

VNA İçin Belirsizlik Hesaplama Yöntemlerinin İncelenmesi

Investigation of Uncertainty Calculation Methods for VNA

Erkan Danacı

ID 0000-0001-6358-8807

RF ve Mikrodalga Laboratuvarı
TÜBİTAK UME, Kocaeli Türkiye
erkan.danaci@tubitak.gov.tr

Özet

Yansıma ve iletim katsayısı ölçümlerinin Vektör Ağ Analizörleri (VNA) ölçümleri önemli olduğu kadar ölçümlerin hangi hata bantları içinde olduğunu belirten belirsizlik hesaplamaları da önemlidir. VNA ölçümlerinin belirsizlik hesaplamalarında Ripple ve Rigorous denen iki yöntem kullanılmaktadır. Her iki yöntemin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu çalışmada, Rigorous ve Ripple belirsizlik hesaplama yöntemlerinin nasıl yapıldığı açıklanırken, her bir yöntemin belirsizlik hesaplama bileşenleri de açıklanmıştır. Bunun yanında her iki yöntemdeki metrolojik izlenebilirlik zincirinin nasıl sağlandığına da bu çalışmada yer verilmiştir. Ayrıca iki hesaplama yöntemi ile yapılan iki kapılı pasif bir devre elamanın yansıma ve iletim katsayısı ölçümlerine ait belirsizlik hesaplamalarının karşılaştırılması da bu çalışmada verilmiştir. Bu çalışma, VNA belirsizlik hesaplaması yapacak başta kalibrasyon ve deney laboratuvarları olmak üzere tüm VNA kullanıcılarına rehber olması açısından hazırlanmıştır. Anahtar kelimeler: Vektör Ağ Analizörü, İzlenebilirlik, Ripple Yöntemi, Rigorous Yöntemi, Yansıma Katsayısı, İletim Katsayısı, Belirsizlik Hesaplama.

Abstract

Reflection and transmission coefficient measurements with Vector Network Analyzers (VNA) are important as well as uncertainty calculations that indicate which error bands the measurements are in. Two methods called Ripple and Rigorous are used in uncertainty calculations of VNA measurements. Both methods have advantages and disadvantages compared to each other. In this study, the rigorous and ripple uncertainty calculation methods are explained, and the uncertainty calculation components of each method are described. And, how the metrological traceability chain is provided in both methods is also included in this study. In addition, the comparison of uncertainty calculations of reflection and transmission coefficient measurements of a two-port passive circuit element performed with the two calculation methods is also given in this study. This study has been prepared to be a guide for all VNAs, especially calibration and testing laboratories that will perform VNA uncertainty calculations. Keywords: Vector Network Analyzer, Traceability, Ripple Method, Rigorous Method, Reflection Coefficient, Transmission Coefficient, Uncertainty Calculation.

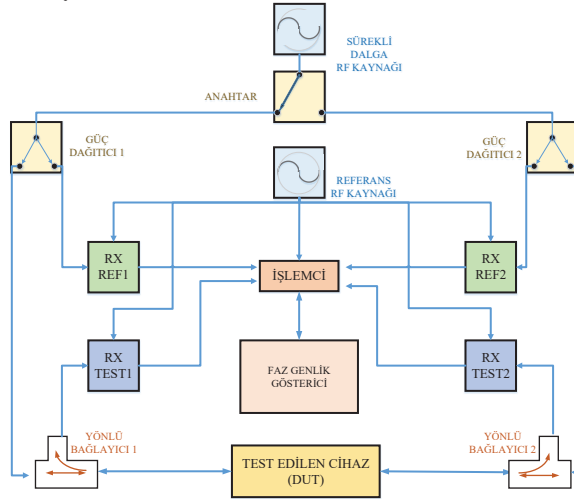
1. Giriş

Yüksek frekanslı elektromanyetik sinyalleri ileten iletim hatlarında konum ve zamana göre değişiklik gösteren elektromanyetik sinyaller var olduğundan elektrik devre teorisinde ana ölçüm büyüklükleri olan elektromanyetik akım ve elektromanyetik gerilim ölçümleri yapılamamaktadır. Yüksek frekanslarda elektro manyetik akım ve gerilim ölçümü yerine elektro manyetik sinyalin gücü ölçülmektedir [1], [2], [3], [4]. Elektro manyetik sinyalin gücü ölçümlerinde ise, elektro manyetik sinyal kaynağından çıkan güç, elektro manyetik sinyalin yüke ulaşmasından sonra yansıyan güç, yükte harcanan güç ve yükte algılanan güç gibi ölçümler yapılmaktadır. Bu güç ölçümlerinde birçok frekansta ardışıl ve tekrarlı olmasını sağlamak için birçok ölçüm cihazı ve birçok yazılımlar geliştirilmiştir. Yüksek frekanslı sistemlerde kullanılan elektriksel devre elemanlarının karakterizasyonun için ise gönderilen gücü, yansıyan gücü ve iletilen gücün ölçümünü kolaylaştıran ağ analizörü (network analyzer- NA) adı verilen ölçüm cihazları geliştirilmiştir [5], [6], [7]. Sadece elektro manyetik sinyallerin güçlerini ölçen ağ analizörlerine skalar ağ analizörü adı verilirken, güç ile birlikte elektro manyetik sinyalin faz değişimlerini ölçebilen cihazlara Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer – VNA) adı verilmektedir.

VNA'ların diğer yüksek frekanslı ölçüm cihaz ve sistemlerine göre kullanımı kolay ve ölçümlerin pratik yapılmasını sağlamasından dolayı, modern haberleşme teknolojilerinin geliştirilmesinde kullanılan elektrik devre bileşenlerini karakterize etmekte kullanılan önemli bir test cihazı olmuştur. VNA'lar, radyo frekansı ve mikrodalga sistemlerinde kullanılan cihazların ve devre elemanlarının karakterizasyonunu sağlamakla birlikte, ürün geliştirmenin çeşitli aşamalarında antenler, yükselteçler, kablolar, zayıflatıcılar, bağlayıcılar ve benzeri birçok aktif veya pasif cihazın performansını ölçmek için kullanılabilirler.

VNA'lar 10 yıl öncesine kadar pasif devre elemanlarının karakterizasyonu için kullanılabilir olduğu bilinmekteydi. Transistor analizlerinde kullanılan giriş çıkış sinyal ölçümleri, yükselteçlerin doğrusal olmayan davranışlarının ölçümleri gibi doğrusal olmayan parametreleri ölçebilen VNA'ların üretilmesi ile RF yükselteç, RF transistor ve entegre devreler gibi aktif devre elemanların ölçümleri VNA ile yapılmaya başlanmıştır. Üreticiler, doğrusal olmayan parametre ölçümünü yapabilen VNA'lara, non-linear VNA veya VNA-X adı vermişlerdir. [8], [9].

VNA'ların önemli bir özelliği de, hem bilinen bir uyarıcı işareti üretmek için kullanılan bir kaynağın çıkışını, hem de test edilen cihazın (Device Under Test - DUT) neden olduğu bu uyaranda meydana gelen değişiklikleri ölçmek için bir dizi algılayıcı içermesidir. Şekil 1'de, bir VNA'nın ölçüm sistematığı verilmiştir.



Şekil 1: İki kapılı dört süper heterodin alıcılı ve dört güç algılayıcılı VNA iç yapısı

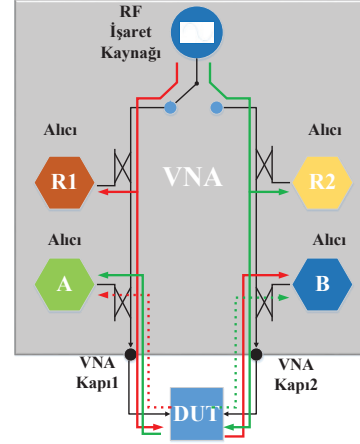
VNA tarafından üretilen işaret DUT'a enjekte edilirken, hem giriş tarafından (Yönlü bağlayıcı 1 tarafı) yansıtılan sinyal, hem de DUT'un çıkış tarafına (Yönlü bağlayıcı 2 tarafı) geçen sinyal VNA tarafından ölçülür. VNA içindeki güç alıcıları Şekil 1'deki RX TEST1, RX TEST2, RX REF1, RX REF2 süper-heterodin alıcı bloklarının içindedir ve kendisine gelen sinyalleri ölçerken bilinen üretilmiş işaretlerle karşılaştırırlar. Ölçülen sonuçlar daha sonra dahili merkezî işlemci tarafından işlenir ve VNA ekranında görüntülenir [10], [11].

VNA iç donanımında, frekansı yükseltmek ve düşürmek için karıştırıcılar, güç algılayıcıları, işaret üreteçleri, güç dağıtıcıları, yönlü bağlayıcılar, ayarlı/sabit zayıflatıcılar, kuvvetlendiriciler ve anahtarlar da bulunmaktadır [10], [12]. Bu cihazların uyumlu bir şekilde bir araya getirilip bir merkezî işlemci birimi tarafından kontrol edilmesiyle, son derece karmaşık fakat kullanışlı bir ölçüm sistemi ortaya çıkmaktadır. VNA'nın ölçümlerini ve çalışma prensibini anlamak amacıyla güç algılayıcı bazında basitleştirilmiş VNA blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

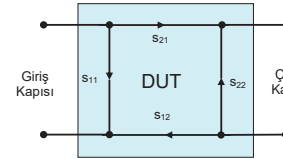
VNA'lar, ölçülmek istenen cihaz veya numunenin karakterizasyonu yaparken, frekans domeninde saçılma parametreleri adı verilen S parametrelerini ölçmektedirler. İki kapılı bir devrenin dört (4) adet S parametresi vardır. Şekil 3'te iki kapılı bir devre elemanının S parametreleri gösterilmiştir.

Şekil 3'te gösterilen S-parametreleri, Şekil 2'de verilen algılayıcılarda ölçülen güçlerle aşağıdaki gibi tanımlanır.

