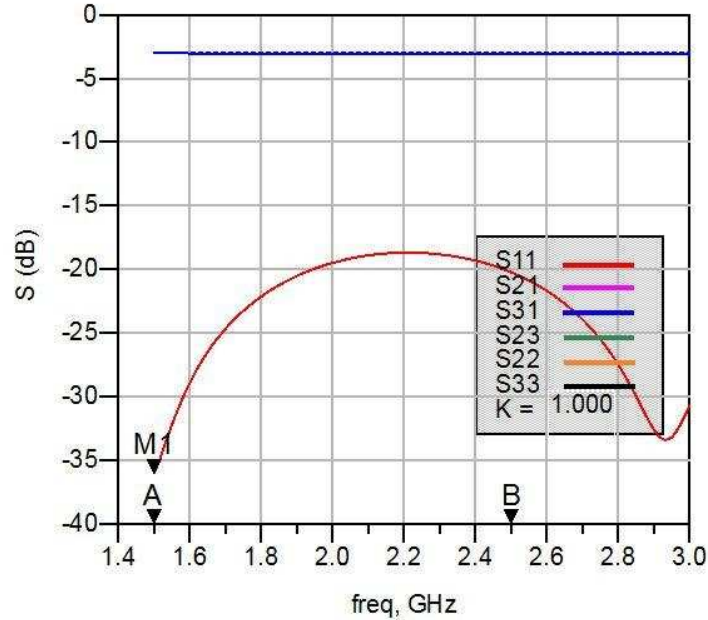
Reflektometrede temel eleman olarak kullanılan güç bölücünün simülasyon çıktıları aşağıdaki şekillerde görülebilir:



Şekil 3.4. Bir aşamalı wilkinson güç bölücü s-parametrleri

Bu ilk şekilden anlaşılacağı üzere güç bölücü merkez frekans 2.25 GHz olacak şekilde ve portları eşit bölme oranına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. 1.5 GHz bandı boyunca eşit bölme oranını sağlamaktadır ve neredeyse hiç çevrim kaybı

yoktur. Ayrıca s_{11} , s_{22} ve s_{33} parametreleri band boyunca -15 dB'in altındadır. Bu güç bölücünün tüm portlarının yeterince uyumlu olduğunu göstermektedir. Aşağıda ise aynı frekansta tasarlanmış fakat iki aşamalı bir wilkinson güç bölücünün s-parametreleri görülmektedir:

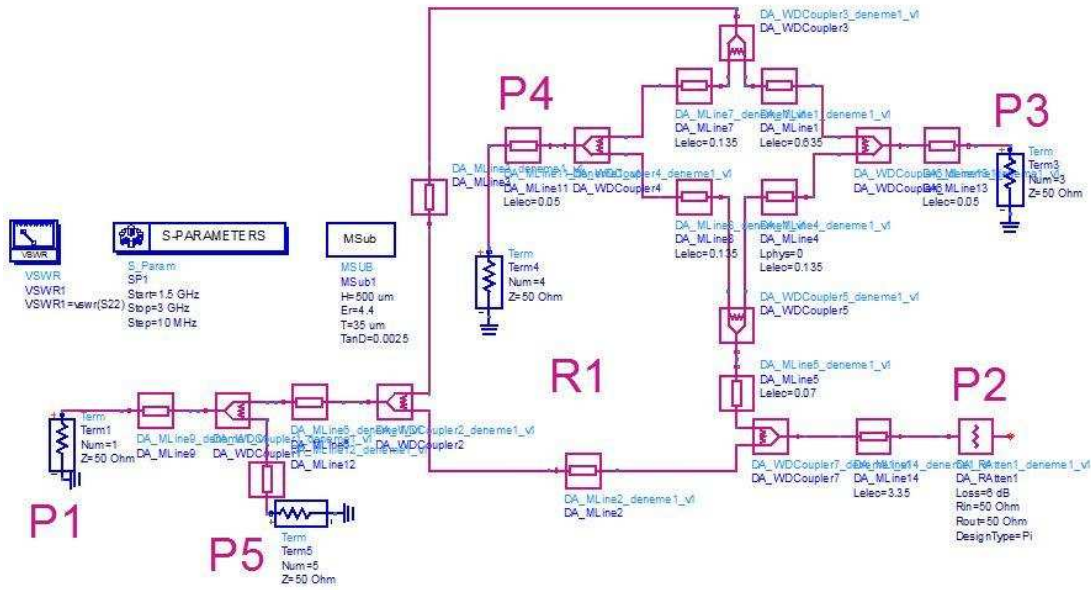


Şekil 3.5. İki aşamalı wilkinson güç bölücü s-parametreleri

İki aşamalı wilkinson güç bölücü daha geniş bantta çalışmaya olanak vermektedir. Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı üzere tek aşamalı güç bölücüye göre bant boyunca uyumu son derece iyidir.

3.5.1. 6-port reflektometre simülasyonu

Bir önceki bölümde de değinildiği üzere devre iki aşamada simüle edilmiş ve ardından üretilmiştir. İlk devre, yansımaya katsayısı Γ 'nın reel kısmını ölçerken diğer devre imajiner kısmı ölçer. Aşağıda bu devrelerden reel kısmı ölçen devrenin ADS'te çizilmiş şemaları görülebilir. İkinci devre ilkinde benzemekte olup sadece 2. porttaki güç bölücü iki aşamalıdır ve gecikme hatları farklıdır.



Şekil 3.6. Tasarlanan reflektometrenin ADS simülasyonu devre şeması

Yansıma katsayısı ölçümü için yapılan bu devreler sadece wilkinson güç bölücülerinden ve faz farkları için gecikme hatlarından oluşur. Burada P1, mikrodalga kaynak işaretin giriş portu, P2 yansıma katsayısı ölçülmek istenen cihazın takıldığı port, P5 ise referans portudur. Kalan iki port P3 ve P4 ise yansıma katsayısının reel kısmının basit bir matematiksel işleme hesaplanma işlemi yapılan portlardır. Bu matematiksel denklem $\Gamma = \Gamma_1 + j\Gamma_2$ iken aşağıda ifade edilmiştir:

$$\Gamma_i = 4 \frac{P_3 - P_4}{P_5}, i = 1 \text{ ve } 2 \quad (3.24)$$

s-parametreleri cinsinden aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$$\Gamma = 4x \left(\frac{|s_{31}|^2 - |s_{41}|^2}{|s_{51}|^2} + j \frac{|s_{32}|^2 - |s_{42}|^2}{|s_{52}|^2} \right) \quad (3.25)$$

3.5.2. Simülasyon sonuçları

Bir önceki bölümde analizi yapılan 6-port reflektometre jonksiyonunda 3. port ve 4. portta görülen güç değeri, 2. porta takılan DUT'in genel karakteristik empedansa

uyumuna göre değişiklik vermektedir. Kullanılan yapıda karakteristik empedans, Z_0 , 50 ohmdur.

