



**MİKRODALGA ÖLÇÜMLERİNDE VEKTÖREL BÜYÜKLÜKLERİN
ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN HESAPLANMASI**

Ecem KARAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ecem KARAY

01/08/2023

MİKRODALGA ÖLÇÜMLERİNDE VEKTÖREL BÜYÜKLÜKLERİN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN HESAPLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ecem KARAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2023

ÖZET

Mikrodalga ölçüm laboratuvarlarında en sık alınan ölçümlerden biri yansıma ve iletim katsayısı ölçümleridir. Bu ölçümler içlerinde karmaşık sayıları barındırırlar ve genelde ağ analizörleri ile analiz edilen saçılma parametreleri ile ifade edilirler. Alınan ölçümlerinin doğruluğu ve güvenilirliği için belirsizlik hesabının yapılması gerekmektedir. Belirsizlik beyanı alınan ölçüme duyulan güveni belirtmektedir. Bu çalışmada, ASELSAN A.Ş. içerisindeki test ve ölçüm laboratuvarında 30 dB büyüklüğe sahip bir zayıflatıcıya ait yansıma ve iletim katsayıları ölçümü belirsizlik değerleri ile beraber alınmış ve ölçümler hesaplanan matematiksel verilerle karşılaştırılmıştır. Ölçümün gerçekleştirildiği test düzeneğinde 1 adet 30dB ortalama güç 50W zayıflatıcı, 1 adet ağ analizörü, 1 adet GPIB-USB-HS+ bağlantı kablosu ve 1 adet N-N tipi kablo kullanılmıştır. Kurulan test düzeneğinde ağ analizörü GPIB-USB-HS+ bağlantı kablosu aracılığı ile VNA Tools bilgisayar programı üzerinden PC kontrollü olarak yönetilmiştir. Ölçüm öncesi N-tipi kalibrasyon kiti ile VNA Tools aracılığıyla ağ analizör cihazına iki port kalibrasyonu uygulanmıştır. Daha doğru bir ölçüm için, bu kalibrasyona ölçüm esnasında kullanılacak N-N kablo da dahil edilmiştir. İki port kalibrasyon işlemi sonrası VNA Tools ile yansıma ve iletim katsayısı ölçümleri belirsizlik değerleri ile elde edilmiştir. Bu veriler, matematiksel formüllerle lineer genlik, logaritmik genlik ve faz değerine dönüştürülmüştür. Matematiksel dönüşümlerin program aracılığı ile alınan verilerle yüksek oranda örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca, ileriki dönemde yapılabilecek çalışmalar ve geliştirme alanlarına atıfta bulunulmuştur.

Bilim Kodu : 90534

Anahtar Kelimeler : Mikrodalga ölçümleri, Vektörel büyüklükler, Belirsizlik hesabı, Yansıma katsayısı, İletim katsayısı, VNA Tools

Sayfa Adedi : 61

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Emin ÇELİK

MEASUREMENT UNCERTAINTY CALCULATIONS OF VECTORAL SIZES IN MICROWAVE MEASUREMENTS

(M. Sc. Thesis)

Ecem KARAY

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2023

ABSTRACT

One of the most frequently taken measurements in microwave measurement laboratories is reflection and transmission coefficient measurements. These measurements contain complex numbers and are usually expressed in terms of scattering parameters analyzed by network analyzers. For the accuracy and reliability of the measurements taken, it is necessary to calculate the uncertainty. The uncertainty statement indicates the confidence in the measurement taken. In this study, in ASELSAN INC, the reflection and transmission coefficients of an attenuator with a size of 30 dB were taken together with the uncertainty values and the measurements were compared with the calculated mathematical uncertainty datas. A 30dB average power 50W attenuator, 1 network analyzer, 1 GPIB-USB-HS+ connection cable and 1 N-N type cable were used in the test setup where the measurement was made. In the test setup, the network analyzer was managed via the GPIB-USB-HS+ connection cable and PC-controlled via the VNA Tools computer program. Before the measurement, two port calibration was applied to the network analyzer via VNA Tools with the N-type calibration kit. For a more accurate measurement, the N-N cable to be used during the measurement is also included in this calibration. After two port calibration process, reflection and transmission coefficient measurements were obtained with VNA Tools with uncertainty values. These data were converted to linear amplitude, logarithmic amplitude and phase values with mathematical formulas. It has been observed that the mathematical transformations overlap with the data obtained through the program at a high rate. In addition, references are made to the work and development areas that can be done in the future.

Science Code : 90534

Key Words : Microwave measurement, vectoral sizes, uncertainty calculations, reflection coefficient, transmission coefficient, VNA Tools

Page Number : 61

Supervisor : Asst. Prof. Mahmut Emin ÇELİK

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince tecrübelerini, bilgi birikimini benden esirgemeyen ve tezin yürütülmesinde destek olan danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Emin ÇELİK'e,

Tez sürecim boyunca farklı bakış açılarıyla çalışmamı zenginleştiren, tecrübeleriyle yol gösteren ve sonuna kadar destek veren sayın Dr. Erkan DANACI'ya,

Sunduğu eğitimlerle araştırmalarımı kuvvetlendiren, laboratuvar altyapısıyla araştırmalarımın gerçekleşmesine olanak sağlayan ASELSAN A.Ş.'ye,

Hayatım boyunca desteklerini her daim hissettiğim babam İsmail YURDAKUL'a, kardeşim Görkem YURDAKUL'a ve elini her zaman üzerimde hissettiğim annem Nurcan KOZAN'a,

Her koşulda sevgisiyle destek olan, duyduğu sonsuz güvenle cesaretlendiren canım eşim Koray KARAY'a ve varlığıyla motive eden, neşe kaynağım kızım Lilya KARAY'a,

Teşekkürler ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. MİKRODALGA YANSIMA VE İLETİM KATSAYILARI ÖLÇÜMLERİ	5
2.1. Yansımaya ve İletim Katsayıları	5
2.2. Skalar ve Vektör Ağ Analizörleri	7
2.3. S Parametreleri	7
3. VNA İLE YANSIMA VE İLETİM KATSAYI ÖLÇÜMLERİ	11
3.1. VNA Hata Terimlerinin Öğrenilmesi	12
3.1.1. VNA'nın kalibrasyon kiti ile kalibrasyonu	12
3.2. VNA Hata Terimleri Öğrenme Teknikleri	16
3.2.1. SOLT yöntemi ile VNA hata terimleri öğrenme	16
3.2.2. TRL yöntemi ile VNA hata terimleri öğrenme	17
4. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ HESAPLAMA İŞLEM ADIMLARI	19
4.1. Model Fonksiyonun Yazılması	20
4.2. Belirsizlik Bileşenlerinin Elde Edilmesi	20
4.2.1. A tipi standart belirsizlik	20
4.2.2. B tipi standart belirsizlik	23

	Sayfa
4.3. Duyarlılık Katsayıları Hesabı	23
4.4. Birleşik Belirsizlik Hesabı	24
4.5. Geniştirilmiş Belirsizlik Hesabı	24
5. KARMAŞIK SAYILARDA BELİRSİZLİK HESAPLAMALARI	27
5.1. Karmaşık Sayı Bileşenleri	27
5.2. Karmaşık Sayı Genlik ve Faz Hesaplamaları	27
5.3. Karmaşık Sayıların Lineer Genliğinin Belirsizlik Hesaplamaları	28
5.4. Karmaşık Sayıların Logaritmik Genliğinin Belirsizlik Hesaplamaları	31
5.5. Karmaşık Sayıların Fazının Belirsizlik Hesaplamaları	32
6. YANSIMA VE İLETİM KATSAYILARININ VEKTÖREL ÖLÇÜMLERİ	35
7. VEKTÖREL ÖLÇÜMLERİN BELİRSİZLİK HESAPLAMALARI VE KARŞILAŞTIRILMALARI	43
7.1. Lineer Genlik ve Belirsizlik Hesabı	44
7.2. Logaritmik Genlik ve Belirsizlik Hesabı	45
7.3. Faz ve Belirsizlik Hesabı	47
7.4. Sonuçların Karşılaştırılması	48
7.4.1. Lineer genlik ve belirsizlik değerlerinin karşılaştırılması	48
7.4.2. Logaritmik genlik ve belirsizlik değerlerinin karşılaştırılması	50
7.4.3. Faz ve belirsizlik değerlerinin karşılaştırılması	52
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. “Student Dağılım” t tablosu.....	22
Çizelge 4.2. Kapsam faktörü tablosu sonuçları (40kg).....	25
Çizelge 5.1. Belirsizlik değerleri ile bilindiği varsayılan reel-imaginer format veriler...	29
Çizelge 7.1. METAS VNA Tools üzerinden alınan verilerin 5 MHz frekans aralıklarıyla örneklenmesi.....	43
Çizelge 7.2. Microsoft Excel üzerinde reel-imaginer formattaki verilerden lineer genlik ve belirsizlik hesabı.....	44
Çizelge 7.3. Microsoft Excel üzerinde reel-imaginer formattaki verilerden logaritmik genlik ve belirsizlik hesabı.....	46
Çizelge 7.4. Microsoft Excel üzerinde reel-imaginer formattaki verilerden faz ve belirsizlik hesabı	47
Çizelge 7.5. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan lineer genlik ve belirsizlik değerleri	49
Çizelge 7.6. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan lineer genlik ve belirsizlik değerleri arasındaki fark	50
Çizelge 7.7. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri.....	51
Çizelge 7.8. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri arasındaki fark.....	51
Çizelge 7.9. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan faz ve belirsizlik değerleri	52
Çizelge 7.10. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan faz ve belirsizlik değerleri arasındaki fark	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İletim hattı.....	5
Şekil 2.2. İletilen Dalga	6
Şekil 2.3. Doğrusal iki kapılı hatta ait s parametreleri.....	8
Şekil 2.4. Çok kapılı hatlar için s parametre matrisi.....	9
Şekil 3.1. Yansıma ve iletim katsayısı ölçümlerinin vektör ağ analizörü ile gösterimi..	11
Şekil 3.2. Tek kapılı, 3 hata terimli model.....	13
Şekil 3.3. Tek kapılı kalibrasyon öncesi ve sonrası yansıma ölçümü.....	14
Şekil 3.4. İki kapılı hata terimi düzeltimi	15
Şekil 3.5. Ağ analizörü kalibrasyonu ile hata terimleri ve kalibrasyon standartları	17
Şekil 5.1. Karmaşık sayıların kartezyen koordinat sisteminde gösterimi	27
Şekil 6.1. Yansıma ve iletim katsayısı ölçümünde kullanılan VNA (a) ve zayıflatıcı (b)	35
Şekil 6.2. Vektör ağ analizörünün iki portlu kalibrasyonu için kullanılan kalibrasyon kiti.....	36
Şekil 6.3. NA port1 üzerinde kısa devre kalibrasyonu görüntüsü	37
Şekil 6.4. VNA ile 30 dB zayıflatıcı ile yansıma ve iletim katsayısı ölçüm düzeneği ...	38
Şekil 6.5. ETAS VNA Tools üzerinde 30 dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının reel-imaginer formattaki verileri	39
Şekil 6.6. METAS VNA Tools üzerinde 30 dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının reel-imaginer formatta grafiksel gösterimi	40
Şekil 6.7. METAS VNA Tools üzerinde 30 dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının lineer genlik ve faz formattaki verileri ..	41
Şekil 6.8. METAS VNA Tools üzerinde 30 dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının logaritmik genlik ve faz formattaki verileri	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\cos$	Cosinüs
c_i	Her bir bileşenin duyarlılık katsayısı
dB	Desibel
e_{ij}	2x2 hata terimleri matrisi
GHz	Giga hertz
im	İmajiner
k_p	Kapsam faktörü
MHz	Mega hertz
n	Alınan ölçüm sayısı
re	Reel
S	Saçılma
S_{ij}	2x2 s matrisi
$\sin$	Sinüs
$\tan$	Tanjant
t	Student
V_{max}	Duran dalga deseninin en yüksek genliği
V_{min}	Duran dalga deseninin en düşük genliği
Z_0	Giriş empedansı
Z_L	Çıkış empedansı
W	Watt
Γ	Yansıma katsayısı
ρ	Yansıma katsayısının genliği
θ	Faz değeri

Kısaltmalar**Açıklamalar****DDO**

Duran Dalga Oranı

GPIB

General Purpose Interface Bus

GUM

Ölçüm Belirsizliği Kılavuzu

HS

Hi Speed

IL

Insertion Loss

LİN

Lineer

LOG

Logaritma

MAG

Magnitude

METAS

The Federal Institute of Metrology

PC

Personal Computer

RF

Radio Frequency

SOLT

Short Open Load Thru

TRL

Thru Reflect Line

UNC

Uncertainty

USB

Universal Serial Bus

VNA

Vector Network Analyzer

1. GİRİŞ

Yansıma ve iletim katsayıları, elektromanyetik dalgaların bir ortamdan diğerine geçişindeki davranışını ifade eden önemli parametrelerdir. Yansıma katsayısı, bir elektromanyetik dalga bir ortam sınırından geçtiğinde, ne kadarının geri yansıdığını gösterirken, iletim katsayısı ise ne kadarının geçtiğini gösterir. Bu katsayılar vektörel büyüklüklerdir. Vektörel sayılar, gerçek ve sanal bileşenlerin toplamından oluşan sayılardır. Genel olarak, vektörel bir sayı $a + bi$ şeklinde ifade edilir, burada a gerçel bileşen, b ise sanal bileşendir. Özellikle genlik ve faz bilgisini ifade etmek için vektörel sayılar kullanılır. Bu tür sayıların ölçümleri için özel olarak geliştirilen, mikrodalga frekansında ölçüm yapan cihazlar vardır. Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer - VNA) vektörel büyüklükleri ölçmekle birlikte yansıma ve iletim katsayısı ölçümünde kullanılan ölçüm cihazlarıdır [1].

Her ölçümde birtakım belirsizlikler ve hatalar bulunmaktadır. Bunlar çeşitli sebeplerden kaynaklanmaktadır [2]. Ölçüm belirsizliği, bir ölçümün gerçek değerine ne kadar yakın olduğunu veya ölçüm sonucunun ne kadar güvenilir olduğunu ifade eden pozitif bir kavramdır [3]. Bir ölçümün belirsizliği, ölçümün gerçek değerine yakınlığını ve tekrarlanabilirliğini yansıtır. Ölçüm sonucu, ölçüm belirsizliğiyle birlikte ifade edilir ve genellikle belirsizlik aralığı içinde yer aldığı kabul edilir. Belirsizlik aralığı, istatistiksel hesaplamalar veya belirsizlik analizi kullanılarak elde edilir. Belirsizlik analizi, ölçüm sürecindeki hataları, sistemik etkileri ve tesadüfi değişkenlikleri dikkate alarak belirsizlik aralığını hesaplar. Belirsizlik aralığı, ölçümün güvenilirliğini değerlendirmek için önemlidir. Daha dar bir belirsizlik aralığı, ölçümün daha kesin ve güvenilir olduğunu gösterirken, daha geniş bir belirsizlik aralığı, ölçümün daha az kesin ve daha az güvenilir olduğunu gösterir.

