



Yavaş dalgalı mikroşerit yapılarla iki ve dört yollu Wilkinson güç bölücü tasarımı

Two-and four-way Wilkinson power divider design with slow-wave microstrip structures

Mehmet Çakır^{1*} , Ceyhan Karpuz²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye.
mcakir@bayburt.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye
ckarpuz@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.06.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 08.03.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 16.10.2024

doi: 10.5505/pajes.2025.24615
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, geleneksel Wilkinson güç bölücüsü iletim hatları menderes yapılar ile modifiye edilerek, ardışık olarak iki ve üç kez bağlanmış iki yollu ve iki kez ardışık bağlanmış dört yollu mikroşerit güç bölücü devreleri sunulmaktadır. Tasarımlarda bağlı dielektrik sabiti 10.2 ve yüksekliği 1.27 mm olan RT/Duroid alt tabaka kullanılmış; elektromanyetik simülasyon programı ile frekans cevapları optimize edilmiştir. Güç bölücülerde her bir bağlantı noktasına 100 ohm direnç yerleştirilmiş ve bu sayede izolasyon ile bant genişliğinin artırılması sağlanmıştır. İki kez ardışık bağlanmış iki yollu yapıda 0.17-1.36 GHz bandında ortalama geri dönüş kaybı -14.45 dB, iletim kaybı -3.40 dB ve izolasyon değeri -13.25 dB olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, 2.24-2.97 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı -15.45 dB, iletim kaybı -3.50 dB ve izolasyon değeri -15.93 dB olarak ölçülmüştür. Üç kez ardışık bağlanmış yapıda ise 0.11-1.05 GHz arasında ortalama geri dönüş kaybı -14.73 dB, iletim kaybı -3.38 dB ve izolasyon değeri -12.20 dB; 1.36-2.10 GHz arasında ortalama geri dönüş kaybı -15.21 dB, iletim kaybı -3.54 dB ve izolasyon değeri -15.34 dB; 2.59-3.14 GHz arasında ise ortalama geri dönüş kaybı -17.52 dB, iletim kaybı -3.65 dB ve izolasyon değeri -14.03 dB olarak ölçülmüştür. Dört yollu, iki kez ardışık bağlanmış yapıda ise 0.47-1.17 GHz aralığında ortalama geri dönüş kaybı -20.65 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve izolasyon değeri -16.74 dB olarak ölçülmüştür. Tasarlanan devreler imal edilmiş ve simülasyon sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Wilkinson güç bölücü, Kaskat bağlı, İki yollu güç bölücü, Dört yollu güç bölücü, Menderes yapı.

Abstract

In this study, conventional Wilkinson power dividers have been modified with meandered transmission line structures, resulting in two-port power dividers with either two or three serial connections and four-port power dividers with two serial connections. A substrate with a relative permittivity of 10.2 and a height of 1.27 mm, RT/Duroid, was used for the designs, and frequency responses were optimized using an electromagnetic simulation program. To enhance isolation and bandwidth, 100-ohm resistors were placed at each connection point in the power dividers. In the two-port configuration with two serial connections, the average return loss was -14.45 dB, insertion loss was -3.40 dB, and isolation was -13.25 dB over the 0.17-1.36 GHz band. Additionally, in the 2.24-2.97 GHz frequency band, the return loss was -15.45 dB, insertion loss was -3.50 dB, and isolation was -15.93 dB. In the three-port configuration with three serial connections, the average return loss was -14.73 dB, insertion loss was -3.38 dB, and isolation was -12.20 dB over the 0.11-1.05 GHz range; -15.21 dB return loss, -3.54 dB insertion loss, and -15.34 dB isolation over the 1.36-2.10 GHz range; and -17.52 dB return loss, -3.65 dB insertion loss, and -14.03 dB isolation over the 2.59-3.14 GHz range. In the four-port configuration with two serial connections, the average return loss was -20.65 dB, insertion loss was -6.17 dB, and isolation was -16.74 dB in the 0.47-1.17 GHz range. The designed circuits were fabricated, and it was observed that the simulation results were consistent with the measurement results.

Keywords: Wilkinson power divider, Cascade connected power divider, Two-way power divider, Meandered structure.

1 Giriş

Mikrodalga güç bölücü devreleri, giriş sinyalinin eşit genlikte ve aynı fazda birden fazla çıkışa bölünmesi için yapıları anten dizileri başta olmak üzere birçok RF/mikrodalga haberleşme sisteminde kullanım alanı bulmaktadır [1]. 1960 yılında J. Wilkinson tarafından literatüre sunulan Wilkinson güç bölücü, giriş sinyalinin eşit faz ve genlikteki sinyallere yüksek izolasyonla ayrılmasını sağlamıştır [2]. Geleneksel Wilkinson güç bölücü, giriş portundan uygulanan gücü kayıpsız olarak iki çıkış porta eşit bölecek şekilde tasarlanmıştır. Wilkinson güç bölücüler kolay imalatı, kayıplarının az olması, maliyetinin düşük olması, çıkış portları arasında yüksek izolasyonun olması gibi nedenlerden dolayı en yaygın kullanılan güç bölücülerdir. Wilkinson güç bölücü, $Z_0\sqrt{2}\Omega$ empedansına sahip iki iletim hattı ve çıkış portları arasında izolasyon sağlayan bir $2Z_0\Omega$ değerindeki dirençten oluşur [2],[3]. Geleneksel Wilkinson güç

