

S-Bant ve C-Bant Uygulamaları için Çift-Bant Dairesel Frekans Seçici Yüzey Tasarımı

Design of Dual-Band Circular Frequency Selective Surface for S-Band And C-Band Applications

Zeynep Sıdıka Seven^{1,2*}, Ömer Faruk Günaydın^{2*}, Mensur Öztürk², Sultan Can²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
TED Üniversitesi
zeynep.seven@tedu.edu.tr

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ankara Üniversitesi
ofgunaydin@ankara.edu.tr, ozturkmnsr@ankara.edu.tr, sultancan@ankara.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, S-bant (2-4 GHz) ve C-bant (4-8 GHz) frekans aralıklarının her ikisinde de bant durdurucu dairesel yapıda çift frekanslı bir frekans seçici yüzey (FSY) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Frekans seçici yüzeyin fiziksel parametrelerinin rezonans frekansına etkileri incelenmiştir. Dairesel yapıdaki frekans seçici yüzeyin yarıçap uzunlukları, iletken yamanın genişliği ve kalınlık değerlerinin malzemenin rezonans frekansı üzerindeki etkileri, 3 boyutlu tam dalga elektromanyetik benzetim programları (CST Studio Suite® ve ANSYS HFSS) aracılığıyla değerlendirilir. Önerilen yapının soğurma ve yansıma özellikleri ile iletim özellikleri değerlendirilmiştir. Tasarımın üretimi ve üretimi gerçekleştirilmiş, benzetim sonuçları ile kıyaslanarak analiz edilmiştir.

Abstract

In this study, a circular frequency selective surface (FSS) with bandstop was developed for both S-band (2-4 GHz) and C-band (4-8 GHz). The effects of the physical parameters of the frequency selective surface on the resonant frequency were investigated. The effects of the radius lengths of the circular frequency-selective surface, the width of the conductive patch and the thickness values on the resonant frequency of the material were evaluated using full-wave 3D electromagnetic simulation programmes (CST Studio Suite® and ANSYS HFSS). The absorption, reflection and transmission properties of the proposed structure were evaluated. Fabrication and production of the design was carried out and analysed by comparison with the simulation results.

1. Giriş

Elektromanyetik kirliliği önleme ve elektromanyetik enterferans azaltmaya yönelik çalışmalarının büyük bir çoğunluğu (milimetre bant dalgası radar algılaması için de önemli olması sebebi ile 2-18 GHz) frekansları aralığında yoğunlaşmaktadır [1],[2] ve [3]. Yüksek performanslı radar algılama için, ışın genişliği ne kadar dar olursa açılabilir çözünürlük o kadar yüksek olur. Özellikle S-bandında (2-4 GHz) ve C-bandında (4-8 GHz) elektromanyetik dalga, radar tespiti için mükemmel bir aday olan en dar ışın genişliğine sahiptir [4]. Ancak S-bandı ve C-bandındaki elektromanyetik dalgaların dalga boylarının uzun olması nedeniyle elektromanyetik soğurucular tarafından kolaylıkla zayıflatılamazlar. Bu nedenle, bu bantlarda yüksek verimli mikrodalga soğurucular geliştirmek hala büyük bir zorluktur.

Anten teknolojisi, radar sistemleri, mikrodalga entegre devreler ve geniş bant haberleşmesi gibi uygulama alanlarındaki teknolojik gelişmeler son yıllarda düzlem dalgalarının gelişmesine göre filtrelenmesi ihtiyacını doğurmuştur. Ayrıca birden fazla frekans bandında çalışabilen uygulamalar yapmak büyük önem taşımaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda FSY'ler son yıllarda ilgi çeken araştırma konuları arasında yerini almaktadır. Frekans seçici yüzeyler kısaca, gelen elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak iletim, yansıma veya soğurma özellikleri gösteren bir filtre veya polarizasyon dönüştürücü olarak görev alan tek veya çok katmanlı periyodik yapı olarak tanımlanmaktadır [5]. Bu periyodik yapılar kullanılan malzemenin elektriksel, fiziksel özellikleri ve birim hücrenin geometrisi gibi birçok parametreye bağlı olarak tasarlanıp istenilen özelliklere sahip yapı optimize edilebilir. Frekans seçici yüzeyler filtreleme çeşitlerine göre alçak geçiren, yüksek geçiren, bant-durdurucu ve bant-geçiren filtre olmak üzere temelde dört ana başlıkta sınıflandırılabilir [6]-[7].