Laboratuvarların deney ve kalibrasyon süreçleri hataya açık bir alandır. Bu alanda insan faktörü, kalibrasyon yöntemi, laboratuvarda kullanılan cihazlar gibi etmenler kalibrasyonun güvenilirliğini etkilemektedir [4]. Laboratuvarların yeterliliklerini belirlemek ve göstermek için kullanılan bir standart mevcuttur. Bu standart TS EN ISO/IEC 17025 “Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Şartlar” standardıdır. Bu standart, bir laboratuvarın kalite yönetim sistemini oluşturmasını, uygulamasını ve sürekli

iyileştirmesini sağlar. Ayrıca, laboratuvarların izlenebilirlik, belgelendirme, kaynak yönetimi, ekipman doğrulaması, deney metotları, raporlama ve belge kontrolü gibi konularda belirli gereklilikleri karşılamalarını sağlar. ISO/IEC 17025 standardı, laboratuvarların uluslararası tanınırlık kazanması ve müşterilere güvenilir ve doğru sonuçlar sağlamaları için önemli bir rol oynar. Aynı zamanda bu standarda göre, ölçüm belirsizliğinin hesaplanması esnasında çeşitli faktörlere dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunlar, ölçüm aracının doğruluğu ve hassasiyeti, ölçüm yönteminin etkisi, ortam koşulları, örnekleme etkisi, işlem hataları gibi faktörlerdir.

Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılması gereken bir kılavuz vardır. Bu "Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Kılavuzu" (Guide on the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM) kılavuzudur [5,6]. GUM, ölçüm belirsizliğinin hesaplanması için genel bir yöntem sunan uluslararası kabul görmüş bir standarttır. Bu standart, belirsizlik hesaplamasını istatistiksel yöntemlerle yapmayı ve belirsizlik bileşenlerini belirlemek için genel prensipleri takip etmeyi önerir. Ölçüm belirsizliği hesabı için gerekli olan ilk adım model fonksiyonun oluşturulmasıdır. Burada ölçüm belirsizliğine etki eden her bir belirsizlik bileşeni mevcuttur ve bu bileşenlerin ölçüm belirsizliğine etkisi aynı değildir. Bu noktada, her bir belirsizlik bileşeninin belirsizliğe katkısını hesaplayabilmek adına duyarlılık katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Ardından her bir belirsizlik bileşeninin kendi belirsizliği ile duyarlılık katsayıları kullanılarak bileşik belirsizlik hesabı yapılmaktadır.

Vektörel ölçümlerin gerçekleştirildiği her alanda ölçüm belirsizliğinin hesaplanması beklenmektedir. Belirtilen kılavuzlar ve standartlar ölçüm belirsizliği hesabı için takip edilmeli ve uygulanmalıdır.

Mikrodalgada ölçümlerindeki yansıma ve iletim katsayısı ölçümlerinin daha kolay şekilde gerçekleştirilebilmesi için İsviçre Ulusal Metroloji Enstitüsü METAS tarafından VNA Tools yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım hem vektörel ölçüm yapmakta hem de vektörel ölçümlerin ölçüm belirsizliğini hesaplamaktadır [7].

Bu çalışmada, VNA kullanılarak 30 dB değerine sahip bir RF zayıflatıcının yansıma ve iletim katsayısı ölçümleri belirsizlik değerleri ile birlikte VNA Tools aracılığı yapılmış ve

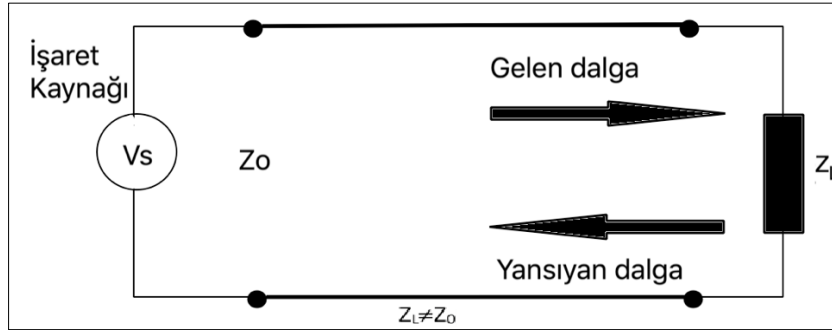
ölçümlerin gerçel ve sanal bileşenleri elde edilmiştir. Bu bileşenlerden yola çıkılarak lineer genlik, logaritmik genlik ve faz bileşenlerinin değerleri ve ölçüm belirsizlikleri matematiksel olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan veriler VNA Tools üzerinden alınan veriler ile karşılaştırılarak matematiksel hesaplamalarda kullanılan denklemlerin validasyonu yapılmıştır. Böylelikle, mikrodalga ölçümlerinde vektörel büyüklüklerin ölçüm belirsizliğinin hesaplamalarının nasıl gerçekleştirileceği bu çalışmada sunulmuştur.

2. MİKRODALGA YANSIMA VE İLETİM KATSAYILARI ÖLÇÜMLERİ

2.1. Yansımaya ve İletim Katsayıları

Bir iletim hattında, çıkış empedansı ile giriş empedansı arasında herhangi bir uyumsuzluk yoksa kaynaktan alıcıya doğru gücün tamamı iletilir. Ancak, empedans eşitsizliği durumu varsa, bu durum kaynaktan belli bir miktar gücün yansımaya neden olur. Genellikle, bir ortamdan diğer bir ortama yüksek frekanslı bir sinyal geçtiğinde de, ortam özelliklerinin farklılığından dolayı sinyalin bir kısmı yansır ve geri döner. Yansıyan sinyal genliğinin gönderilen sinyal genliğine oranına yansımaya katsayısı denir.

Şekil 2.1’de gösterilen Z_0 karakteristik empedansa sahip bir iletim hattının Z_L empedansı ile sonlandırılması durumunda oluşan yansımaya katsayısı (Γ) (2.1) denkleminde belirtildiği gibi hesaplanır. Yansımaya katsayısı vektörel ölçüm yapan cihazların gelişmesi ile vektörel olarak ölçülebilmektedir.



Şekil 2.1. İletim hattı

$$\text{Yansımaya Katsayısı: } \Gamma = \text{Yansıyan Dalga} / \text{Gelen Dalga} = \rho \angle \theta \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)’de ρ yansımaya katsayısının genliğini, θ ise yansımaya katsayısının fazını ifade etmektedir. Yansımaya katsayısının karakteristik empedans ve yük empedansına bağlı olarak değeri ise (2.2) denklemindeki gibi hesaplanır.

$$\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0) \quad (2.2)$$

Yansımaya katsayısının logaritmik ifadesi olan yansımaya kaybı ise (2.3) denklemindeki gibi hesaplanır.

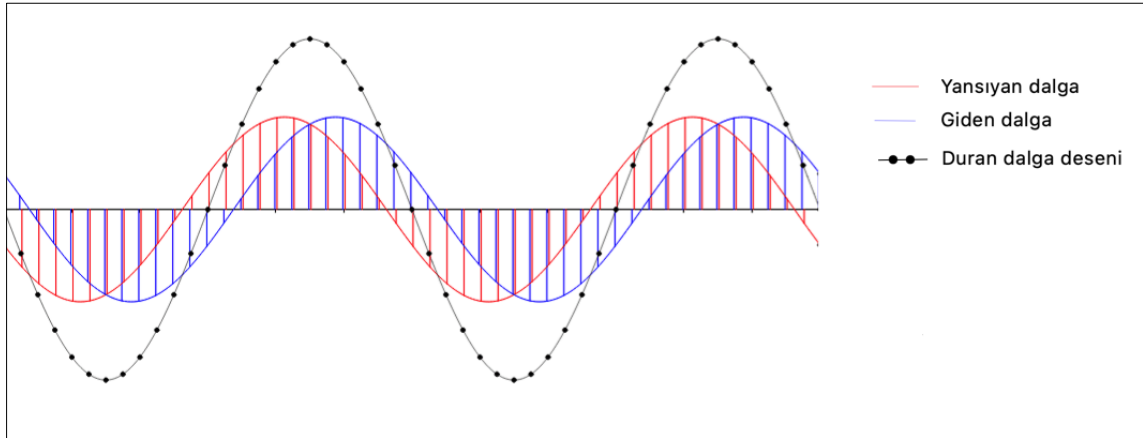
$$\text{Yansıma Kaybı} = 20 \times \log (\rho) \quad (2.3)$$

Bir iletim hattının çıkışında elde edilen sinyal genliğinin girişine gönderilen sinyalin genliğine oranı ile de iletim katsayısı (S_{21}) (2.4) denklemindeki gibi hesaplanabilir. İletim katsayısının logaritmik ifadesi olan iletim kaybı (IL) ise (2.5) denklemindeki gibi hesaplanır.

$$\text{İletim Katsayısı: } S_{21} = \text{Çıkan Sinyal} / \text{Giren Sinyal} \quad (2.4)$$

$$\text{İletim Kaybı} = \text{IL (dB)} = 20 \times \log \left[\frac{1}{|S_{21}|} \right] \quad (2.5)$$

Yansıma katsayısının olduğu her yerde duran dalgalar meydana gelir. Şekil 2.2’de mavi ile gösterilen sinyal ilerleyen ve kırmızı ile gösterilen sinyal yansıyan sinyal ise, siyah ile gösterilen sinyal duran dalga desendir. Bu durumda oluşan duran dalga oranı (DDO – SWR – Standing Wave Ratio), yansıma katsayısı aracılığıyla (2.6) denklemi ile hesaplanabilir.



Şekil 2.2. İletilen dalga

$$\text{Duran Dalga Oranı (DDO)} = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{(1+\rho)}{(1-\rho)} \quad (2.6)$$

(2.6) denklemindeki V_{max} duran dalga deseninin sahip olduğu en yüksek genliğini, V_{min} duran dalga deseninin en düşük genliğini ifade etmektedir.

2.2. Skalar ve Vektör Ağ Analizörleri

Mikrodalga laboratuvarlarındaki yansıma ve iletim katsayısı ölçümleri için üreticiler ağ analizörü adında cihazlar üretmişlerdir.

İki tip ağ analizörü vardır. Bunlar skalar ve vektör ağ analizörleridir (VNA). Temel olarak, skalar ağ analizörü sadece genlik ölçümü yapabiliyorken, vektör ağ analizörü hem genlik hem de faz ölçümü yapabilmektedir. Vektör ağ analizörleri, skalar ağ analizörlerine göre çok daha karmaşık işlemler yapabilmektedir ve bu nedenle sahip oldukları donanımlar skalar ağ analizörlerine göre daha pahalıdır.

Vektör ağ analizörleri, RF teknolojisinin gelişimi noktasında önemli bir test aracıdır. Birçok pasif cihazın (antenler, kablolar, zayıflatıcılar, yönlü bağlayıcılar ve benzeri) performansını doğrulamak için kullanılırlar. Aktif cihazlar için geliştirilmiş daha özel fonksiyonlu vektör ağ analizörleri de mevcuttur.

Vektör ağ analizörleri RF ve mikrodalga sistemlerinde kullanılan cihazların ve devre elemanlarını karakterize etmeyi sağlar. Karakterizasyon, iletim ve yansıma katsayılarının ölçümleri ile sağlanır.

Yüksek frekanslarda değişken olarak akım ve gerilim değerlerinin yerine güç değerleri ölçülmektedir. Bu güç değerlerinin oranlarından s parametreleri olarak isimlendirilen saçılma (scatering) parametreleri tanımlanmıştır [8].

2.3. S Parametreleri

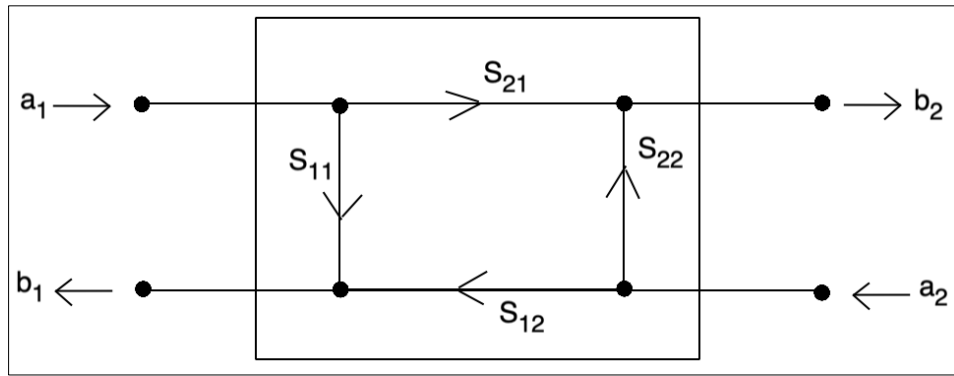
S parametreleri doğrusal bir elektrik devresinin karakteristiğini belirtmek için kullanılan parametrelerdir. S parametreleri frekansa bağlı olarak değişiklik gösterirler. Bir frekans için s parametresi genlik ve faz ile karmaşık sayı biçiminde, birimsiz olarak ifade edilir.

Yüksek frekanslı devrelerde oluşan duran dalga desenleri dolayısıyla akım ve voltaj ölçümü konuma bağlı olarak değişimi göstermesi nedeniyle güçtür. Bu noktada; akım gerilim ölçümü yerine gönderilen, yansıyan ve iletilen dalga modelleri ile daha tutarlı olan s (saçılma) matrisleri ölçülmektedir [8]. Elektriksel bileşenlerin ve sinyallerin yansıma

kayı, iletim kaybı, duran dalga oranı gibi pek çok özelliği bu s parametreleri aracılığı ile ifade edilir.

S parametresi birden fazla kapısı olan devre elemanları için kullanılabilir. N adet kapılı bir ağ yapısında, gönderilen dalga kesişim noktasıyla beraber diğer bağlantı noktalarına da etki edeceğinden dolayı, ağa ait oluşturulan matrislere aynı zamanda saçılma matrisi adı verilmiştir [9].

Doğrusal iki kapılı bir iletim hattına ait s parametreleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Doğrusal iki kapılı hatta ait s parametreleri

Şekil 2.3'e göre:

S_{11} : Birinci kapının yansıma katsayısı

S_{12} : İki kapılı devrede geriye iletim katsayısı

S_{21} : İki kapılı devrede ileri iletim katsayısı

S_{22} : İkinci kapının yansıma katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

a_x : İletilen sinyal gücü

b_x : Yansıma sinyal gücüdür.

Buna göre, yansıyan ve gelen işaretlerinin s parametresi açısından ifade ediliş şekli (2.7) ve (2.8)'de verilmiştir.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{21}a_2 \quad (2.7)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2.8)$$

Devrenin giriş ve çıkış portundaki yansıma katsayıları (2.9)'daki gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned} \Gamma_{giriş} &= S_{11} \\ \Gamma_{çıkış} &= S_{22} \end{aligned} \quad (2.9)$$

İki kapılı bir devrede duran dalga oranının s parametreleri ile ifade ediliş şekli ise (2.10) ve (2.11)'deki gibidir.

$$DDO = \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \quad (2.10)$$

$$DDO_{çıkış} = \frac{(1 + S_{22})}{(1 - S_{22})} \quad (2.11)$$

Daha genel bir ifade ile, çok kapılı hatlar için tanımlı s parametre matrisi Şekil 2.4'teki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \dots & S_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$$

Şekil 2.4. Çok kapılı hatlar için s parametre matrisi

Şekil 2.4'ten yola çıkarak, saçılma matrisi için aşağıdaki ifade genel bir şekilde tanımlanabilir:

$$S_{ij} = \frac{a_i}{b_j} \quad (k \neq j \text{ için } a_k = 0) \quad (2.12)$$

(2.12)'deki S_{ij} değeri, j bağlantı noktasından uygulanan sinyalin i noktasına ne kadar etki ettiğini ifade eden bir değerdir [10]. Bu değer elde edilebilmesi için j bağlantı noktası

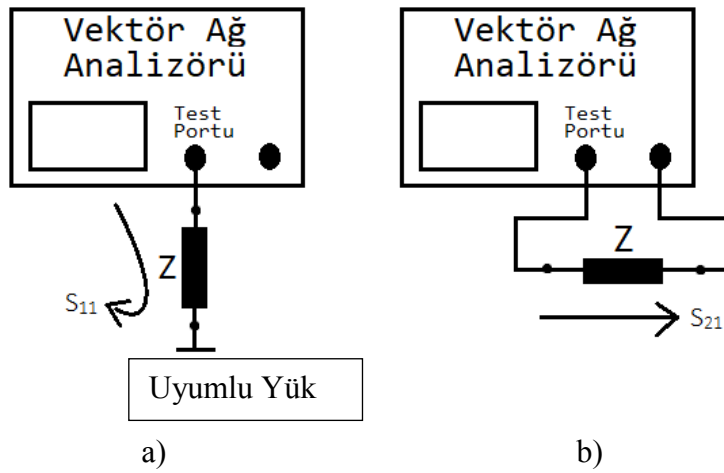
hariç diğer bağlantı noktalarından sinyal uygulanmaması ve sinyal uygulanmayan bağlantı noktalarında yansıma olmaması için eşleşmiş yükler ile sonlandırılmış olması gerekmektedir.