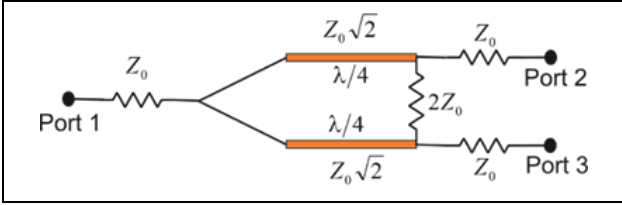
bölücünün çeyrek dalga boyu ($\lambda/4$) uzunluğundaki iletim hatları modifiye edilerek çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Trapez, dairesel ve dikdörtgen rezonatörlerin kombinasyonu kullanılarak [4], yarım daire rezonatör ve iki T-şekilli rezonatör kullanılarak [5], modifiye edilmiş bir alçak geçiren filtre kullanılarak [6], n yollu bir güç bölücü için n adet çok modlu rezonatör ve n adet dirençten oluşan modifiye bir yapı ile [7] Wilkinson güç bölücünün iletim hatları modifiye edilerek harmonik bastırma özellikli yeni güç bölücü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, özel olarak tasarlanmış çift bantlı bir bant geçiren filtre içeren yapılar [8], yavaş dalgalı yapılar [9], özel tasarlanmış interdigital yapılar [10] kullanılarak filtreleme yapan güç bölücü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, kapasitif yüklü yapı [11], T şeklinde rezonatör ve dört adet dikdörtgen şekilli rezonatör [12], çift iletim hattı tekniği [13], özel olarak tasarlanmış yapay iletim hattı modeli (bu model şönt kapasitör ve açık uçlu yan hatlardan

*Yazışılan yazar/Corresponding author

oluşmaktadır) [14], üçgen rezonatörler [15], indüktif yarık yüklemeli yapı ile iletim hattının empedans değerini değiştirerek yavaş dalgalı yapı [16] ve menderes yapılı iletim hattı [17] kullanarak boyut küçültme üzerine çalışmalar yapılmıştır. İletim hatları farklı güç oranlarına bölmek için çeşitli empedans değerlerine göre tasarlanmış iki kaskat bağlı yapılar [18], dairesel iletim hatları ve kaskat bağlantı kullanarak polarizasyon tespiti [19] üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, geleneksel Wilkinson bölücünün iletim hatları menderes yapılı şekilde modifiye edilerek hem boyut küçültme sağlanmış hem de iki yollu olarak iki ve üç segmentli yapılar ile dört yollu olarak iki segmentli bir yapı tasarlanmıştır. İki yollu yapıların iki ve üç segmentli versiyonları, dört yollu yapının ise iki segmentli versiyonu geliştirilmiştir. Bu tasarımların amacı, bant sayısını artırarak dizi antenler için mikrodalga devre elemanları tasarlamaktır.

2 Materyal-metot

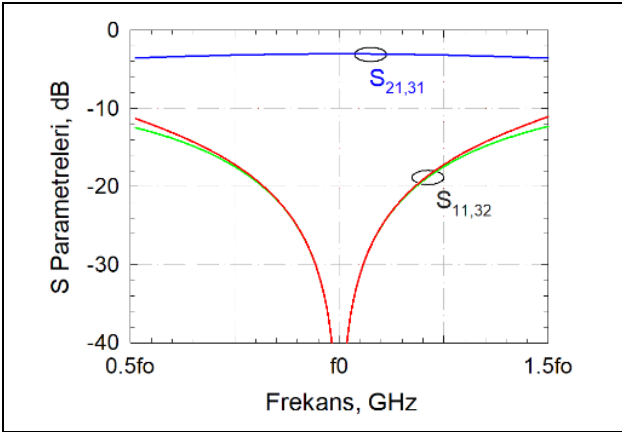
Bu çalışmada, geleneksel Wilkinson Güç Bölücü devresinin iletim hatları menderes yapılı şekilde modifiye edilerek güç bölücüler oluşturulmuştur. Bu güç bölücüler, ardışık olarak iki ve üç kez kaskat bağlanarak iki yollu ve iki kez kaskat bağlanarak dört yollu güç bölücüler tasarlanmıştır. Şekil 1'de geleneksel Wilkinson Güç Bölücü devresi gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel Wilkinson Güç Bölücü devre modeli.

Figure 1. Conventional Wilkinson power divider circuit model.

Şekil 2'de ise geleneksel Wilkinson Güç Bölücü'nün frekans cevabı verilmiştir.



Şekil 2. Geleneksel Wilkinson güç bölücü devre modeli.

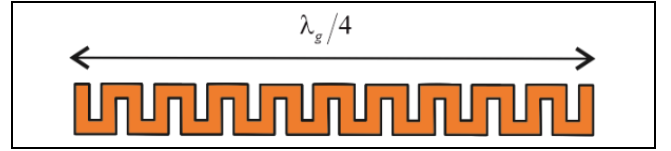
Figure 2. Frequency response of conventional Wilkinson Power Divider circuit model.

