

Dalgacık Gürültü Giderme Yöntemiyle Mikrodalga Bileşen Karakterizasyonunun İyileştirilmesi

Improving Microwave Component Characterization using Wavelet Denoising Method

Anıl Karatay, Bilal Orkan Olcay ve Fatih Yaman

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye

anilkaratay@iyte.edu.tr, bilalolcay@iyte.edu.tr, fatihyaman@iyte.edu.tr

Özetçe—Bu çalışmada, haberleşme ve radar uygulamalarında sıklıkla kullanılan anten ve güç bölücü gibi çeşitli mikrodalga bileşenlerinin karakterizasyonunu iyileştirmeye yönelik, verimli bir yaklaşım sunulmuştur. Computer Simulation Technology (CST) yazılımı kullanılarak bileşenler öncelikle simüle edilmiş ve ardından üretilmiştir. Üretilen bileşenlerin vektör ağ analizörü (VNA) ölçümleri, düşük maliyetli ancak gürültülü bir koaksiyel kablo kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları, dalgacık tabanlı bir gürültü giderme yöntemi kullanılarak işlenmiştir. Kıyaslama amacıyla Haar ve Daubechies-4 (DB4) dalgacık fonksiyonları ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar incelenmiştir. İdeal sonuçlar ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonun ve kök ortalama kare hatasının, gürültü giderme uygulaması ile birlikte olumlu yönde değiştiği görülmüştür. Bu yaklaşım, özellikle fiziksel olarak gürültüden tamamen arındırılmış koaksiyel kablolarla altın ve gümüş gibi pahalı elementler kullanılması düşünüldüğünde, maliyet ve iş gücü açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Deneysel ve sayısal sonuçlar, ideal simülasyon sonuçları ile filtrelenmiş ölçüm sonuçları arasında iyi bir uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—*anten, radyo frekans, dalgacık, gürültü.*

Abstract—In this study, an efficient approach is presented to improve the characterization of various microwave components commonly used in communication and radar applications, such as antennas and power dividers. The components were initially simulated and then fabricated using the Computer Simulation Technology (CST) software. Vector Network Analyzer (VNA) measurements of the fabricated components were performed using a low-cost but noisy coaxial cable, and the measurement results were processed using a wavelet-based noise reduction method. For comparison purposes, the Haar and Daubechies-4 (DB4) wavelet functions were applied separately, and the results were examined. It was observed that the correlation and root mean square error between the ideal and measurement results improved in a positive direction with the noise reduction application. This approach provides significant cost and labor advantages, particularly when expensive elements such as gold and silver are used in coaxial cables that are physically free from noise. The experimental and numerical results show good agreement between the ideal simulation results and the filtered measurement results.

Keywords—*antenna, radio frequency, wavelet, noise.*

979-8-3503-4355-7/23/\$31.00 ©2023 IEEE

I. GİRİŞ

Radyo Frekans (RF) bileşenleri, RF ve mikrodalga sistemleri oluşturmak ve çalıştırmak için oldukça kritik bir öneme sahiptir. Bu bileşenler arasında antenler, filtreler, amplifikatörler, karıştırıcılar, zayıflatıcılar, kuplörler, dolaştırıcılar ve daha fazlası bulunur. RF bileşenleri, RF ve mikrodalga frekans aralığında sinyalleri iletmek, almak, güçlendirmek, filtrelemek ve manipüle etmek için kullanılır [1], [2]. Bu bileşenlerin performansı, RF veya mikrodalga sistemlerinin genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, bir antenin kalitesi, kablosuz iletişim sisteminin menziline ve hassasiyetine etkileyebilirken, bir filtre performansı kablosuz bir sinyalin sinyal-gürültü oranını ve bozulmasını etkileyebilir. Bu nedenle, RF bileşenlerinin karakterizasyonu, doğru bir şekilde ölçerek yapılmalıdır. Bu karakterizasyon genellikle VNA yardımıyla gerçekleştirilir ve bu sayede ölçüm altındaki RF bileşene ilişkin saçılma parametreleri (S-parametreler) elde edilir [3].