Bant genişliği ve frekans kararlılığı FSY'ler için literatürde karşımıza çıkan en önemli özelliklerdir [8]. Pek çok avantajının

yanında antenler üzerinden alınan sinyalin kazancını, yönlülüğünü ve polarizasyon saflığını arttırdıklarından bu tip uygulama alanlarında sıklıkla tercih edilir [8]. Ayrıca radar kesit alanının (RCS) azaltılmasında yaygın olarak kullanılır. Tasarım biçimlerine göre FSY'ler düzlemsel ve düzlemsel olmayan yapılar olarak iki sınıfa ayrılır. Düzlemsel olarak tasarlanan FSY'ler alt tabakalara işlenebilir ve tek veya çok katmanlı olarak kullanılabilir. Bu avantajının yanında herhangi bir şekil kısıtı olmaksızın istenilen şekilde tasarlanabilir. Malzeme türünü, şeklini ve yönünü seçme özgürlüğü bu yapıların sıklıkla çeşitli alanlarda kullanılmasını sağlamaktadır [9]-[10].

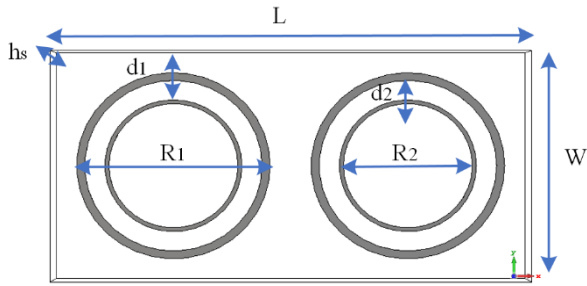
Bu çalışmada, S bant ve C bant uygulamaları için $f_{r1}=2.90$ GHz ve $f_{r2}=4.80$ GHz merkez frekanslarında bant durduran filtre (BSF) tasarlanmıştır.

Tasarlanan FSY'in çift rezonanslı bir yapı göstermesi başlıca amacımız olduğundan yapının iletim özelliğinin tasarım kriterlerimize uygun olduğu gözlenmiştir. Literatürde incelenen diğer FSY yapıları ile kıyaslandığında tasarımın açılabilir, çapraz polarizasyon, bant genişliği ve bant ayrımı özellikleri bakımından iyi bir performans sergilediği görülmektedir [9].

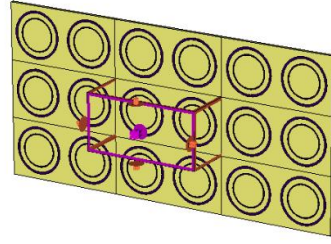
Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde zamanda sonlu farklar yöntemini (Finite difference time domain method (FDTD)) temel alan CST Studio Suite® ve sonlu elemanlar yöntemini (Finite element method (FEM)) ile çözüm yapan ANSYS HFSS 3 boyutlu tam dalga elektromanyetik benzetim programları kullanılarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Program sonuçları hem WR229 dalga kılavuzu ve network analizörü aracılığıyla gerçekleştirilen deneysel ölçümler ile hem de literatürdeki uygulamalarla uyumluluk göstermektedir.

2. Önerilen FSS Tasarımı

Bu çalışmada önerilen polarizasyon bağımsız tasarımın uyarım yönleri ve sınır koşulları ile birlikte Şekil 1'de verilmektedir. W alt taşa ait en değerini gösterirken L ise alt taşa ait boy değerini göstermektedir.



a)



b)

Şekil 1: Önerilen Tasarıma ait a) CST Studio Suite® tasarımı ve uyarımı b) sınır koşulları.