$S_{11} = A/R1$	DUT giriş kapısı (Port1) yansımaya katsayısı
$S_{21} = B/R1$	DUT'nin ileriye doğru (Port1'den Port2'ye) iletim katsayısı
$S_{12} = A/R2$	DUT'nin geriye doğru (Port2'den Port1'e) iletim katsayısı
$S_{22} = B/R2$	DUT'nin çıkış (Port2) yansımaya katsayısı



Şekil 2: Dört güç algılayıcılı VNA'nın blok diyagramı



Şekil 3: İki kapılı bir devrenin S parametreleri

Temelde iki kapılı bir devre için yapılan S parametre ölçümlerinden elde edilen dört ölçümü, yansımaya katsayısı ölçümleri (S_{11} ve S_{22}) ve iletim katsayısı (S_{12} ve S_{21}) olmak üzere iki gruba ayırabiliriz. S-Parametre ölçümlerinde sadece RF güç değerinin kendisi değil, uygulanan ve ölçülen güç değerlerinin faz bilgileri de dikkate alınır. Böylelikle ölçülen S-parametreleri, sadece genlik değil faz bilgisi de içeren vektörel büyüklüklerdir.

VNA'nın iç yapısının karmaşıklığı, ölçümlerde birçok hata ile karşılaşılmasına neden olmaktadır. Her gün çalıştırılan VNA'nın çalışma süresi ve uygulanan güç seviyelerindeki farklılıklara göre, içinde var olan mikrodalga devre elemanlarının davranışları farklılık göstermektedir. Her ne kadar üreticiler bu davranış farklılıklarının en aza indirgenmesi için birçok önlem almış olsalar da (güç algılayıcı sayısı artırılması, performansı artırılmış yeni VNA'ların üretilmesi, vb) ölçüm hatalarının önüne geçememektedirler [8], [9]. VNA ile doğru ve güvenilir bir ölçüm yapabilmek için ölçüm öncesinde bu hataların iyi belirlenmesi gerekmektedir [13], [14].

VNA'lar ile ölçümler öncesinde hata terimlerinin belirlenmesi için SOLT, SOL, QSOLT, TRL, LRL gibi birçok kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir. Hata terimlerini belirlemek amacıyla geliştirilen yöntemlere göre de üreticiler kalibrasyon kitleri de geliştirmişlerdir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan hata terimleri belirleyen kalibrasyon yöntemlerini SOLT (Short, Open, Load, Thru) ve TRL (Thru, Reflect, Line) olarak gösterebiliriz. [14], [15], [16]. Bu çalışmada iki kapılı bir devre elemanının S parametrelerinin ölçümleri öncesinde, SOLT hata terimleri belirleme kalibrasyon yöntemine göre ölçümler ve hata terimi hesaplamaları ele alınmıştır.

Temelde yansımaya ve iletim katsayısı olarak sınıflandırılan iki farklı ölçüm gerçekleştiren VNA'ların belirsizlik hesaplamaları

için de değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar Ripple ve Rigorous yöntemi olarak isimlendirilmiştir [17]. Literatürde bu iki hesaplama yöntemleri için birçok kılavuz doküman üretilmiş olmasına rağmen, bu iki yöntemin model fonksiyonlarının aynı anda kullanıldığı bir Türkçe yayına rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada VNA ile yapılan yansıma ve iletim katsayılarının belirsizlik hesaplamaları için önerilen Ripple ve Rigorous yöntemleri ve hesaplamalarda kullanılan belirsizlik bileşenleri hakkında bilgi verilirken, yöntemlerin karşılaştırmaları da yapılmıştır. Belirsizlik hesaplama yöntemlerinde farklı referans ölçüm cihazları kullanılarak izlenebilirlik zincirleri oluşturduğundan, bu çalışmada her iki belirsizlik hesaplama yönteminin izlenebilirlik zincirleri de açıklanmıştır. Ayrıca iki hesaplama yöntemi ile yapılan iki kapılı pasif bir devre elemanın yansıma ve iletim katsayısı ölçümlerine ait belirsizlik hesaplamalarının karşılaştırılması da bu çalışmada verilmiştir. Bu çalışma, VNA belirsizlik hesaplaması yapacak başta kalibrasyon ve deney laboratuvarları olmak üzere tüm VNA kullanıcılarına Türkçe rehber olması açısından hazırlanmıştır.

2. VNA Ölçümlerinin Belirsizlik Hesaplama Yöntemleri

Ölçüm belirsizliği, yapılan ölçümlerin belirlenen bir duyarlılık aralığında ne kadar güvenilir olduğunu gösteren hesaplama ile elde edilen pozitif bir sayı değeridir. VNA ile yapılan vektörel S-parametre ölçümlerinin belirsizlik hesaplamaları için literatürde tanımlanmış Ripple ve Rigorous adında iki yöntem mevcuttur. 2018 yılına kadar Ripple yöntemi S-parametre ölçümleri için tek kabul edilmiş belirsizlik hesaplama yöntemi idi. Ripple yönteminde, VNA hata terimleri belirlemede kullanılan kalibrasyon kitlerinin güncel verilerinin VNA içine yüklenmemesi gibi VNA’da S-parametre ölçümlerini etkileyen tüm parametrelerin belirsizlik hesaplamalarına katılmaması gibi bazı eksiklikler vardı. Ripple yöntemindeki bu eksiklikleri ve hesaplama problemlerini gidermek amacıyla Rigorous yöntemi geliştirilmiştir. 2018 yılında, S-parametre ölçüm belirsizlik hesaplamaları için kullanılan her iki hesaplama yöntemini içeren rehber doküman İsviçre Ulusal Metroloji Enstitüsü (METAS) tarafından güncellenerek “Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analyzers” (EURAMET Calibration Guide No 12 (CG-12), Ver. 3.0) adıyla yayınlanmıştır. Bu rehber doküman, ulusal metroloji enstitülerinin, kalibrasyon laboratuvarının akreditasyon denetimlerinde ve laboratuvarların öz beyanlarında kabul edilen rehber doküman olmuştur [17]. EURAMET CG-12 numaralı kalibrasyon rehberi, önce Avrupa Bölgesel Metroloji Organizasyonu (EURAMET) üyelerince kabul görmüş, daha sonra Uluslararası Ölçüler ve Ağırlıklar Bürosu (BIPM) Elektrik ve Manyetizma Danışmanlar Komitesi (CC-EM) RF Alt Komitesi (GT-RF) toplantılarında rehber doküman olarak kabul edilerek tüm bölgesel metroloji organizasyonlarında kullanılan rehber doküman hüviyeti kazanmıştır.

Her iki belirsizlik hesaplama yönteminin belirlenen bazı parametrelere göre karşılaştırılması Tablo 1’de verilmiştir. VNA ile iki kapılı bir devre elemanı için gerçekleştirilen her bir frekanstaki S-parametre ölçümlerinden yansıma ve iletim katsayıları karmaşık sayı olarak elde edilmektedir. S-parametrelerinin belirsizlik hesaplamalarında, karmaşık sayı olarak ölçülen yansıma ve iletim katsayısı büyüklüklerinin hem gerçek hem de sanal bileşenlerinin belirsizliklerinin ayrı ayrı

hesaplanması gerekmektedir. EURAMET CG-12 numaralı kalibrasyon rehberine göre, gerçek ve sanal bileşenler için hesaplanan belirsizliklerin en büyüğü her iki bileşene uygulanacağı belirtilmiştir. Bu çalışmada, Ripple ve Rigorous belirsizlik hesaplama yöntemleri, yansıma ve iletim katsayılarının gerçek ve sanal bileşenlerinden elde edilen genlik ve faz değeri için ayrı ayrı ele alınarak açıklanmıştır.

Tablo 1: VNA belirsizlik hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması

Karşılaştırma Parametresi	Ripple Yöntemi	Rigorous Yöntemi
İzlenebilirlik Standartları	Birincil seviye ölçüm sistemleri ile izlenebilirliği sağlanmış her konnektör tipine uygun verifikasyon kitleri	Performans testleri yapılarak izlenebilirliği sağlanmış VNA ve birincil seviye sistemler ile izlenebilirliği sağlanmış konnektör tipine uygun hata terimi belirleme amaçlı kalibrasyon kitleri
Belirsizlik Hesaplama Parametreleri	VNA dalgalanma (Ripple) ölçümlerinden elde edilen parametreler	VNA performans test sonuçlarından ve kalibrasyon kiti sertifikası değerlerinden gelen parametreler
Hesaplama Aracı	Operatöre uygun olarak geliştirilmiş bir yazılımlar veya bir MS Excel makroları	VNA Tools benzeri yazılımlar

2.1. Ripple Yöntemi ile VNA Ölçümlerinin Belirsizlik Hesaplamaları

Ripple yöntemi 1985 yılından beri kabul görmüş, VNA verifikasyonlarına dayalı olarak kullanılmakta olan bir yöntem iken, belirlenen model fonksiyonlarının yüksek frekanslarda iyi sonuçlar vermediği bilinmektedir. Bu yöntemde, verifikasyon kiti adı verilen ölçüm referans standartları, VNA ile birlikte kullanılmaktadır. Verifikasyon kitlerinin içinde birincil seviye ölçüm sistemleri ile karakterize edilmiş değişik elektrik uzunluklara sahip Hesaplanabilir Empedans Standartları (HES ya da Airline) ve sabit zayıflatma değerlerine sahip zayıflatıcı setleri vardır.

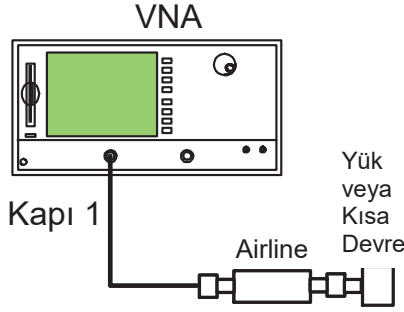
Değişik uzunluklardaki Airline’lar, VNA ile empedans ve yansıma katsayısı ölçümleri için ölçüm referansı olarak kullanılırken, zayıflatıcı setleri ise iletim katsayısı ölçümleri için ölçüm referansı olarak kullanılırlar.

Ripple yönteminde ölçümlere başlamadan önce VNA’nın kullanılacağı konnektör tipine uygun bir kalibrasyon kiti ile hata terimlerinin belirlenmesi gerekir. Ardından yansıma ve iletim katsayısı için belirsizlik hesaplamalarında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için ölçümlere geçilir.

Ripple yönteminde Şekil 4’teki gibi ölçüm düzeneği ile yansıma katsayısı belirsizliklerini belirlemek için ölçümler yapılmaktadır.