S-parametreler, yüksek frekanslı cihazların ve sistemlerin performansını karakterize etmek için ihtiyaç duyulan en önemli parametrelerdir. Bu parametreler, belirli bir frekansta gelen ve yansıyan veya iletilen dalgalar arasındaki ilişkiyi ifade eden karmaşık sayılardır. Elektromagnetik dalgaların bir cihaza veya bileşene nasıl davrandığını açıklayarak, davranışı hakkında değerli bilgiler sağlar. S-parametrelerini ölçmek için yaygın olarak VNA kullanılmaktadır. Bu ekipman, geniş bir frekans aralığında sinyaller üretebilir ve ölçülebilir. Test edilen bileşene VNA'yı bağlayarak, ilgili bileşenin S-parametrelerini ölçmek mümkündür. Bu bilgi, bileşenin performansını analiz etmek, tasarımını optimize etmek ve özelliklerini doğrulamak için kullanılabilir [4].

Bu ölçümler sırasında, VNA tarafından üretilen sinyali RF bileşene iletmek ve ardından o sinyali geri toplamak için en az bir koaksiyel kabloya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kablolar radyo ve mikrodalga frekanslarındaki sinyalleri iletmek için kullanılan, hafif ve ince yapılarıdır. Hafif ve ince olma avantajları olsa da, kablunun üretiminde kullanılan materyalin ucuz ve kalitesiz oluşu, kablunun kullanım durumu, ortam şartları gibi parametrelere bağlı olarak koaksiyel kablo bir gürültü

kaynağı gibi davranabilmektedir [5]. Bir koaksiyel kablonun VNA ölçümleri sırasında gürültülü olmasının pek çok nedeni olabilir [6]. Kablo hasar görmüş olabilir, bağlantıları gevşek olabilir veya kalitesiz olabilir, bu da artan gürültü ve sinyal kaybına neden olabilir. Kablonun empedansı, ağ analizörüne veya test edilen cihaza uygun şekilde eşleştirilmemiş olabilir, bu da yansımalar ve gürültüye neden olabilir. Kablo, ölçümü etkileyen harici sinyalleri alıyor olabilir veya ölçüm kalitesini etkileyebilecek sıcaklık, nem veya diğer çevresel faktörlerden etkileniyor olabilir. Altın veya gümüş gibi materyallerden yapılmış, dayanıklı ve gürültüden büyük ölçüde arındırılmış koaksiyel kablolar da literatürde ve piyasada mevcut olmakla birlikte, bu yapılar, ilgili ölçümün maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, çeşitli nedenlerle gürültü kaynağı gibi davranan koaksiyel bir kablo ile anten ve güç bölücü bileşenlerinin karakterizasyonu yapılmıştır. Ölçüm sırasında kablodan kaynaklanan gürültünün ortadan kaldırılması için dalgacık gürültü giderme yöntemi kullanılmıştır [7], [8]. Haar ve DB4 olmak üzere iki farklı çekirdek fonksiyonunun kullanıldığı bu çalışma ile düşük maliyetli ve kusurlu koaksiyel kablolarla yapılan RF ölçümlerinin kalitesini artırmanın yolları literatüre kazandırılmıştır.