Yukarıda ifade edilen s parametre ölçümleri vektör ağ analizörü ve ağ analizörüne uygun kalibrasyon kiti ve kablolarla birlikte gerçekleştirilebilir.

3. VNA İLE YANSIMA VE İLETİM KATSAYI ÖLÇÜMLERİ

Yansımaya ve iletim katsayılarını pek çok cihaz ve yöntemle ölçmek mümkündür. Bu yöntemlerden olan yönlü bağlayıcı ile, yarıklı hat ile ve spektrum analizör ile olan ölçümler ile yansımaya katsayısını ölçmek mümkündür. İletim katsayısı ölçümü için kullanılan yöntemler arasında ise ölçüm alıcısı kullanılarak ve güç algılayıcıları ile birlikte güç metre kullanımı vardır. Yansımaya ve iletim katsayıları için var olan bu tekniklerden ziyade vektör ağ analizörlerinin kullanımı en çok tercih edilen yöntemdir.

Genel bir ifadeyle, vektör ağ analizörü ile yansımaya katsayısı ölçümü yapmak için, vektör ağ analizörünün test portuna test edilecek malzeme bağlanır ve eğer ölçülecek cihaz iki kapılı ise ikinci kapısı uygun eşleşmiş yük ile sonlandırılır (Şekil 3.1.a). Test portundan gönderilen sinyal, bu malzeme üzerinden yansır ve yansımaya katsayısı (S_{11}) olarak ölçülür. İletim katsayısı (S_{21}) ölçümünde ise, test edilecek malzeme, vektör ağ analizörünün iki test portu arasına kablolar aracılığı ile bağlanır (Şekil 3.1.b) ve ölçümü gerçekleştirilir.



Şekil 3.1. Yansımaya ve iletim katsayısı ölçümlerinin vektör ağ analizörü ile gösterimi

Yansımaya ve iletim katsayıları için kullanılan formüller (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) ve (2.5)'te gösterilmiştir. Bu formüllerden de görüleceği gibi yansımaya ve iletim katsayıları, içlerinde hem genlik hem de faz ifadelerini barındıran karmaşık sayı biçiminde ifade edilirler.

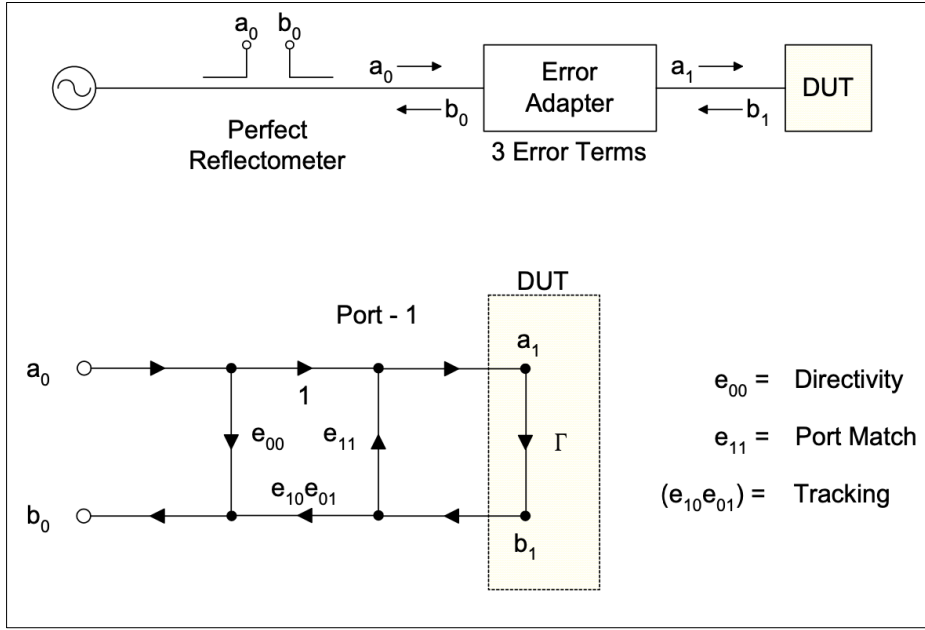
Vektör ađ analizörü ile iletim ve yansıma katsayısı ölçümlerinde vektör ađ analizöründen kaynaklı hatalar mevcuttur. Vektör ađ analizörleri ile hataları arındırılmış yansıma ve iletim katsayısı ölçümleri için, sistematik hata terimlerinin karakterize edilmesi ve cihaza öğretilmesi gerekmektedir. Bunun için de ölçüm öncesinde değeri bilinen kalibrasyon kitleri ile hata terimlerinin öğrenilmesi gereklidir.

3.1. VNA Hata Terimlerinin Öğrenilmesi

3.1.1. VNA'nın kalibrasyon kiti ile kalibrasyonu

Vektör ađ analizörüne ait hata terimlerinin öğrenilmesi, günlük kalibrasyon işlemi ile mümkündür. Bu kalibrasyon işlemi kalibrasyon kitleri ile yapılabilir. Kit ile yapılacak kalibrasyon işlemi sonrasında oluşacak hata terimleri network ađ analizör ile yapılacak ölçümlerin iki kapılı veya tek kapılı olma durumuna göre değışkenlik gösterecektir.

Hata terimlerinin elde edilebilmesi için cihaza bir kapılı devre hata terimi için uygun kalibrasyon işlemi uygulanması gerekmektedir. Yapılacak kalibrasyon sonucu üç tane hata terimi hesaplanabilir. Hesaplanan hata terimleri; yönlendiricilik, kaynak uyumu ve yansıma izidir [11]. Hata terimlerini elde etmek için kurulacak sistem, oluşan devre ve bağlantılar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tek kapılı, 3 hata terimli model

Hata terimleri, 3 bilinmeyenli 3 denklem ile çözülebilen genel denklemlerden türetilmiştir. Denklemlerin elde edilebilmesi için vektör ağ analizörü üzerinde açık devre, kısa devre ve yük ile kalibrasyonun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon sonrası oluşan denklemlerin çözülmesi ile sistematik hata terimleri elde edilir. Test edilen cihazın gerçek S parametreleri ise hata terimlerinin ölçülen s parametrelerden çıkartılması ile elde edilir.

Hata terimleri dikkate alınarak (3.1)'deki gibi ölçülen yansıma katsayısı hesaplanır.

$$\Gamma_M = \frac{b_0}{a_0} = \frac{e_{00} - \Delta_e \Gamma}{1 - e_{11} \Gamma} \quad (3.1)$$

(3.1)'de Γ_M ölçülen yansıma katsayısını Γ ise ölçülmeye çalışılan asıl yansıma katsayısıdır.

(3.1)'den Γ eşitliğin soluna alınarak (3.2) elde edilir.

$$\Gamma = \frac{\Gamma_M - e_{00}}{\Gamma_M e_{11} - \Delta_e} \quad (3.2)$$

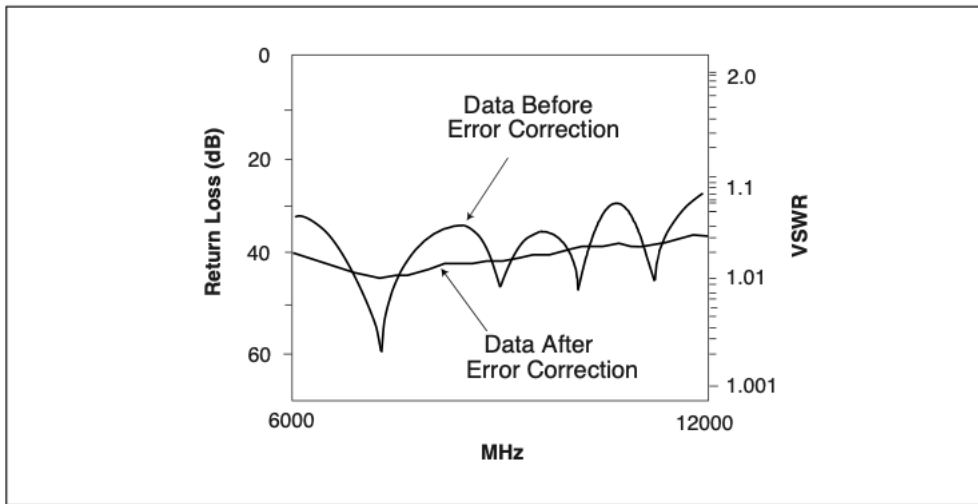
$$\Delta_e = e_{00} e_{11} - (e_{10} e_{01})$$

Açık devre, Kısa Devre ve Uyumlu Yük bağlanarak elde edilen üç bilinmeyenli 3 denklem ise (3.3)'teki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
e_{00} + \Gamma_M \Gamma_{M11} - \Gamma \Delta_e &= \Gamma_M \\
e_{00} + \Gamma_1 \Gamma_{M1} e_{11} - \Gamma_1 \Delta_e &= \Gamma_{M1} \\
e_{00} + \Gamma_2 \Gamma_{M2} e_{11} - \Gamma_2 \Delta_e &= \Gamma_{M2} \\
e_{00} + \Gamma_3 \Gamma_{M3} e_{11} - \Gamma_3 \Delta_e &= \Gamma_{M3}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

(3.3)'teki Γ_{M1} Açık Devre, Γ_{M2} Kısa Devre ve Γ_{M3} Uyumlu Yükten elde edilecek ölçümleri ifade etmektedir.

İki bağlantı noktası olan bir cihazın bir bağlantısına ait yansıma katsayısı ölçümü yapılırken, ikinci bağlantı noktasının uyumlu bir empedans ile sonlandırılması ile ölçümler yapılabilir. Bu koşulun sağlanması durumu kalibrasyon sonucunu verimli hale getirecektir. Eğer iki bağlantı noktalı cihazın ikinci bağlantı noktası ağ analizörünün diğer portuna bağlı şekilde kalibrasyon gerçekleştirilecekse burada cihazın iyi bir şekilde sonlandırılması varsayımı geçerli olmayacaktır. Bu durumda, iki bağlantı noktalı hata düzeltme tekniğinin uygulanması önemli ölçüde daha doğru sonuç verecektir [12].



Şekil 3.3. Tek kapılı kalibrasyon öncesi ve sonrası yansıma ölçümü

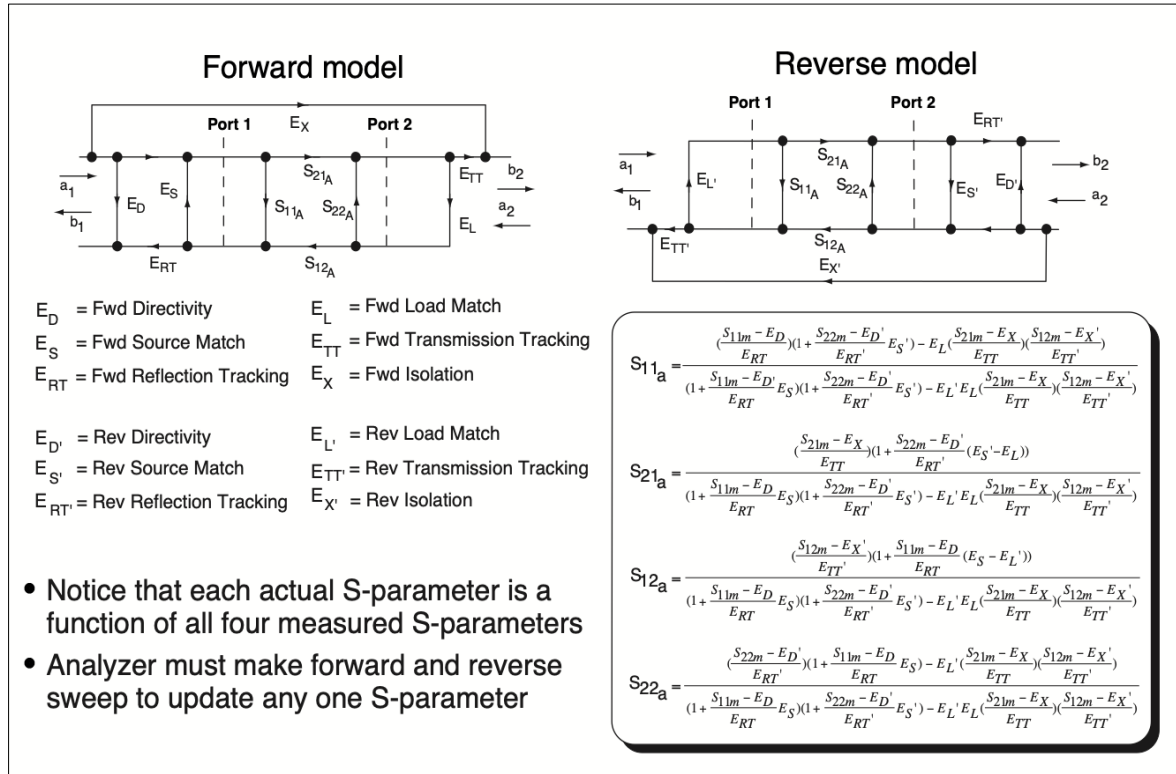
Şekil 3.3'te tek kapılı kalibrasyon öncesi ve sonrası ağ analizörü ile alınan yansıma kaybı ölçüm sonuçları görülmektedir. Kalibrasyon yapılmadan önce sinyal üzerinde, sistematik hataların neden olduğu dalgalanma mevcuttur. Kalibrasyon ardından hata düzeltimi ile

alınan sonuç çok daha pürüzsüzdür ve cihazın gerçek yansıma performansını daha iyi temsil eder.

Kalibrasyon işlemlerinde tercih edilen durum, test edilecek cihaz ile aynı tip konektörlere sahip kalibrasyon kitleridir. Test edilecek cihaz ile kitin arasında bir adaptör kullanılacaksa bu adaptörün etkileri ölçüm belirsizliğinin bir parçası olarak kabul edilmelidir. Kullanılan adaptör, test edilen cihaz için alınan ölçümde istenen sinyale ekleme ya da çıkarma yapacağından ölçümün hatalı sonuç vermesine neden olabilir. Eğer adaptör kullanımından kaçınılamazsa yüksek kaliteli konnektör türleri her zaman en iyi seçim olacaktır.

İki kapılı devrenin hata düzeltimi tüm önemli sistematik hataları içerdiğinden en doğru sonucu verir. 12, 8 ve 16 terimli hata düzeltimi modelleri mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan model 12 terimli hata düzeltim modelidir.

İki kapılı devrede hata modeli, ileri ve geri yönde ölçülen dört adet S parametresi kullanılarak oluşturulur. İleri ve geri yönde oluşan devreler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. İki kapılı hata terimi düzeltimi

Sistem hata terimleri tanımlandıktan sonra, cihaza ait gerçek S parametrelerinin elde edilebilmesi için dört denklem kullanılır. Bu denklemler Şekil 3.4'te kutu içerisinde gösterilmektedir.