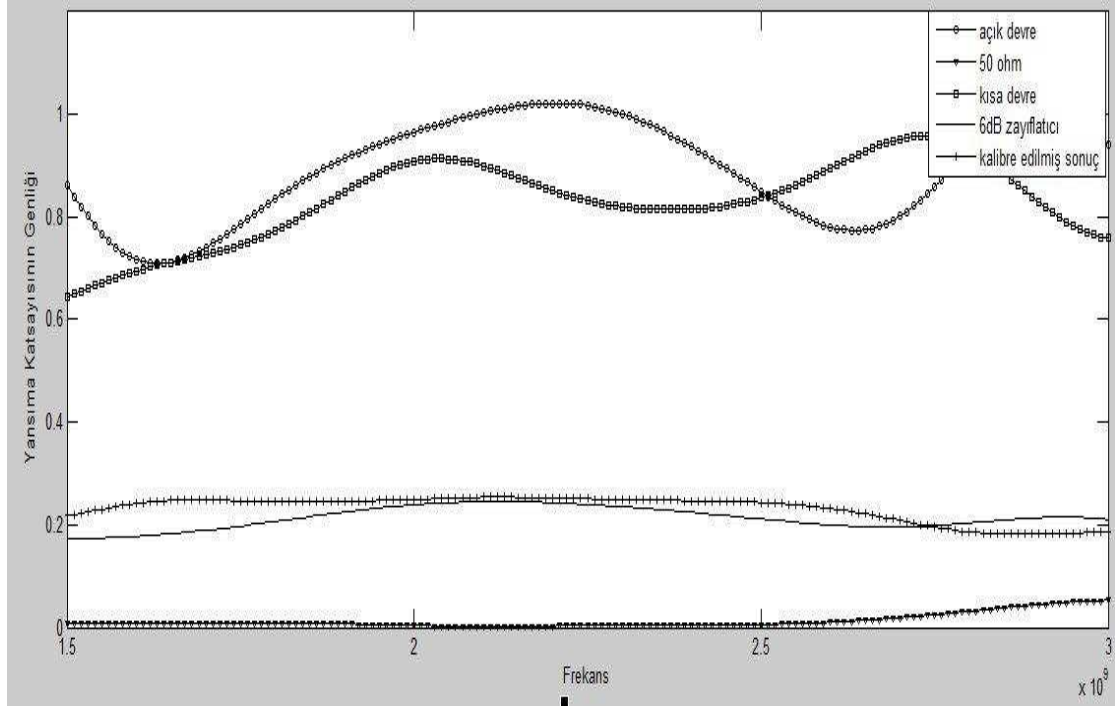
Devreyi test etmek ve daha sonrasında kalibrasyonda kullanmak üzere DUT olarak açık devre, kısa devre ve uyumlu yük konmuştur. Yansıma katsayısı aşağıdaki yansıma katsayısı denklemi gereğince sırasıyla 1, -1 ve 0 çıkmalıdır:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.26)$$

Burada Z_L , kompleks yüküdür.

Simülasyonda devreyi test etmek amacıyla kullanım kolaylığı açısından konnektörlü 6 dB'lik bir zayıflatıcı kullanılmıştır. Bu zayıflatıcının yansıma katsayısının genliği, ideal şartlarda 0.25 çıkmalıdır Aşağıda yük olarak açık devre, kısa devre, 50 ohm ve 6 dB zayıflatıcı bulunduğu elde edilen yansıma katsayılarının genliği görülebilir. Frekans aralığı olarak 1.5-3 GHz aralığı seçilmiştir.

Şekil 3.7'de anlaşılacağı üzere açık devre ve kısa devre yüklerinde yansıma katsayısı 1'e çok yakındır. Bu demek oluyor ki bu yüklere gelen işaretin neredeyse tamamı yansımıştır. Bunun yanında yük olarak uyumlu bir yük bağlandığında ise yansıyan işaretin oldukça küçük olduğu 50 ohm'luk yükün grafiğinden görülmektedir.



Şekil 3.7. ADS'te tasarlanan reflektometrenin sümülasyon sonuçları

Yük olarak 6 dB'lik zayıflatıcı konduğunda ise sonuç ideal olan 0.25 değerine yakın çıkmış ama bazı frekanslarda doğruluktan sapmalar olmuştur. Bu sapmalar kullanılan güç bölücülerinin ve iletim hatlarının kusurlarından oluşmaktadır. Bunlar da bölüm 3.3'te ayrıntısı anlatılan hata hesaplama yöntemi ile kalibre edilmiş ve hatalar minimize edilmiştir.

Sonuç olarak 2.25 GHz merkez frekansında tasarlanan reflektometre yaklaşık 2.5 GHz band genişliğinde son derece iyi çalışmaktadır.

BÖLÜM 4. REFLEKTOMETRE GERÇEKLENMESİ

4.1. Giriş

Mikrodalga devrelerinde kullanılacak aktif ve pasif komponentlerin seçilimi büyük önem taşımaktadır. Seçimde en önemli parametrelerden birisi çalışılan frekanstır. Çünkü pasif ve aktif devreler her frekansta aynı performansta çalışmazlar. Bu yüzden geniş bantlarda çalışmak zordur.