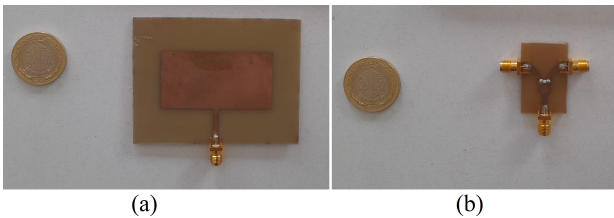
II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, anten ve güç bölücü olmak üzere, iki farklı RF bileşenin karakterizasyonu üzerinde durulmuştur. Karakterize edilecek olan anten ve güç bölücü, CST yazılımı ile simüle edilmiş, arzulanan S-parametresi değerlerine ulaşıldığında, ilgili yapılar kimyasal aşındırma yöntemiyle üretilmiştir. Bileşenlerin fotoğrafları Şekil 1'de verilmiştir. Üretilmiş olan bileşenlerin her bir portuna 50 Ω empedansa sahip birer kuplör lehimlenmiştir. Bu kuplörler, RF bileşen ile VNA arasında bir bağlantı noktası oluşturmaktadır. Ölçülmek istenen RF bileşeni karakterize etmek için S-parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Çok portlu bir RF bileşen için saçılma parametrelerinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir [9]:

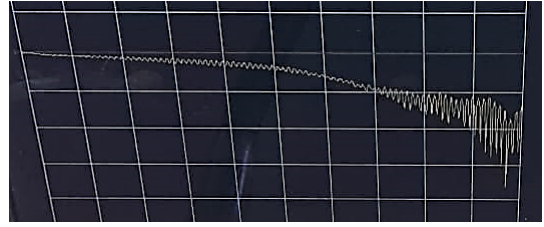
$$S_{mp} = \left. \frac{V_m^-}{V_p^+} \right|_{V_k=0}, \quad k \neq p \quad (1)$$

Burada V , ilgili portta ilerleyen gerilim dalgasını ifade eder. Üst indeks olarak verilmiş olan + ve - işaretleri, sırasıyla porttan bileşene ve bileşenden porta ilerleyen dalgayı göstermektedir.

Bu çalışma çerçevesinde, RF bileşenlerin S-parametreleri VNA yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm sırasında kullanılan koaksiyel kablonun kendisi bir gürültü kaynağı gibi davranmaktadır. Şekil 2'de gürültülü koaksiyel kablonun HP Agilent Keysight, 8720D VNA cihazına bağlı olduğu durumda ölçülen



Şekil 1: Üretilip ölçülen RF bileşenler (a) Anten (b) Güç bölücü.



Şekil 2: Koaksiyel kablodan kaynaklanan spektral gürültünün ölçülmesi.

S_{11} parametresinin fotoğrafı görülmektedir. Yatay eksendeki başlangıç değeri 0.1 GHz, bitiş değeri 15 GHz'dir. Düşey ekseninde her bir kare 10 dB değişimi ifade etmektedir. Koaksiyel kablonun bir gürültü kaynağı olarak davrandığı bu gibi durumlarda, kablonun sebep olduğu spektral gürültü, bileşenin doğru şekilde karakterize edilmesini engellemektedir. Bileşenin doğru karakterizasyonu için şekildeki gürültüden kurtulmak gerekmektedir. Bu bağlamda, dalgacık dönüşümü tabanlı bir gürültü giderme yöntemi kullanılmıştır.

Dalgacık dönüşümü, bir sinyalin ($f(t)$) bir dalgacık fonksiyonu ($\psi(t)$) ve ölçeklendirme ve öteleme parametreleri (a ve b) kullanılarak hesaplanabilir [10].

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

Bu işlem, her seviyede dalgacık katsayıları üzerinde bir eşik uygulayarak gerçekleştirilir [11]. Sert ve yumuşak eşikleme yöntemleri olmak üzere iki farklı dalgacık eşikleme yöntemi vardır [12]. Sert eşikleme yöntemi, belirlenen eşik değerinin altındaki tüm dalgacık katsayılarını sıfırlayarak gürültüyü kaldırır:

$$T_{sert}(x') = \begin{cases} x', & \text{eğer } |x'| \geq \lambda \text{ ise} \\ 0, & \text{eğer } |x'| < \lambda \text{ ise} \end{cases} \quad (3)$$