Burada, f_0 kesim frekansıdır. İdeal Wilkinson Güç Bölücü devresi için, S matrisi, gücün birinci porta girdiğinde eşit genlik ve aynı fazda çıkış portlarına bölündüğünü gösterir. Tüm portlar uyumlu yükle sonlandırıldığında, portlarda geri dönüş kayıpları sıfırdır. Çıkış portlarından birine bir sinyal uygulandığında, bu sinyalin sadece yarısı giriş portuna ulaşır; yüksek izolasyon nedeniyle diğer çıkış portunda ise herhangi

bir sinyal görülmez. Wilkinson güç bölücünün ideal saçılma matrisi, Denklem 1'de gösterildiği gibidir.

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

Yavaş dalgalı yapılar kullanılarak devre boyutlarında küçültme sağlanmıştır [17]. Devre boyutunu küçültmek için çeyrek dalga boyu iletim hatları kapasitif veya indüktif olarak yüklenebilir. İletim hattının kapasitans veya indüktansındaki artışa bağlı olarak faz ve grup hızı azalır; bu nedenle bu yapılar yavaş dalga yapıları olarak adlandırılır. 50 Ω empedansına sahip iletim hattına menderes yapılı verilerle, 0.8 mm derinliğinde ve 0.2 mm genişliğinde yarıklar açılarak, iletim hattının empedansı 70 Ω olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu devre tasarımında kullanılan menderes yapılı iletim hattı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Menderes yapılı iletim hat modeli.

Figure 3. Meandered transmission line model.

Mikroşerit hatların karakteristik empedansı denklem 2 ile verilmiştir.

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{2h} \right) \quad (2)$$

Burada, W mikroşerit hattın genişliği, h dielektrik tabakanın yüksekliği, η_0 serbest uzayın empedansı (120 π) ve ϵ_{eff} ise etkin dielektrik sabitidir. Kılavuz dalga boyu denklem 3 ile verilmiştir.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

Her bir iletim hattının uzunluğu $\lambda_g/4$ 'tür. Menderes yapılı iletim hatları, kolay üretim süreci nedeniyle farklı mikrodalga devreleri için yaygın olarak tercih edilmektedir.

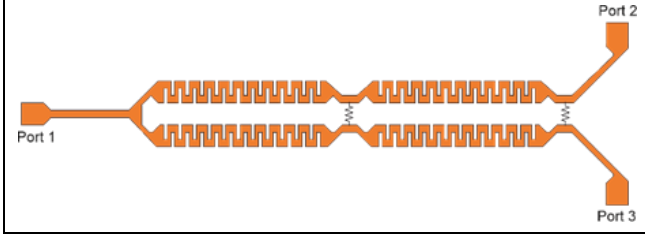
2.1 Kaskat bağlı iki yollu Wilkinson güç bölücü

Bu bölümde, anten dizilerinde yaygın olarak kullanılabilecek türde iki yollu Wilkinson Güç Bölücüler üzerinde yeni bir model sunulmaktadır. İki adet ve üç adet iki yollu Wilkinson Güç Bölücünün iletim hatlarının kaskat bağlanması sonucunda çoklu bant yapıları elde edilmiştir. Ayrıca, iletim hatlarının menderes yapılı olarak tasarlanmasıyla devre boyutları küçültülmüş ve daha kompakt bir hale getirilmiştir. Tasarımlarda bağli dielektrik sabiti 10.2 ve kalınlığı 1.27 mm olan RT/Duroid taban malzemesi kullanılmıştır. Simülasyonlar, Tam Dalga Elektromanyetik Simülasyon programı olan Sonnet kullanılarak yapılmıştır.

2.1.1 İki kez ardışık bağlı iki yollu Wilkinson güç bölücü

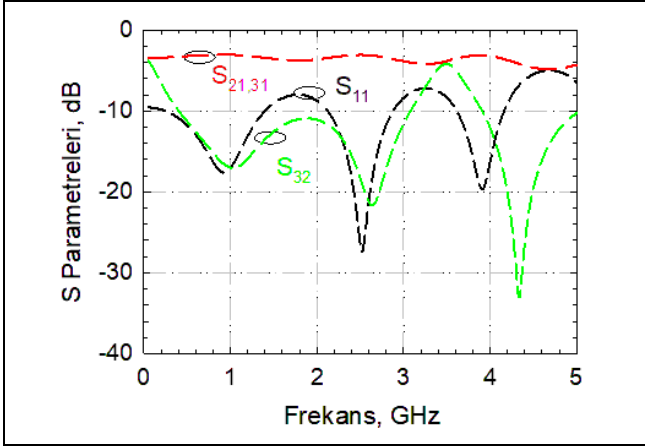
İki kez ardışık bağlı iki yollu Wilkinson Güç Bölücü modelinde, geleneksel Wilkinson Güç Bölücünün iletim hatları menderes yapılı hale getirilmiş ve yavaş dalga etkisi ile minyatürizasyon sağlanması amaçlanmıştır. Buna ek olarak, iletim hatları iki kez ardışık bağlanarak kaskat bağlı bir yapı oluşturulmuştur.

