



Tümleyen Açık Halka Rezonatör içeren Kaskat Bağlı Yarı-Mod Dielektrik Tabanda Bütünleştirilmiş Dalga Kılavuzu Yapıları Kullanılarak Ultra Geniş-Band Filtre Tasarımı

An Ultra-Wideband Filter Design by Using the Cascading Half-Mode Substrate Integrated Waveguide with Complementary Open Loop Resonator

Pınar Öztürk Özdemir¹, Ceyhan Karpuz², Emine Us³

¹Hava Harp Okulu
Milli Savunma Üniversitesi
oozdemir33@hho.msu.edu.tr

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Pamukkale Üniversitesi
ckarpuz@pau.edu.tr

³Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Milli Savunma Üniversitesi
eus@hho.msu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga-kılavuzu yapıları üzerine eklenen tümleyen açık halka rezonatörler aracılığıyla gerçekleştirilen ultra geniş-band band geçiren filtre tasarımı sunulmaktadır. Önerilen konfigürasyonda, geleneksel dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları ile benzer alan dağılımına sahip olmaları nedeniyle geleneksel yapılar yerine kullanılan yarı-mod devreler toplam boyutu yarı yarıya azaltarak oldukça önemli bir boyut indirgeme sağlamaktadır. Ayrıca yarı-mod devreye eklenen tümleyen açık halka rezonatör ile ultra geniş bir geçme bandı elde edilmektedir. Bir iletim hattı aracılığıyla önerilen devrelerin birbirine kaskat olarak bağlanması ile geçme bandı içerisinde sağlanan çoklu mod özelliği sayesinde band daha seçici bir hale getirilmektedir. Toplam 27.1 mm x 10.4 mm boyutlarında üretilen ve 3.75 GHz'den 8.6 GHz'e uzanan geniş bir frekans aralığını kapsayan devre yaklaşık olarak % 77.6'lık kısmı band genişliğine sahiptir.

Abstract

In this paper, the design of an ultra wide-band bandpass filter is presented by using the complementary open-loop resonators implemented on the half-mode substrate integrated waveguide structures. In the proposed configuration, the half-mode substrate integrated circuits, which are used instead of conventional substrate integrated circuits since they have similar field distribution with the conventional structures, provide a very significant size reduction by reducing the overall dimensions by about a half. In addition, an ultra-wide passband is obtained with the complementary open loop resonator implemented to the half-mode circuit. It is seen that the multi-

mode in the passband is acquired by using the proposed structures that are cascaded to each other by means of a transmission line. The wide-passband becomes more selective due to the multi-mode. The produced circuit has a total dimension of 27.1 mm x 10.4 mm. The circuit, covering a wide frequency range from 3.75 GHz to 8.6 GHz, has a fractional bandwidth of 77.6% approximately.

1. Giriş

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda alternatif filtre yapıları olarak sıkça karşılaşılan dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları, düzlemsel iletim hatları ile dikdörtgen dalga kılavuzlarının pek çok iyi özelliklerinin bir araya getirilmiş hali olarak bilinmektedir [1]. Bu yapılar, geleneksel dikdörtgen dalga kılavuzlarının yüksek performans özelliklerini korumanın yanında, düşük maliyet ve kolay üretim olanakları sağlamaktadır. Literatürden iyi bilindiği üzere [2, 3], iletim yönü boyunca yerleştirilen simetrik düzlem bir manyetik duvara eşdeğer olmaktadır. Bu nedenle kesme düzlemi bir manyetik duvar ise Dielektrik-tabanda Bütünleştirilmiş Dalga-kılavuzu (DBD) yapısının yarısı, ana yapıdaki alan dağılımını herhangi bir değişim olmaksızın korumaktadır. Bu nedenle DBD'ler hayali bir manyetik duvar aracılığıyla ikiye bölündüğünde her bir yarı, Yarı-Mod Dielektrik-tabanda Bütünleştirilmiş Dalga-kılavuzları (YMDBD) haline gelmektedir. Bu özelliği nedeniyle YMDBD'ler geleneksel DBD'ler ile karşılaştırıldığında çok daha kompakt boyutlara sahip olmakta, devrelerin karmaşıklığı, maliyetleri büyük ölçüde azaltılmakta ve ayrıca düzlemsel devrelere daha kolay entegre edilebilmektedirler [4, 5]. [4] nolu çalışmada yatay asimetric basamak tipi empedans rezonatörler aracılığıyla geliştirilen tümleyen bölünmüş halka rezonatörler yarı-mod DBD'ler üzerine dahil edilerek bir birim hücre tanıtılmıştır.