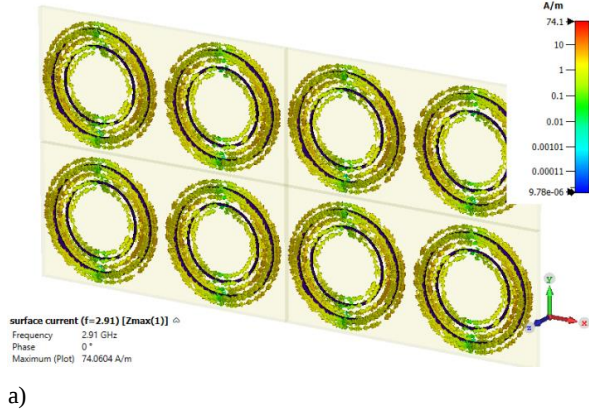
Kullanılan alt taş malzemenin kalınlığı h_s olarak verilirken kalınlık değeri 1.58 mm olarak alınmıştır. Tasarımda kullanılan malzeme literatürde rölatif elektriksel geçirgenlik değeri 4.4 olarak yer alan FR4'dür. Kullanılan FR-4 malzemedeki iletken kalınlığı 35 mikrondur. Önerilen tasarım parametreleri aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Çizelge 1: Tasarım Parametreleri

Parametre	Değer
L	58.166 mm
W	29.083 mm
R1	24 mm
R2	17 mm
d1	1 mm
d2	0.5 mm
h_s	1.58 mm

2.1. Tasarımın CST Studio Suite® ve ANSYS HFSS Sonuçları

Tasarım WR229 dalga kılavuzunun en boy değerleri uyarınca alt taş boyu 58.166 mm eni 29.083 mm olarak benzetim çalışmalarında referans değeri olarak belirlenmiştir. Dalga kılavuzunun literatürde belirlenen kesim frekansları 2.557 GHz ile 5.154GHz aralığındadır. Bu sınır koşulları ile tasarımlar CST Studio Suite® ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçlar ANSYS HFSS yazılımı ile de elde edilmişlerdir. CST Studio Suite® ile elde edilen yüzey akım dağılımları alt ve üst frekans değerleri için aşağıda verilmektedir.



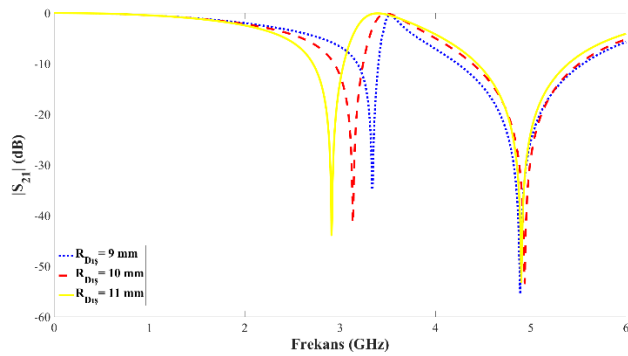
a)



b)

Şekil 2: Önerilen Tasarıma ait yüzey akım dağılımlarına a) alt kesim frekansı için b) üst kesim frekansı için

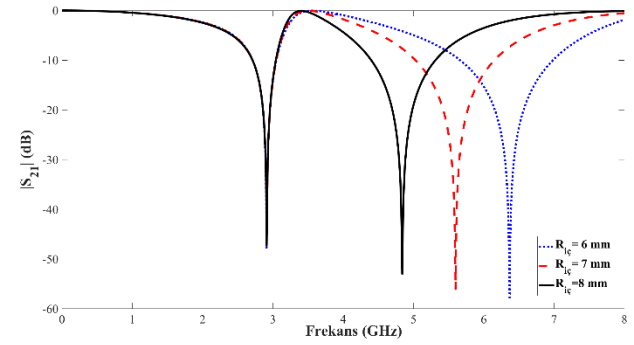
Yüzey akım dağılımlarından da anlaşılabileceği gibi alt kesim frekans değeri için dış çemberin rezonatör etkisi fark edilmektedir. Bu etkiye bağlı olarak yapılan parametrik analizlerde dış çember yarıçap değerinin alt kesim frekansına etkisi Şekil 3'te verilmektedir. Dış çember yarıçap değerinin artışı ile ters orantılı artış gösteren alt kesim frekans değerinin ilgili uygulamalara göre ayarlana bilir olduğu simülasyon yardımıyla gösterilmektedir.