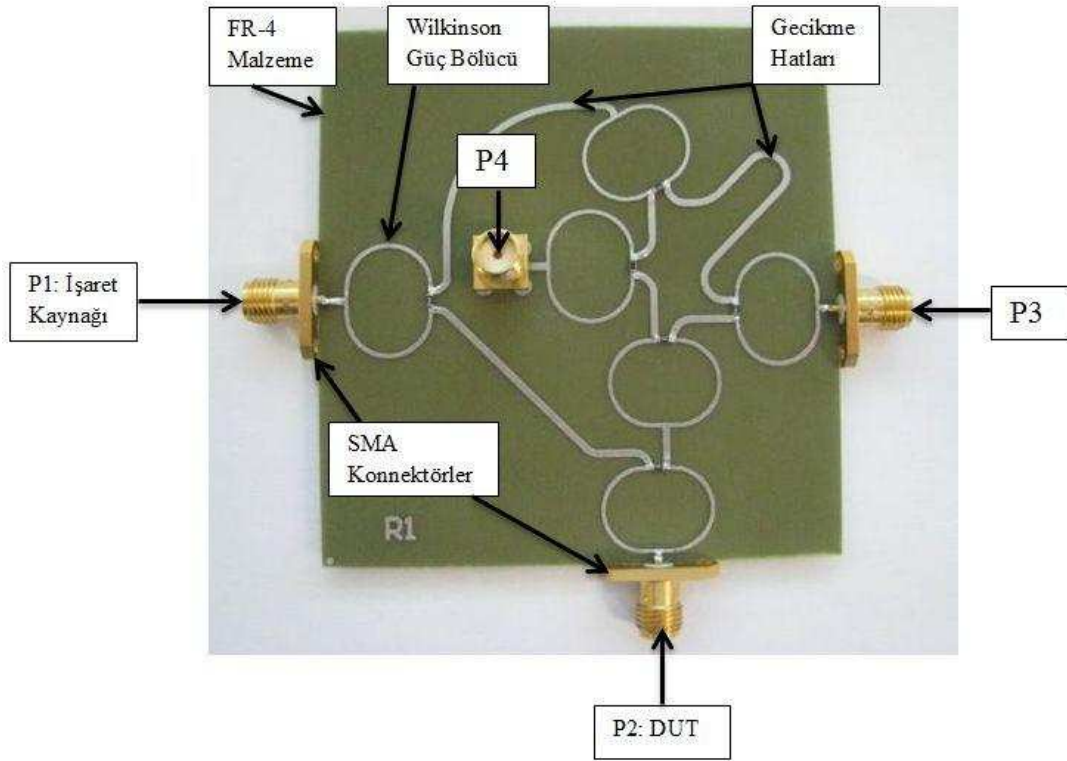
Özellikle içinde iletim hatları içeren devrelerde yüksek frekanslarda çalışmak daha zorluklar gerektirir. Çünkü yüksek frekanslarda dalga boyu kısa olduğu için birim hatalar sonucunda meydana gelebilecek bozulmalar yüksek frekanslarda daha fazladır.

Mikrodalga devrelerinde devre elemanlarının yerleştirildiği malzeme de büyük önem taşır. Malzemenin bağıl dielektrik katsayısı çalışılan bantta ve kartın her yerinde homojen şekilde olmalıdır. Ayrıca sıcaklık değişimlerine de tolerans gösterilebilmelidir. Bunların yanında ise masraf da göz önünde tutulmalıdır ki yukarıdaki özelliklerin hepsine sahip bir malzemeler yeri geldiğinde devrenin en pahalı bileşeni olabilmektedir.

4.2. Devrenin Üretilmesi

Yukarıda değinilen bu koşullar göz önüne alındığında çalışma frekansı 2.25 GHz seçilmiştir. Bu frekanslarda çalışılabilecek ucuz malzeme bulmak daha kolaydır. Devre en sık kullanılan malzemelerden FR-4 malzemesine basılmıştır. Bu malzemenin bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 4.4$ 'tür. Malzemenin kalınlığı 0.5 mm iken iletken bakırın kalınlığı ise 35 mikrondur.

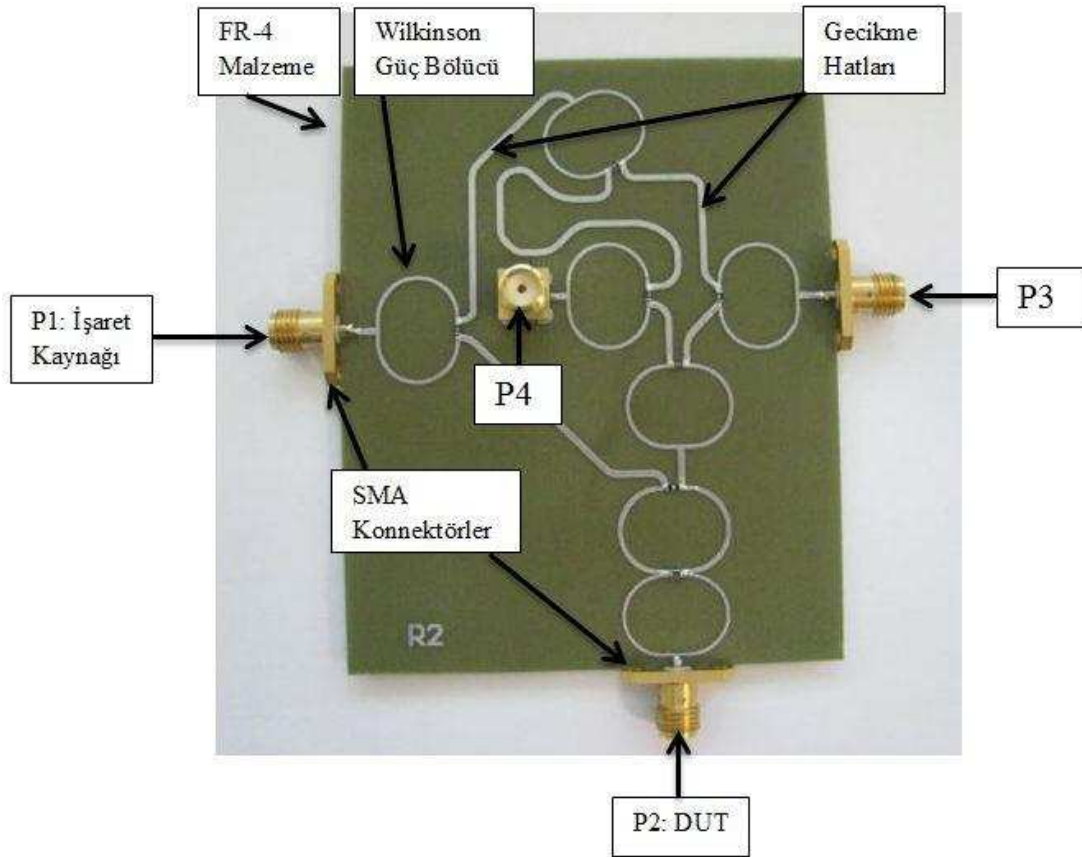
Devrede kullanılan wilkinson güç bölücülerinde kullanılan direnç olarak 0603 kılıfa sahip dirençler kullanılmıştır. Devrenin testi için ise SMA konnektörler tercih edilmiştir. Aşağıda devrenin üretilmiş SMA'ları takılmış şekli görülebilir. Bu ilk devre Γ 'nin reel kısmını ölçen devredir:



Şekil 4.1. Yansıma katsayısının reel kısmını ölçen reflektometre

Yukarıdaki devre ile P2'ye takılan aygıtın yansıma katsayısının reel kısmı ölçülebilir. Burada P1 bir işaret kaynağına, P2'de DUT'e bağlanır. P3 ve P4 ise bir güç ölçere bağlanabilir. Bu çalışmada ölçüm kolaylığı olması açısından bu portlar bir vektör ağ analizörüne bağlanmıştır.