Geleneksel Wilkinson iki yöllü güç bölücünün iletim hatları arasına $100\ \Omega$ değerinde bir direnç yerleştirilmiş ve daha sonra iki adet iletim hattının seri bağlanmasıyla iki kez ardışık bağlanmış güç bölücü modeli elde edilmiştir. Bu tasarımın merkez frekansı 1 GHz'dir. Tasarlanan devre modeli Şekil 4'te verilmiş olup, devre boyutu dalga boyu cinsinden $0.56\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ 'dir. Bu devreye ait simülasyon sonuçları Şekil 5'te sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, 0.17-1.36 GHz frekans aralığında ortalama geri dönüş kaybı -13.40 dB, iletim kaybı ise -3.19 dB ve çıkış portları arasındaki izolasyon değeri ise -13.32 dB'dir.



Şekil 4. İki yöllü iki segmentli devre modeli.

Figure 4. Twice cascaded two-way circuit model.

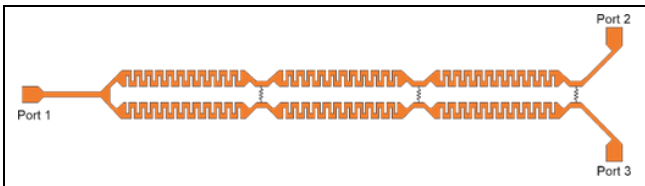


Şekil 5. İki yöllü iki segmentli devreye ait S parametrelerinin frekansa göre değişim grafiği.

Figure 5. Frequency response of S parameters of a two-way circuit cascaded twice.

2.1.2 Üç kez ardışık bağlı iki yöllü Wilkinson güç bölücü

Çalışmanın bu kısmında, iletim hatları menderes yapı ile modifiye edilmiş geleneksel Wilkinson iki yöllü güç bölücünün iletim hatlarının seri olarak üç kez kaskat bağlanmasıyla oluşturulan iki yöllü tasarım sunulmuştur. Her bağlantı noktasına $100\ \Omega$ izolasyon direnci yerleştirilerek çıkış kapıları arasındaki yüksek izolasyon değeri sağlanmıştır. Burada devrenin merkez frekansı 0.57 GHz'dir. Devrenin boyutları dalga boyu cinsinden $0.79\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ olarak ölçülmüştür. Bu devre tasarımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



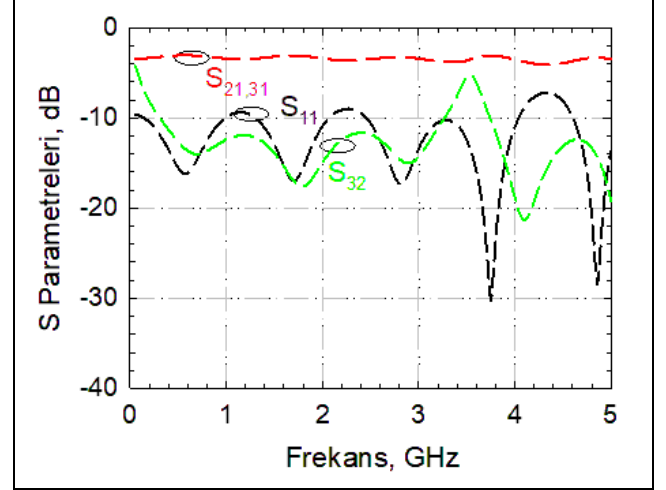
Şekil 6. İki yöllü üç segmentli devre modeli.

Figure 6. Two-way circuit model cascaded three times.

Tasarıma ait 0.11-1.05 GHz frekans aralığında ortalama geri dönüş kaybı -12.65 dB, iletim kaybı -3.22 dB ve izolasyon değeri -11.80 dB'dir. Bu tasarıma ait iletim kaybını, geri dönüş kaybını ve izolasyon değerini ifade eden S parametreleri Şekil 7'de verilmiştir.

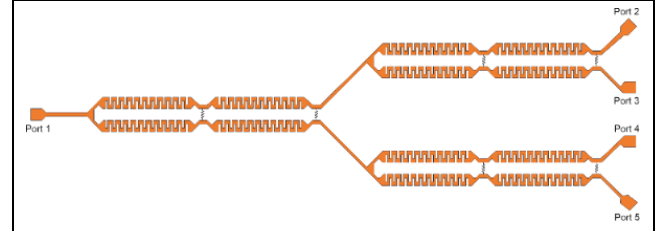
2.2 İki kez ardışık bağlı dört yöllü Wilkinson güç bölücü

İletim hatlarının ardışık olarak iki kez kaskat bağlanmasıyla dört yöllü Wilkinson Güç Bölücü tasarlanmıştır. Önceki bölümlerde olduğu gibi, bu bölümde de menderes yapı ile iletim hatları kullanılmaktadır. Tasarlanan dört yöllü Wilkinson Güç Bölücü Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 7. İki yöllü üç segmentli devreye ait S parametrelerinin frekansa göre değişim grafiği.