Şekil 3: Dış çember yarıçap değerinin alt kesim frekansına etkisi

Aynı zamanda iç çember yarıçap değerinin üst kesim frekansına etkisi Şekil 4'te sunulmuştur. İç çember yarıçap değerinin artışı ile ters orantılı artış gösteren üst kesim frekans değerinin ilgili

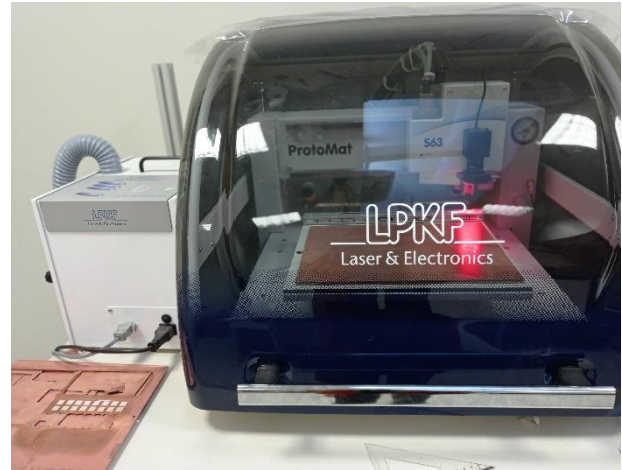
uygulamalara göre ayarlana bilir olduğu simülasyon yardımıyla gösterilmektedir.



Şekil 4: İç çember yarıçap değerinin üst kesim frekansına etkisi

2.2. Prototip ve Üretim

Tasarım CST Studio Suite® simülasyonu ile elde edilen veriler doğrultusunda WR229 dalga kılavuzu boyutlarında LPKF S63 cihazı kullanılarak üretilmiştir. LPKF S63 cihazının görüntüsü Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5: LPKF S63 cihaz görüntüsü.

Tasarıma ait prototip görüntüsü dalga kılavuzla ölçüm görüntüsü ile birlikte Şekil 6'da verilmektedir.



a)

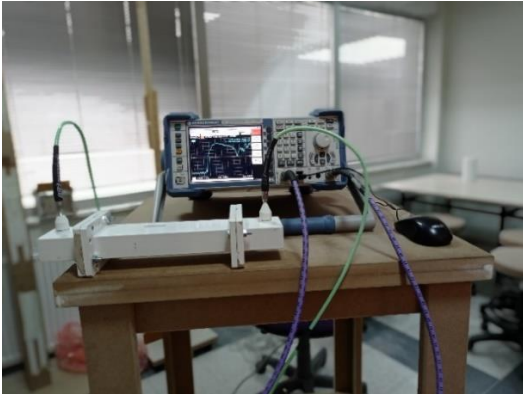


b)

Şekil 6: Prototipe ait a) görüntü b) dalga kılavuzla ölçüm görüntüsü.

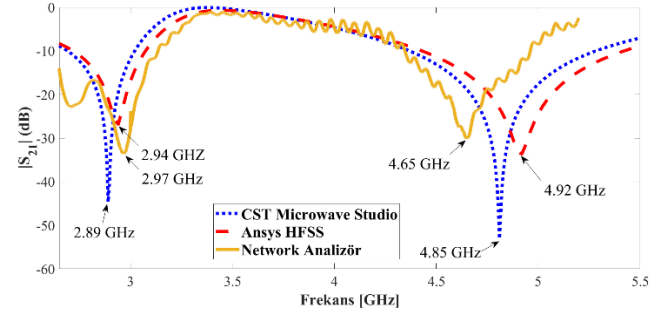
2.3. Deneysel Sonuçlar

Ölçümler Rohde Schwarz Network R&S@ZVL13 analizörü kullanılmıştır. Ölçüm cihazının frekans aralığı 9 kHz ile 13.6 GHz'tir. Dalga kılavuzuna ait kesim frekansları cihazın ölçüm aralığında bulunmaktadır. Cihaz iki port kullanarak ölçüm yapma imkânı sağlamaktadır. Ölçüm cihazı ve ölçüm düzeneğine ait görüntü Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7: Rohde Schwarz Network analizör ve ölçüm düzeneğinin görüntüsü.

Ölçüm sonuçları ile CST Studio Suite® ve ANSYS HFSS programlarından elde edilen S_{21} analizleri Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8: Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar.