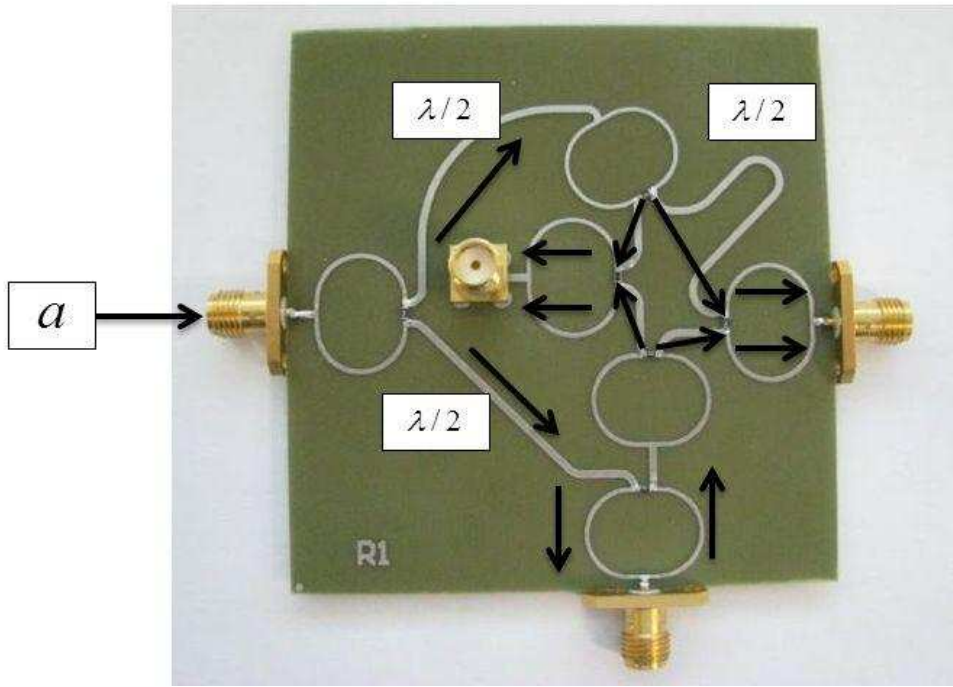
Aşağıda yer verilmiş devre ise yukarıdakine benzeyen fakat gecikme hatları ve DUT'in bağlandığı porttaki wilkinson güç bölücünün iki aşamalı ile değiştirilmiş bir devredir.



Şekil 4.2. Yansımaya katsayısının imajiner kısmını ölçen reflektometre

4.3. Devrenin Analizi

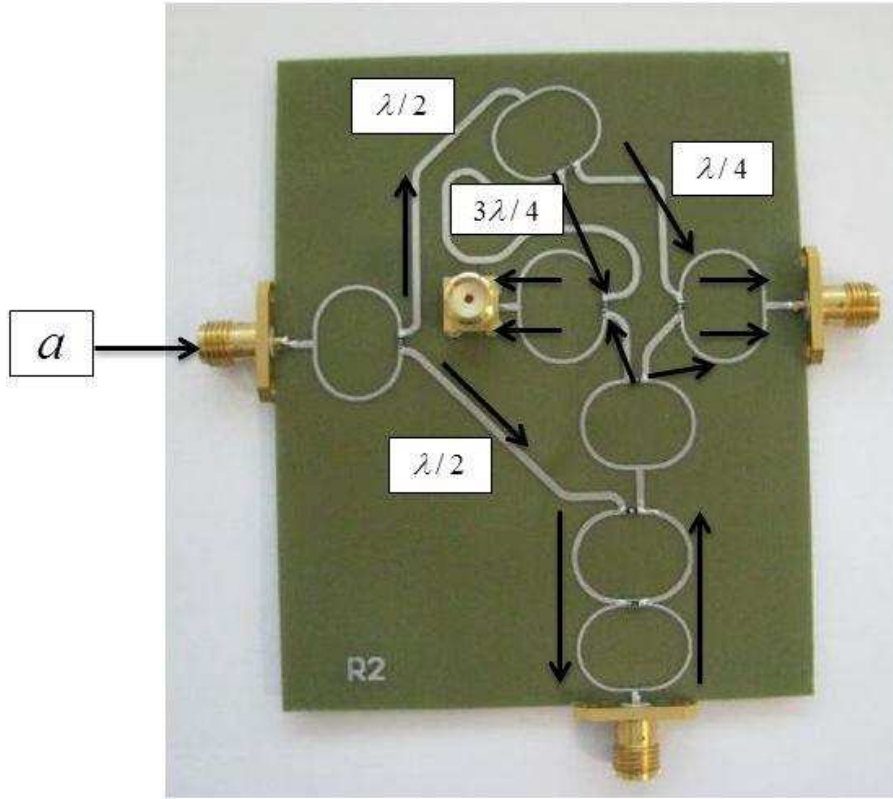
Aşağıdaki şekle göre girişte verilen işaretin genliğine a denirse DUT portuna gelen dalganın genliği iki adet wilkinson güç bölücünden geçtiği için $-a/2$ olur.



Şekil 4.3. Birinci devre için reflektometrede güç akışı

DUT'ten yansiyarak geri dönen dalga ise $ja\Gamma/2$ olur. Buradaki j katsayısı faz farkından, $1/\sqrt{2}$ katsayısı ise işaretin eşit iki güce bölünmesinden gelmektedir. Bu yansıyan dalga idealde birinci porta ulaşamaz. Gerçekte ise wilkinson güç bölücünün izolasyonu kadar zayıflayarak ulaşır ki bu göz ardı edilebilir. Sonuç olarak P3'e ve P4'e DUT'ten yansiyarak gelen dalganın genliği $ja\Gamma/4\sqrt{2}$, Giriş kaynağından gelen dalganın genliği ise P4'te $-ja/2\sqrt{2}$ ve P5'te $ja/2\sqrt{2}$ olur. Burada son güç bölücü aslında birleştirici olarak çalışır.