VNA ile tek kapılı DUT'nin yansıma katsayısı ölçülmesi durumunda Ripple yöntemine göre yansıma katsayısı belirsizliği Denklem (1)'deki gibi hesaplanır [17].

$$u^2(S_{xxM}) = [\delta D^2 + (\delta T \cdot S_{xxM})^2 + (\delta L \cdot S_{xxM})^2 + (\delta M \cdot S_{xxM}^2)^2 + \delta ResN^2 + \delta Con^2 + \delta Cab^2 + \delta Amb^2] \quad (1)$$



Şekil 4: Yansıma katsayısı belirsizlikleri için Ripple Yöntemi için ölçüm düzeneği

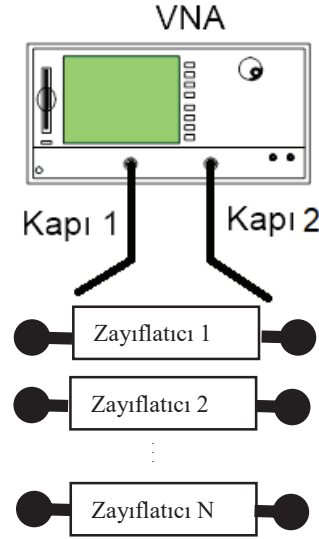
Denklem (1)'deki S_{xxM} DUT'nin ölçülen yansıma katsayısını ifade eder ve XX notasyonu VNA'nın kullanılan birincil portu için 11 ve ikinci portu için 22 olarak alınır. Model fonksiyondaki; δD ölçülen etkin yönlendiriciliğini, δT tahmini frekans izlemesini, δL VNA'nın doğrusal olmamasından kaynaklı etkiler toplamını, δM ölçülen etkin test port uyumsuzluğunu, $\delta ResN$ sistem çözünürlük ve gürültü etkilerini, δCon konnektör tekrarlanabilirliği nedeniyle oluşan etkileri, δCab kablo hareketleri nedeniyle oluşan etkileri ve δAmb çevre şartları nedeniyle oluşan etkileri ifade etmektedir. Ölçüm yapılan her frekans adımı için yansıma katsayısının hem gerçek hem de sanal bileşenlerine ait belirsizlikler denklem (1) kullanılarak hesaplanmalıdır. Her frekanstaki gerçek ve sanal belirsizlik değerlerinden en büyüğü, o frekansta gerçek ve sanal bileşenleri her ikisi için de belirsizlik değeri olarak sertifikalandırılır.

Ripple yönteminde VNA'nın hata terimleri öğrenildikten sonra belirsizlik hesabında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için işlemlere geçilir. Etkin yönlendiricilik (δD) parametresini belirlemek için Şekil 4'deki düzende 50 ohm Yük airline arkasına bağlanır ve frekans VNA ekranındaki dalgalanmaların büyüklüğü dikkate alınarak dalgalanma oranları frekans bölgelerine göre kaydedilir. Tahmini frekans izleme (δT) parametresi ölçülen yansıma katsayısının 1/1000'i olarak hesaba katılır. VNA'nın doğrusal olmamasından kaynaklı etki (δL) parametresi VNA'nın Şekil 5'te verilen ölçümlerinden elde edilir. Etkin test port uyumluluğu (δM) parametresini belirlemek için Şekil 4'teki düzende Yük yerine Kısa Devre elemanı airline arkasına bağlanır ve VNA ekranındaki dalgalanmalar, frekans bölgelerine göre büyük değişim gösterdiği yerlerde ayrıştırılarak dalgalanma oranları not edilerek tespit edilir. VNA sistem çözünürlüğü ve gürültü etkileri ($\delta ResN$) parametresi, VNA'nın bir saatten az bir sıklıkta, bir günden fazla ardaşık yapılan gürültü ölçümleri ile tespit edilir. Konnektör tekrarlanabilirlik etkisi (δCon) parametresi, S parametresi ölçümlerinde konnektörlerin farklı oryantasyonlarda (0° , 120° , 240° gibi) bağlantısı yapılarak yapılan ölçümlerden tespit edilir. VNA kablolarının hareketi ve bükülmelerinden gelen etki (δCab) parametresi VNA

kablolarının değişik açılarda bükülmeleri sağlanarak yapılan S-Parametre ölçümlerinden elde edilir. Ortam şartlarının etkisi (δAmb) parametresi, ölçülen yansıma katsayısının 2/1000 değeri olarak alınır.

$\delta ResN$, δCon , δCab ve δAmb değerlerinin hesaplanamadığı durumlarda, VNA'nın ve kalibrasyon kitinin genel değerlendirmesi yapılarak bunların hepsi yerine 0,0016 gibi sabit bir değer kabul edilebilir.

Şekil 5'teki gibi ölçüm düzeneği ile iletim katsayısı belirsizlikleri için ölçümler yapılmaktadır.



Şekil 5: İletim katsayısı belirsizlikleri için Ripple Yöntemi için ölçüm düzeneği

VNA ile iki kapılı DUT'nin iletim katsayısı ölçülmesi durumunda Ripple yöntemine göre ileriye doğru iletim katsayısı belirsizliği denklem (2) 'deki gibi hesaplanır [17]. Geriye doğru iletim katsayısının belirsizlik hesaplaması için belirsizlik bileşen ve S-parametre notasyonları değiştirilerek hesaplama tekrarlanmalıdır.

$$u^2(S_{21M}) = [\delta I^2 + (\delta L \cdot S_{21M})^2 + (\delta M_1 \cdot S_{11M} \cdot S_{21M})^2 + (\delta M_2 \cdot S_{22M} \cdot S_{21M})^2 + (\delta T \cdot S_{21M})^2 + (\delta Cab1 \cdot S_{21M})^2 + (\delta Cab2 \cdot S_{22M} \cdot S_{21M})^2 + \delta ResN^2 + \delta Con^2 + \delta Amb^2] \quad (2)$$

Denklem (2)'teki S_{xxM} DUT'nin ölçülen birincil ve ikinci portlarının yansıma katsayılarını, S_{xyM} ise DUT'nin ölçülen ileri ve geri yöndeki iletim katsayılarını ifade eder. Model fonksiyondaki; δI izolasyon nedeniyle oluşan etkileri, δL sistemin doğrusal olmaması nedeniyle oluşan etkileri, δM_1 ve δM_2 portların empedans uyumsuzluğunda gelen etkilerini, δT tahmini frekans izlemesini, δCab_1 birinci porttaki kablo hareketliliğinden gelen etkiyi, δCab_2 ikinci porttaki kablo hareketliliğinden gelen etkiyi, $\delta ResN$ sistem çözünürlüğü ve sistem gürültü seviyesi etkilerini, δCon konnektör tekrarlama bilirliliği nedeniyle oluşan etkileri ve δAmb çevre şartları nedeniyle oluşan etkileri ifade etmektedir. Yansıma katsayısının gerçek ve sanal bileşen belirsizliklerinde olduğu gibi, iletim katsayısı belirsizliğinde de, hem gerçek hem de sanal bileşenin belirsizliği hesaplanır ve en büyük belirsizlik hem gerçek hem de sanal bileşene verilerek sertifikalandırılır.

Denklem (2)'deki VNA'nın doğrusal olmamasından kaynaklanan etkileri (δI) belirlemek için Şekil 5'teki düzenekte değişik zayıflatma değerlerine sahip zayıflatıcılar VNA'ya bağlanıp ölçümler alındıktan sonra, ölçümlerin sertifika değeri de dikkate alınarak nominal zayıflatma değerinden kaçıklığına bakılarak belirlenir.

Denklem (2)'deki izolasyon değeri ise, VNA'ya zayıflatıcılar bağlı iken yapılan ölçümlerden Denklem (3) kullanılarak hesaplanır.

$$dA = \pm 20 \cdot \log_{10} \left[1 + 10^{\frac{(I-A)}{20}} \right] \quad (3)$$

Denklem (3)'teki A zayıflatma değerini, I izolasyon değerini ve dA zayıflatıcının belirsizlik değerini ifade etmektedir. Rasgele oluşan durumlar için VNA'nın performansına bağlı olarak ölçülen iletim katsayısının $1/100$ 'ü gibi sabit bir değer hesaba katılabilir.

İletim katsayısı ölçümünde VNA'nın iki kapısı da DUT'a bağlanacağından iki adet empedans uyumsuzluğu ($\delta M_{1/2}$) söz konusu olacaktır. Her kapı için empedans uyumsuzluğu da yine iki kapılı ölçümlerden Denklem (4)'teki gibi hesaplanır.

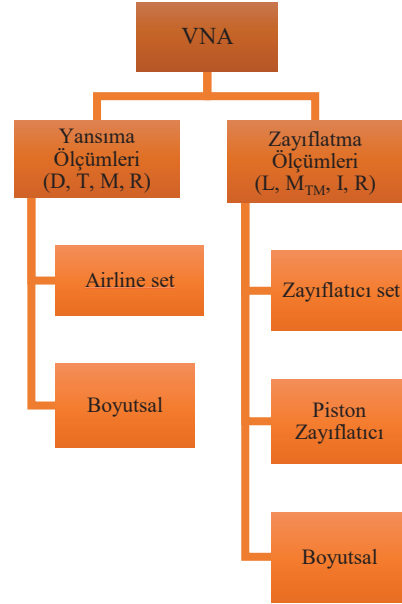
$$M_i = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{I + |M \cdot S_{11}| + |T_y \cdot S_{22}| + |M \cdot T_y \cdot S_{11} \cdot S_{22}|}{I - |M| |T_y|} + \frac{|M \cdot T_y \cdot S_{12} \cdot S_{21}|}{I - |M| |T_y|} \right) \quad (4)$$

Denklem (4)'teki M DUT'ın ilgili kapısının bağlandığı VNA etkin test port uyumluluğunu, T_y VNA'nın diğer kapısının etkin yük uyumluluğunu ve S_{xx} ve S_{xy} ölçülen S parametrelerini ifade eder.