Yumuşak eşikleme yöntemi ise, belirlenen eşik değerinin altındaki tüm dalgacık katsayılarını sıfırlar ve geri kalan katsayıları eşik değerine göre küçültür:

$$T_{yumuşak}(x') = \begin{cases} x' - \lambda, & \text{eğer } x' > \lambda \text{ ise} \\ x' + \lambda, & \text{eğer } x' < -\lambda \text{ ise} \\ 0, & \text{eğer } |x'| \leq \lambda \text{ ise} \end{cases} \quad (4)$$

Burada x' dalgacık katsayısı, λ ise eşik değeridir. Yapılan ölçümün frekans uzayında olması sebebiyle, frekans uzayında yer alan sinyalin dalgacık dönüşümü alınıp, eşik değerleri belirlenip, gürültüden arındırıldıktan sonra frekans uzayına geri dönülmüştür.

Haar ve DB4 dalgacık çekirdek fonksiyonları kullanılarak, tek portlu anten yapısının S_{11} parametresi, 3 portlu güç bölücü yapısının ise S_{11} ve S_{21} parametreleri ölçülmüştür. Güç bölücünün simetrisi sebebiyle S_{31} parametresinin ölçülmesine gerek duyulmamıştır. Her bir çekirdek fonksiyonunun ölçümlere tek tek uygulanması neticesinde 6 adet filtrelenmiş sonuç elde edilmiştir. Taban-2 logaritması kullanılarak tanımlanan ve özellikle sürekliliği için tercih edilen Haar çekirdek fonksiyonu şu şekildedir [13]:

$$\psi_{Haar}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq x < 1 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (5)$$

Daubechies çekirdek fonksiyonu, filtre kademe sayısı kadar ölçekleyici katsayı ve dalgacık katsayısı içeren bir dalgacık fonksiyonudur. Bu çekirdek fonksiyonu, bir anlamda Haar dönüşümünü genelleştiren, kolayca uygulanabilen ve kolayca tersine çevrilebilen bir dalgacık dönüşümleri ailesini ifade eder. Haar dönüşümü gibi, Daubechies dalgacık dönüşümü de bir ayrıştırma dizisi olarak uygulanır. Tek fark, filtre uzunluğunun ikiden fazla olmasıdır. Bu nedenle, Daubechies dalgacık dönüşümü daha yerel ve pürüzsüzdür [13].

Kullanılan algoritmaların ölçüm sonuçlarını ne düzeyde iyileştirdiği, korelasyon ve kök ortalama kare hatası değerlerinin hesaplanması ile ortaya koyulmuştur. İdeal sonuçlar ile deneysel ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon şu şekilde hesaplanır:

$$r_{ID} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})(D_i - \bar{D})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}} \quad (6)$$

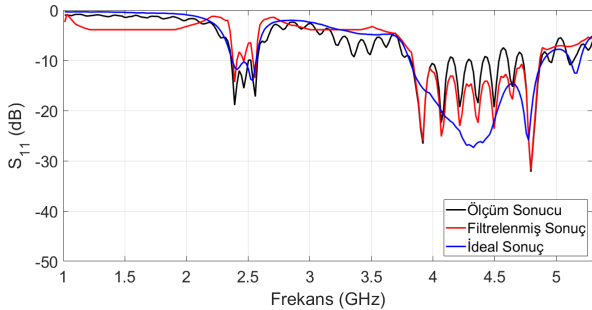
r_{ID} , I (ideal) ve D (deney) olmak üzere iki değişken arasındaki korelasyon katsayısını, \bar{I} ve \bar{D} ilgili ortalamaları ve n gözlem sayısını temsil eder. Kök ortalama kare hatası değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - I_i)^2}{n}} \quad (7)$$