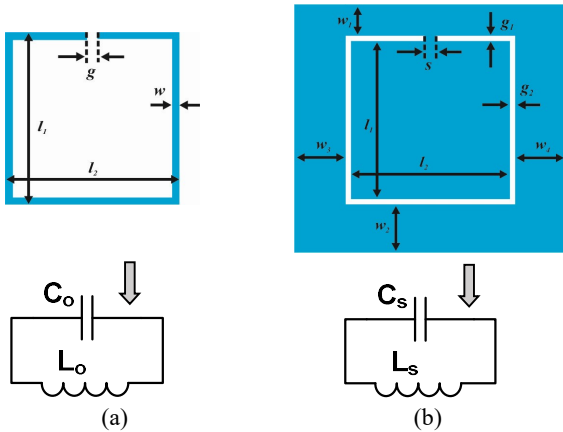
Önerilen birim hücre aynı yüzey alanını kapsayan geleneksel yapılara göre daha düşük rezonans frekansına sahip olması nedeniyle önemli bir minyatürizasyon sağlamıştır. Bir diğer çalışmada ise iki adet modifiye edilmiş tümleyen bölünmüş halka rezonatörler incelenmiştir. Daha yüksek indüktans ve kapasite sağlayan bu rezonatörlerin yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları üzerine yüklenmesi ile oldukça minyatür boyutlara ulaşılmış ve oldukça geniş tutma bandına sahip bir band geçiren filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir [5].

Bu çalışmada, kaskat bağlı tümleyen Açık Halka Rezonatör içeren Yarı-Mod Dielektrik-tabanda Bütünleştirilmiş Dalga-kılavuzu (AHR-YMDBD) yapıları kullanılarak ultra geniş-band filtre tasarımı önerilmektedir. Önerilen kaskat bağlı yarı-mod dielektrik-tabanda bütünleştirilmiş dalga-kılavuzu yapısında tümleyen açık halka rezonatörün kullanımı, ikinci harmoniğin bulunduğu frekans değerini daha aşağı değerlere çekmek suretiyle yansıma sıfırlarını birbirine yaklaştırarak çok modlu ultra geniş-band frekans cevabının elde edilmesini sağlarken aynı zamanda da ikinci harmoniğin de kolay bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, YMDBD kullanılması nedeniyle daha kompakt bir boyut elde edilmektedir. Tasarımda bir transmisyon hattı aracılığıyla iki açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik-tabanda bütünleştirilmiş dalga-kılavuzu yapısının kuplajlanması ile yansıma sıfırlarının sayısı arttırılmıştır. Böylece elde edilen filtre devresinin daha yüksek bir seçiciliğe sahip olması sağlanmıştır.

2. Açık Halka Rezonatör İçeren Yarı -Mod Dielektrik Tabanda Bütünleştirilmiş Dalga Kılavuzu Yapıları

2.1. Eşdeğer Devre Modeli

Şekil 1'de geleneksel Açık Halka Rezonatör (AHR) ve dualite teoremine dayalı olarak bu rezonatörlerden türetilmiş açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları (AHR-YMDBD) için eşdeğer devre modelleri gösterilmektedir [6, 7].



Şekil 1: (a) Açık halka rezonatör ve (b) tümleyen açık halka rezonatör konfigürasyonları ve eşdeğer devre modelleri.