Ripple yöntemindeki hesaplamalarda frekanslara göre değişimler söz konusu olduğundan her frekans bölgesinde ölçümlerden elde edilen parametrelerin değiştiği dikkate alınarak belirsizliği hesaplamak gerekmektedir. Bundan dolayı MS Excel uygulamasında yapılmış bir makro veya kullanıcıya özel bir yazılım ile yapılması önerilmektedir. VNA ile yapılan yansıma ve iletim katsayıları ölçümleri sonucunda vektörel büyüklükler okunduğundan, her frekanstaki hem yansıma hem de iletim katsayısı ölçümlerinin gerçek ve sanal bileşenleri için belirsizlik hesaplamalarının ayrı ayrı yapılması gereklidir. Hesap edilen iki belirsizlikten en büyük olanı hem gerçek hem de sanal bileşen belirsizliği olarak kalibrasyon sertifikalarında verilmelidir.

Ripple yöntemi ile belirsizlik hesaplaması yapan laboratuvarlarda VNA'ların izlenebilirliği en hızlı ve kolay şekilde Verifikasyon Kitleri ile sağlanmaktadır. Bu hesaplama yönteminde VNA'nın izlenebilirliği yansıma ve iletim katsayısı için iki ayrı koldan sağlanır. Yansıma katsayısı izlenebilirliğinde, verifikasyon kitlerinin içindeki yer alan 50 ohm ve 25 ohm empedanslardaki airline'ların birim uzunluktaki iç iletken dış çap, dış iletken iç çap ölçümleri ve yapıldığı malzemenin Dielektrik (permittivity) ve Manyetik Geçirgenlik (permeability) parametreleri kullanılarak birim uzunluklardaki empedans ve S-parametre değerlerinin hesaplaması yapılır. Hesaplama yöntemi ile elde edilen S-parametreleri VNA ile ölçülerek VNA'nın verifikasyonu yapılarak yansıma katsayısı

izlenebilirliği sağlanmış olur. İletim katsayısı izlenebilirliği ise, verifikasyon kitinin içinde yer alan 3 dB ile 20 dB zayıflatma değerlerine sahip zayıflatıcıların, birincil seviye zayıflatma ölçüm sistemlerinde yapılan kalibrasyonları ile sağlanır. Ripple yönteminin dayalı olduğu bu izlenebilirlik zincirlerinin doğru olarak kabul edilebilmesi için, VNA'yı izlenebilirlik zincirine dahil edecek kalibrasyon laboratuvarının elinde VNA'nın her bir konnektör tipi için (N, 3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm gibi) uygun verifikasyon kitinin olması gereklidir. Ripple yöntemine göre izlenebilirlik zinciri Şekil 6'da görselleştirilmiştir.



Şekil 6: Ripple yöntemine göre VNA izlenebilirlik zinciri

2.2. Rigorous Yöntemi ile VNA Ölçümlerinin Belirsizlik Hesaplamaları

Rigorous yöntemi 2018 yılında tanımlanmıştır. Temel prensipte VNA'nın kendisinin performansının yapılması ve günlük hata terimleri belirlemede kullanılan kalibrasyon kitlerinin izlenebilirliğinin birincil seviye ölçüm sistemleri ile sağlanması prensibine dayalıdır.

VNA'ların performansının belirlenmesi işlemlerinde aşağıda sıralanan parametrelerin ölçülmesi ve raporlanması gereklidir. Bu raporlamalar VNA Tools programı kullanılarak kolayca yapılabilir [18].

- S Parametre Gürültü Seviyesi (Noise Floor) (logaritmik)
- S Parametre İz Gürültü Seviyesi (Trace Noise) genlik (logaritmik) ve fazı (°)
- Test Alıcısı Gürültü Seviyesi (Test Receiver Noise Floor)
- Test Alıcısı İz Gürültüsü Seviyesi (Test Receiver Trace Noise) genlik (logaritmik) ve fazı (°)
- Referans Alıcısı Gürültü Seviyesi (Reference Receiver Noise Floor)
- Referans Alıcısı İz Gürültüsü Seviyesi (Reference Receiver Trace Noise) genlik (logaritmik) ve fazı (°)
- Doğrusallık (Linearity)
- Kayma (Drift)

S-parametre Gürültü Seviyesi (Noise Floor), S-parametre İz Gürültü Seviyesi (Trace Noise), Test Alıcısı Gürültü Seviyesi (Test Receiver Noise Floor), Test Alıcısı İz Gürültüsü Seviyesi (Test Receiver Trace Noise), Referans Alıcısı Gürültü Seviyesi (Reference Receiver Noise Floor) ve Referans Alıcısı İz Gürültüsü Seviyesi değerleri VNA Tools yazılımı kullanılarak ölçülebilmektedir. Gürültü değerlerinin ölçülebilmesi için VNA Tools yazılımının kalibrasyonu yapılan VNA ile iletişim kurmuş olması gereklidir. Bilgisayar ve VNA iletişimi GPIB adaptörler veya bilgisayar iletişim portlarından biri kullanılarak yapılabilir. VNA'nın doğrusalılık değeri ise Ripple yöntemindeki gibi; Şekil 4'teki düzenekte değişik zayıflatma değerlerine sahip zayıflatıcılar VNA'ya bağlanıp ölçümler alındıktan sonra, ölçümlerin sertifika değeri de dikkate alınarak nominal zayıflatma değerinden kaçıklığına bakılarak belirlenir. Kayma değeri ise, VNA'nın hata terimleri öğretildikten sonra iki portunun birbirine bağlanarak, Sii ve Sij parametrelerinin 24 saatlik dilim içinde her 15 dk da yapılan ölçümlerin sonundaki değişim değerleri kaydedilerek elde edilir. Kayma değerinin belirlenmesi için otomatik ölçüm sisteminizin olması önerilmektedir.

Rigorous yönteminin hesaplamalarının yapılabilmesi için VNA performansından gelen parametrelerin VNA Tools yazılımına girilmesi gereklidir.

Rigorous yönteminde, izlenebilirliği sağlanmış kalibrasyon kitlerinden ise aşağıdaki sıralanmış parametreler yansıma ve iletim katsayısı ölçümlerine göre belirlenmiş olması ve VNA Tools yazılımına girilmiş olması gereklidir.

- Yansıma Katsayısı için kablo kararlılığından (Cable Stability) gelen belirsizlik bileşeni
- İletim Katsayısı için kablo kararlılığından (Cable Stability) gelen belirsizlik bileşeni
- Kalibrasyon Standartlarından (Open, Short, Load) gelen belirsizlik bileşeni
- Giriş ve Çıkış kapısı konnektör tekrarlanabilirliği belirsizlik bileşeni

VNA Tools yazılımına kalibrasyon kitlerinin sertifika değerlerinin girilmesi ile yukarıda bahsedilen Kalibrasyon kiti parametrelerinin VNA Tools yazılımı tarafından hesaplara dahil edilmesini sağlamaktadır. Operatörün özel bir hesaplama yapmasına ihtiyaç yoktur. Ancak VNA Tools yazılımının veri tabanı özel bir formatta dosya istediğinden, operatörün Kalibrasyon standart olarak Kalibrasyon kiti verilerini istenen formatta VNA Tools'a yüklemesi gereklidir.

VNA ile tek kapılı DUT'nin yansıma katsayısı ölçülmesi durumunda Rigorous yöntemine göre yansıma katsayısı belirsizliği Denklem (5)'teki gibi hesaplanır [17]. Belirsizlik hesaplamasında ölçüm yapılan VNA'nın portuna ait parametreler kullanılmalıdır.

$$u^2(S_{xxM}) = [(\delta STB_{Cab})^2 + (\delta TD_{Cal})^2 + (\delta REP_{Con})^2 + (\delta DVNA)^2 + (\delta LVNA)^2 + (\delta NVNA)^2] \quad (5)$$

Denklem (5)'teki, S_{xxM} DUT'nin ölçülen Yansıma Katsayısını ifade etmektedir. δSTB_{Cab} kablo kararlılığından (Cable Stability) gelen belirsizlik bileşenini, δSTD_{Cal} kalibrasyon Standartlarından (Open, Short, Load) gelen belirsizlik bileşenini, δRep_{Con} konnektör tekrarlanabilirliği belirsizlik

bileşenini, $\delta DVNA$ VNA kaymasından (Drift) gelen belirsizlik bileşenini, $\delta LVNA$ VNA doğrusalılığından (Linearity) gelen belirsizlik bileşenini ve $\delta NVNA$ VNA gürültüsünden (Noise) gelen belirsizlik bileşenlerini ifade etmektedir. Kablo konum kararlılığı, konnektör tekrarlanabilirliği, VNA doğrusalılığı gibi etkiler Ripple yönteminde açıklandığı gibi belirlenebilmektedir. VNA kayması ve gürültü değerlerinin belirlenmesi için VNA Tools yazılımı kullanılabilir.

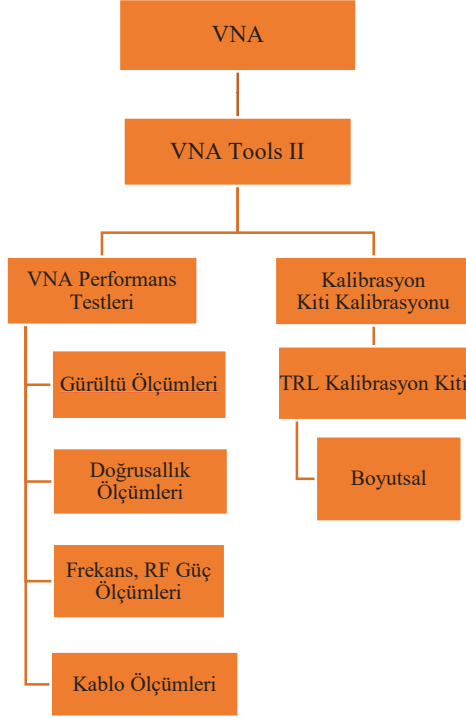
VNA ile iki kapılı DUT'nin iletim katsayısı ölçülmesi durumunda Rigorous yöntemine göre iletim katsayısı belirsizliği Denklem (6)'daki gibi hesaplanır [17].

$$u^2(S_{xyM}) = [(\delta STB_{Cab_{refl}})^2 + (\delta STB_{Cab_{trans}})^2 + (\delta TD_{Cal})^2 + (\delta REP_{Con_{12}})^2 + (\delta DVNA_{P1P2})^2 + (\delta LVNA_{P1P2})^2 + (\delta NVNA)^2] \quad (6)$$

Denklem (6)'daki, S_{xyM} DUT'nin ölçülen İletim Katsayısını ifade eder. $\delta STB_{Cab_{refl}}$ yansıma katsayısı için kablo kararlılığından (Cable Stability) gelen belirsizlik bileşenini, $\delta STD_{Cal_{trans}}$ iletim katsayısı için kalibrasyon Standartlarından (Open, Short, Load) gelen belirsizlik bileşenini, $\delta Rep_{Con_{12}}$ giriş çıkış kapısı konnektör tekrarlanabilirliği belirsizlik bileşenini, $\delta DVNA_{P1P2}$ VNA'nın her iki kapısındaki kaymasından (Drift) gelen belirsizlik bileşenini, $\delta LVNA_{P1P2}$ VNA'nın her iki kapısındaki doğrusalılığından (Linearity) gelen belirsizlik bileşenini ve $\delta NVNA$ VNA gürültüsünden (Noise) gelen belirsizlik bileşenlerini ifade etmektedir. İleri ve geri iletim katsayısı belirsizlik hesaplamalarında hesaplamada kullanılan parametrelerin notasyonları değiştirilerek hesaplamalar yapılmalıdır.