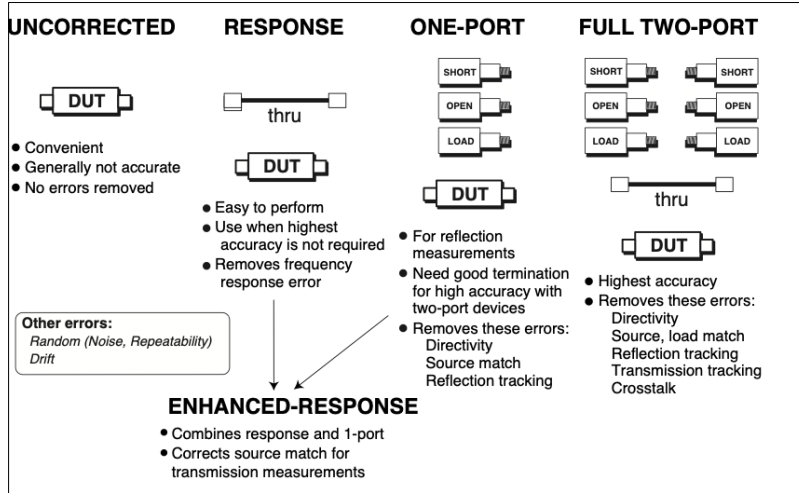
3.2. VNA Hata Terimleri Öğrenme Teknikleri

İki kapılı devrede hata terimlerinin analizi için en çok bilinen ve kullanılan iki tip yöntem vardır. Bunlardan biri, SOLT olarak ifade edilen kısa devre, açık devre, uyumlu yük ve uçtan uca ölçümlerini içeren (SOLT- Short Open Load Thru) yöntemdir. Diğeri ise, TRL olarak ifade edilen, uçtan uca, yansıtılmalı ve hat ölçümlerini içeren (TRL - Thru Reflection Line) olarak tanımlanan yöntemdir.

3.2.1. SOLT yöntemi ile VNA hata terimleri öğrenme

Kısa devre, açık devre, uyumlu yük ve uçtan uca standartları uygulanır. Kalibrasyon kiti aracılığı ile vektör ağ analizörüne uygulaması kolaydır. Kit içerisinde dişi ve erkek adaptörlerde, açık devre, kısa devre ve yük malzemeleri bulunmaktadır. SOLT kalibrasyon modeli ile on iki hata terimi oluşur.

Ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirilebilen “doğrulanmamış, tepki, tek port ve iki port” kalibrasyon standartları mevcuttur. SOLT kalibrasyon baz alınarak gerçekleştirilen kalibrasyonlar düşünüldüğünde bunların özet şeklinde gösterimi ve açıklamaları Şekil 3.5'te belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Ağ analizörü kalibrasyonu ile hata terimleri ve kalibrasyon standartları

SOLT kalibrasyonu esnasında ağ analizörü ile test edilecek cihaz arasında minimum bağlantı yapılması gerekir. Kalibrasyon sonrası, test esnasında kullanılmayacak herhangi bir ara bağlantı SOLT işleminde kullanılırsa bu ölçüm hatasına neden olacaktır.

SOLT kalibrasyon yönteminde bulunan tepki kalibrasyonu hızlıdır ancak frekans aralığı boyunca yol kaybını ortadan kaldırmada başarılı değildir. Bu yöntemde 12 terimli hata modelinde yalnızca ileri ve geri izleme terimleri hesaba katılır.

3.2.2. TRL yöntemi ile VNA hata terimleri öğrenme

SOLT'tan sonra, iki kapılı devrelerin en yaygın hata terimi belirleme yöntemi TRL'dir. Uçtan uca yansıtılmalı hat işlemi ile ölçümler gerçekleştirilir. Üretim süreci kolay ve işlem tanımları SOLT kalibrasyona kıyasla daha basittir.

TRL, dalga kılavuzunu test etme, test fikstürlerini kullanma gibi birincil olarak koaksiyel olmayan ortamlarda kullanılır. TRL, SOLT'tan farklı kalibrasyon standartlarına sahip olsa da SOLT'a benzer ancak 8 terimli hata modelini kullanır. Kullanılan standartlar bir hat (thru), bir yansıtma (reflect) ve bir veya daha fazla gecikme hattı (line) içerir. TRL kalibrasyon algoritması, kalibrasyon için referans olarak iletim hattının karakteristik empedansını kullanır.

4. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ HESAPLAMA İŞLEM ADIMLARI

Ölçüm belirsizliği, yapılan ölçümün ne kadarlık bir ölçüm aralığı içinde belirlenmiş bir güvenlik seviyesinde gerçekli olduğunu gösteren pozitif parametredir. Yapılan ölçme işleminin sunduğu güvenli aralığı belirtmek amacıyla kullanılır. Bu sonuç aynı zamanda ölçümün kalitesinin de bir ifadesidir.

Kalite standartları gereği, laboratuvarların onaylı deney ve kalibrasyon yetkinliğini kazanabilmesi için TS EN ISO/IEC 17025 “Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Şartlar” standardına göre işlem gerçekleştirmesi gerekmektedir [13]. Bu standarda göre, yapılan ölçüm ile ortaya çıkan belirsizlik ifadesi kalite standartlarınca doğrulanmış şekilde beyan edilir. Ölçüm belirsizliği hesaplanırken, ölçüm cihazlarının durumu (teknik özellikler, kalibrasyon verileri vb), ortam şartları, ölçüm yöntem gibi özelliklere dikkat edilmelidir.

Hesaplanmak istenen ölçüm belirsizliği için Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Kılavuzu’na (Guide on Uncertainty of Measurement - GUM) göre takip edilmesi gereken bazı adımlar vardır [14]. Bunlar şu şekildedir:

- Bir model fonksiyon yardımıyla ölçme işleminin tanımlanması
- Model fonksiyondaki her bir bileşenin standart belirsizliğinin hesaplanması
- Bileşik standart belirsizlik hesabının yapılması
- Genişletilmiş belirsizlik hesabının yapılması
- Belirsizlik beyanı

İzlenecek adımlarda öncelikle ölçüm yöntemine göre bir model fonksiyon belirlenmelidir. Ardından, model fonksiyon içerisinde bulunan her bir belirsizlik bileşeni elde edilir. Model fonksiyondan kaynaklı her bir belirsizlik bileşeninin sahip olduğu bir duyarlılık katsayısı vardır. Duyarlılık katsayılarının hesaplanmasıyla beraber belirsizlik bileşenleriyle birleşik belirsizlik hesabı gerçekleştirilir. Son olarak elde edilen birleşik belirsizlikten yola çıkarak istenilen güvenlilik seviyesine göre genişletilmiş belirsizlik tanımlanır ve yapılan ölçüme istinaden normal dağılım biçiminde olacak şekilde bir ölçüm belirsizliği beyan edilir.

4.1. Model Fonksiyonun Yazılması

Model fonksiyon temel olarak, ölçüme girdi sağlayan bileşenler ile sonuç arasındaki ilişkiyi gösteren matematiksel ifadedir. Genel bir ifade ile (4.1)'daki gibi gösterilebilir.

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de göre n adet x bileşeni model fonksiyonunun girdilerini oluştururken, y ifadesi model fonksiyonun çıktısını belirtir. Girdi büyüklüklerinden biri tekrarlanabilir ölçüm sonucunu gösterir.

Model fonksiyona girdi sağlayan x bileşenleri farklı türlerde olabilir. Değer ve belirsizlikleri doğrudan yapılan ölçümlerle elde edilebilen değişkenler çeşitli ölçü aletleri ile tek bir gözlem sonucu da elde edilebilir, tekrarlı ölçümlerle de oluşabilir. Bir diğer girdi büyüklük çeşidi ise, değer ve belirsizliğini dış kaynaklardan alır. Bunlara cihaz üreticilerinin sunduğu el kitaplarından alınan veriler, eski kalibrasyon verileri örnek verilebilir.

4.2. Belirsizlik Bileşenlerinin Elde Edilmesi

Model fonksiyon oluşturulurken ölçüme etki eden tüm bileşenler göz önünde bulundurulmalı ve fonksiyona eklenmelidir. Beyan edilecek ölçüm belirsizliğini, bu bileşenlerin sahip olduğu belirsizlikler belirleyecektir. Bileşenlerin belirsizlikleri, değerlendirilme metotlarına göre A tipi standart belirsizlik ve B tipi standart belirsizlik olarak ikiye ayrılırlar [15].

4.2.1. A tipi standart belirsizlik

Sadece tekrarlanabilir ölçüm sonuçlarına uygulanabilen, istatistiksel yöntemlerle gerçekleştirilen belirsizlik bileşeni hesaplama yöntemine A tipi standart belirsizlik denir. Nedeni tam olarak belli olmayan rastgele hatalardan meydana gelir.

A tipi ölçüm belirsizliği hesabında, normal dağılım ve student dağılımı kullanılabilir.

Eğer tekrarlı ölçüm sayısı 10 adetten fazla ise normal dağılım kullanılır ve aşağıdaki adımlar takip edilir.

Öncelikle n tane alınan ölçüm için ortalama değer hesaplanır. Alınan ölçümler (4.2)'de, ortalama değer in elde edilişı ise (4.3)'te verilmiştir.

$$\text{Alınan } n \text{ adet ölçüm} = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (4.2)$$

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{k=1}^n x_k \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemde $\bar{x}$, alınan n adet ölçümün aritmetik ortalamasını belirtmektedir. Bu değer, model fonksiyon çıktısı y 'nin oluşmasında etkili olan girdi büyüklüklerinden birini oluşturur. Elde edilen ortalama ölçüm yardımıyla ölçüme ait deneysel varyans hesaplanır.

$$V(x) = s^2(x) = \left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.4)$$

(4.4)'de $V(x)$ deneysel varyansı ifade etmektedir ve alınan her bir ölçümün farklılığını belirtir. Bu değişken, alınan her bir x_i ölçümünün ölçüm ortalaması $\bar{x}$ değerinden sapma miktarını karakterize eder. Deneysel varyans, deneysel standart sapma hesabında kullanılır ve denklem (4.5) ile hesaplanır.

$$s(x) = \sqrt{V(x)} \quad (4.5)$$

Denklemde $s(x)$ değişkeni deneysel standart sapma ifadesidir. Hesaplanan deneysel standart sapmanın, ölçüm sayısının kareköküne bölünmesi ile ortalamanın standart sapması, diğer bir ifade ile elde edilmek istenen standart belirsizlik hesaplanır. Bunun için denklem (4.6) kullanılır.

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \left(\frac{s(x)}{\sqrt{n}}\right) \quad (4.6)$$

Denklemleri ile, ulaşılmak istenen standart belirsizlik değeri, $u(\bar{x})$ deneysel standart sapma $s(x)$ aracılığıyla elde edilmiş olur.

Alınan tekrarlı ölçümün sonucunun güvenilir olabilmesi için bu tekrarlı ölçümlerin sayısının yeterince büyük olması gerekir. Eğer alınan her bir ölçüm normal dağılıma sahip değilse Student (t) dağılımı ele alınır [16]. Kullanılan t dağılımında katsayı belirlenirken aşağıda verilen Çizelge 4.1 kullanılır.

Çizelge 4.1. “Student dağılım” t tablosu

Serbestlik Derecesi	Kapsam Aralığı (%)					
V_{eff}	68,27	90	95	95,45	99	99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,8
2	1,32	2,92	4,3	4,53	9,92	19,21
3	1,2	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,6	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,9
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,5	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,2	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,2	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,9	3,51
18	1,03	1,73	2,1	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,7	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,7	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,7	3,2
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,66	1,984	2,025	2,626	3,077
Sonsuz	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

4.2.2. B tipi standart belirsizlik

Tekrarlanabilir ölçümden gelen belirsizliğin dışında kalan, önceden tahmin edilebilen değişiklikleri barındıran belirsizlik hesaplamalarının yöntemidir. Bu ölçüm belirsizliğine, daha önce alınan ölçümler, üretici firmanın sunduğu değerler [16], kalibrasyon ve diğer sertifikalardan gelen veriler gibi doğrudan ölçüm ile bağlantısı olmayan veriler dahil edilmektedir.

Ölçüm belirsizliği beyanı, kalite standartları gereği normal dağılım üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu belirsizliğin hesabı sırasında girdi büyüklüklerinden B tipi ölçüm belirsizliği içeren değişkenlerden bazıları dikdörtgen, üçgen ve u tipi dağılımı barındırabilir. B tipi ölçüm belirsizliğinin barındırdığı normal dağılım dışındaki bu dağılımların normal dağılıma dönüştürülmesi ve o şekilde işleme alınması gerekmektedir. Dönüşüm işlemlerinde kullanılan belirli bir katsayı vardır ve katsayılara normalizasyon faktörü adı verilir. Buna göre, normal dağılıma dönüşüm için denklem (4.7), (4.8) ve (4.9)'daki ifadeler kullanılır.

$$\text{Dikdörtgen dağılımdan dönüşüm} = (\text{değer}/\sqrt{3}) = \text{değer} * 0,577 \quad (4.7)$$

$$\text{Üçgen dağılımdan dönüşüm} = (\text{değer}/\sqrt{6}) = \text{değer} * 0,408 \quad (4.8)$$

$$\text{U tipi dağılımdan dönüşüm} = (\text{değer}/\sqrt{2}) = \text{değer} * 0,707 \quad (4.9)$$

Yukarıdaki denklemlere göre normalizasyon faktörleri şu şekildedir:

- Dikdörtgen dağılım için 0,577
- Üçgen dağılım için 0,408
- U tipi dağılım için 0,707

4.3. Duyarlılık Katsayıları Hesabı

Model fonksiyonda bulunan her bir girdi büyüklüğünün işlem sonucuna etkisi farklıdır. Duyarlılık katsayısı, model fonksiyonu içinde bulunan her bir belirsizlik bileşeninin toplam belirsizliğe katkı oranı olarak ifade edilir.

Belirsizlik bileşenlerinin kendilerine ait bir duyarlılık katsayısı vardır ve bu duyarlılık katsayıları girdi büyüklüklerinin model fonksiyona göre kısmi türevleriyle elde edilir.

Her bir i girdi büyüklüğünün duyarlılık katsayısı c_i ile ifade edilirse, denklem (4.10)'daki hesaplama ile bileşenlerin duyarlılık katsayılarına ulaşılabilir.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (4.10)$$

Eşitlikte f model fonksiyonunu, x_i her bir girdi bileşenini ve c_i x_i 'nin duyarlılık katsayısını ifade eder.

4.4. Birleşik Belirsizlik Hesabı

Model fonksiyon içinde bulunan belirsizlik bileşenlerinin sahip olduğu bütün standart belirsizliklerle kullanımı ile birleşik standart belirsizlik elde edilir. Buna göre birleşik standart belirsizlik, girdi büyüklüklerinin sahip olduğu A tipi veya B tipi belirsizlik sonucu ile bileşenlerin her birinin sahip olduğu duyarlılık katsayılarının tümünü barındırır.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'ya göre f ölçüm için belirlenen model fonksiyonu, x_i her bir belirsizlik bileşenini, c_i bu bileşenlerin her birinin sahip olduğu duyarlılık katsayısını, $u(x_i)$ ise her bir belirsizlik bileşeninin A tipi veya B tipi belirsizlik hesaplama yöntemi ile belirlenmiş standart belirsizlik verisini ifade eder. Ayrıca bu denklem, korelasyon harici belirsizlik bileşenlerinde geçerlidir.