Görüldüğü gibi P3 portu ile P4 portu arasında $\lambda/2$ kadarlık bir faz farkı vardır.



Şekil 4.4. İkinci devre için reflektometrede güç akışı

Buna göre birinci devrede çıkış portlarında görülen dalgaların genlikleri aşağıdaki gibidir:

$$P_3 = \frac{ja\Gamma}{4\sqrt{2}} - \frac{ja}{2\sqrt{2}} \quad (4.1a)$$

$$P_4 = \frac{ja\Gamma}{4\sqrt{2}} + \frac{ja}{2\sqrt{2}} \quad (4.1b)$$

Bu denklemler 3. bölümde ayrıntısı verilmiş analizdeki denklem (3.21) formatında yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$P_3 = \frac{ja}{4\sqrt{2}}(\Gamma - 2) \quad (4.2a)$$

$$P_4 = \frac{ja}{4\sqrt{2}}(\Gamma + 2) \quad (4.2b)$$

Aynı inceleme ikinci devre için de gerçekleştirildiğinde çıkış portlarında aşağıda ifadesi yazılmış genlikte dalgalar görülür:

$$P3 = \frac{ja}{4\sqrt{2}}(\Gamma - 2j) \quad (4.3a)$$

$$P4 = \frac{ja}{4\sqrt{2}}(\Gamma + 2j) \quad (4.3b)$$

Yukarıdaki denklemlerden anlaşılacağı üzere reflektometre q_i noktaları 2, -2, 2j ve -2j noktalarında tasarlanmıştır. q_i noktaları karmaşık düzlemde bir birlerinden simetrik olarak 90° ayrılmışlardır ki bu durum ideal reflektometre tasarımını gereğidir.

Denklem (3.34) kullanıldığında DUT'in yansıma katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\Gamma = 4x \left(\frac{P_{3_1} - P_{4_1}}{P_{5_1}} + j \frac{P_{3_2} - P_{4_2}}{P_{5_2}} \right) \quad (4.4)$$

Burada ikinci alt indis devrelerin sayılarını ifade etmektedir.

4.4. Devrenin Kalibrasyonu

Genel olarak 6-port reflektometreler bilinmeyen katsayıları tanımlamak amacıyla en az 5 kalibrasyon standartı ile kalibre edilirler fakat tasarımda seçilen konfigürasyon bölüm 3.3'te anlatılan hata analizine göre sadece 3 adet standart ile kalibre edilmiştir. Kalibre edilmiş reflektometre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\Gamma_{kalibreli} = \frac{\Gamma_{ölçülen} - E_D}{E_R + E_S (R_{ölçülen} - E_D)} \quad (4.5)$$

Burada E_D , yönlülük hatası; E_R , yansıma işaret yolu hatası ve E_S ise kaynak uyumu hatasıdır ve bu değerler üç adet geniş bantlı uyumlu, kısa devre ve açık devre standartları ile hesaplanmıştır:

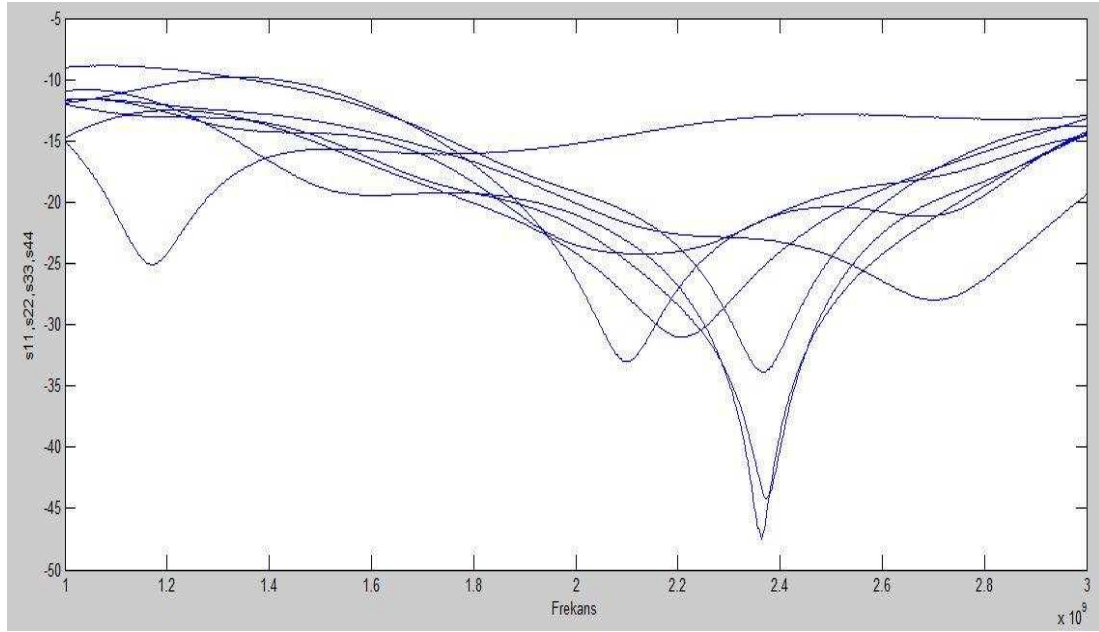
$$E_D = \Gamma_{ölçülen}^{uyumlu} \quad (4.6a)$$

$$E_S = \frac{2\Gamma_{ölçülen}^{uyumlu} - \Gamma_{ölçülen}^{açık devre} - \Gamma_{ölçülen}^{kısa devre}}{\Gamma_{ölçülen}^{kısa devre} - \Gamma_{ölçülen}^{açık devre}} \quad (4.6b)$$

$$E_R = (1 + E_S) \left(\Gamma_{ölçülen}^{uyumlu} - \Gamma_{ölçülen}^{kısa devre} \right) \quad (4.6c)$$