Rigorous yönteminde VNA performans testleri, kablo kararlılık testleri ve izlenebilirlik zincirinde kalibrasyonu yapılmış kalibrasyon kitlerinin sertifika verileri haricinde özel bir ölçüme ihtiyaç yoktur.

Rigorous yöntemi ile belirsizlik hesaplaması yapan laboratuvarlarda VNA'ların izlenebilirliği, VNA'nın performans testinden elde edilen parametreler ve VNA'nın günlük ölçümlerinde hata terimlerini öğretmek amacıyla kullanılan kalibrasyon kitlerinin güncel sertifika verileri üzerinden sağlanmaktadır. VNA performans testlerinde, VNA'nın gürültü ölçümleri, doğrusalılık ölçümleri, frekans kararlılıkları, test portlarının güç değişimleri ve kullanılan kabloların kararlılıkları ve ölçüme etkilerinin yapılması gereklidir. Kalibrasyon kitlerinin ise, birincil seviye ölçüm sistemleri ile karakterize edilmiş TRL kalibrasyon kitlerinin olması veya TRL kalibrasyon kiti ile izlenebilirliği sağlanmış VNA sistemleri ile karakterize edilmiş ve son sertifika verilerinin olması gereklidir. Hem VNA performans test değerlerinin, hem de güncel kalibrasyon kiti değerlerinin VNA Tools yazılımına girilmesi sonunda VNA Tools yazılımı, ölçümlerden sonra standart ve genişletilmiş belirsizlik değerlerini hesaplamakta ve operatöre analiz yapması için fırsat tanımaktadır. Rigorous yöntemine göre izlenebilirlik zinciri Şekil 7'de görselleştirilmiştir.



Şekil 7: Rigorous yöntemine göre VNA izlenebilirlik zinciri

3. Ripple ve Rigorous Yöntemi Belirsizliklerinin Karşılaştırılması

Belirsizlik hesaplama yöntemlerinin karşılaştırması için Tablo 2’de listesi verilen ölçüm cihazları kullanılarak Agilent 8491B model 20 dB sabit zayıflatıcının 10 MHz - 9 GHz frekans aralığındaki ölçümleri kullanılmıştır.

Tablo 2: Deneysel ölçümler için kullanılan ölçüm cihazları listesi

Cihaz Adı	Model	Çalışma Aralığı
VNA	Keysight E5080A	9 kHz- 9 GHz
Kalibrasyon Kiti	Keysight 85054D	DC-18 GHz
Ölçülen Cihaz (Zayıflatıcı)	Agilent 8491B	20 dB, DC-18 GHz

Bu deneysel çalışmada değişik konnektör tipi ve değişik frekanslardaki ölçümlerde karşılaşılabilecek belirsizlik hesaplamalarına değil, sadece belirsizlik hesaplama yöntemlerinden gelen farklılıklar ele alındığında, en uygun frekanslarda kullanılan genel bir zayıflatıcı ele alınmıştır.

Deneysel çalışma için seçilen zayıflatıcı ile tüm s parametreler için (S11, S21, S12, S22) her frekansta en az 10’ar adet ölçüm yapılmıştır. Çalışmada 10’ar ölçümün ortalaması ölçülen değer olarak verilirken, her frekanstaki 10’ar ölçümün standart

sapması tekrarlı ölçümlerden gelen belirsizlik bileşeni olarak belirsizlik hesabına katılmıştır.

Kalibrasyon kiti olarak kullanılan 85054D ile VNA hata terimleri SOLT yöntemine göre belirlenmiştir.

20 dB zayıflatıcının yansıma ve iletim katsayıları ölçüm sonuçları ve hesaplanan belirsizlikler Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmiştir. Deneysel çalışmadaki belirsizlik hesaplamaları Uluslararası ölçüler ve Ağırlıklar Bürosunun (BIPM) yayınladığı GUM dokümanına uygun olarak yapılmıştır [19], [20].

Ripple ve Rigorous yöntemlerindeki belirsizlik değerlerindeki farklılıklar hesaba katılan belirsizlik bileşenlerinin farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Tablo 3’teki |S11| ve |S21| değerleri, sırasıyla giriş yansıma katsayıları ve ileri doğru iletim katsayılarının genlikleri, U|SXY| değerleri hesaplama yöntemlerinin %95 (k=2) güvenilirlik seviyesinde belirsizlik değerleridir. 20 dB zayıflatıcının yansıma ve iletim katsayılarının faz ölçüm sonuçları ve hesaplanan belirsizlikler ise Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 4’teki faz belirsizlik değerleri %95 güvenilirlik seviyesinde verilmiştir.

Yansıma ve iletim katsayısı fazlarının belirsizlikleri Denklem (7)’de verilen model fonksiyon dikkate alınarak hesaplanmaktadır [21]. Fazı elde etmek için kullanılan katsayısının gerçek ve sanal bileşenin belirsizlikleri faz belirsizliğini belirleyen bileşenlerdir ve bunların aynı olduğu düşünüldüğünde, faz belirsizliği hesaplanan fazın +/- salınım yaptığı faz değeri hakkında bilgi vermektedir.

$$Faz(^{\circ}) = \text{Arctg} \left(\frac{\text{Sanal}}{\text{Gerçek}} \right) \left(\frac{180}{3,14} \right) \quad (7)$$

Deneysel çalışmada zayıflatıcının çıkış yansıma katsayısı (S22) ve geriye doğru iletim katsayısı (S12) ölçülmüş olmakla birlikte bu çalışmada veri karmaşıklığı olmaması için verilmemiştir. İleri ve geri sinyal ölçümlerinde simetrik davranışı benzer olan DUT ve VNA’larda S11, S22 ve S12, S21 değerleri arasında büyük bir farklılık görülmesi beklenmemektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan zayıflatıcının 1 GHz frekanstaki her iki belirsizlik hesaplama yöntemi kullanılarak yapılan yansıma ve iletim katsayılarının genlik belirsizlik bileşenleri ve değerleri sırasıyla Tablo 5-8’de verilmiştir. Tablo 9-12’de ise faz belirsizlik bileşenleri verilmiştir. Tablolarda verilen belirsizliklerde, Rigorous yöntemine göre olanların Ripple yöntemine göre kısmen büyük olduğu görülmektedir.

Belirsizlik hesaplamaları içeren tablolardaki veriler, hesaplama araçlarındaki yuvarlamalardan dolayı farklılıklar içermektedir.

Tablo 3. Ripple ve Rigorous yöntemlerine göre giriş yansıması genlik ölçüm sonuçları ve hesaplanan belirsizlik değerleri

Frekans (GHz)	S ₁₁	U S ₁₁ (Ripple)	U S ₁₁ (Rigorous)	S ₂₁	U S ₂₁ (Ripple)	U S ₂₁ (Rigorous)
0,01	0,0050	0,0040	0,0104	0,10431	0,00042	0,00293
0,02	0,0050	0,0040	0,0104	0,10427	0,00042	0,00293
0,03	0,0050	0,0040	0,0104	0,10428	0,00042	0,00294
0,04	0,0050	0,0040	0,0103	0,10426	0,00005	0,00295
0,05	0,0050	0,0040	0,0104	0,10428	0,00042	0,00296
0,1	0,0060	0,0040	0,0104	0,10422	0,00010	0,00297
0,2	0,0060	0,0040	0,0104	0,10415	0,00017	0,00296
0,3	0,0060	0,0040	0,0104	0,10405	0,00041	0,00295
0,4	0,0060	0,0040	0,0105	0,10403	0,00041	0,00293
0,5	0,0060	0,0040	0,0104	0,10397	0,00031	0,00294
0,6	0,0060	0,0040	0,0105	0,10389	0,00034	0,00291
0,7	0,0060	0,0040	0,0106	0,10388	0,00031	0,00292
0,8	0,0050	0,0040	0,0105	0,10379	0,00027	0,00290
0,9	0,0050	0,0040	0,0106	0,10376	0,00022	0,00291
1	0,0050	0,0040	0,0106	0,10374	0,00041	0,00291
2	0,0080	0,0040	0,0104	0,10329	0,00027	0,00288
3	0,0140	0,0040	0,0162	0,10275	0,00033	0,00289
4	0,0200	0,0040	0,0162	0,10229	0,00038	0,00286
5	0,0230	0,0040	0,0160	0,10166	0,00018	0,00308
6	0,0250	0,0040	0,0163	0,10120	0,00041	0,00286
7	0,0290	0,0040	0,0160	0,10044	0,00041	0,00290
8	0,0320	0,0040	0,0163	0,09908	0,00026	0,00283
9	0,0290	0,0040	0,0202	0,09668	0,00034	0,00287

Tablo 4: Ripple ve Rigorous yöntemlerine göre giriş yansıma katsayısı fazı ölçüm sonuçları ve hesaplanan belirsizlik değerleri