4.5. Genişletilmiş Belirsizlik Hesabı

Birleşik standart belirsizlik hesabında girdi büyüklüklerinin belirsizlikleri normal dağılıma göre hesaplanır. Bu da 1σ , diğer bir deyişle kapsam faktörü 1 değerine eşittir. Çizelge

4.2’de görüldüğü gibi, kapsam faktörü 1, ölçüm belirsizlik değerinin ölçüm sonuçlarının %68.27’sini kapsadığını belirtmektedir.

Kalibrasyon sertifikalarında beyan edilen belirsizlik değeri, kullanım alanına göre 2 veya 3 kapsam faktörünü kullanmaktadır. Bu durumda, hesaplanan bileşik standart belirsizlik değeri kapsam faktörü ile genişletilmesine genişletilmiş belirsizlik denir. Denklem (4.12) genişletilmiş belirsizlik hesaplama yöntemini vermektedir.

$$U(y) = k u_c(y) \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denkleme göre $u_c(y)$, model fonksiyonu oluşturulan ölçümün bileşik standart belirsizlik değerini, k değeri ise kapsam faktörünü ve $U(y)$ genişletilmiş belirsizliği ifade etmektedir.

Kapsam faktörü belirsizlik ifadesinin güvenilirlik seviyesini göstermektedir ve genişletilmek istenilen seviye için Çizelge 4.2’de belirtilen değerlere göre seçilmektedir. (Çizelge 4.2’deki değerler normal dağılım için geçerlidir.)

Çizelge 4.2 Kapsam faktörü tablosu

Güvenilirlik Düzeyi p(%)	Kapsam Faktörü (k_p)
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2,0
99	2,576

Yaygın olarak, kalibrasyon sertifikalarında beyan edilen standart belirsizlik değeri, kapsam faktörü 2’ye göre hesaplanmaktadır. Bu da belirsizlik değerinin, ölçüm sonuçlarının %95,45’ini kapsadığı anlamına gelmektedir [17].

Alınan ölçüm sayısı kapsam faktörünün belirlenmesinde etkilidir. Az sayıda ölçüm almak demek, ölçüm belirsizliğinin değerinin artması anlamına gelmektedir. Bu durumda, kapsam faktörünün belirlenebilmesi için t dağılımı kullanılır. Bu dağılıma göre %95,45 değerine ulaşmak için birleşik standart belirsizliğin sahip olduğu serbestlik derecesi

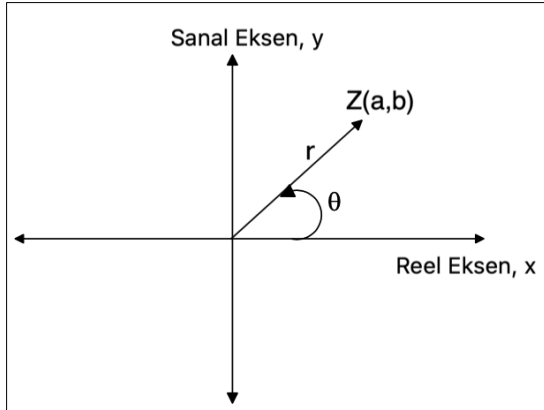
bulunmalı ve bu değerden yola çıkarak Çizelge 4.1'e göre elde edilecek katsayı kullanılmalı.

5. KARMAŞIK SAYILARDA BELİRSİZLİK HESAPLAMALARI

5.1. Karmaşık Sayı Bileşenleri

Karmaşık sayılar, içerisinde bir gerçekte bir de sanal bileşen bulunduran sayılardır. “ $z = a + ib$ ” şeklinde gösterilir. Burada z karmaşık sayısına ait a ve b ifadeleri reel sayılar kümesine aittir ve a karmaşık sayının reel ($\text{Re}(z)$) kısmını oluştururken b sanal ($\text{Im}(z)$) kısmını oluşturur. i ise $\sqrt{-1}$ olarak ifade edilir. Bu sayılar aynı zamanda içlerinde genlik ve faz bilgisi de bulundurmaktadır.

Bir karmaşık sayının “ $z = a + ib$ ” şeklindeki ifadesine cebirsel ifadesi, $Z(a,b)$ şeklinde ifade edilmesine ise kartezyen koordinatları ile gösterilmiş biçimi denir. Kartezyen koordinat sisteminde x eksenini reel eksen, y eksenini sanal eksen olarak gösterilir.



Şekil 5.1. Karmaşık sayıların kartezyen koordinat sisteminde gösterimi

Burada $Z(a,b)$ olarak gösterilen karmaşık sayının genlik ifadesi r ile, faz ifadesi ise θ ile gösterilmiştir.

5.2. Karmaşık Sayı Genlik ve Faz Hesaplamaları

Karmaşık sayılar genlik ve faz bilgisi taşırlar. Bir z karmaşık sayısının reel bileşeni a , sanal bileşeni b olsun. Bu sayının genlik (r) ifadesi (5.1) ile, faz (θ) ifadesi (5.2) ile bulunur.

$$r = |z| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5.1)$$

$$\tan \theta = b/a \quad (5.2)$$

Bir başka açıdan, z karmaşık sayısının a ve b ifadeleri aynı zamanda şu şekilde de ifade edilebilir:

$$a = |z| \cos \theta = r \cos \theta \quad (5.3)$$

$$b = |z| \sin \theta = r \sin \theta \quad (5.4)$$

Ayrıca karmaşık sayılar üstel ve kutupsal form gibi farklı gösterimlerle de ifade edilebilir. Kutupsal form, bir karmaşık sayının grafiksel özelliklerini vurgular. Şekil 5.1’de verilen grafikte $Z(a,b)$ noktası, kutupsal formda “ $r (\cos \theta + i \sin \theta)$ ” ifadesine eşittir. Eşitlik şu şekilde gösterilebilir:

$$r (\cos \theta + i \sin \theta) = r \cos \theta + r \sin \theta i \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)’deki eşitliğin “ $z = a+ib$ ” formuna eşit olduğu, denklem (5.3) ve denklem (5.4) yardımıyla görülebilir.

Bir karmaşık sayının üstel formda gösterilmesi Euler’in e^z üstel fonksiyonunun açılımıyla mümkündür. Herhangi bir θ reel sayısı için $e^{i\theta}$, “ $\cos \theta + i \sin \theta$ ” şeklinde tanımlanır. Sonuç olarak, bir z karmaşık sayısı üstel formda denklem (5.6)’teki tanımlanabilir.

$$z = r e^{i\theta} \quad (5.6)$$

5.3. Karmaşık Sayıların Lineer Genliğinin Belirsizlik Hesaplamaları

Karmaşık sayılar reel-imaginer formattan genlik-faz formatına dönüştürülebildiği gibi sahip oldukları belirsizliklerin bilinmesi yoluyla belirsizlik dönüşümü yapılması da mümkündür.

Frekansa bağlı, bir yansıma katsayısı ölçümünde reel-imaginer biçimde alınan ölçüm sonuçlarının belirsizlikleri ile bilindiğini varsayalım.

Çizelge 5.1. Belirsizlik değerleri ile bilindiği varsayılan reel-imaşiner format veriler

Frekans	Real	$u_{Reel} (k=1)$	Imaşiner	$u_{Imaşiner} (k=1)$
f	re	u_{re}	im	u_{im}

Yukarıdaki çizelgede reel ve imaşiner değerler $k=1$ %68'lik güvenilirlik seviyesinde belirsizlikleri ile bilinmektedir. Çizelge 5.1'de re, U_{re} , im ve U_{im} ifadeleri gerçel sayılardan oluşmaktadır.

Genlik değerinin bulunabilmesi için formül (5.1)'den yola çıkarak aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$|S_{11}| = \sqrt{re^2 + im^2} \quad (5.7)$$

(5.3)'da verilen formüle göre $|S_{11}|$ yansıma katsayısı için f frekansında alınan ölçümün genlik değeridir. Aynı zamanda bu formül, genlik değerinin model fonksiyonu oluşturmaktadır.

Genliğin belirsizliği için formül (4.11)'dan yararlanılır. Burada belirsizliğe etki eden, model fonksiyondaki her bir belirsizlik bileşeninin duyarlılık katsayısı önemli rol oynamaktadır.

$$u_{s11} = \sqrt{C_{Real}^2 u_{Real}^2 + C_{Imaşiner}^2 u_{Imaşiner}^2} \quad (5.8)$$

Denklem (26)'dan yola çıkarak, genel bir ifade ile genliğin belirsizlik değeri denklem (5.8)'de verilmiştir. Her bir reel ve imaşiner değer belirsizliği ile onların duyarlılık katsayılarının kareleri çarpılır ve birbiriyle toplanır. Sonucun karekökü genliğin belirsizliğini vermektedir.

C_{Real} reel bileşenin, $C_{Imaşiner}$ ise imaşiner bileşenin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Duyarlılık katsayılarının bulunabilmesi için her bir belirsizlik bileşenin model fonksiyona göre kısmi türevi alınır. Denklem (4.10) u_{s11} belirsizliği için gereken duyarlılık katsayılarına uyarlanacak olursa;

$$c_{Real} = \frac{\partial |S_{11}|}{\partial Real} \quad (5.9)$$

$$c_{Real} = \frac{1}{2} (re^2 + im^2)^{-1/2} 2 re \quad (5.10)$$

$$c_{Real} = \frac{re}{|S_{11}|} \quad (5.11)$$

Burada denklem (5.9) reel bileşene ait duyarlılık katsayısının hesabına ait formülü vermektedir. Beraberindeki (5.10) ve (5.11) ile, duyarlılık katsayısına genliğin reel bileşene bölümü ile ulaşılabildiği görülür. Benzer işlem imajiner bileşenin duyarlılık katsayısının bulunması için yapılacak olursa;

$$c_{Imajiner} = \frac{\partial |S_{11}|}{\partial Imajiner} \quad (5.12)$$

$$c_{Imajiner} = \frac{1}{2} (re^2 + im^2)^{-1/2} 2 im \quad (5.13)$$

$$c_{Imajiner} = \frac{im}{|S_{11}|} \quad (5.14)$$

(5.12), (5.13) ve (5.14) imajiner bileşenin duyarlılık katsayısı hesabının işlem adımlarını göstermektedir. Buna göre duyarlılık katsayısının genliğin reel bileşene bölümü ile elde edildiği görülür.

Duyarlılık katsayılarının elde edilmesinden sonra genliğin belirsizlik formülü yeniden ele alınacak olursa, (5.8) şu şekilde yeniden yazılabilir;

$$u_{S11} = \sqrt{\left(\frac{re}{|S_{11}|}\right)^2 u_{re}^2 + \left(\frac{im}{|S_{11}|}\right)^2 u_{im}^2} \quad (5.15)$$

Yukarıda verilen formül (5.15) sonuç itibarıyla genliğin belirsizlik değerini ifade etmektedir ve formül içerisindeki her bir bileşen Çizelge 5.1 yardımıyla bilinir bir haldedir.

5.4. Karmaşık Sayıların Logaritmik Genliğinin Belirsizlik Hesaplamaları

Ölçümlerin belirsizlik beyanında logaritmik ölçeğin kullanıldığı durumlar da olmaktadır. Lineer genlik belirsizliğinin bilindiği varsayılarak logaritmik genliğin belirsizliği hesaplanabilir. [18]

Lineer ve logaritmik genlik arasındaki bağlantı şu şekildedir:

$$\text{Mag}_{\log} = 20 \log(\text{Mag}_{\text{lin}}) \quad (5.16)$$

Yukarıdaki denklemde $\text{Mag}_{\log}$ ifadesi logaritmik genliği, Mag_{lin} ifadesi lineer genliği ifade etmektedir. Bu denklem aynı zamanda logaritmik genlik değerinin model fonksiyonudur. Logaritmik genlik tek bir değişkene (lineer genliğe) bağlı olduğundan logaritmik genliğin belirsizlik ifadesinde de tek bir ifadenin belirsizliği ve duyarlılık katsayısı işleme alınacaktır.

$$u_{\text{Mag}_{\log}} = \sqrt{c_{\text{Mag}_{\text{lin}}}^2 u_{\text{Mag}_{\text{lin}}}^2} \quad (5.17)$$

Denklem (5.17)'te $U_{\text{Mag}_{\text{lin}}}$ ifadesinin bilindiği varsayıldığına göre lineer genliğin duyarlılık katsayısı olan $C_{\text{Mag}_{\text{lin}}}$ ifadesinin bulunması gerekmektedir. (4.10)'dan yola çıkarak lineer genliğin duyarlılık katsayısı şu şekilde elde edilir:

$$c_{\text{Mag}_{\text{lin}}} = \frac{\partial(20 \log(\text{Mag}_{\text{lin}}))}{\partial \text{Mag}_{\text{lin}}} \quad (5.18)$$

$$c_{\text{Mag}_{\text{lin}}} = 20 \frac{1}{\text{Mag}_{\text{lin}} \ln(10)} \quad (5.19)$$

$$c_{Maglin} = \frac{8.68588961}{Maglin} \quad (5.20)$$

Denklem (5.20) itibariyle lineer genliğin duyarlılık katsayısına ulaşılabilir. Bu ifade (5.17)'te yerine konulacak olursa:

$$u_{Maglog} = \sqrt{\left[\frac{8.68588961}{Maglin} \right]^2} u_{Maglin}^2 \quad (5.21)$$

Sonuç olarak, lineer genlik ve belirsizliğinin bilinmesi şartıyla logaritmik genliğin belirsizliği (5.21)'de verilen formül ile bulunabilir.

5.5. Karmaşık Sayıların Fazının Belirsizlik Hesaplamaları

Reel-imaginer formattaki bir verinin belirsizlik değerleri biliniyorsa genlik-faz formatındaki faz değerinin belirsizliğinin hesaplanması mümkündür.

Fazın belirsizlik değerinin hesabında Çizelge 5.1 kullanılabilir. Burada frekansa bağlı olarak alınan bir yansıma katsayısı ölçümünde reel ve imaginer sayıların belirsizlik değerleri ile bilindiği varsayılmaktadır.

Faz değerinin bulunabilmesi için formül (29)'dan yola çıkarak aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\tan\theta = \frac{im}{re} \quad (5.22)$$

$$\theta = \arctan(im/re) \quad (5.23)$$

Faz değeri olan θ , (5.22) ve (5.23) yardımı ile bulunabilir. Denklem (5.23)'te verilen denklem aynı zamanda faz değerine ait model fonksiyondur. im ve re değerleri, model fonksiyonunun belirsizlik bileşenlerini oluşturmaktadır.

Fazın belirsizliği için denklem (4.11)'den yararlanılır. Belirsizlik değerleri bilinen reel ve imaginer bileşenlerinin yanı sıra bu bileşenlerin duyarlılık katsayılarının da hesaplanması gerekmektedir.

$$u_{\theta} = \sqrt{c_{Real}^2 u_{Real}^2 + c_{Imajiner}^2 u_{Imajiner}^2} \quad (5.24)$$

Denklem (4.11)'dan yola çıkarak, fazın belirsizlik değerinin genel formülü (5.24)'te verilmiştir. Her bir reel ve imajiner değerin belirsizliği ile onların duyarlılık katsayılarının kareleri çarpılır ve birbiriyle toplanır. Sonucun karekökü genliğin belirsizliğini vermektedir.

c_{Real} reel bileşenin, $c_{Imajiner}$ ise imajiner bileşenin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Duyarlılık katsayılarının bulunabilmesi için her bir belirsizlik bileşenin model fonksiyona göre kısmi türevi alınır. Denklem (4.10) u_{θ} belirsizliği için gereken duyarlılık katsayılarına uyarlanacak olursa;

$$c_{Real} = \frac{\partial \theta}{\partial Real} \quad (5.25)$$

$$c_{Real} = \frac{\partial (im/re) / \partial re}{1 + (im/re)^2} \quad (5.26)$$

$$c_{Real} = \frac{-im/(re^2)}{1 + (im/re)^2} \quad (5.27)$$

$$c_{Real} = \frac{-im}{|S_{11}|^2} \quad (5.28)$$

Burada denklem (4.25) reel bileşene ait duyarlılık katsayısının hesabına ait formülü vermektedir. Beraberindeki (5.26), (5.27) ve (5.28) ile, duyarlılık katsayısına genliğin karesinin imajiner bileşenin negatif değerine bölümü ile ulaşılabildiği görülür. Benzer işlem imajiner bileşenin duyarlılık katsayısının bulunması için yapılacak olursa;

$$c_{Imajiner} = \frac{\partial \theta}{\partial Imajiner} \quad (5.29)$$

$$c_{Imajiner} = \frac{re/(im^2)}{1 + (im)^2} \quad (5.30)$$

$$c_{Imajiner} = \frac{re}{|S_{11}|^2} \quad (5.31)$$

(5.29), (5.30) ve (5.31) imajiner bileşenin duyarlılık katsayısı hesabının işlem adımlarını göstermektedir. Buna göre duyarlılık katsayısının genliğin karesinin reel bileşene bölümü ile elde edildiği görülür.