Şekil 1(a)'da gösterilmekte olan eşdeğer devre modelinde C_o ve L_o sırasıyla geleneksel açık halka rezonatörün açık devre sonlandırılmış uçları arasındaki kapasite etkisini ve rezonatörü

oluşturan metal halkanın indüktansını temsil etmektedir. Literatürden iyi bilindiği üzere C_o açık halka rezonatörlerde birbirini gören uçlar arasındaki kapasiteyi temsil etmek için kullanılır ve π eşdeğeri ile temsil edilen süresizlik formülüyle hesaplanabilmektedir [8]. L_o ise şerit indüktörler için kullanılan indüktans formülü aracılığıyla kolaylıkla hesaplanabilmektedir [9]. Şekil 1(b)'de verildiği üzere AHR-YMDBD'lerin eşdeğer devre modeli de birbirine paralel bağlı bir indüktör ve kapasitör kullanılarak gerçekleştirilmektedir. AHR'ler için verilen devre parametrelerinin (C_o , L_o) dualite teoreminden faydalanılarak AHR-YMDBD'ler için kullanılacak olan devre parametreleri (C_s , L_s) ile ilişkisi Denklem (1) ve (2)'de verilmektedir [5].

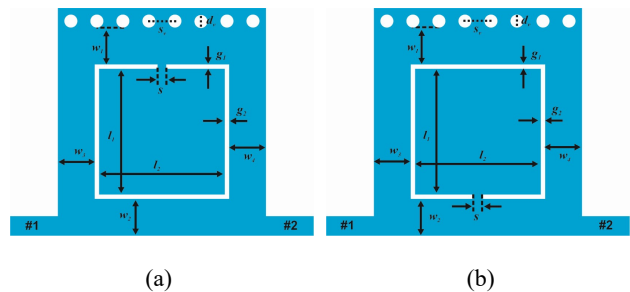
$$C_s = 4\epsilon_0 L_o / \mu_0 \quad (1)$$

$$L_s = \mu_0 C_o / 4\epsilon_0 \quad (2)$$

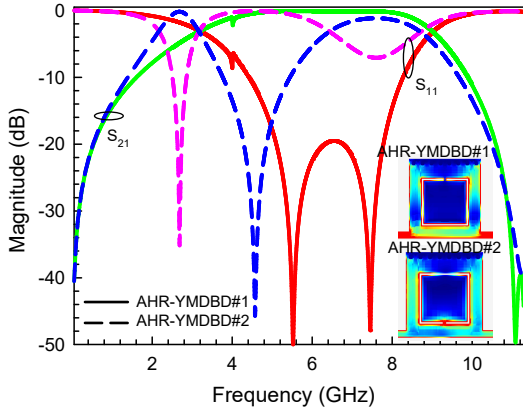
Denklemlerde ϵ_0 ve μ_0 sırasıyla serbest uzay ortamının bağlı elektriksel ve manyetik geçirgenlik parametrelerini temsil etmektedir. Denklem (1) ve (2) incelendiğinde dualite teoreminden beklendiği üzere, her iki yapının rezonans frekansının aynı olduğu kolayca çıkarılabilmektedir. Bu durumda AHR-YMDBD yapılarında yarı uzunluğu ve genişliğine bağlı olarak eşdeğer devre modellerinde kullanılan paralel rezonans devrelerindeki indüktans ve kapasite değerlerinin değişecek olması nedeniyle rezonans frekansının da değişim göstereceği açıktır.

2.2. AHR-YMDBD Konfigürasyonu

Önerilen tümleyen açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu ile elde edilebilen, bağıl dielektrik katsayısı 3.55 ve yüksekliği 0.813 mm olan Rogers RO4003C tabaka üzerine yerleştirilmiş iki farklı konfigürasyon Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere önerilen devre yapılarında tümleyen açık halka rezonatörün yarı-mod devreye bağlantısının yapıldığı indüktif hat parçaları AHR-YMDBD#1 için üst ve AHR-YMDBD#2 yapısında ise alt yol üzerinde yer almaktadır. Yarı-mod dalga kılavuzu yapılarında üst tabakada yer alan iletken metal üzerine şekilde gösterildiği üzere farklı yönlerde yerleştirilen tümleyen açık halka yapıları alan dağılımını etkileyeceğinden iletim farklılıkları oluşacak ve geçme bandlarının karakteristiklerindeki değişim kaçınılmaz hale gelecektir. Önerilen konfigürasyonlar için tam dalga elektromanyetik simülatör aracılığıyla [10] elde edilen frekans cevapları ve geçme bandlarının merkez frekansında oluşan alan dağılım grafikleri Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 2: Tümleyen açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu konfigürasyonu a) AHR-YMDBD#1 b) AHR-YMDBD#2