Frekans (GHz)	Faz(S ₁₁) (°)	U(Faz(S ₁₁)) (Ripple) (°)	U(Faz(S ₁₁)) (Rigorous) (°)	Faz(S ₂₁) (°)	U(Faz(S ₂₁)) (Ripple) (°)	U(Faz(S ₂₁)) (Rigorous) (°)
0,01	0	42	110	-0,768	0,231	1,043
0,02	-1	42	110	-1,540	0,231	1,043
0,03	-2	42	109	-2,300	0,231	1,056
0,04	-3	42	109	-3,053	0,027	1,070
0,05	-4	42	108	-3,824	0,230	1,078
0,1	-8	41	105	-7,607	0,056	1,088
0,2	-16	39	101	-15,132	0,094	1,102
0,3	-24	39	103	-22,655	0,226	1,111
0,4	-34	40	104	-30,188	0,226	1,115
0,5	-43	40	104	-37,679	0,169	1,136
0,6	-52	41	107	-45,214	0,187	1,133
0,7	-63	41	109	-52,720	0,169	1,157
0,8	-74	42	111	-60,217	0,148	1,163
0,9	-85	43	114	-67,753	0,122	1,184
1	-97	43	114	-75,231	0,227	1,209
2	145	29	75	29,711	0,148	1,362
3	62	16	65	-45,352	0,187	1,549
4	-13	11	46	59,592	0,213	1,709
5	-88	10	41	-15,556	0,100	2,003
6	-170	9	37	88,977	0,234	2,067
7	112	8	32	13,345	0,234	2,268
8	40	7	29	-62,459	0,149	2,418
9	-28	8	40	42,864	0,202	2,633

Tablo 5: Ripple yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz'deki giriş yansıma katsayısı genliği birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz
Etkin yönlendiriciliği	Normal	$2,00.10^{-3}$
Tahmini frekans izleme	Dikdörtgen	$-3,82.10^{-7}$
Tahmini doğrusal olmamaktan kaynaklı etkiler toplamını	Normal	$4,13.10^{-6}$
Ölçülen etkin test port uyumsuzluğunu	U	$3,29.10^{-6}$
Sistem çözünürlük ve gürültü etkileri	Dikdörtgen	$1,99.10^{-5}$
Konnektör tekrarlanabilirliği	Normal	$4,25.10^{-6}$
Kablo hareketleri nedeniyle oluşan etkileri	Normal	$-2,65.10^{-6}$
Çevre şartları	Dikdörtgen	$-7,65.10^{-7}$
Birleşik Belirsizlik (k=1)		0,0020
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		0,0040

Tablo 6: Rigorous yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz'deki giriş yansıma katsayısı genliği birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz
Kablo kararlılığı	Dikdörtgen	0,001421
Kalibrasyon standartları	Normal	0,005047
Konnektör tekrarlanabilirliği	Dikdörtgen	0,000448
VNA kayması	Dikdörtgen	0,000365
VNA doğrusallığı	Dikdörtgen	0,000544
VNA gürültüsü	Dikdörtgen	0,000026
Birleşik Belirsizlik (k=1)		0,005303
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		0,010606

Tablo 7: Ripple yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz'deki ileri doğru iletim katsayısı genliği birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz
Konnektör tekrarlanabilirliği	Normal	$3,59.10^{-7}$
Sistem çözünürlük etkileri	Dikdörtgen	$1,02.10^{-6}$
Tahmini doğrusal olmamaktan kaynaklı etkiler toplamını	Normal	$1,96.10^{-4}$
İzolasyon	Normal	$-3,46.10^{-6}$
Sistem gürültüsü	Normal	$-4,62.10^{-6}$
Test port uyumsuzluğunu	U	$-1,86.10^{-6}$
Kablo hareketleri nedeniyle oluşan etkileri	Normal	$-5,77.10^{-5}$
Çevre şartları	Dikdörtgen	$-1,39.10^{-5}$
Birleşik Belirsizlik (k=1)		0,000205
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		0,00041

Tablo 8: Rigorous yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz'deki ileri doğru iletim katsayısı genliği birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz
Kablo kararlılığı	Dikdörtgen	0,001434
Kalibrasyon standartları	Normal	0,000045
Konnektör tekrarlanabilirliği	Dikdörtgen	0,000004
VNA kayması	Dikdörtgen	0,000238
VNA doğrusallığı	Dikdörtgen	0,000086
VNA gürültüsü	Dikdörtgen	0,000003
Birleşik Belirsizlik (k=1)		0,001457
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		0,002914

Tablo 9: Ripple yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz'deki giriş yansıma katsayısı fazı birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz (°)
Yansıma katsayısı gerçek bileşen belirsizliği	Normal	0,000205
Yansıma katsayısı sanal bileşen belirsizliği	Normal	0,000205
Yansıma katsayısı genlik belirsizliği	Normal	0,000205
Birleşik Belirsizlik (k=1)		21,4389
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		42,8779

Tablo 10: Rigorous yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz’deki giriş yansıma katsayısı fazı birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz (°)
Kablo kararlılığı	Dikdörtgen	15,2066
Kalibrasyon standartları	Normal	54,0782
Konnektör tekrarlına bilirliliği	Dikdörtgen	4,8033
VNA kayması	Dikdörtgen	3,9153
VNA doğrusallığı	Dikdörtgen	5,5602
VNA gürültüsü	Dikdörtgen	0,2143
Birleşik Belirsizlik (k=1)		56,7896
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		113,5792

Tablo 11: Ripple yöntemlerine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz’deki ileri doğru iletim katsayısı fazı birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz (°)
Yansıma katsayısı gerçek bileşen belirsizliği	Normal	0,0020
Yansıma katsayısı sanal bileşen belirsizliği	Normal	0,0020
Yansıma katsayısı genlik belirsizliği	Normal	0,0020
Birleşik Belirsizlik (k=1)		0,1133
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		0,2266

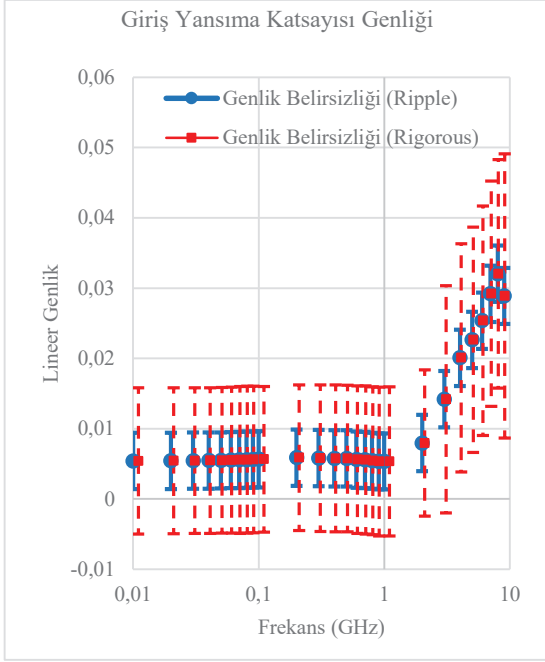
Tablo 12: Rigorous yöntemine göre 20 dB zayıflatıcının 1 GHz’deki ileri doğru iletim katsayısı fazı birleşik belirsizlik değeri parametreleri ve değerleri

Belirsizlik Bileşeninin Adı	Dağılımı	Değeri @ 1GHz (°)
Kablo kararlılığı	Dikdörtgen	0,5875
Kalibrasyon standartları	Normal	0,0250
Konnektör tekrarlına bilirliliği	Dikdörtgen	0,0025
VNA kayması	Dikdörtgen	0,1315
VNA doğrusallığı	Dikdörtgen	0,0436
VNA gürültüsü	Dikdörtgen	0,0009
Birleşik Belirsizlik (k=1)		0,6041
Genişletilmiş Belirsizlik (k=2)		1,2082

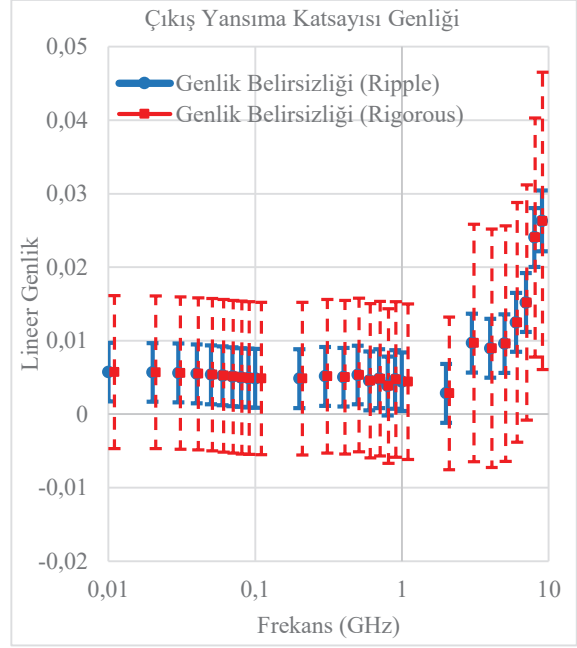
Ripple ve Rigorous yöntemlerine göre hesaplanmış giriş kapısı yansıma katsayısı ve ileri doğru iletim katsayısı genlik belirsizlikleri ve ölçüm sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9’da grafik olarak verilmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9’da her frekansta ölçülen büyüklüklerin hesaplanan belirsizlik değerleri ilgili büyüklük üzerinde dikey çubuklarla gösterilmiştir. Rigorous yöntemi belirsizliği kırmızı renkle kesikli çizgilerle, Ripple yöntemi belirsizliği mavi renkle düz çizgilerle verilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11’de ise deneysel ölçümde kullanılan zayıflatıcının çıkış yansıma katsayısı ve geriye doğru iletim katsayısı değerleri ve belirsizlikleri verilmiştir. Tüm S parametre ölçüm değerleri birbiri ile uyumlu iken, Ripple belirsizliğinin Rigorous belirsizliğinden küçük olduğu görülmektedir. Rigorous yönteminde Ripple göre hesaba katılmayan parametrelerin eklenmesi ile belirsizlik büyümektedir.