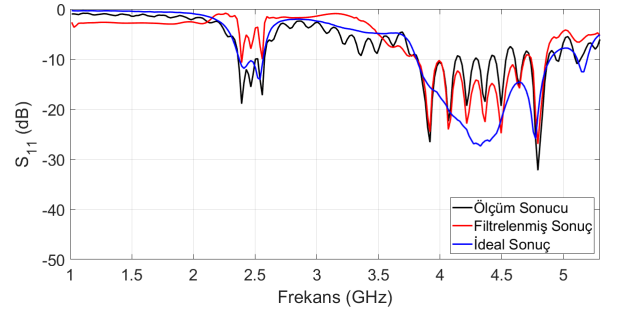
III. DENEYLER VE SONUÇLAR

Bu kısım, deneysel sonuçlar, ideal sonuçlar ve filtrelenmiş sonuçlar arasındaki kıyaslamaya ayrılmıştır. Şekil 3 ve 4'te, antene ilişkin gürültülü ölçümler, ideal sonuçlar ve sırasıyla Haar ve DB4 dalgacık gürültü giderme işleminden geçirilmiş sonuçlar yer almaktadır. Görünürlüğü arttırmak amacıyla Haar ve DB4 sonuçları üst üste çizdirilmemiş ve iki farklı grafik olarak verilmiştir.

Şekil 3 ve 4'te yüksek yansımaya sahip bölgelerdeki dalgalanmalar her iki yöntemle de oldukça iyi giderilmiş, düşük yansımaya sahip bölgelerdeki dalgalanmalar



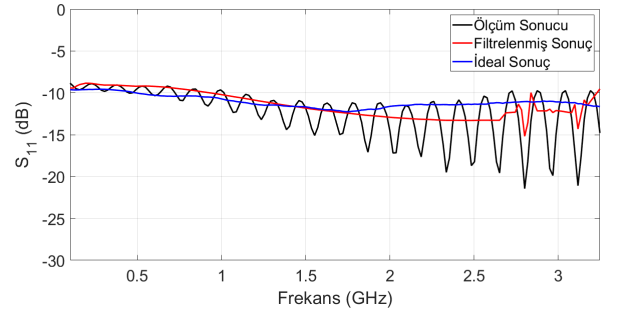
Şekil 3: Anten yansımaya katsayısı grafiğinin Haar dalgacık gürültü giderme yöntemiyle işlenmesi.



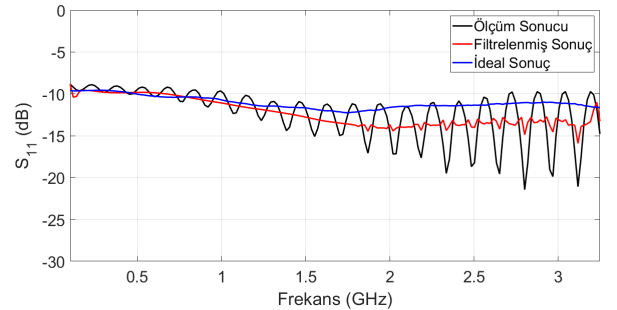
Şekil 4: Anten yansımaya katsayısı grafiğinin DB4 dalgacık gürültü giderme yöntemiyle işlenmesi.

ise sınırlı oranda baskılanabilmiştir. 4 – 4.5 GHz arasında yer alan çukur, filtre uygulaması ile daha belirgin hale getirilmiştir. İdeal sonuç ile ölçüm sonucu arasındaki korelasyon 0.80'den, Haar ve DB4 çekirdek fonksiyonlu filtreler kullanılarak sırasıyla 0.88 ve 0.89'a yükseltmiştir. Kök ortalama kare hatası ise 4.83'ten, 4.10 ve 3.89'e düşürülmüştür.