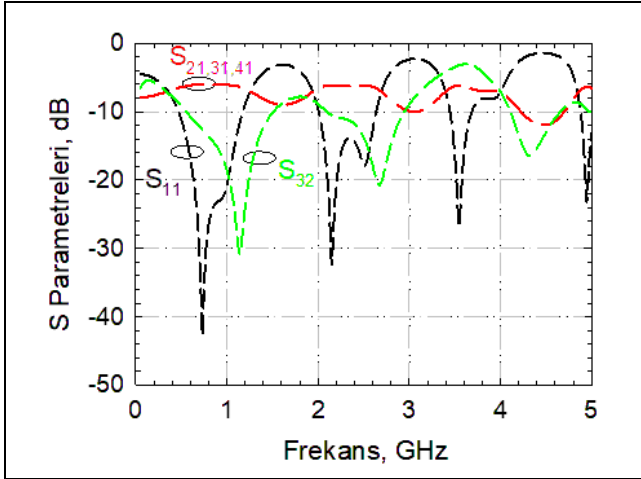
Figure 7. Frequency response of S parameters of three times cascaded.



Şekil 8. Dört yöllü iki segmentli devre modeli.

Figure 8. Four-way circuit model connected twice consecutively.

Şekilden görüldüğü üzere, Port 1'den sonra menderes yapı ile iletim hatları iki kez kaskat bağlanmış, ardından hatlar iki yola ayrılmış ve sonra tekrar iki kez ardışık olarak bağlanmıştır. Her bağlantı noktasına $100\ \Omega$ 'luk izolasyon direnci yerleştirilerek çıkış portları arasındaki yüksek izolasyon sağlanmaktadır. Tasarlanan devrenin simülasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu devrenin merkez frekansı 0.73 GHz'dir. Devrenin boyutları dalga boyu cinsinden $1.1\lambda_g \times 0.31\lambda_g$ olarak ölçülmüştür. 0.47-1.17 GHz frekans aralığında ortalama geri dönüş kaybı -20.66 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve çıkış kapıları arasındaki izolasyon değeri -15.87 dB'dir.

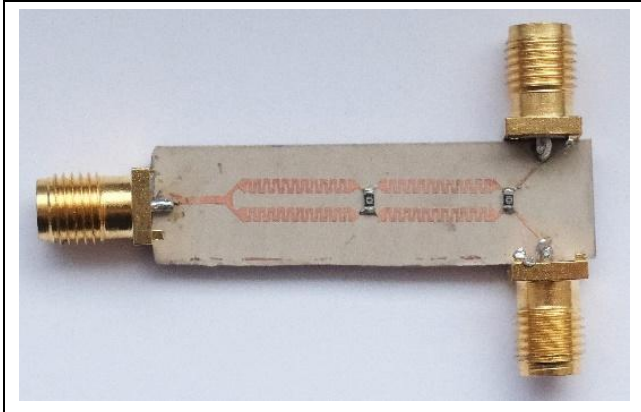


Şekil 9. Dört yollu iki segmentli devre modeline ait S parametrelerinin frekansa bağlı değişim grafiği.

Figure 9. Frequency response of S parameters of the four-way circuit model cascaded.

3 Deneysel çalışmalar

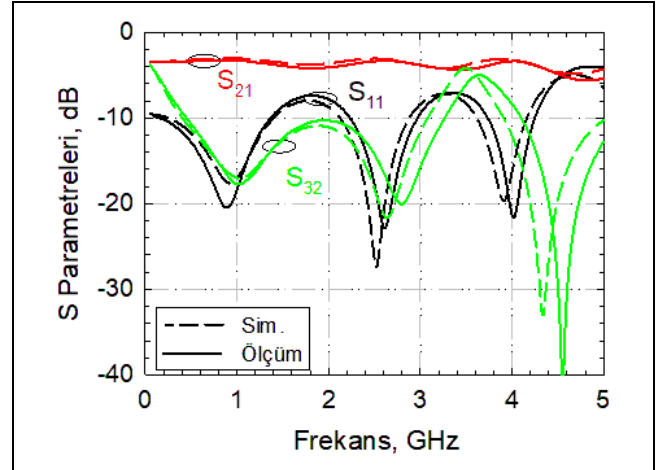
Tasarımların doğruluğunu doğrulamak amacıyla tüm devreler imal edilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Keysight PNA N5222A Ağ Analizörü kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan cihaz dört portlu olduğu için, dört yollu devrenin boşa kalan portu 50 Ω uyumlu yük ile sonlandırılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da imal edilen iki kez kaskat bağlanmış iki yollu Wilkinson güç bölücüsünün fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 10. İki yollu iki segmentli yapının imal devre fotoğrafı.

Figure 10. Photograph of a two-way circuit cascaded twice.