Yukarıda verilen şekilde kesim frekansları ve zayıflama oranları görülmektedir. Tasarımın bant genişliği özellikleri şu şekildedir; Alt kesim frekansı 2.89 GHz için bant genişliği değerleri CST Studio Suite® için 0.36 GHz, HFSS için 0.33 GHz ve deney sonuçları için 0.49 GHz'dir. Üst kesim frekansı 4.81 GHz için CST Studio Suite® için 0.98 GHz, HFSS için 0.92 GHz ve deney sonuçları için 0.61 GHz'dir. Alt kesim frekansının CST Studio Suite® sonuçlarının deneysel sonuçlara göre bağıl hata oranı ($\% Hata = \frac{f_{Program} - f_{Deneysel}}{f_{Deneysel}} \cdot 100$) % 2.69 ve ANSYS HFSS sonuçlarının deneysel sonuçlara göre bağıl hata oranı % 1.01 olarak hesaplanmıştır. Üst kesim frekansının CST Studio Suite® sonuçlarının deneysel sonuçlara göre bağıl hata oranı % 3.33 ve ANSYS HFSS sonuçlarının deneysel sonuçlara göre bağıl hata oranı % 5.49 olarak hesaplanmıştır. Tasarımın üst alt kesim frekansında alt kesim frekansına kıyasla deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca mevcut sonuçlara bağlı olarak alt kesim frekansında ANSYS HFSS simülasyon programı daha az hata verirken, üst kesim frekansında ise CST Studio Suite® programının daha az hata verdiği görülmektedir. Deney ortamındaki gürültü ve VGA kaynaklı dalgalanmalar mevcut hataların sebebi olmaktadır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada S bant $f_{r1}=2.90$ GHz ve C bant $f_{r2}=4.80$ GHz frekanslarında çalışan, her iki kesim frekansı için kabul edilebilir, uygun bant genişliklerine sahip ve polarizasyona bağımlı olmayan çift bant dairesel frekans seçici yüzey tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının tutarlı olduğu görülmektedir. Hesaplanan bağıl hata değerlerinin oldukça düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarındaki dalgalanmaların VNA kaynaklı dalgalanmalar ve ortam gürültüsü olduğu bilinmektedir. Bu dalgalanmaların haricinde deneysel sonuçların simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu ve benzeri tasarım çalışmalarda temel olan simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçların doğruluğu ve birbirleriyle olan tutarlılığıdır. Tasarım parametrelerinin ve dielektrik malzemenin seçimi simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların tutarlılığı için önem arz etmektedir.

4. Kaynaklar

- [1] Zhu, Q., Zhang, Z., Lv, Y., Chen, X., Wu, Z., Wang, S., & Zou, Y. (2019). Synthesis and electromagnetic wave absorption performance of NiCo₂O₄ nanomaterials with different nanostructures. *CrystEngComm*, 21(31), 4568-4577.
- [2] Zhang, Z., Wang, S., Lv, Y., Chen, X., Wu, Z., & Zou, Y. (2019). MnO₂ nanostructures deposited on graphene foams for broadband and lightweight electromagnetic absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 810, 151744.
- [3] Fang, S., Huang, D., Lv, R., Bai, Y., Huang, Z. H., Gu, J., & Kang, F. (2017). Three-dimensional reduced graphene oxide powder for efficient microwave absorption in the S-band (2–4 GHz). *Rsc Advances*, 7(41), 25773-25779.
- [4] Fang, S., Huang, D., Lv, R., Bai, Y., Huang, Z. H., Gu, J., & Kang, F. (2017). Three-dimensional reduced graphene oxide powder for efficient microwave absorption in the S-band (2–4 GHz). *Rsc Advances*, 7(41), 25773-25779.
- [5] MUNK, Ben A. Frequency selective surfaces: theory and design. John Wiley & Sons, 2005.
- [6] WU, Te-Kao. Frequency selective surfaces. *Encyclopedia RF Microwave Engineering*, 1995.
- [7] MITTRA, Raj; CHAN, Chi H.; CWIK, Tom. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. *Proceedings of the IEEE*, 1988, 76.12: 1593-1615.
- [8] Raiva, A. P. (2003). Frequency selective surfaces: Design of broadband elements and frequency stabilization techniques. Southern Illinois University at Carbondale.
- [9] Can, S., & Yilmaz, A. E. (2013). Parametric performance analysis of the square loop frequency selective surface. *Elektrotehniski vestnik*, 80(3), 110.
- [10] Design of the Square Loop Frequency Selective Surfaces with Particle Swarm Optimization via the Equivalent Circuit Model”