4.5. Devrenin Testleri

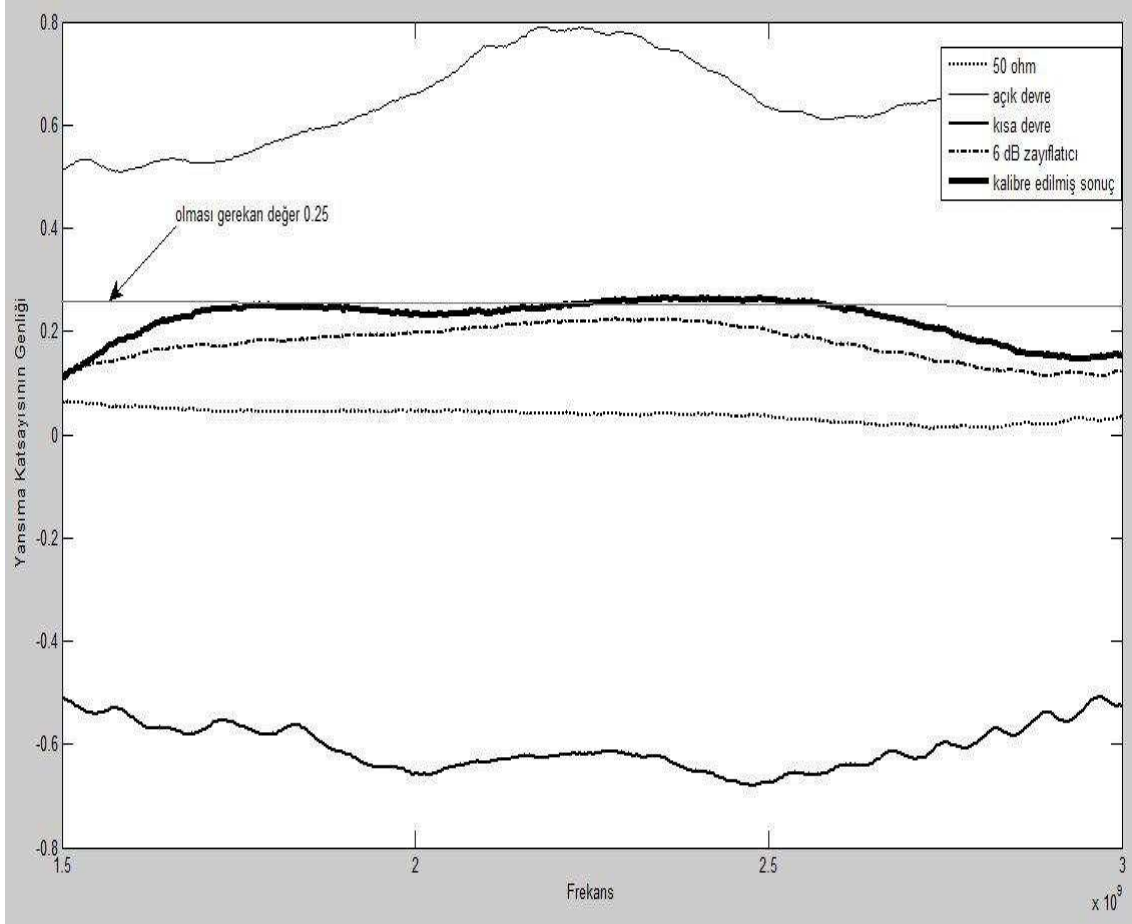
Tasarlanan reflektometrede diğer mikrodalga devrelerde olduğu gibi giriş ve çıkış portlarının uyumu önemlidir. Uyum kriteri bu portlara kartın karakteristik empedanı ile aynı Z_0 empedanslı bir işaret kaynağından gönderilen işaretin geriye yansıma oranı olan $s_{ii}, i=1,2,\dots,n$ parametrelerinin minimum olmasıdır. Genel olarak bu parameter -10 dB'in altında olması uyum için yeterlidir. Aşağıda, üretilen devrelerin portlardaki uyumu gösteren s_{ii} paramterleri bulunabilir:



Şekil 4.5. Üretilen devrenin portlarının ağ analizörü ile ölçülen S_{ii} parametreleri

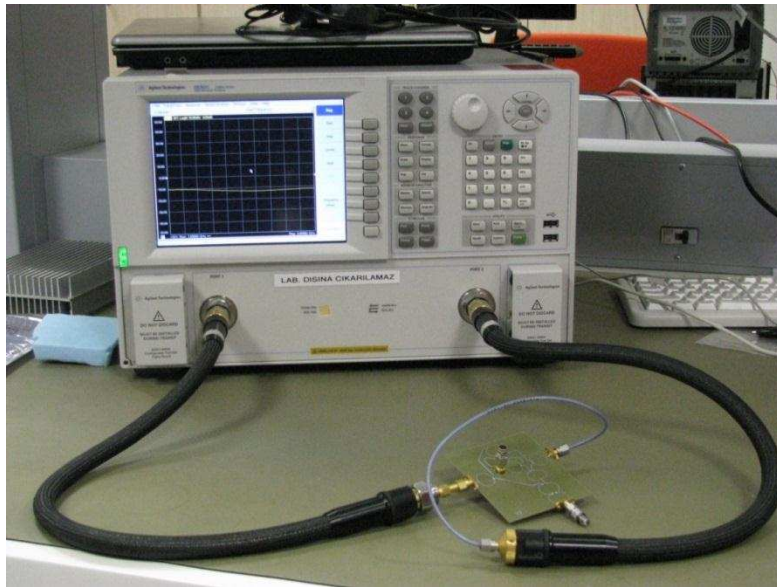
Görüldüğü üzere reflektometrenin tüm portları yeterince uyumludur. Bant boyunca S_{ii} parametreleri -10 dB'in altındadır.

Devre, simülasyonda kullanılan yükler kullanılarak test edilmiştir. Böylece simülasyon sonuçları ile karşılaştırma yapılabilir. Kalibrasyon amacıyla geniş bantlı açık devre, kısa devre, 50 ohm ve 6dB'lik zayıflatıcı kullanılmıştır. Aşağıda devrenin alınan ölçümler sonucunda elde edilmiş grafiği ve test edilmekte olunan reflektometre görülebilir:



şekil 4.6. Devrenin ölçüm sonuçları

Grafikten de anlaşılacağı üzere 2.25 GHz merkezi etrafında yaklaşık bir GHz'lik bantta oldukça iyi bir sonuç alınmıştır ve ideal olan 0.25 değeri sağlanmıştır.