Şekil 3: AHR-YMDBD#1 ve AHR-YMDBD#2 için frekans cevabı ve alan dağılımı grafikleri

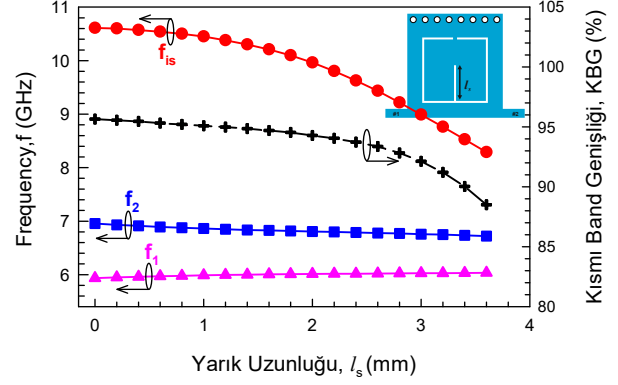
Önerilen tasarımlarda kullanılan tüm fiziksel parametreler Çizelge 1’de verilmektedir. Frekans cevapları incelendiğinde tümleyen açık halkanın dalga kılavuzu yapısına toprak düzleme geçiş bağlantılarını sağlayan metal deliklerin bulunduğu üst koldan indüktif bir hat parçası ile bağlanması durumunda ultra geniş-band band geçiren filtre karakteristiği gözlemlenirken, bağlantının alt koldan yapılması durumunda ortaya çıkan bir iletim sıfırı ile iki geçme bandı meydana gelmektedir. İletim karakteristikleri arasındaki bu fark, tümleyen açık halka yapılarını yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapılarına bağlamak amacıyla kullanılan hat parçası üzerinden açıklanabilir. Şekil 3’de verilmekte olan alan dağılımları dikkatli olarak incelendiğinde yarıkların bulunduğu bölgelerde daha yüksek yoğunluğa ulaşmakta olduğu ve AHR-YMDBD#2 devresinde yer alan indüktif hat parçasında ise bu yoğunluğun maksimum seviyeleri ulaştığı görülebilmektedir. Literatürden de iyi bilindiği üzere [11]; bu noktada oluşan indüktans değerinin artması iletim sıfırı ve temel mod frekansının AHR-YMDBD#1 devresine göre daha aşağı frekanslara kaymasına neden olmaktadır.

Çizelge 1: AHR-YMDBD#1 ve AHR-YMDBD#2 için fiziksel parametreler (Tüm birimler mm cinsinden alınmalıdır)

w_1	l_1	g_1	s	s_v	d_v
1.7	5.8	0.2	0.4	1.2	0.6

(AHR-YMDBD#1 ve AHR-YMDBD#2 için boyutlar $w_1=w_2=w_3=w_4$, $l_1=l_2$, $g_1=g_2$ olacak şekilde belirlenmiştir.)