Ripple ve Rigorous yöntemlerine göre hesaplanmış giriş kapısı yansıma katsayısı fazı ve ileri doğru iletim katsayısı fazı belirsizlikleri ile birlikte sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13’te grafik olarak verilmiştir. Şekil 14 ve Şekil 15’te ise sırasıyla deneysel ölçümde kullanılan zayıflatıcının çıkış yansıma katsayısı fazı ve geriye doğru iletim katsayısı fazı belirsizlikleri ile birlikte verilmiştir. Ripple ve Rigorous yöntemlerinde ölçülen faz değerleri arasında konnektör bağlamalarına bağlı olarak 180 ° farklılıklar olabilmektedir. Bunlar çoğunlukla ölçüm anında VNA’ların fazlarının kaymasından kaynaklanmaktadır. Faz belirsizlikleri çok küçük olduğundan şekillerde görülmeye bilmektedirler. VNA ile yapılan faz ölçümlerinde kaymaların en aza indirgenmesi için üreticiler VNA’ların harici olarak 10 MHz sinyal ile tetiklenmesini tavsiye etmektedirler. 10 MHz referans sinyalin kararlılığı ölçümlerdeki faz kararlılığını etkilemektedir. Bu deneysel çalışmada harici 10 MHz sinyal uygulaması yapılmamıştır. Harici referans sinyal ile tetikleminin ölçümlere etkisi araştırmacılara gelecek çalışmalar için önerilebilir.

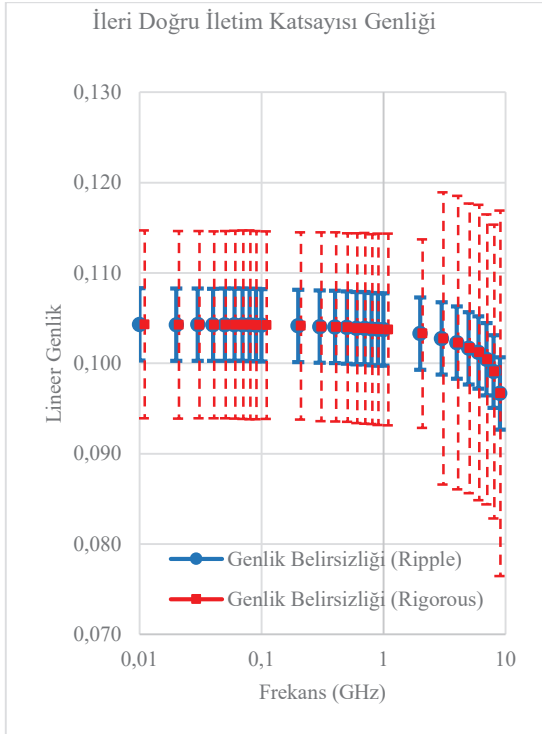
Üreticiler zayıflatıcıları üretirken, mümkün derecede iletim katsayısı fazlarında değişime neden olmayacak şekilde üretmektedirler. Zayıflatıcının sadece sinyali düşürmesi, sinyalin fazını etkilememesi istenen bir durumdur. Bu çalışmada da, ölçümü yapılan zayıflatıcının ileri ve geri iletim katsayısı faz değerlerinin çok küçük olduğu görülmüştür. Aynı faz küçüklüğü değerinin giriş ve çıkış kapılarındaki yansıma katsayısı fazları için söylemek mümkün değildir. Konnektör sıkarken belirli değerlerdeki torkların kullanımı yansıma katsayısı faz değerlerinin değişimine de sebep olmaktadır.



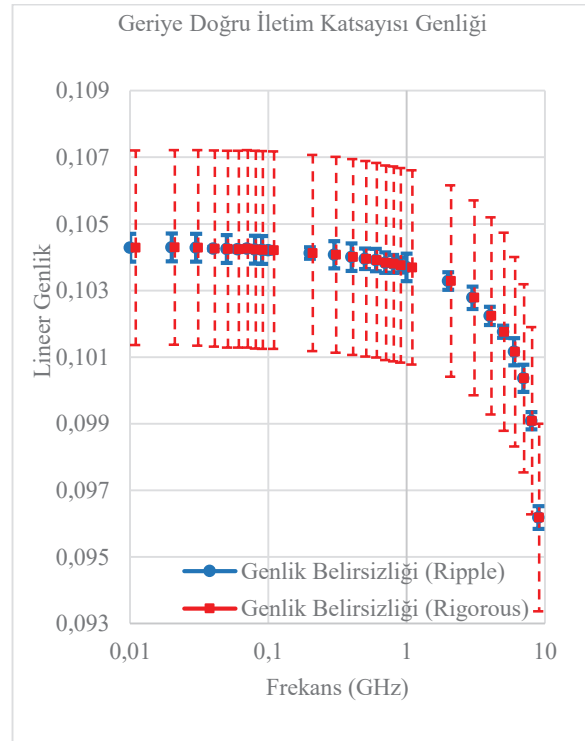
Şekil 8: Giriş yansımaya katsayısı genlikleri ve belirsizlikleri



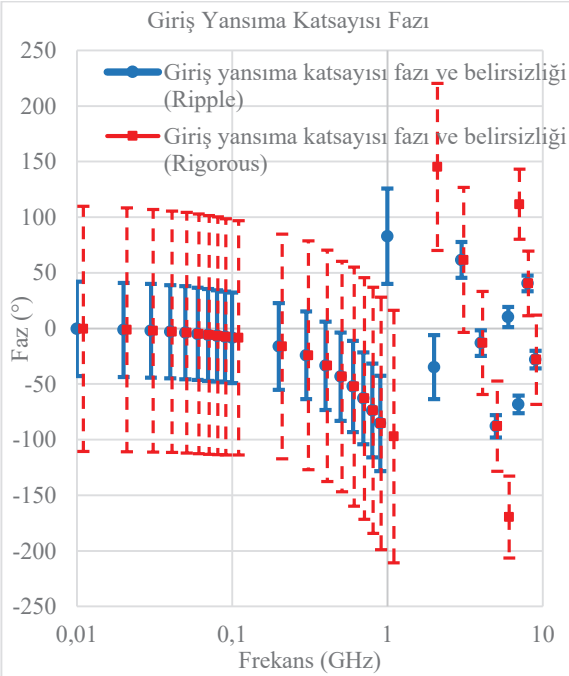
Şekil 10: Çıkış yansımaya katsayısı genlikleri ve belirsizlikleri



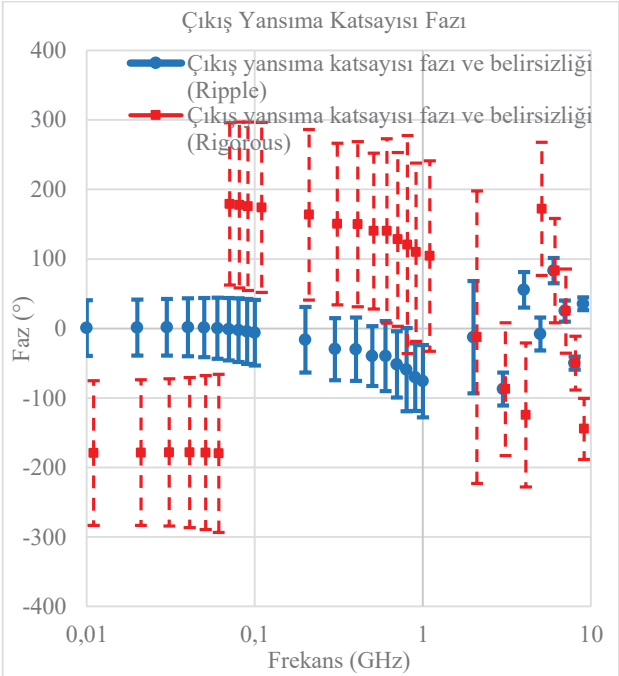
Şekil 9: İleri doğru iletim katsayısı genlikleri ve belirsizlikleri



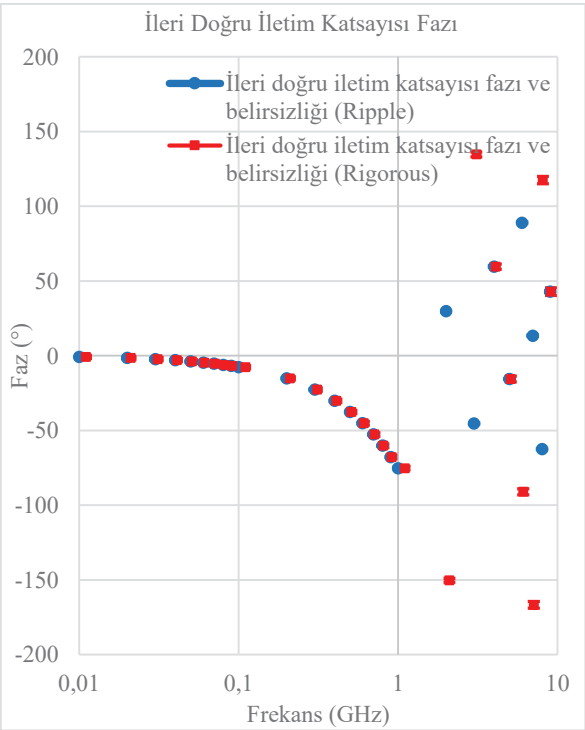
Şekil 11: Geri doğru iletim katsayısı genlikleri ve belirsizlikleri



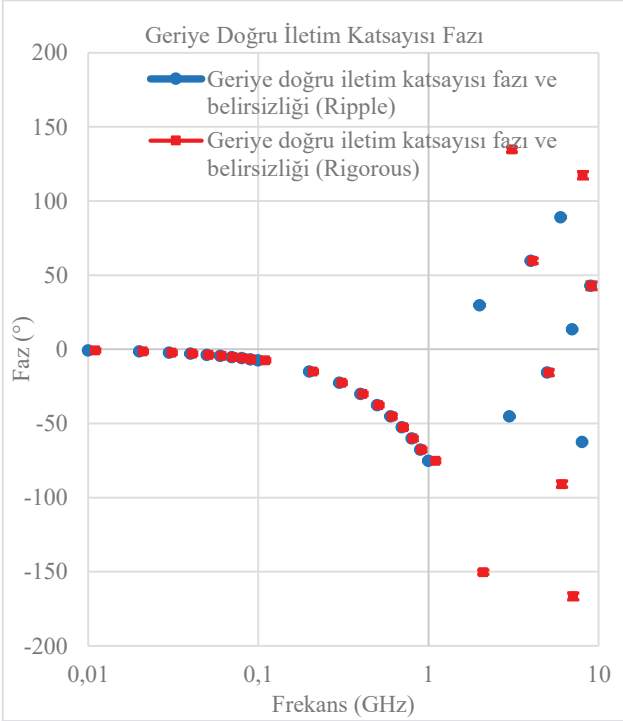
Şekil 12: Giriş yansıma katsayısı fazı ve belirsizlikleri