şekil 4.7. Reflektometrede alınan ađ analizörü ölçümü

4.5.1. Simülasyon sonuçları ile karşılaştırma

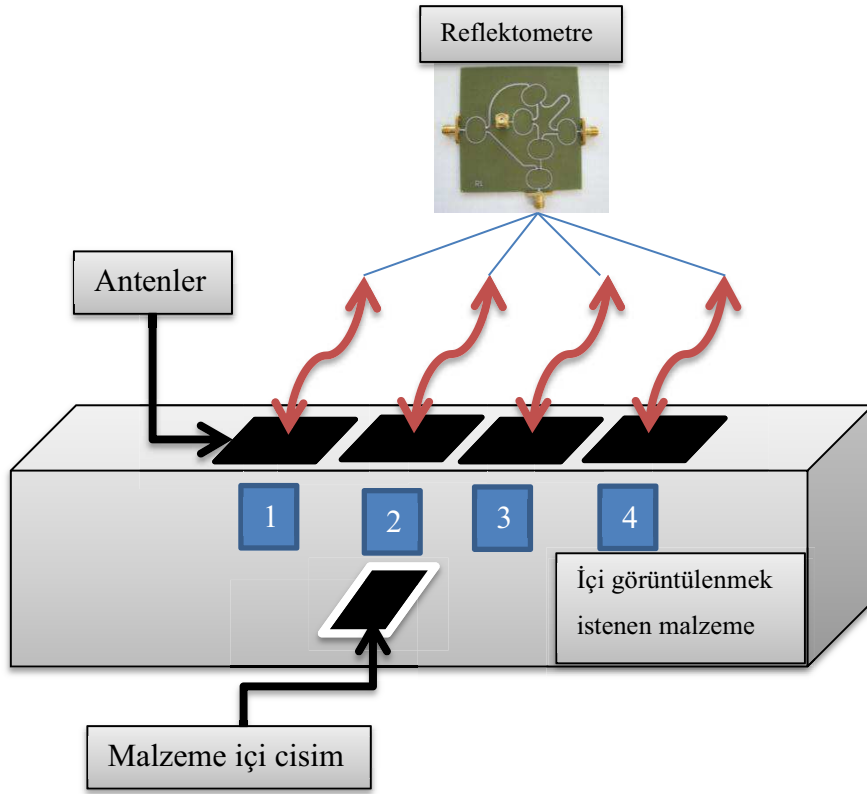
Devre, simülasyon sonuçları ile son derece yakın sonuçlar vermiştir. Fakat özellikle bandın uzaklarında hatalar artmıştır. Bunların sebepleri, üretimde kullanılan malzemenin her yerinde bağıl dielektrik sabitinin aynı olmaması, iletim hatlarının mikro düzeyde kalınlıklarının eşit olmaması ve kullanılan wilkinson güç bölücünün gücü her frekansta eşit bölememesi olarak verilebilir. Başka bir deyişle hata kaynağı olarak kullanılan komponent, malzeme ve hatların idealden uzaklaşmalarıdır.

4.5.2. Örnek bir uygulama olarak reflektometrenin malzeme içi görüntüleme amacıyla kullanılması

Reflektometre, ölçüm portuna takılan cihazın s_{11} parametresini ya da başka bir deyişle yansıma katsayısını ölçer. Buradan yola çıkılarak aslında DUT olarak bir anten de takılabilir.

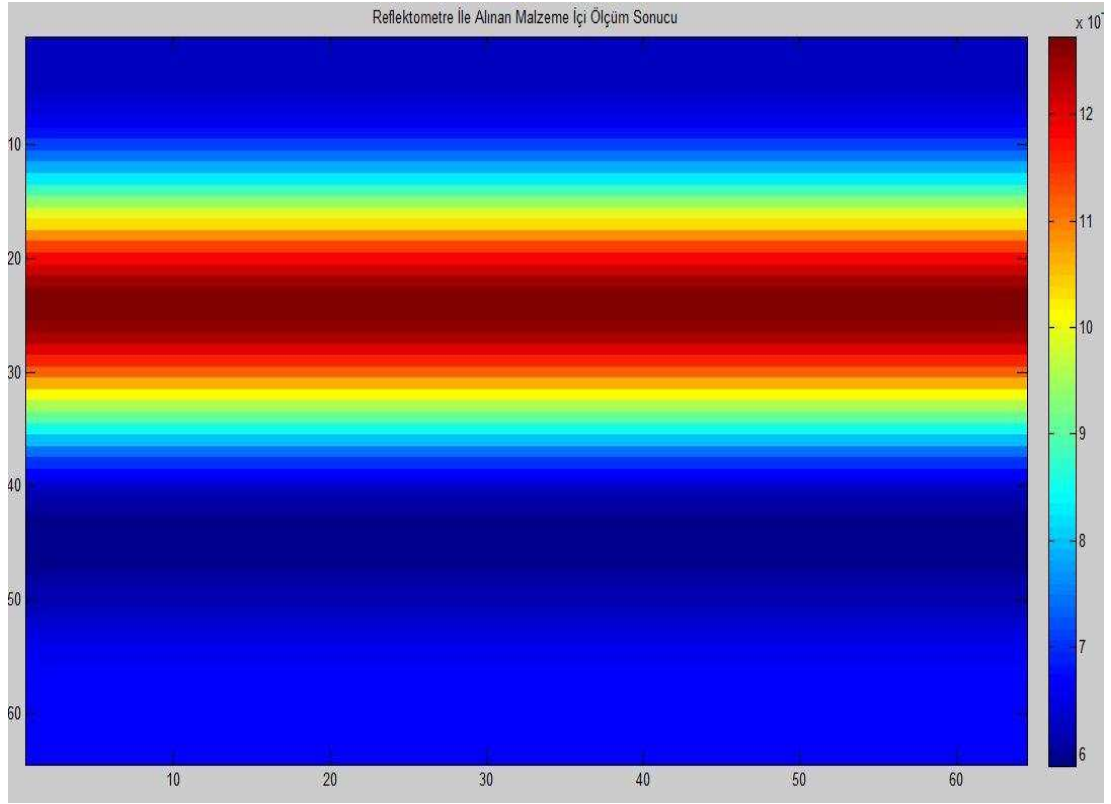
Mikrodalga yolu ile malzeme içi görüntülemeye genel prensip, malzemeye doğru gönderilen işaretin ne kadarının geri döndüğünün ölçülmesidir. Eğer malzemenin bir bölgesinde normalden daha fazla geri dönüş var ise o bölgede mevcut malzemedeki farklı bir cismin malzeme içinde olduğunun kanıtıdır.