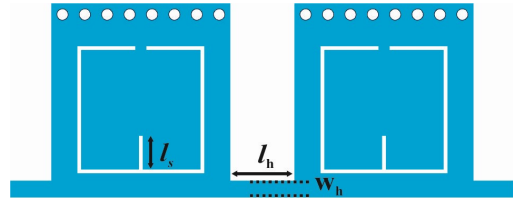
Tasarımın ana parametreleri olan geri dönüş kaybı seviyesi ve araya girme kaybı seviyesi, merkez frekansı, harici kalite faktörü, band genişliğinin filtrenin fiziksel yapısı ile ilişkisinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bir önceki bölümde verilen eşdeğer devre modelinden de görüleceği üzere bu parametrelerin kontrol edilmesini sağlayan fiziksel parametrelerden biri de yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları üzerine eklenen açık halka rezonatörlerin genişliği ve uzunluğudur. Şekil 4’de verildiği üzere AHR-YMDBD#1 devresinde orta noktadan eklenecek bir indüktif yarı arcacılığıyla toplam açık halka boyutu artırılabilir. Eklenen indüktif yarı arcacılığın uzunluğunu temsil eden l_s parametresiyle yansıma ve iletim sıfırlarının konumunu ve



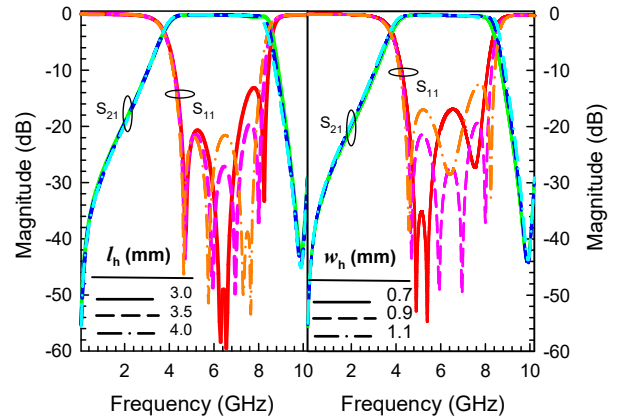
Şekil 4: Yarık uzunluğu (l_s) değişiminin frekans cevabına etkisi y dolayısıyla band genişliğini kontrol edebilmek mümkündür. Şekil 4’de l_s parametresine bağlı olarak kısmi band genişliği, yansıma sıfırları başka bir deyişle mod frekansları (f_1 , f_2) ve iletim sıfırının (f_{1s}) konumunun verildiği grafikten de görüleceği üzere geçme bandının sağ tarafında yer alan iletim sıfırının konumuna bağlı olarak sağ taraftan daha hızlı değişmektedir. Aynı zamanda yansıma sıfırlarının birbirine yaklaşarak uzaklaşması nedeniyle geri dönüş kaybı seviyesi de ayarlanabilmektedir.

3. Ultra Geniş-Band Band Geçiren Filtre Tasarımı

Şekil 5’de bir iletim hattı aracılığıyla birbirine kaskat olarak bağlanmış iki adet AHR-YMDBD içeren ultra geniş-band band geçiren filtre devresi gösterilmektedir. Geniş-bandlı bir tasarım



Şekil 5: Kaskat bağlı tümleyen açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga-kılavuzu yapıları kullanılarak tasarlanan ultra geniş-band filtre devresi

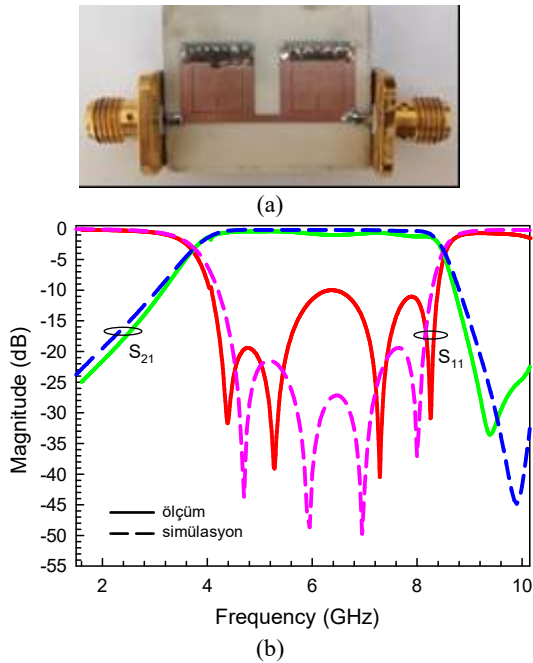


Şekil 6: Önerilen ultra geniş-band filtre devresi için l_h ve w_h parametrelerinin frekans cevabına etkisi