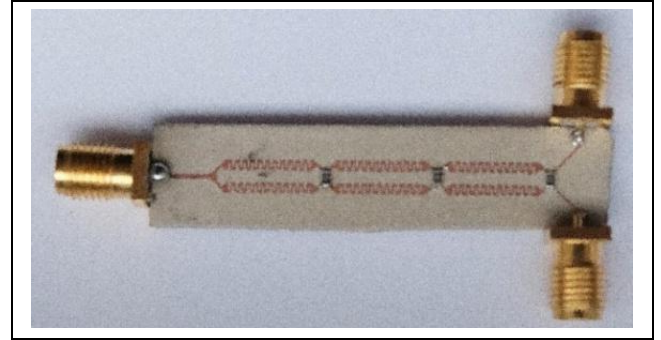
Şekil 11'de ise imal edilen devreye ait ölçüm ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, iletim kaybı simülasyon değerleriyle uyumlu olarak 0.17-1.36 GHz frekans bandında ortalama -3.40 dB, geri dönüş kaybı ise aynı frekans bandında ortalama -14.45 dB, çıkış portları arasındaki izolasyon değeri ise ortalama 13.25 dB olarak ölçülmüştür. Bu devrenin kısmi bant genişliği, ilgili frekans bandında -10 dB için %155.56, 2.24-2.97 GHz frekans bandında ise geri dönüş kaybı ortalama -15.45 dB, iletim kaybı -3.5 dB, izolasyon değeri ise 15.93 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandındaki kısmi bant genişliği ise %28.02 olarak hesaplanmıştır. Menderes yapılı iletim hatları sayesinde geleneksel Wilkinson güç bölücüsüne kıyasla yaklaşık olarak %18 oranında bir boyut küçültme sağlanmıştır.



Şekil 11. İki yollu iki segmentli yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları.

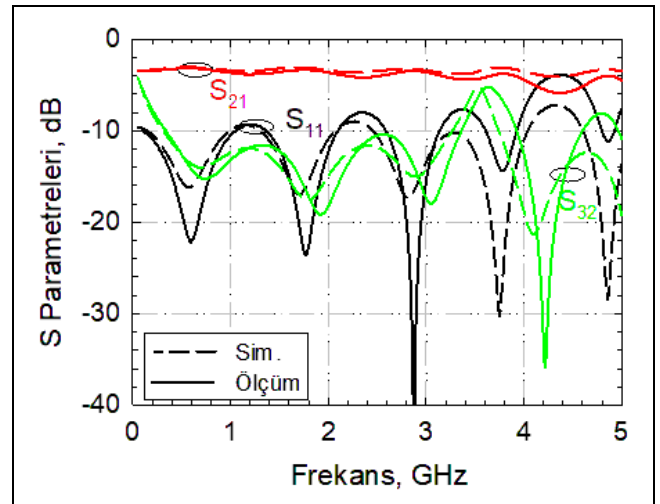
Figure 11. Frequency response of simulation and measurement results of two times cascaded two-way circuit.

Şekil 12'de, üç kez ardışık olarak bağlanmış iki yollu devrenin imal edilmiş fotoğrafı verilmiştir. Bu devreye ait S parametrelerinin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 12. İki yollu üç segmentli yapının imal devre fotoğrafı.

Figure 12. Photograph of three times cascaded two-way circuit.

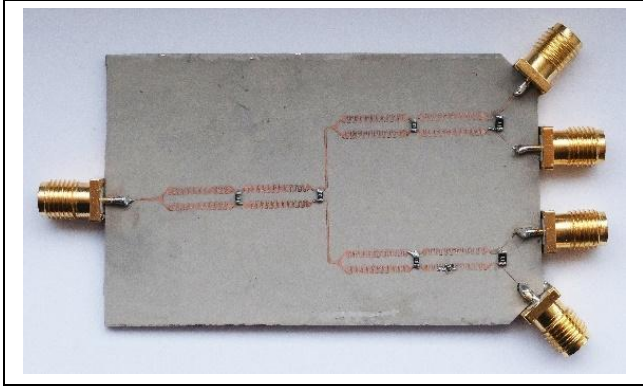


Şekil 13. İki yollu üç segmentli yapıya ait ölçüm ve simülasyon sonuçları.

Figure 13. Frequency response of measurement and simulation three times cascaded two-way circuit.

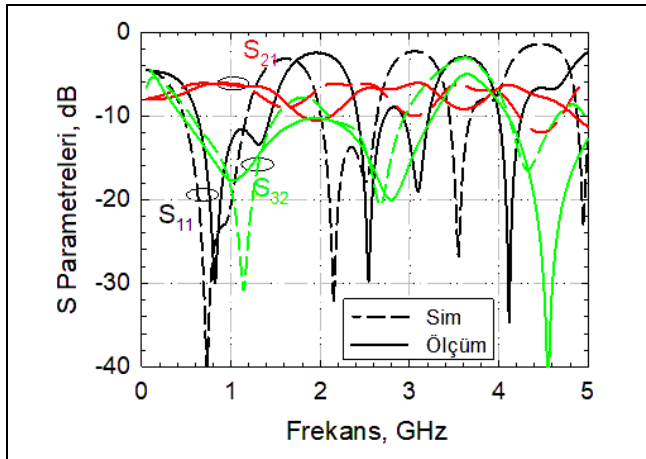
0.11-1.05 GHz frekans bandında iletim kaybı -3.38 dB, geri dönüş kaybı -14.73 dB ve izolasyon değeri -12.20 dB'den daha iyi olarak ölçülmüştür. İmal edilen devrenin izolasyon dirençlerinin konumlarının farklı olmasından dolayı izolasyon değerlerinde frekans bandında kaymalar gözlemlense de, ölçüm sonuçlarının tasarlanan devre ile iyi derecede örtüştüğü gözlenmektedir. Bu frekans bandında, 10 dB için kısmi bant genişliği %162.07 olarak hesaplanmıştır. 1.36-2.10 GHz frekans bandında ortalama iletim kaybı -3.54 dB, geri dönüş kaybı -15.21 dB, izolasyon değeri ise -15.34 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandında, kısmi bant genişliği %42.78 olarak hesaplanmıştır. 2.59-3.14 GHz frekans bandında, ortalama iletim kaybı -3.65 dB, geri dönüş kaybı -17.52 dB, izolasyon değeri ise -14.03 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandında, kısmi bant genişliği %19.20 olarak hesaplanmıştır. Bu devre, geleneksel Wilkinson güç bölücüsüne kıyasla %25 oranında bir minyatürizasyon sağlamıştır.