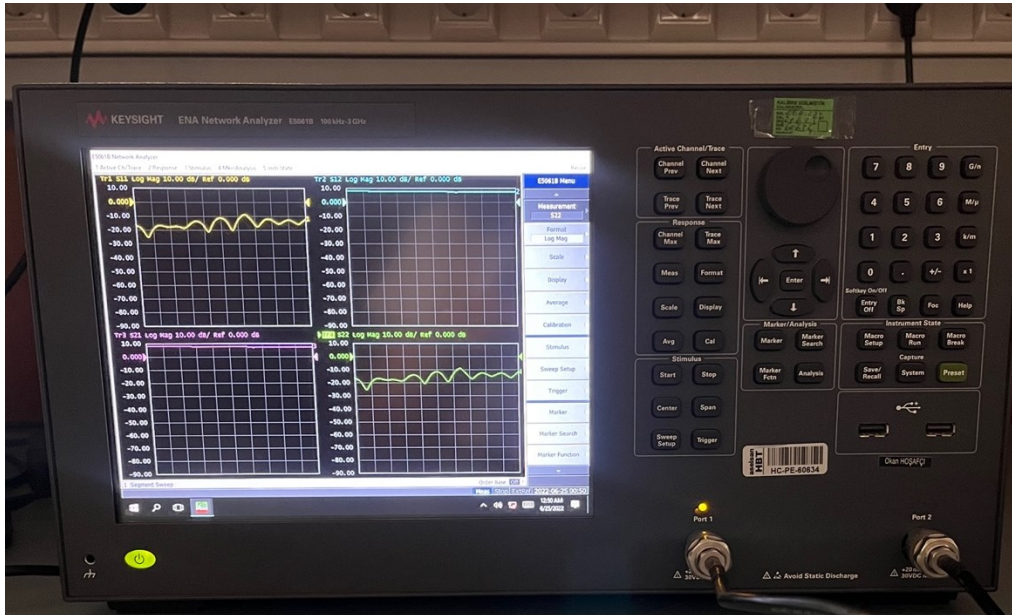
Duyarlılık katsayılarının elde edilmesinden sonra genliğin belirsizlik formülü yeniden ele alınacak olursa, (5.8) şu şekilde yeniden yazılabilir;

$$u_{\theta} = \sqrt{\left(\frac{-im}{|S_{11}|^2}\right)^2 u_{re}^2 + \left(\frac{re}{|S_{11}|^2}\right)^2 u_{im}^2} \quad (5.32)$$

$|S_{11}|$ reel ve imajiner formattaki değerin genlik ifadesidir. Yukarıda verilen denklem (5.32) sonuç itibarıyla genliğin belirsizlik değerini ifade etmektedir ve formül içerisindeki her bir bileşen Çizelge 5.1 yardımıyla bilinir bir haldedir.

6. YANSIMA VE İLETİM KATSAYILARININ VEKTÖREL ÖLÇÜMLERİ

Vektör ağ analizörü kullanılarak yansımaya ve iletim katsayıları ölçümleri, test düzeneği üzerinde deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 30 dB zayıflatıcı kullanılmış ve 1 MHz - 1 GHz frekans aralığındaki yansımaya ve iletim katsayılarının vektör ağ analizörü ile ölçülmüştür. Ölçüm düzeneğinde, 1 adet PASTERNAK 30 dB ortalama güç 50 W zayıflatıcı, 1 adet KEYSIGHT E5061B model ENA ağ analizörü ve 1 adet NATIONAL INSTRUMENT GPIB-USB-HS+ bağlantı kablosu kullanılmıştır. Laboratuvar ölçümünde kullanılan ölçüm cihazının ve zayıflatıcının görseli Şekil 6.1’de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 6.1. Yansımaya ve iletim katsayısı ölçümünde kullanılan VNA (a) ve zayıflatıcı (b)

Yukarıdaki şekilde görüleceği gibi zayıflatıcının bir ucu N tipi erkek, diğer tarafı N tipi dişi olacak şekilde seçilmiştir. Bunun sebebi zayıflatıcının vektör ağ analizörüne doğrudan bağlanabilecek olmasıyla, adaptör kullanımı ile gelecek ölçüm belirsizliklerini ortadan kaldırmaktır. Böylece, zayıflatıcının ölçüm cihazına bağlanacak olan portu (port 1) ile arasında herhangi bir dönüştürücü adaptör ihtiyacı olmaz. Diğer portu (port 2) için ise ölçüm belirsizliğini en aza indirebilmek adına olabilecek en kısa N-N erkek kablo kullanılır. Öte yandan, ölçümlerde kullanılacak bu bağlantı kablosu, vektör ağ analizörünün iki portlu kalibrasyonunda port2 ile beraber kullanılacak, kalibrasyon işlemine yedirilecektir.

Test ve ölçüm cihazlarının doğrulukları zamanla azalmaktadır. Çevresel koşullar, test düzeneğinde kullanılan diğer ekipmanlar, uygulanan farklı ölçümler [19] gibi sebepler bu azalmaya sebep olmaktadır. Bu ölçümde, doğru ölçüm için öncelikle vektör ağ analizörü ile iki port kalibrasyonu yapıldı. Ardından 30 dB zayıflatıcı kullanılarak yansıma ve iletim katsayısı ölçümleri alındı.

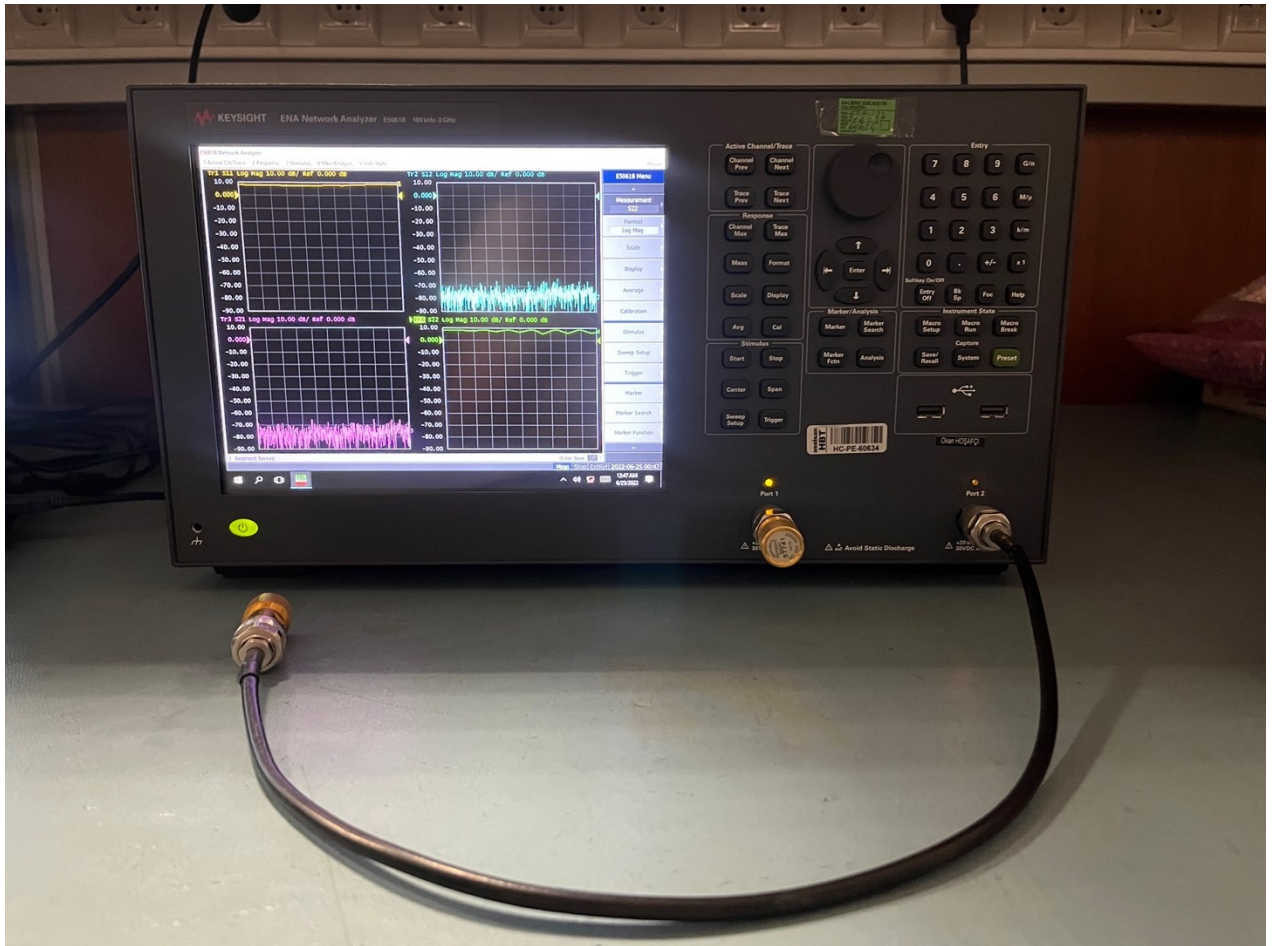
Vektör ağ analizörünün iki portlu kalibrasyonu (hata terimlerinin öğrenilmesi) için Keysight ürünü olan N tipi 85032F kalibrasyon kiti kullanılmıştır. Laboratuvarında kullanılan kalibrasyon kitinin görselleri Şekil 6.2’de sunulmuştur.



Şekil 6.2. Vektör ağ analizörünün iki portlu kalibrasyonu için kullanılan kalibrasyon kiti

Vektör ağ analizörünün kullanılacak her iki portu da N tipi olduğundan kalibrasyon kiti de N tipi seçilmiştir. Cihaza ana ölçüm öncesi kit aracılığıyla SOLT tipi kalibrasyon uygulanmıştır.

Kalibrasyon kontrolü METAS VNA Tools bilgisayar programı aracılığıyla sağlanmıştır. Vektör ağ analizörü ile PC arasındaki bağlantı National Instrument firmasına ait GPIB-USB-HS+ ürünü ile kurulmuştur. Ölçüm cihazının GPIB adresine göre METAS VNA Tools üzerinden aynı adres ile cihaz iletişimi sağlanmış ve kontrol edilmiştir. Port1 üzerinden kısa devre kalibrasyonu yapıldığında ölçüm cihazına yansıyan örnek görüntü Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. VNA port1 üzerinde kısa devre kalibrasyonu görüntüsü

Yukarıdaki kısa devre kalibrasyonunda VNA'nın sağladığı güç değeri 10 dBm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sebeple, sol üst ekranda görünen 10 dBm birinci porttan gönderilen ve geri yansıyan gücü göstermektedir. Ayrıca VNA port 2'de bağlı olan N-N

tipi erkek kablo ölçüm esnasında kullanacağından kalibrasyon işleminde port 2'ye dahil edilmiştir.

Vektör ağ analizörü üzerinde SOLT kalibrasyonu uygulandıktan sonra ölçüm cihazıyla 30 dB zayıflatıcı ile alınacak ana ölçüm için deney düzeneği kurulmuştur. Laboratuvarda kurulan deney düzeneği Şekil 6.4'te sunulmuştur.



Şekil 6.4. VNA ile 30 dB zayıflatıcı ile yansımaya ve iletim katsayısı ölçüm düzeneği

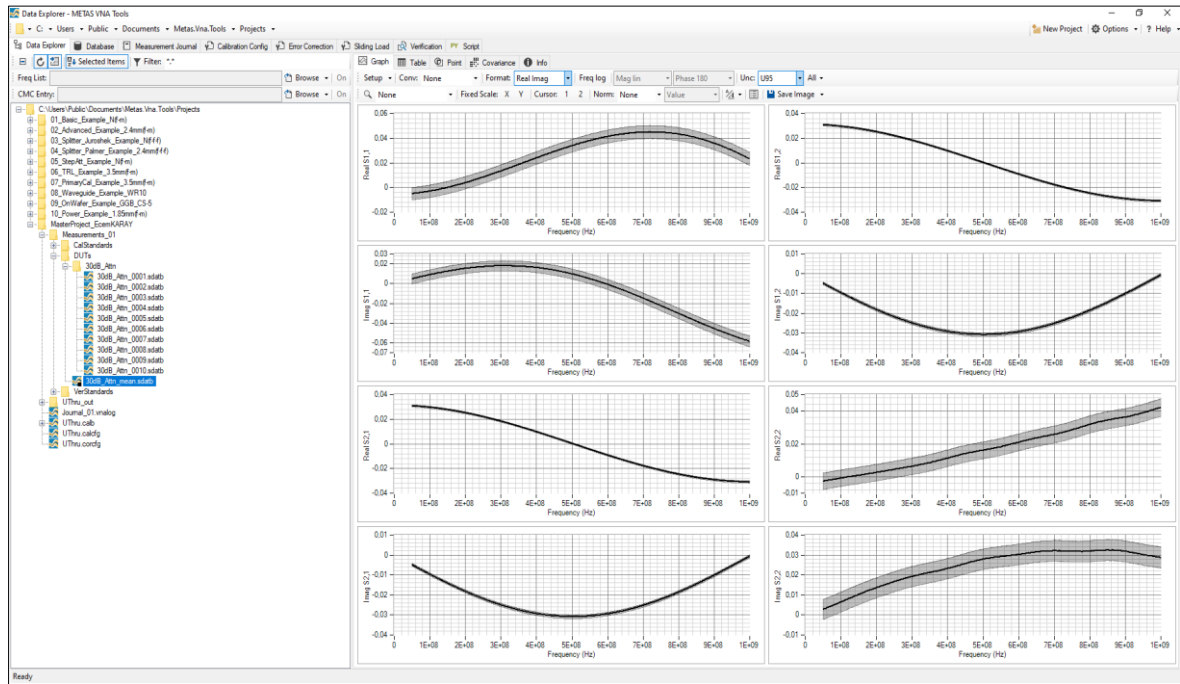
Yukarıdaki görselde de görüleceği gibi 30 dB zayıflatıcı kullanılarak, vektör ağ analizörünün iç güç özelliği 10 dB'de tutularak alınan ölçümde S_{21} ve S_{12} görselleri (sağ üst ve sol alt) beklenen -20 dB etrafındadır.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen iletim ve yansımaya katsayıları ölçümleri METAS VNA Tools üzerinden detaylı olarak alınmış ve incelenmiştir. Bu bilgisayar programı vektör ağ analizörünün kalibrasyon işlemlerini yönetmek için kullanılmasının yanı sıra asıl

fonksiyonu, kalibrasyon işleminden sonra alınan ölçümleri hata doğrulama özelliği ile doğrulaması ve doğrulanmış sonuçlara ait ölçüm belirsizliğini analiz etmesidir. Analiz işlemi program içerisinde, gerçek zamanlı olarak fourier dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilir. Sonuç itibariyle, programa ölçüm cihazının güncel cihaz kalibrasyon bilgileri girilir. SOLT kalibrasyon ile cihaz ölçüme hazır hale gelir. Hata doğrulaması işlemi ile alınan ölçüm, kalibrasyon cihazın verileri ile arka planda yeniden hesaplanır ve kullanıcıya ölçüm belirsizlikleri ile sunulur.