hedeflendiğinden konfigürasyonda kullanılan rezonatörler AHR-YMDBD#1 topolojisine dayalı olarak elde edilmiştir. Şekil 3'den görüleceği üzere konfigürasyonda kullanılmak üzere tasarlanan rezonatör (AHR-YMDBD#1) iki yansıma sıfırına sahip bir ultra geniş-band karakteristiği sergilemektedir. Bununla birlikte giriş/çıkış portları arasına yerleştirilen bir iletim hattı aracılığıyla kaskat olarak bağlanan iki özdeş yarı-mod rezonatör yardımıyla Şekil 6'dan da gözlemlenebileceği üzere dört yansıma sıfırı (dört mod) oluştuğu görülmektedir. Başka bir deyişle kaskat bağlantı aracılığıyla iki mod daha elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu durum çoklu mod özelliği sayesinde daha yüksek bir seçiciliğin elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Özetle bağlantıyı sağlayan iletim hattının genişliği ve uzunluğuna bağlı olarak dört yansıma sıfırının (dört modun) konumu ve band genişliği Şekil 6'da verildiği gibi değiştirilebilmektedir. Önerilen konfigürasyonlarda kullanılan özdeş rezonatörlere ait boyutlar, $w_1=1.4$ mm, $w_2=1.3$ mm, $w_3=w_4=1.4$ mm, $l_1=l_2=6.4$ mm, $g_1=g_2=0.2$ mm, $s=0.6$ mm, $s_v=1.2$ mm, $d_v=0.6$ mm, $l_s=1.8$ mm'dir.

4. Deneysel Sonuçlar

Şekil 7(a)'da gösterilen kaskat bağlı tümleyen açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları kullanılarak tasarlanan ultra geniş-band band geçiren filtre devresi bağlı dielektrik geçirgenliği 3.55 ve yüksekliği 0.813 mm olan Rogers RO4003C malzeme üzerinde üretilmiştir. Önerilen devrenin toplam boyutu $0.76\lambda_g \times 0.29\lambda_g$ olarak belirlenmiştir. λ_g merkez frekansında ölçülen dalga boyunu temsil etmektedir. Üretilen devrenin ölçümleri Keysight N5222A PNA Network Analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarından elde edilen frekans cevaplarının karşılaştırması Şekil 7(b)'de verilmektedir.



Şekil 7: a) Kaskat bağlı tümleyen açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik-tabanda bütünleştirilmiş dalga-kılavuzu yapıları kullanılarak üretilen ultra geniş-band band geçiren filtre devresi b) Önerilen devre için simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 2: Önerilen ultra geniş-band devre ile literatürde yer alan diğer çalışmaların karşılaştırılması

Ref.	KBG (%)	Üretim Türü	Araya Girme Kaybı Seviyesi (dB)	Boyut (λ_g^2)
[12]	35.5	Katlanmış DBD	1.2	0.523
[13]	113	Yarı-mod DBD	< 1.77	0.574
[14]	58.1	Yarı-mod DBD	< 1.1	0.323
Önerilen devre	77.6	Yarı-mod DBD	< 1.2	0.22