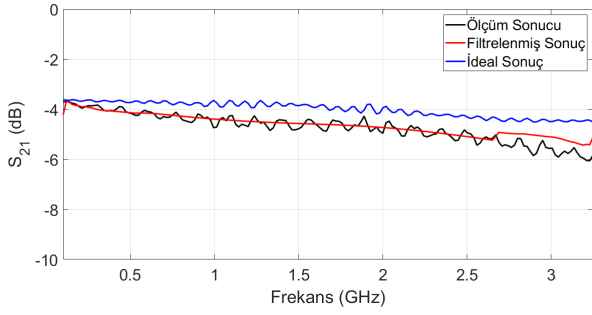
Şekil 5 ve 6'da, güç bölücünün giriş portundan verilen güç ile yansıyan gücün oranına ilişkin ölçüm sonuçları yer almaktadır. Bu grafiklerde, anten grafiklerinden farklı olarak frekans bağıllığı çok daha düşüktür. Bununla ilişkili olarak, anten ölçüm sonuçlarına kıyasla çok daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Filtrelenmemiş ölçüm sonuçları ile ideal sonuçlar arasındaki korelasyon değeri 0.49 olarak hesaplanmıştır. Haar



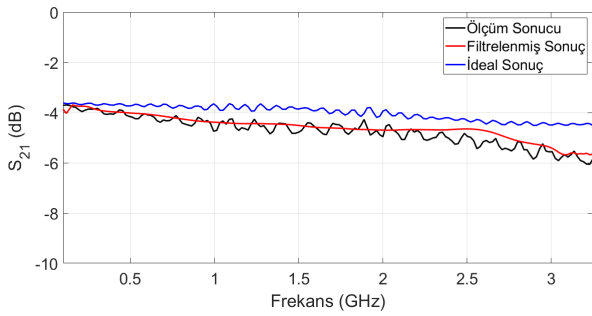
Şekil 5: Güç bölücü yansımaya katsayısı grafiğinin Haar dalgacık gürültü giderme yöntemiyle işlenmesi.



Şekil 6: Güç bölücü yansımaya katsayısı grafiğinin DB4 dalgacık gürültü giderme yöntemiyle işlenmesi.



Şekil 7: Güç bölücü iletim katsayısı grafiğinin Haar dalgacık gürültü giderme yöntemiyle işlenmesi.



Şekil 8: Güç bölücü iletim katsayısı grafiğinin DB4 dalgacık gürültü giderme yöntemiyle işlenmesi.

ve DB4 çekirdek fonksiyonları kullanılarak uygulanan dalgacık tabanlı gürültü giderme algoritması ile bu değer sırasıyla 0.78 ve 0.84'e yükselmiştir. Kök ortalama kare hatası ise 2.77'den 1.15 ve 1.11'e inmiştir.

Şekil 7 ve 8'de, güç bölücünün giriş portundan verilen güç ile çıkış portlarından birine iletilen güç oranına ilişkin ölçüm sonuçları yer almaktadır. Bu ölçümler sırasında güç bölücünün üçüncü portu 50 Ω 'luk bir yük ile kapatılır ve yalnızca iki port çalışır durumda tutulur. Şekil 5 ve 6'da olduğu gibi, bu grafiklerde de frekans bağıllığı oldukça düşüktür. Filtrelenmemiş ölçüm sonuçları ile ideal sonuçlar arasındaki korelasyon değeri 0.88 olarak bulunmuştur. Haar ve DB4 dalgacık çekirdek fonksiyonları ile uygulanan gürültü giderme işlemi ile bu değer sırasıyla 0.91 ve 0.92'ye yükselmiştir. Kök ortalama kare hatası ise 0.792'den 0.647 ve 0.628'e inmiştir.

Tablo I'de dalgacık tabanlı gürültü giderme algoritmasının korelasyon ve kök ortalama kare hatası üzerindeki etkisi tek bir