The screenshot displays the METAS VNA Tools software interface. The main window shows a table of measurement data. The table has columns for Frequency (MHz), S11, S12, S21, S22, and various error terms. The data is organized into a grid with multiple columns for each parameter. The interface includes a menu bar at the top with options like File, Edit, View, and a toolbar with icons for various functions. The left sidebar shows a tree view of the project files. The bottom status bar displays the current frequency and other measurement parameters.

Şekil 6.5. METAS VNA Tools üzerinde 30 dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının reel-imaginer formattaki verileri



Şekil 6.6. METAS VNA Tools üzerinde 30 dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının reel-imaginer formatta grafiksel gösterimi

30dB zayıflatıcı için alınan yansıma ve iletim katsayıları ölçümünün METAS VNA Tools programı üzerinde gösterimi Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da verilmiştir. Tüm sonuçların 50 MHz - 93 MHz frekans aralığı örnek gösterimi Şekil 6.5’te sunulmuştur. Aynı görsel, ölçümlerin sayısal verilerini linear formatta ifade ederken, Şekil 6.6 verileri grafiksel ortamda göstermektedir. Burada sonuçlar kendi belirsizlik değerleri ile program tarafından hesaplanmış ve o şekilde verilmiştir. Şekil 6.6’da grafiklere ait koyu gri alan belirsizlik alanını ifade etmektedir. Her iki görselde “unc: U95” olarak görünen fonksiyon, ölçüm belirsizliği kapsam faktörünün 2’ye göre, %95 kapsam aralığında sonuçların temsil edildiği anlamına gelmektedir.

METAS VNA Tools üzerinden aynı ölçümün linear genlik ve faz ve logaritmik genlik ve faz sonuçları da belirsizlikleriyle beraber elde edilmiştir.

[illegible]

Şekil 6.5, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 aynı ölçümün farklı formattaki sonuçlarını ifade etmektedir. Bölüm6’da, Şekil 6.5’teki veriler kullanılarak matematiksel işlemlerle Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’deki verilerin nasıl elde edileceği anlatılacaktır.

7. VEKTÖREL ÖLÇÜMLERİN BELİRSİZLİK HESAPLAMALARI VE KARŞILAŞTIRILMALARI

Ölçüm laboratuvarında 30 dB zayıflatıcı ile vektör ağ analizörü kullanılarak iletim ve yansıma katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler bilgisayar programı aracılığı ile otomatik olarak alınmış veriler Bölüm 5’te sunulmuştur.

Bilgisayar programı aracılığı ile alınan ölçümler arasında reel-imaginer, lineer genlik-faz ve logaritmik genlik-faz formatta veriler mevcuttur. Bunlardan reel-imaginer formattaki örneklenen veriler belirsizlik değerleri ile birlikte kullanılarak matematiksel ifadelerle diğer formattaki verilere dönüştürülmüştür. Alınan ölçümler 50 MHz – 91 MHz aralığındadır ve matematiksel hesaba katılacak veriler 5 MHz aralıklarla örneklenerek değerlendirilmiştir.

Matematiksel hesaplamalar Microsoft Excel programı üzerinde program formül fonksiyonları kullanılarak otomatik olarak hesaplatılacaktır. Kullanılacak formüller ise tez üzerinde belirtilen formüllerdir.

Çizelge 7.1. METAS VNA Tools üzerinden alınan verilerin 5 MHz frekans aralıklarıyla örneklenmesi

	B	C	D	E	F
	30 dB zayıflatıcı VNA TOOLS ÖLÇÜMÜ				
	Frekans (MHz)	Reel	Ureel	Im	Uim
7	50	-0,005052641	0,004977187	0,004663466	0,0049768
8	55	-0,004858725	0,004977398	0,005257079	0,0049776
9	60	-0,004777837	0,004977677	0,005661019	0,0049781
10	65	-0,004535667	0,004977797	0,006090427	0,0049787
11	70	-0,004384701	0,004978022	0,00648366	0,0049793
12	75	-0,004127011	0,004977915	0,006838172	0,0049797
13	80	-0,003858534	0,004978325	0,007284046	0,0049806
14	85	-0,003697241	0,004978814	0,007742416	0,0049815
15	90	-0,003492534	0,004979156	0,008142718	0,0049823

Yukarıdaki Çizelge 7.1, Şekil 6.5’te verilen verilerin belirtilen sayıda örneklenerek Microsoft Excel programı üzerine incelenmek üzere alınmış halidir ve matematiksel

hesaplamalara dahil edilecek verileri ifade etmektedir. Ayrıca, çizelge üzerinde hücrelerin bulundukları satır ve sütunda bulundukları konumlar belirtilmiştir. Bu konum bilgisi excel üzerinde yapılan hesaplamalarda değerlendirmeye alındığından tez içerisinde formüller ifade edilirken dikkate alınacaktır.

7.1. Lineer Genlik ve Belirsizlik Hesabı

Bölüm 4.2’te belirtilen matematiksel ifadeler örneklenen veriler üzerine uygulanmıştır.

Çizelge 7.2. Microsoft Excel üzerinde reel-imaginer formattaki verilerden lineer genlik ve belirsizlik hesabı

	H	I	J	K
	Lineer Genlik			
	S11 Genliği	Reel Duyarlılık Katsayısı	Im Duyarlılık Katsayısı	Lineer Genliğin Belirsizliği
	Genlik	Cre	Cim	US11 (k=1)
8	0,006875834	-0,734840434	0,678240029	0,004977013
9	0,007158498	-0,678735295	0,734383005	0,004977481
10	0,007407757	-0,644977563	0,764201507	0,004977932
11	0,007593785	-0,597286700	0,802027804	0,004978368
12	0,007827097	-0,560195040	0,828360741	0,004978896
13	0,007987041	-0,516713418	0,856158422	0,004979191
14	0,008242913	-0,468103219	0,883673795	0,004980077
15	0,008579895	-0,430919148	0,902390541	0,004981026
16	0,008860116	-0,394186049	0,919030663	0,004981850

Çizelge 7.2, sırasıyla 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 ve 90 MHz frekans değerlerindeki yansıma (S11) katsayısının lineer genlik ve faz bilgisini belirsizlik değerleri ile barındırmaktadır. Bu değerler Çizelge 7.1’deki verilerle belirli formüller kullanılarak hesaplatılmıştır.

Hesaplanan her bir hücrenin matematiksel detayı şu şekildedir:

H8 hücresi reel-imaginer verinin lineer genliğini ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.1) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=KAREKÖK(TOPLA(C8^2; E8^2))” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, H8-H16 arası her bir H_i hücresi için “=KAREKÖK(TOPLA(C_i^2; E_i^2))” formülü kullanılır.

I8 hücresi lineer genlik değerinin belirsizlik hesabında kullanılan reel-imaginer verinin reel bileşeninin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.10) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=(0,5)*((C8^2+E8^2)^(-0,5))*2*C8” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, I8-I16 arası her bir I_i hücresi için “=(0,5)*((C_i^2+E_i^2)^(-0,5))*2*C_i” formülü işletilir.

J8 hücresi lineer genlik değerinin belirsizlik hesabında kullanılan reel-imaginer verinin imajiner bileşeninin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.13) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=(0,5)*((C8^2+E8^2)^(-0,5))*2*E8” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, J8-J16 arası her bir J_i hücresi için “=(0,5)*((C_i^2+E_i^2)^(-0,5))*2*E_i” formülü işletilir.

Son olarak, K8 hücresi lineer genliğin belirsizliğini ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.8) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=KAREKÖK(TOPLA((I8^2*D8^2);(J8^2*F8^2)))” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, K9-K16 arası her bir K_i hücresi için “=KAREKÖK(TOPLA((I_i^2*D_i^2);(J_i^2*F_i^2)))” formülü işletilir.

7.2. Logaritmik Genlik ve Belirsizlik Hesabı

Bölüm 4.3’te belirtilen matematiksel ifadeler örneklenen veriler üzerine uygulanmıştır.

Çizelge 7.3. Microsoft Excel üzerinde reel-imaginer formattaki verilerden logaritmik genlik ve belirsizlik hesabı

	L	M	N
	Logaritmik Genlik		
	S ₁₁ Genliği	Lineer Genlik Duyarlılık Katsayısı	Logaritmik Genliğin Belirsizliği
	Genlik	Cmag_lineer	US11 (k=1)
8	-43,253492060	1263,248845352	6,287206077
9	-42,903562297	1213,367677670	6,039513975
10	-42,606265548	1172,539776523	5,836822841
11	-42,390833643	1143,815530727	5,694334155
12	-42,127985509	1109,720432415	5,525182878
13	-41,952282258	1087,497882107	5,414859912
14	-41,678385932	1053,740333251	5,247707575
15	-41,330360639	1012,353850168	5,042560620
16	-41,051212139	980,335916015	4,883886937

Çizelge 7.3, sırasıyla 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 ve 90 MHz frekans değerlerindeki yansıma (S₁₁) katsayısının logaritmik genlik ve faz bilgisini belirsizlik değerleri ile barındırmaktadır. Bu değerler Çizelge 7.2’deki verilerle belirli formüller kullanılarak hesaplatılmıştır.

Hesaplanan her bir hücrenin matematiksel detayı şu şekildedir:

L8 hücresi reel-imaginer verinin logaritmik genliğini ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.16) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=20*LOG10(H8)” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, L8-L16 arası her bir L_i hücresi için “=20*LOG10(H_i)” formülü kullanılır.

M8 hücresi logaritmik genliğin belirsizlik hesabında kullanılan lineer genlik değerinin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.19) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=20/(H8*LN(10))” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, M8-M16 arası her bir M_i hücresi için “=20/(H_i*LN(10))” formülü kullanılır.

N8 hücresi logaritmik genlik değerinin belirsizliğini ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.17) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=KAREKÖK(M8^2*K8^2)” formülü işletilmiştir.

Benzer şekilde, N8-N16 arası her bir N_i hücresi için “=KAREKÖK($M_i^2 * K_i^2$)” formülü kullanılır.

7.3. Faz ve Belirsizlik Hesabı

Bölüm 4.4’te belirtilen matematiksel ifadeler örneklenen veriler üzerine uygulanmıştır.

Çizelge 7.4. Microsoft Excel üzerinde reel-imaginer formattaki verilerden faz ve belirsizlik hesabı

	O	P	Q	R	S	T
	Genliğin Açısı, Teta					
	Teta	Teta	Reel Duyarlılık Katsayısı	Im Duyarlılık Katsayısı	Teta Belirsizliği, radyan	Teta Belirsizliği, derece
	rad	derece	Cre	Cim	Uteta (k=1) rad	Uteta (k=1) derece
8	2,396227713	137,293734687	-98,641125916	-106,872913213	0,723836953	41,472802435
9	2,316835456	132,744893443	-102,588985008	-94,815327330	0,695323062	39,839076830
10	2,271790249	130,163993215	-103,162335910	-87,067862786	0,671979175	38,501570635
11	2,210910107	126,675817992	-105,616338269	-78,654672348	0,655550982	37,560304548
12	2,165417561	124,069287103	-105,832433781	-71,571238812	0,636049578	36,442956367
13	2,113804056	121,112051139	-107,193449334	-64,693977356	0,623307205	35,712872172
14	2,057939410	117,911242686	-107,204069823	-56,788568929	0,604011800	34,607326923
15	2,016307426	115,525905725	-105,175011004	-50,224292115	0,580347254	33,251448330
16	1,975978347	113,215219687	-103,726711254	-44,489943746	0,562030111	32,201953293

Çizelge 7.4, sırasıyla 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 ve 90 MHz frekans değerlerindeki yansıma (S11) katsayısının faz ve belirsizlik değerleri ile barındırmaktadır. Bu değerler Çizelge 7.2’deki verilerle belirli formüller kullanılarak hesaplatılmıştır.

Hesaplanan her bir hücrenin matematiksel detayı şu şekildedir:

O8 hücresi reel-imaginer verinin fazının radyan cinsinden değerini ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.23) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=ATAN2(C8;E8)” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, O8-O16 arası her bir O_i hücresi için “=ATAN2($C_i;E_i$)” formülü kullanılır.

P8 hücresi reel-imaginer verinin fazının derece cinsinden değerini ifade etmektedir. Hesabında standart radyan-derece dönüşüm denklemi kullanılmıştır ve excel üzerinde “=O8*180/PI()” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, P8-P16 arası her bir P_i hücresi için “=O_i*180/PI()” formülü kullanılır.

Q8 hücresi fazın belirsizliği hesabında kullanılan reel-imaginer verinin reel bileşeninin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.27) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=(-E8/(C8^2))/(1+(E8/C8)^2)” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, Q8-Q16 arası her bir Q_i hücresi için “=(-E_i/(C_i^2))/(1+(E_i/C_i)^2)” formülü kullanılır.

R8 hücresi fazın belirsizliği hesabında kullanılan reel-imaginer verinin imajiner bileşeninin duyarlılık katsayısını ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.30) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=(C8/(E8^2))/(1+(C8/E8)^2)” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, R8-R16 arası her bir R_i hücresi için “=(C_i/(E_i^2))/(1+(C_i/E_i)^2)” formülü kullanılır.

S8 hücresi fazın belirsizliğinin radyan cinsinden değerini ifade etmektedir. Hesabında denklem (5.24) kullanılmıştır ve excel üzerinde “=KAREKÖK(TOPLA((Q8^2*D8^2);(R8^2*F8^2)))” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, S8-S16 arası her bir S_i hücresi için “=KAREKÖK(TOPLA((Q_i^2*D_i^2);(R_i^2*F_i^2)))” formülü kullanılır.

T8 hücresi fazın belirsizliğinin derece cinsinden değerini ifade etmektedir. Hesabında standart radyan-derece dönüşüm denklemi kullanılmıştır ve excel üzerinde “=S8*180/PI()” formülü işletilmiştir. Benzer şekilde, T8-T16 arası her bir T_i hücresi için “=S_i*180/PI()” formülü kullanılır.

7.4. Sonuçların Karşılaştırılması

7.4.1. Lineer genlik ve belirsizlik değerlerinin karşılaştırılması

30 dB zayıflatıcının vektör ağ analizör ile frekansa bağlı ölçülen iletim ve yansım katsayılarının lineer genlik ve belirsizlik değerleri Şekil 6.7’de verilmiştir. Ölçülen reel-

imajiner veriler ile örneklendirilmiş frekans setinde hesaplanan lineer genlik ve belirsizlik değerleri ise Çizelge 7.2’de sunulmuştur.