İki kez ardışık olarak bağlanmış dört yollu devrenin imal edilmiş fotoğrafı Şekil 14'te verilmiştir. Bu devreye ait bazı S parametreleri Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 14. Dört yollu iki segmentli yapının imal devre fotoğrafı.

Figure 14. Photograph of a four-way circuit cascaded twice.



Şekil 15. Dört yollu iki segmentli yapının ölçüm ve simülasyon sonuçları.

Figure 15. Frequency respond of measurement and simulation results of the four-way circuit cascaded twice.

Devrenin simetrik olmasından dolayı yalnızca bazı S parametreleri verilmiştir. 0.47-1.17 GHz frekans bandında ortalama geri dönüş kaybı -20.65 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve izolasyon değeri de -15.87 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandında kısmi bant genişliği %85.37 olarak hesaplanmıştır.

2.01-2.63 GHz frekans bandında ise, ortalama geri dönüş kaybı -16.74 dB, iletim kaybı -6.26 dB ve izolasyon değeri -12.17 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandındaki kısmi bant genişliği ise %26.72 olarak hesaplanmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada iki ve üç kez ardışık bağlı iki yollu devreler ile iki kez ardışık bağlı dört yollu devre tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan devrelerin boyutları, iki yollu devreler için iki kez ardışık bağlı ve üç kez ardışık bağlı olanlar için sırasıyla $0.56\lambda_g \times 0.18\lambda_g$, $0.79\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ ve dört yollu iki kez ardışık bağlı devre için $1.1\lambda_g \times 0.31\lambda_g$ olarak ölçülmüştür. İki kez ardışık bağlı iki yollu devrenin birinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -14.45 dB, iletim kaybı -3.40 dB ve izolasyon değeri -13.25 dB; ikinci bandında ise geri dönüş kaybı -15.45 dB, iletim kaybı -3.50 dB ve izolasyon değeri -15.93 dB olarak ölçülmüştür. Üç kez ardışık bağlı iki yollu devrede birinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -14.73 dB, iletim kaybı -3.38 dB ve izolasyon değeri -12.20 dB; ikinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -15.21 dB, iletim kaybı -3.54 dB ve izolasyon değeri -15.34 dB; üçüncü bandında ise ortalama geri dönüş kaybı -17.52 dB, iletim kaybı -3.65 dB ve izolasyon değeri -14.03 dB olarak ölçülmüştür. Dört yollu, iki kez ardışık bağlanmış yapıda ise birinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -20.65 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve izolasyon değeri -16.74 dB; ikinci bandında ise geri dönüş kaybı -16.74 dB, iletim kaybı -6.26 dB ve izolasyon değeri -12.17 dB olarak ölçülmüştür. Tasarlanan devreler imal edilmiş ve simülasyon sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir. İmal edilen devrelerle tasarlanan devrelerin S parametreleri iyi bir şekilde örtüşmektedir. Tasarlanan devrelerin özellikle anten dizileri başta olmak üzere birçok mikrodalga devresinde kullanılacağı düşünülmektedir. Tablo 1'de diğer çalışmalarla bu çalışma arasındaki kıyaslamalar verilmiştir.

5 Conclusions

In this study, designs for two-way circuits connected in series twice, three times, and four-way circuits connected in series twice have been developed. The dimensions of the designed circuits were measured as $0.56\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ for the two-way circuit connected twice, $0.79\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ for the three times connected two-way circuit, and $1.1\lambda_g \times 0.31\lambda_g$ for the four-way circuit connected twice. For the two-way circuit connected twice, the average return loss in the first band was -14.45 dB, insertion loss -3.40 dB, and isolation value better than -13.25 dB. In the second band, the return loss was -15.45 dB, insertion loss -3.50 dB, and isolation value better than -15.93 dB. For the two-way circuit connected three times, the average return loss in the first band was -14.73 dB, insertion loss -3.38 dB, and isolation value -12.20 dB. In the second band, the return loss was -15.21 dB, insertion loss -3.54 dB, and isolation value -15.34 dB. In the third band, the return loss was -17.52 dB, insertion loss -3.65 dB, and isolation value -14.03 dB. In the four-way circuit connected twice, the average return loss in the first band was -20.65 dB, insertion loss -6.17 dB, and isolation value -16.74 dB. In the second band, the return loss was -16.74 dB, insertion loss -6.26 dB, and isolation value -12.17 dB. The designed circuits were manufactured, and it was observed that the simulation results were consistent with the measurement results. The S parameters of the manufactured circuits closely matched those of the designed circuits. It is anticipated that the designed circuits will be used in various microwave applications, particularly in antenna arrays.