Ölçüm sonuçlarından da görüleceği üzere geçme bandı içerisinde araya girme kaybı seviyesi -1.2 dB'inin altına düşmemektedir. Literatürde açık halka rezonatör içeren yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları kullanılarak tasarlanan ultra geniş-band performanslı çalışmalara pek rastlanmamakla birlikte önerilen ultra geniş-band filtre devresinin incelenen çalışmalar içerisinde de kompakt boyut, düşük araya girme kaybı ve ultra geniş-band olanağı sunma gibi yönlerden oldukça avantajlı olduğu Çizelge 2'de verilen karşılaştırma tablosundan da açıkça görülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları üzerine eklenen tümleyen açık halka rezonatörler kullanılarak ultra geniş-band band geçiren filtre tasarlanmıştır. Filtre tasarımında kullanılan rezonatörlerin eşdeğer devre modelleri elde edilmiş ve iki farklı konfigürasyona bağlı olarak frekans cevapları incelenmiştir. Önerilen rezonatörlerin giriş ve çıkış portları arasına yerleştirilen bir iletim hattı aracılığıyla birbirlerine kaskat olarak bağlanmasıyla ultra geniş geçme bandı içerisinde dört yansıma sıfırının (dört modun) oluşması sağlanarak daha seçici bir geçme bandı elde edilmiştir. Tasarlanan ultra geniş-band filtre devresi imal edilmiş, ölçümleri yapılarak simülasyon sonuçlarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Önerilen band geçiren filtre literatürde yer alan diğer filtre devrelerine göre oldukça kompakt boyutlu olması ve ultra geniş-band performans sergilemesinin yanı sıra düşük araya girme kaybına da sahiptir.

6. Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 120E101 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] Karpuz, C., Fırat, G.B., Öztürk Özdemir P., Özek, A. and Görür, A., " Design of dual-mode substrate integrated waveguide filter using inductive slots", Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2016, pp. 1-4.
- [2] Hong, W., Liu, B., Wang, Y., Lai, Q. and Tang H., "Half Mode Substrate Integrated Waveguide: A New Guided Wave Structure for Microwave and Millimeter Wave Application", 2006 Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, 2006, pp. 219.

- [3] Liu, B., Hong, W., Wang, Y., Lai Q. and Wu, K., "Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) 3-dB Coupler", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 22-24, Jan. 2007.
- [4] Huang, Y., Shao, Z., Jiang, W., Huang, T. and Wang, G., "Half-mode substrate integrated waveguide bandpass filter loaded with horizontal-asymmetrical stepped-impedance complementary split-ring resonators", *Electronics Letters*, vol. 52, no. 12, pp. 1034-1036, June, 2016.
- [5] Wang, L., He, Z., Huang, Y.M., Ding, S. and Bozzi, M., "HMSIW Cavity Filters Employing Various Complementary Split-Ring Resonators for Microwave Remote Sensing Applications", *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, vol. 34, no. 09, pp. 1391–1398, 2019.
- [6] Rogla, L.J., Carbonell, J. and Boria, V.E., "Study of equivalent circuits for open-ring and split-ring resonators in coplanar waveguide technology", *Microwaves, Antennas & Propagation*, 170-176, 2007.
- [7] Yan, T., Tang, X.H., Xu, Z.X., and Lu, D., "A novel type of bandpass filter using complementary open-ring resonator loaded HMSIW with an electric cross-coupling", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 4, pp. 998-1001, April 2016.
- [8] Hong, J.S. and Lancaster, M.J., *Microstrip filters for RF/Microwave applications*, New York, Wiley, NY, USA, 2001.
- [9] Bahl, I.J., *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*, Artech House, 2003.
- [10] *Sonnet User's Manual, Version 16*, Sonnet Software, North Syracuse, NY, June 2016.
- [11] Dong, Y.D., Yang, T. and Itoh, T., "Substrate Integrated Waveguide Loaded by Complementary Split-Ring Resonators and Its Applications to Miniaturized Waveguide Filters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 9, pp. 2211-2223, Sept. 2009.
- [12] Yang, L., Xu, F., Qiang, J., Liu, S. and Zhan, J., "A novel wideband bandpass filter based on CSRR-loaded substrate integrated folded waveguide", *Int J RF Microw Comput Aided Eng.*, 2020; 30:e22181.
- [13] Li, J., Ding, C., Wei, F. and Wei Shi, X., "Compact UWB BPF with notch band based on SW-HMSIW", *Electronics Letters*, vol. 51, pp. 1338-1339, 2015.
- [14] Wei, F., Yi Wang, X., Yi Kang, H., Li, B. and Wei Liao, D., "Wideband bandpass filter based on U-slotted SW-HMSIW cavities", *Int J RF Microw Comput Aided Eng.*, 2018;28:e21178.