5 MHz aralıklarla örneklenmiş verilerle yapılan çalışmalara göre ölçülen ve hesaplanan lineer genlik ve belirsizlik değerleri excel üzerinde şu şekilde gösterilebilir:

Çizelge 7.5. Örneklenen frekans sayısınınca ölçülen ve hesaplanan lineer genlik ve belirsizlik değerleri

	V	W	X	Y
	HESAP		VNA TOOLS	
	S ₁₁ Lineer Genlik	US ₁₁	S ₁₁ Lineer Genlik	US ₁₁
8	0,006875834	0,004977013	0,006875834	0,004978483
9	0,007158498	0,004977481	0,007158498	0,004979051
10	0,007407757	0,004977932	0,007407757	0,004979596
11	0,007593785	0,004978368	0,007593785	0,004980021
12	0,007827097	0,004978896	0,007827097	0,004980546
13	0,007987041	0,004979191	0,00797987	0,004980775
14	0,008242913	0,004980077	0,008242913	0,004981533
15	0,008579895	0,004981026	0,008579895	0,004982407
16	0,008860116	0,004981850	0,008866012	0,004983126

Çizelge 7.5’teki değerler herhangi bir formül kullanılmadan doğrudan alınan verilerdir. Her bir ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki fark excel üzerinde hesaplatıldığında şu çizelge çıkmaktadır:

Çizelge 7.6. Örneklenen frekans sayısının ölçülen ve hesaplanan lineer genlik ve belirsizlik değerleri arasındaki fark

	AH	AI
	Lin_Genlik	Ulin_genlik
8	0,000000000	-0,000001470
9	0,000000000	-0,000001570
10	0,000000000	-0,000001664
11	0,000000000	-0,000001653
12	0,000000000	-0,000001650
13	0,000007170	-0,000001584
14	0,000000000	-0,000001456
15	0,000000000	-0,000001381
16	-0,000005896	-0,000001276

Çizelge 7.6’da AH sütunu ölçülen ve hesaplanan lineer genlik değerleri arasındaki farkı, AI sütunu ise ölçülen ve hesaplanan lineer genlik belirsizliği arasındaki farkı ifade etmektedir.

AH8-AH16 arasındaki her bir AH_i hücresi için “ $=V_i-X_i$ ” formülü uygulanmıştır. Benzer şekilde AI8-AI16 arasındaki her bir AI_i hücresi için de “ $=W_i-Y_i$ ” formülü işletilmiştir.

7.4.2. Logaritmik genlik ve belirsizlik değerlerinin karşılaştırılması

30 dB zayıflatıcının vektör ağ analizör ile frekansa bağlı ölçülen iletim ve yansım katsayılarının logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir. (Genlik değerinin lineer ya da logaritmik olması faz değerini değiştirmedikinden her iki şekil de kullanılabilir.) Ölçülen reel-imaginer veriler ile örneklendirilmiş frekans setinde hesaplanan faz ve belirsizlik değerleri ise Çizelge 7.3’te sunulmuştur.

5 MHz aralıklarla örneklenmiş verilerle yapılan çalışmalara göre ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri excel üzerinde şu şekilde gösterilebilir:

Çizelge 7.7. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri

	Z	AA	AB	AC
	HESAP		VNA TOOLS	
	S11 Logaritmik Genlik	US11	S11 Logaritmik Genlik	US11
8	-43,253492060	6,287206077	-43,253492810	6,289062528
9	-42,903562297	6,039513975	-42,903562411	6,041419293
10	-42,606265548	5,836822841	-42,606265724	5,838773640
11	-42,390833643	5,694334155	-42,390833634	5,696224379
12	-42,127985509	5,525182878	-42,127985542	5,527012824
13	-41,952282258	5,414859912	-41,952283495	5,416582317
14	-41,678385932	5,247707575	-41,678386036	5,249241861
15	-41,330360639	5,042560620	-41,330360419	5,043958609
16	-41,051212139	4,883886937	-41,051212350	4,885137370

Çizelge 7.7'deki değerler herhangi bir formül kullanılmadan doğrudan alınan verilerdir. Her bir ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki fark excel üzerinde hesaplatıldığında şu çizelge çıkmaktadır:

Çizelge 7.8. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri arasındaki fark

	AJ	AK
	Log_Genlik	Ulog_genlik
8	0,000000750	-0,001856451
9	0,000000114	-0,001905318
10	0,000000176	-0,001950799
11	-0,000000009	-0,001890224
12	0,000000033	-0,001829946
13	0,000001237	-0,001722405
14	0,000000104	-0,001534286
15	-0,000000220	-0,001397989
16	0,000000211	-0,001250433

Çizelge 7.8'de AJ sütunu ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik değerleri arasındaki farkı, AK sütunu ise ölçülen ve hesaplanan logaritmik genlik belirsizliği arasındaki farkı ifade etmektedir.

AJ8-AJ16 arasındaki her bir AJ_i hücresi için “ $=Z_i-AB_i$ ” formülü uygulanmıştır. Benzer şekilde AK8-AK16 arasındaki her bir AK_i hücresi için de “ $=AA_i-AC_i$ ” formülü işletilmiştir.

7.4.3. Faz ve belirsizlik değerlerinin karşılaştırılması

30 dB zayıflatıcının vektör ağ analizör ile frekansa bağlı ölçülen iletim ve yansım katsayılarının faz ve belirsizlik değerleri Şekil 6.8’te verilmiştir. Ölçülen reel-imaginer veriler ile örneklendirilmiş frekans setinde hesaplanan logaritmik genlik ve belirsizlik değerleri ise Çizelge 7.4’te sunulmuştur.

5 MHz aralıklarla örneklenmiş verilerle yapılan çalışmalara göre ölçülen ve hesaplanan faz ve belirsizlik değerleri excel üzerinde şu şekilde gösterilebilir:

Çizelge 7.9. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan faz ve belirsizlik değerleri

	AD	AE	AF	AG
	HESAP		VNA TOOLS	
	Teta (derece)	Uteta	Teta (derece)	Uteta
8	137,293734687	41,472802435	137,293734	41,4605528
9	132,744893443	39,839076830	132,744896	39,8261751
10	130,163993215	38,501570635	130,163994	38,4886901
11	126,675817992	37,560304548	126,675822	37,5478238
12	124,069287103	36,442956367	124,069291	36,4308677
13	121,112051139	35,712872172	121,112053	35,7015025
14	117,911242686	34,607326923	117,91124	34,5971982
15	115,525905725	33,251448330	115,525908	33,242214
16	113,215219687	32,201953293	113,21522	32,1936945

Çizelge 7.9’deki değerler herhangi bir formül kullanılmadan doğrudan alınan verilerdir. Her bir ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki fark excel üzerinde hesaplatıldığında şu çizelge çıkmaktadır:

Çizelge 7.10. Örneklenen frekans sayısınca ölçülen ve hesaplanan faz ve belirsizlik değerleri arasındaki fark

	AL	AM
	Teta	Uteta
8	0,000000610	0,012249650
9	-0,000002176	0,012901721
10	-0,000000501	0,012880548
11	-0,000004480	0,012480727
12	-0,000003682	0,012088640
13	-0,000002042	0,011369658
14	0,000002544	0,010128740
15	-0,000001791	0,009234357
16	0,000000181	0,008258790

Çizelge 7.10’da AL sütunu ölçülen ve hesaplanan faz değerleri arasındaki farkı, AM sütunu ise ölçülen ve hesaplanan faz belirsizliği arasındaki farkı ifade etmektedir.

AL8-AL16 arasındaki her bir AL_i hücresi için “=AD_i-AF_i” formülü uygulanmıştır. Benzer şekilde AM8-AM16 arasındaki her bir AM_i hücresi için de “=AE-AG_i” formülü işletilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, mikrodalga ölçümlerinde vektörel büyüklüklerin belirsizlik hesaplamalarını üzerine bir çalışmadır. Çalışmada 1 adet 50 W 30 dB değerli PASTERNAK zayıflatıcı KEYSIGHT E5061B model ENA ağ analizörü kullanılarak, NATIONAL INSTRUMENT GPIB-USB-HS+ aracılığı ile bilgisayar kontrollü otomatik olarak yansıma ve iletim katsayısı ölçümü belirsizlik değerleri ile beraber ölçülüp sonuçlar matematiksel hesaplamalarla elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Ölçüm belirsizliğinin hesaplanması ve beyan edilmesi yapılan ölçümün kalitesini belirtmektedir. Ölçüm belirsizlik değeri ne kadar küçük olursa, ölçümün güven aralığı o kadar yüksek olur. Yansıma ve iletim katsayıları vektörel büyüklüklerdir. Bu bağlamda, ölçüm belirsizliği hesaplanırken karmaşık sayıların işlem özellikleri dikkate alınmalıdır.

Ölçüm belirsizliği, ölçüm için oluşturulan test düzeneği ile ortaya çıkan ölçüm denklemini temel alır. Bölüm 4.1, bu denklemin dönüştüğü model fonksiyonu ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak karmaşık sayılarda reel-imaginer formattan lineer genlik, logaritmik genlik ve faz dönüşüm formülleri birer model fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Model fonksiyonların her bir girdisinin kendine ait belirsizlik değeri ve duyarlılık katsayısı vardır. Duyarlılık katsayısı Bölüm 4.3'te belirtildiği gibi her bir girdinin çıktı belirsizliği üzerindeki etki oranını ifade etmektedir. Bölüm 5.3 altında lineer genlik için, Bölüm 5.4 altında logaritmik genlik için, Bölüm 5.5 altında ise faz için model fonksiyonlar oluşturuldu ve her bir girdi büyüklüğüne ait duyarlılık katsayısı yine bu bölümler altında matematiksel olarak incelendi.

Vektörel büyüklüklerin belirsizlik hesabında gerekli tüm matematiksel işlemler denklemler sunularak detaylıca sunuldu ve sayısal ifadelerle kullanılabilecek duruma getirildi.

METAS VNA Tools bilgisayar programı vektörel büyüklüklerin belirsizlik değerlerini otomatik olarak hesaplayabilme özelliğine sahip olması dolayısıyla 30 dB zayıflatıcının yansıma ve iletim katsayıları bu program aracılığı ile alındı. Ölçüm öncesi kullanılan vektör ağ analizörüne SOLT kalibrasyon uygulandı ki bu da ölçümün doğruluğu için gerekli bir adımdır. VNA Tools ile veriler hem grafiksel hem de veri tablosu şeklinde elde

edildi. Buradan elde edilen reel-imaşiner formattaki veriler matematiksel denklemlere girdi sağlamak üzere 5 MHz frekans aralıkları ile örneklendi.

VNA Tools üzerinden elde edilen reel-imaşiner formattaki örneklenmiş veriler Microsoft Excel programına yerleştirildi. Matematiksel denklemler program içerisindeki fonksiyonlar aracılığı ile işlendi. Lineer genlik, logaritmik genlik ve faz ifadelerinin belirsizlik değerleri ile birlikte hesabı excelde gerçekleştirildi.

Bölüm 7.4 sonuçların karşılaştırılması bölümünde, VNA Tools ile otomatik alınan ve matematiksel işlemlerle hesaplanan veriler karşılaştırıldı. Karşılaştırmaya göre, Çizelge 7.6 lineer genlik ve belirsizlik değeri ölçümü için farkı vermektedir. Buna göre, çoğu verinin 10^{-5} hassasiyette doğruluk sağladığı hatta kimi verinin bire bir aynı olduğu görülmektedir. Ölçümler 10^{-9} hassasiyetle alınmıştır. Bazı farkların 0,000000000 çıkmasının sebebi daha yüksek hassasiyetin kullanılmamış olmasıdır. Bu doğrultuda lineer genlik ve belirsizliğinin başarılı bir şekilde hesaplandığı ve ölçüldüğü görülmektedir. Benzer şekilde logaritmik genlik ve belirsizlik için ölçüm ve hesap farkı Çizelge 7.8’de, faz ve belirsizlik için ölçüm ve hesap farkı Çizelge 7.10’te sunulmuştur. Logaritmik genlik ve belirsizlik değeri için farkın 10^{-2} hassasiyetten sonra ortaya çıktığı görülür. Faz ve belirsizlik değeri incelendiğinde, fazın belirsizlik değerinin aralarında en yüksek farka sahip olan değer olduğu görülür. Buna rağmen, her bir fark 1’in altında ve göz ardı edilebilecek büyüklüktedir. Öte yandan, ölçüm öncesi vektör ağ analizörüne yapılan SOLT kalibrasyonunun hassasiyeti, kullanılan kalibrasyon kiti, ölçüm cihazının ısınma süresi ve bunun gibi sebepler ölçüm sonucunu doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Deney esnasında ölçüm, olabilecek en hassas şekilde gerçekleştirildi ve matematiksel işlemlerle elde edilen değerler otomatik olarak alınan verilerle karşılaştırıldığında başarılı bir sonuç elde edildi.

Yapılan bu çalışma, Türkçe kaynakların mikrodalga ölçümlerindeki vektörel büyüklüklerin belirsizlik hesaplamalarındaki sayıca yetersizliği üzerine ele alınmıştır. Hesaplanan verilerin bilgisayar programı aracılığı ile alınan veriler ile karşılaştırılmasıyla çalışmanın doğruluğu vurgulanmış ve Türkçe kaynak yetersizliği noktasında ışık olmuştur. Ayrıca, optik akustik, kuvvet ve düşük frekans empedanslarında yapılacak vektörel ölçümlerin de

benzer şekilde ölçüm belirsizliği hesabına tabii tutulması önerilmektedir. Bu anlamda, yapılan tez çalışması örnek bir çalışmadır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Keysight Technologies Application Note 5965-7707 (2022). Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis. URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06841/application-notes/5965-7707.pdf>, Son Erişim Tarihi: 24.07.2023.
2. Bell, S. (2001). The Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. *Measurement Good Practice Guide No.11*. URL: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg11_uncertainty, Son Erişim Tarihi: 23.07.2023
3. TÜBİTAK UME (2013). *Metroloj Kitabı*, ISBN 978-975-403-731-9, 508.
4. European Committee for Standardization/International Organization for Standardization. (2005). General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. *CEN/ISO*. Brussels.
5. JCGM 100:2008 (2008). *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of the uncertainty in measurement*. (1st ed.). Sevres: Bureau Int. des Poids et Measures, 134.
6. TÜBİTAK UME (2020). *Genel Belirsizlik Eğitimi Dokümanı*.
7. Wollensack, M. (2020). METAS VNA Tools - User Manual V2.4.3, *METAS*. Berne-Wabern. 83.
8. Pozar, D. M. (1998). *Microwave Engineering*. (4. Edition). Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc., 756.
9. Collin, R. E. (2001). *Foundations for Microwave Engineering*. (2. Edition). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 924.
10. Agilent Technologies, (2011). *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3) - Power Measurement Uncertainty per International Guides*. Agilent Technologies, California.
11. İnternet: Agilent Technologies Application Note Agilent AN 1287-3 (2002). Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements URL: https://xdevs.com/doc/HP/pub/an_1287-3.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.06.2023.
12. İnternet: Rytting, D. (1996). Network Analyzer Error Models and Calibration Methods URL: https://www.rfmentor.com/sites/default/files/NA_Error_Models_and_Cal_Methods.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.06.2023.
13. Türk Standardları Uluslararası Standartlar Teşkilatı/Uluslararası Elektroteknik Komisyonu 17025 (2017). Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Şartlar. *TS EN ISO/IEC*. Ankara.

14. JCGM, (2008). *Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement*. BIPM. France. 134.
15. Kirkup, L., Frenkel, R. B. (2006). *An Introduction to Uncertainty in Measurement*. (edition). Cambridge: Cambridge University Press, 27.
16. Sadikhov, E., Kangı, R. ve Uğur, S. (1995). *Ölçüm Belirsizliği*, Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli.
17. TÜBİTAK UME RF ve Mikrodalga Laboratuvarı, (2011). *Genel Mikrodalga Metrolojisi Eğitim Dokümanı*, TÜBİTAK, Kocaeli.
18. Carlo Carobbi F.M. (2010). The Use of Logarithmic Units in the Uncertainty Evaluations of EMC Measurements. IEEE *EMC Newsletter*. 46-50.
19. Cable, M. (2005). *Calibration: A Technician's Guide*. (1. Edition). North Carolina: Instrumentation, Systems, and Automation Society, 273.



Gazili olmak ayrıcalıktır