Şekil 14: Çıkış yansıma katsayısı fazı ve belirsizlikleri



Şekil 13: İleri doğru iletim katsayısı fazı ve belirsizlikleri



Şekil 15: Geriye doğru iletim katsayısı fazı ve belirsizlikleri

4. Sonuç ve Değerlendirmeler

Bu çalışmada VNA ile yapılan vektörel yansıma ve iletim katsayısı ölçüm belirsizlikleri hesaplamalarında kullanılan Ripple ve Rigorous yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve her iki hesaplama yönteminin karşılaştırması yapılmıştır. Hesaplama yöntemlerinin VNA için sağladığı farklı izlenebilirlik zincirleri de bu çalışmada kısaca bahsedilmiştir. Belirsizlik hesaplama yöntemlerinin kavranmasını kolaylaştırmak için yapılan deneysel ölçüm verileri kullanılarak her iki yöntem için belirlenen frekans bandındaki tüm frekanslar için belirsizlikler hesaplanmıştır. Ayrıca, örnek bir frekansta, yansıma ve iletim katsayı genlikleri ile birlikte fazlarına ilişkin belirsizlik bileşenler her iki hesaplama yöntemi için bu çalışmada detaylandırılmıştır. Çalışmada sunulan hesaplama model fonksiyonları, kalibrasyon yapmak isteyen laboratuvarlar için örnek olması açısından verilmiştir. Model fonksiyonda belirtilen parametreler, VNA'ların teknolojik gelişimi ile gelecekte değişiklikler gösterebilecektir.

Bu çalışmadaki örnek uygulamalara bakılarak her iki yöntemin de kalibrasyon laboratuvarlarında kullanılması mümkün gibi görünse de, Ripple yöntemi için, belirsizlik bileşenleri doğru ve güncel kalibrasyon kiti verilerinin kullanılması durumunda belirsizlik hesaplamasının kolay olduğu söylenebilir. Bu çalışmada, Rigorous yöntemine göre hesaplanan belirsizliklerin Ripple yöntemine göre büyük olduğu da görülmüştür. Bu farkın en büyük nedeni Rigorous hesaplamalarında Ripple'a göre daha fazla parametrenin hesaba katılmasıdır.

VNA'lar her ne kadar fazları da ölçebilen cihazlar olsalar da, ölçümlerde referans osilatörlerinin faz değerlerinin kayması olasılığı mevcuttur. Bu faz kaymalarının önüne geçebilmek için üreticilerinin belirttiği şekilde VNA'ların harici olarak kararlı 10 MHz referans sinyal ile tetiklenmesi gereklidir. Bu harici sinyal ile tetiklenmeye rağmen, VNA'lar da faz kayması yine de olacaktır. VNA'nın harici sinyal ile tetiklenmesi ve tetiklenmemesi durumlarına göre ölçümlerdeki faz kaymalarının incelenmesi ileriki çalışmalar için önerilir. Zayıflatıcı gibi uygulanan sinyalin fazını en az kaydıracak mikrodalga devre elemanları ilerideki faz kayması çalışmaları için uygun olacaktır.

Bu çalışmada kullanılan VNA, harici sinyal ile tetiklenmemiştir. Zayıflatıcının giriş çıkış yansıma katsayısı faz belirsizliklerinin büyük çıkması nedenlerinden biri VNA'nın sinyal fazlarındaki salınımın fazla olmasından kaynaklıdır. Ayrıca zayıflatıcının ileri ve geri iletim katsayısı faz değerlerinin çok küçük olduğu da görülmüştür. İletim katsayısı faz açıları çok küçük olduğundan, hesaplanan faz belirsizlikleri de çok küçük çıkmıştır.

Bununla birlikte Ripple yöntemi kalibrasyon laboratuvarlarının her konnektör tipi için ayrı bir verifikasyon kiti kullanımını gerektirdiğinden pahalı bir yöntemdir. Ripple yönteminin yüksek frekanslardaki uygulanabilirliğinde zorluklar olduğu da bilinmektedir. Ayrıca Ripple yöntemi ile belirsizlik hesaplaması yapabilmek için VNA konusunda uzman bir personelin olması da gereklidir. Bu yöntem ile izlenebilirlik sağlamak isteyen laboratuvarların, verifikasyon kitlerini birincil seviye sistemler ile kalibre ettirmeleri ve VNA performans testlerinde güncel kalibrasyon kiti verilerini kullanmaları önerilmektedir.

Rigorous yöntemi Ripple yöntemine göre kıyaslandığında hesaplaması kolay ve VNA konusunda uzman olmayan operatör ile gerçekleştirilebilmektedir. Rigorous yönteminde kullanılması zorunlu olan VNA Tools ve benzeri yazılımlar operatör adına birçok hesaplamayı yapabilmektedir. Bu yöntem için VNA'nın performans testleri ve TRL kalibrasyon kitlerinin kalibrasyonları yine ulusal metroloji enstitülerindeki birincil seviye veya bunlardan izlenebilir ikinci seviye ölçüm sistemleri ile kalibrasyonu yapılabilmektedir. Yani Rigorous yöntemi kullanan laboratuvarların VNA ve kalibrasyon kitlerini bir üst laboratuvara göndererek izlenebilirlik almaları gereklidir.

5. Bilgilendirme

Bu çalışma, TÜBİTAK UME RF ve Mikrodalga Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Pozar D. M., *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons 4th Edition, 2011. ISBN: 1118213637, 9781118213636.
- [2] Famton A., *Radio frequency & microwave power measurement*, IEE Electrical Measurement Series 7, Peter Peregrinus Ltd, London, UK, 1990.
- [3] Teppati V., Ferrero A., and Sayed M., *Modern RF and Microwave Measurement Techniques*, Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-03641-3.
- [4] Dunsmore J. *Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012. ISBN 978-1-119-97955-5.
- [5] Bailey A.E., *Microwave Measurements*; IEE Electrical Measurement Series; Peter Peregrinus Ltd. Volume 3, pp. 547–561, Stevenage, UK, 1989.
- [6] Keysight Application Note 1, *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 1)*; Keysight Application Note 5988-9213; Keysight Technology, USA, 2017.
- [7] Anne Y. R., Lyman E. B., “Radio Frequency Power Measurement”, *Proceeding of The IEEE*, Vol 55, No 6, pp 837-850, June 1967.
- [8] Keysight Application Note, *PNA Family Microwave Network Analyzers Configuration Guide (5992-1465EN)*, Keysight Technologies, USA, August 1, 2024.
- [9] Rohde & Schwarz Application Note, *ZVA Vector Network Analyzer*, Rohde & Schwarz (PD 5213.5680.12), Version 13.00, December 2017.
- [10] Keysight Technologies, *Network Analyzer Basics*, Electronic document. Back to Basics Series, available at www.keysight.com.
- [11] Keysight Application Note, *Keysight Technologies Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers* - Application Note, Electronic document. Available at <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-4840EN.pdf>.
- [12] Ferrero A. and Pisani U., “Two-port network analyzer calibration using an unknown thru”. *IEEE Microwave & Guided Wave Letters*, 2(12):505 – 507, 1992.
- [13] Eğitim Notu, *TÜBİTAK UME Genel Mikrodalga Ölçüm ve Uygulamaları Eğitim Notları*, 2024.
- [14] Wuebbeler G., Elester C., Reichel T., and Judaschke R., Determination of the Complex Residual Error Parameters of a Calibrated One-Port Vector Network Analyzer”, *IEEE Trans. Instr. & Meas.*, 58(9):3238 – 3244, 2009.

- [15] Garelli M. and Ferrero A., “A Unified Theory for S-Parameter Uncertainty Evaluation”, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 60(12):3844 – 3855, 2012.
- [16] Hall B.D., *VNA error models: Comments on EURAMET/cg-12/v.01*, ANAMET Report 051, 2010.
- [17] Euramet Calibration Guide, *Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA) EURAMET Calibration Guide No. 12 Version 3.0 (03/2018)*, 2018. ISBN: 978-3-942992-51-0, <https://www.euramet.org>.
- [18] Software Tool, *METAS VNA Tools*, available at www.metas.ch/vnatools.
- [19] BIPM Guide, *JCGM 100:2008; Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement*, 1st ed., BIPM (Bureau International des Poids et Mesures): Paris, France, 2008.
- [20] Mubarak F. and Rietveld G., “Uncertainty Evaluation of Calibrated Vector Network Analyzers”, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, PP(99):1 – 13, 2017.
- [21] Karay E., Çelik M. E., Danaci E., “RF Vektörel Ölçümlerde Belirsizlik Hesaplamaları”, 2023 International Marmara Sciences Congress (Imascon Spring), 2023.

Özgeçmişler



Dr. Erkan DANACI, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 1991 yılında mezun olmuştur. Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda sırasıyla 1996 yılında Yüksek Lisans ve 2002 yılında Doktora çalışmasını tamamlamıştır.

1992-2000 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisli Bölümü Devreler ve Sistemler Teorisi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. 2000 yılında TÜBİTAK UME RF ve Mikrodalga Laboratuvarı'nda Araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2007-2014 yılları arasında TÜBİTAK UME Stratejik Planlama ve İş Geliştirme Birimi Sorumluluğu görevini yürütmüş, bunun yanında 2011-2014 yıllarında arasında TÜBİTAK UME Müdür İdari Yardımcılığı görevine vekalet etmiştir. 2014 yılından itibaren TÜBİTAK UME RF ve Mikrodalga Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmakta ve 2020 yılından beri Laboratuvar sorumlusu görevini yürütmektedir.

TÜRKAK'da RF ve Mikrodalga ölçümleri konusunda denetçi olarak görev almaktadır.

2011 yılında buyana EURAMET TC-IM Türkiye delegasyonu, 2020 yılından buyana EURAMET TC-EM RFSC Türkiye delegasyonu görevlerini sürdürmektedir.

2023 yılından beri de TÜBİTAK UME Dijitalleşme Çalışma Grubu Koordinatörlüğünü yürütmektedir.