TABLE I: KORELASYON VE KÖK ORTALAMA KARE HATASI DEĞERLERİ

	Korelasyon	Kök ortalama kare hatası
Anten - Filtresiz - S_{11}	0.80	4.83
Anten - Haar - S_{11}	0.88	4.10
Anten - DB4 - S_{11}	0.89	3.89
Güç Bölücü - Filtresiz - S_{11}	0.49	2.77
Güç Bölücü - Haar - S_{11}	0.78	1.15
Güç Bölücü - DB4 - S_{11}	0.84	1.11
Güç Bölücü - Filtresiz - S_{21}	0.88	0.79
Güç Bölücü - Haar - S_{21}	0.91	0.65
Güç Bölücü - DB4 - S_{21}	0.92	0.63

tablo halinde gösterilmiştir. Tüm ölçüm sonuçları için korelasyon değeri yükselirken, kök ortalama kare hatasının düştüğü görülmüştür. DB4 çekirdek fonksiyonu ile gerçekleştirilmiş filtreleme işleminin, Haar dalgacık fonksiyonuna kıyasla daha iyi sonuç verdiği ancak bu farkın göz ardı edilebilir olduğu gösterilmiştir.

IV. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Bu çalışmada anten ve güç bölücü olmak üzere iki farklı mikrodalga bileşeninin karakterizasyonundaki spektral gürültünün giderilmesi için yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. CST ile simüle edilip ardından üretilmiş bileşenlerin VNA ölçümleri sırasında koaksiyel kablodan kaynaklanan spektral gürültüler olabileceği gerçeğinden hareketle, dalgacık tabanlı bir gürültü giderme kodu yazılmış ve ölçüm sonuçları bu kod kullanılarak işlenmiştir. Kıyaslama amacıyla, Haar ve DB4 dalgacık fonksiyonları ayrı ayrı uygulanmış ve DB4 çekirdek fonksiyonunun Haar fonksiyonuna kıyasla daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Filtrelenmiş sonuçların ideal sonuçlarla arasındaki korelasyon, filtrelenmiş sonuçların ideal sonuçlarla arasındaki korelasyona kıyasla daha yüksek olmakla birlikte, kök ortalama kare hatası da daha düşük bulunmuştur. Bu yaklaşım, fiziksel olarak gürültüsüz koaksiyel kabloların pahalı elementlerden üretilmesi sebebiyle, maliyet açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] J. Carr, *RF components and circuits*. Newnes, 2002.
- [2] E. S. Rosker, R. Sandhu, J. Hester, M. S. Goorsky, and J. Tice, "Printable materials for the realization of high performance rf components: Challenges and opportunities," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, pp. 1–19, 2018.
- [3] R. Mavaddat, *Network scattering parameters*. World Scientific, 1996.
- [4] D. F. Williams, J. C. Wang, and U. Arz, "An optimal vector-network-analyzer calibration algorithm," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 12, pp. 2391–2401, 2003.
- [5] S. Colangeli, R. Cleriti, W. Ciccognani, and E. Limiti, "Evaluation of coaxial cable performance under thermal gradients," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 7, no. 3-4, pp. 239–249, 2015.
- [6] Y.-I. Hayashi and H. Sone, "The effect of position of a connector contact failure on electromagnetic near-field around a coaxial cable," *IEICE transactions on communications*, vol. 92, no. 6, pp. 1969–1973, 2009.
- [7] Z. Saraç, B. Kurt, and C. Erdemir, "A new hybrid peak detection methods for fiber bragg grating temperature sensor," in *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [8] S. Sardy, P. Tseng, and A. Bruce, "Robust wavelet denoising," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 6, pp. 1146–1152, 2001.
- [9] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] M. Abdulrahman, T. R. Gwadabe, F. J. Abdu, and A. Eleyan, "Gabor wavelet transform based facial expression recognition using pca and lbp," in *2014 22nd signal processing and communications applications conference (SIU)*. IEEE, 2014, pp. 2265–2268.
- [11] G. Strang and T. Nguyen, *Wavelets and filter banks*. SIAM, 1996.
- [12] M. Srivastava, C. L. Anderson, and J. H. Freed, "A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds," *IEEE access*, vol. 4, pp. 3862–3877, 2016.
- [13] I. Sharif and S. Khare, "Comparative analysis of haar and daubechies wavelet for hyper spectral image classification," *ISPRS Archives*, vol. 40, no. 8, p. 937, 2014.