Tablo 1. Önceki çalışmalar ile kıyaslamalar.

Table. 1. Comparisons with previous studies.

	S ₁₁	S ₂₁	S ₃₂	Alan (mm ²)	Çalışma frekansı (GHz)
Bu çalışmada	17.52 dB	-3.66 dB	14.03 dB	29.6*10.5	0-5
Referans [11]	36 dB	-3.16 dB	16 dB	295.6	0-3
Referans [20]	10 dB	-3.09 dB	13.56 dB	22*15	3.1-10.6
Referans [21]	25	-3.7	25	6.33*22.1	1-4

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Mehmet Çakır, literatür taraması, devre imalatı ve ölçümü; Ceyhan Karpuz, simülasyon, tasarımın ortaya koyulması, teorik çalışmalar, konularında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

- [1] Xu X, Tang X. "A design approach for dual-band wilkinson power divider with two pairs of coupled-line sections". *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 45, 81-87, 2014.
- [2] Wilkinson EJ. "An N-way hybrid power divider". *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 8(1), 116-118, 1960.
- [3] Pozar DM. *Microwave Engineering*. 3rd ed. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [4] Imani MS, Hayati M. "Compact Wilkinson power divider with extensive suppression of harmonics, using a combination of trapezoidal, circular and rectangular resonators". *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 139, 1-10, 2021.
- [5] Karimi G, Menbari S. "A novel Wilkinson power divider using lowpass filter with harmonics suppression and high fractional bandwidth". *Microelectronics Journal*, 71(6), 61-69, 2018.
- [6] Moloudian G, Soltani S, Bahrami S, Buckley JL, O'Flynn B, Lalbakhsh A. "Design and fabrication of a Wilkinson power divider with harmonic suppression for LTE and GSM applications". *Scientific Reports*, 13(1), 1-15, 2023.
- [7] Liu Y, Sun S, Zhu L. "Design of n-way wideband filtering power dividers with good port-port isolation". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69(7), 3298-3306, 2021.
- [8] Roshani S, Koziel S, Roshani S, Mehr FSH, Szczepanski S. "Design and implementation of a dual-band filtering wilkinson power divider using coupled T-shaped dual-band resonators". *Energies*, 15(3), 1-12, 2022.
- [9] Abdelrahman BM, Ahmed HN, Nashed AI. "A novel tri-band wilkinson power divider for multiband wireless applications". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(10), 891-893, 2017.
- [10] Younesiraad H, Bemani M, Fozi M. "A novel fully planar quad band Wilkinson power divider". *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 74, 75-82, 2017.
- [11] Li JL, Qu SW, Xue Q. "Capacitively loaded Wilkinson power divider with size reduction and harmonic suppression". *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(11), 2737-2739, 2007.
- [12] Lotfi S, Roshani S, Roshani S. "Design of a miniaturized planar microstrip Wilkinson power divider with harmonic cancellation". *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(6), 3126-3136, 2020.
- [13] Kumar M, Islam SKN, Sen G, Parui SK, Das S. "Miniaturization of dual-band Wilkinson power divider using dual transmission line". *IEEE Applied Electromagnetics Conference*, Aurangabad, India, 19-22 December 2017.
- [14] Phan HP, Vuong TP, Nguyen TT, Luong MH, Iitsuka Y, Hoang MH. "Simple miniaturized Wilkinson power divider using a compact stub structure". *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 14-16 October 2015.
- [15] Imani MA, Shama F, Alirezapoori M, Haghiri S, Ghadrddan A. "Ultra-Miniaturized wilkinson power divider with harmonics suppression for wireless applications". *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 33(14), 1920-1932, 2019.
- [16] Karpuz C, Gorur AK, Cakir M, Cengiz A, Gorur A. "Compact Wilkinson power dividers based on narrow slits loaded transmission lines". *IEEE Radio and Wireless Symposium*, Las Vegas, NV, USA, 22-25 January 2023.
- [17] Karpuz C, Cakir M, Gorur AK, Gorur A. "Design of n-way Wilkinson power dividers with new input/output arrangements for power-halving operations". *Applied Science*, 13(11), 1-21, 2023.
- [18] Watkins GT. "A 1:8 cascaded Wilkinson power divider". *44th European Microwave Conference*, Rome, Italy, 6-9 October 2014.
- [19] Forte GGS, Fontgalland G, Silva HS. "Polarization detection of electromagnetic waves using cascaded wilkinson power dividers". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30(8), 833-835, 2020.
- [20] Osman SAM, El-Tager AME, Abdelghany FI, Hafez IM. "Two-Way Modified Wilkinson Power Divider for UWB Applications Using Two Sections of Unequal Electrical Lengths". *Progress in Electromagnetics Research C*, 68, 221-233, 2016.
- [21] Da K, Yi-Hsin P, Hsin-Hao C. "A compact wilkinson power divider/combiner with two-section coupled lines for harmonics suppression". *2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, Kaohsiung, Taiwan, 4-7 December 2012.