Bunu için aşağıdaki test düzeneği hazırlandı ve ölçümler alındı:



Şekil 4.8. Malzeme içi görüntüleme test düzeneği

Yukarıdaki düzenek sadece ikinci antenin altına cisim gelecek şekilde hazırlandı. Öngörülen, 2 numaralı antenin ölçüm değerlerinin diğerlerinden farklı ve yansıma katsayısı daha büyük çıkmasıdır. Çünkü test portu olan DUT olarak antenin bağlandığı porttan gönderilen işaretin bir kısmı cisimden yansyarak geri dönecektir. Bu da reflektometre ile ölçüldüğünde aşağıdaki görüntü elde edilmiştir:



Şekil 4.9. Malzeme içi görüntüleme test sonuçları

BÖLÜM 5. SONUÇ

Tezde, uygulanması basit, üretilmezi ucuz ve genişbantlı mikroşerit tabanlı bir reflektometre tasarımı yapılmaya çalışılmış ve bu tasarım üretilerek test edilmiştir. Basit bir matematiksel işlem ile sadece çıkış portlarından alınan dört adet skaler güç ölçümü ile kompleks yansıma katsayısı başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

Devrenin ucuz ve uygulaması kolay olması amacıyla sadece wilkinson güç bölücüler ve gecikme hatları olarak da iletim hatları kullanılmıştır. Bu reflektometrenin çalışmasının öncelikle ADS simülasyonu yapılmıştır. Burada elde edilen başarılı sonuçtan sonra devre üretilmiştir. Devrenin çalışması test edilmek amacıyla da 6 dB'lik bir zayıflatıcı kullanılmıştır. Son olarak da örnek bir uygulama olması açısından malzeme içi görüntüleme düzeneği hazırlanmış ve örnek bir malzeme içindeki cisim tespit edilebilmiştir.

Sonuçlar göstermiştir ki bu reflektometre ile geniş bantlı 50 ohm, açık devre ve kısa devre standartları ile yapılan tek port kalibrasyonu ile DUT'in makul bir doğrulukla ölçümü yapılabilir.

Gelecekte reflektometrenin çalışma frekans aralığını arttırmak amacıyla wilkinson güç bölücüden daha geniş banda sahip güç bölücüleri ya da kuplörler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ENGEN, G. and HOER, C., Application of an arbitrary 6-port junction to power-measurement problems, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-21, no. 4, pp. 470–474, Nov. 1972.
- [2] HOER, C., The six-port coupler: A new approach to measuring voltage, current, power, impedance, and phase, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 21, no. 4, pp. 466–470, Nov. 1972.
- [3] ENGEN, G., The six-port reflectometer: An alternative network analyzer, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 25, no. 12, pp. 1075–1080, Dec. 1977.
- [4] DE SOUZA ROLÌM, Belfort de OLIVEIRA, A. J., and de MELO, M. T., Six-port complex permittivity measurements, in *Proc. 36thEuMC*, Sept. 2006, pp. 492–494.
- [5] GHANNOUCHI, F.M. and MOHAMMADI, A., *The Six-Port Technique*. Norwood, MA: Norwood, MA: Artech House, 2009.
- [6] BIALKOWSKI, M.E. and WOODS, G.S., Design and analysis off a six-port receiver for use in near-field antenna measurements, in *IEEProc. H Microwaves, Antennas and Propagation*, Dec. 1987, vol. 134, no. 6, pp. 515–520.
- [7] AKYEL, C., GHANNOUCHI, F.M., and CARON, M., A new design for high-power six-port reflectometers using hybrid stripline/wave-guide technology, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, no. 2, pp. 316–321, Apr. 1994.
- [8] BENSMIDA, S., POIR, P., NEGRA, R., and GHANNOUCHI, F.M., New time-domain voltage and current waveform measurement setup for power amplifier characterization and optimization, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 56, no. 1, pp. 224–231, Jan. 2008.

- [9] GUTIÉRREZ MÍGUELEZ, C., HUYART, B., BERGEAULT, E., and JALLET, L.P., A new automobile radar based on the six-port phase/frequency discriminator, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 1416–1423, July 2000.
- [10] STELZER, A., DÍSKUS, C., LUBKE, K., and THIM, H., A microwave position sensor with submillimeter accuracy, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 12, pp. 2621–2624, Dec. 1999.
- [11] GARCÍA, A., KERNEVES, D., and HUYART, B., “Measurement of direction of arrival for radar application,” in *Proc. 32nd EuMC*, Sept. 2002, pp. 1–4.
- [12] HUYART, B., LAURÍN, J.-J., BOSÍO, R., and ROSCOE, D., A direction-finding antenna system using an integrated six-port circuit, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 43, no. 12, pp. 1508–1512, Dec. 1995.
- [13] MAJER, N., HARÍNG, J., and WIESER, V., DOA estimation by six-port reflectometer array, in *Proc. 17th Int. Conf. Radioelektronika, 2007*, Apr. 24–25, 2007, pp. 1–4.
- [14] YAKABE, T., Xiao, F., IWAMOTO, K., GHANNOUCHI, F.M., FUJII, K., and YABE, H., Six-port based wave-correlator with application to beam direction finding, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 2, pp. 377–380, Apr. 2001.
- [15] VENDELÍN, G.D., PAVÍO, A.M., and ROHDE, U. L., *Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques*, Second Edition, New York: Wiley-Interscience, 2005.
- [16] MALORATSKY, L.G., *Passive RF & Microwave Integrated Circuits*, New York: Elsevier, 2004.
- [17] POZAR, D.M., *Microwave Engineering*, Third Edition, New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [18] ENGEN, G.F., A Least Square Solution for Use in SixPort Measurement Technique, *IEEE Trans. Theory and Tech.*, Vol. MTT28, pp. 1437–1477, 1980.
- [19] ENGEN, G.F., An Improved Circuit for Implementing the SixPort Technique of Microwave Measurements, *IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech.*, Vol. MTT 25, No. 12, pp. 1080–1083, December 1977.

ÖZGEÇMİŞ

Erkin HALAÇLI, 1986 yılında Yozgat'ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini sırasıyla Bozüyük Zafer İlkokulu, Bozüyük Mustafa Şeker Anadolu Lisesi ve Kütahya Fen Lisesi'nde tamamladıktan sonra 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2006 yılında Kontrol Mühendisliği programıyla çift anadal yapmaya başlayarak, 2009 yılında elektronik mühendisi ve kontrol mühendisi ünvanıyla mezun oldu. Lisans eğitimi sırasında Eclipse Information Systems şirketinde bir yıl boyunca çeşitli projelerde çalıştı. 2009 yılından itibaren TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Enstitüsü'nde (UEKAE) Araştırmacı olarak görev yapmaktadır. 2009-2010 yılı güz döneminden itibaren Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans yapmaktadır.