

İyileştirilmiş Geniş Durdurma Bandlı Taban İletkeni Kusurlu Alçak Geçiren Bir Mikroşerit Süzgeç Tasarımı

An Improved Broad Stopband Microstrip Low Pass Filter with Defected Ground Structure

Agâh Oktay Ertay¹, Mehmet Abbak¹, Can Suer¹

¹Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)

aoertay@itu.edu.tr , abbak@itu.edu.tr , suerc@itu.edu.tr

Öz

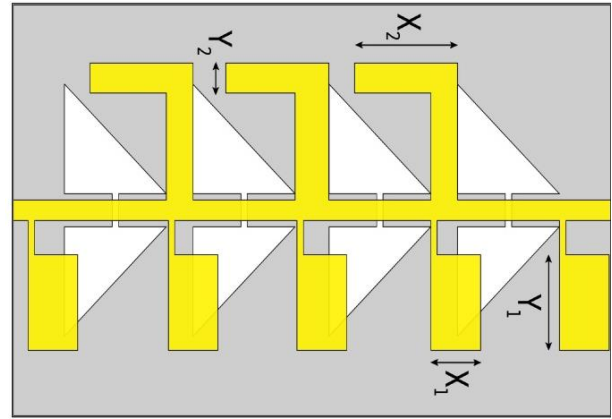
Bu makalede, çeşitli mikrodalga uygulamaları için kullanılacak, mikroşerit yapıda, taban iletkeni kusurlu bir alçak geçiren süzgeç tasarlanmıştır. Tasarımdaki hedeflerden biri geniş durdurma bandına sahip bir karakteristik elde etmektir. Ek olarak, geçiş bandında keskinlik istenmektedir. Bu amaçla öncelikle klasik süzgeç yaklaşımıyla bir süzgeç tasarlanmıştır ve sonrasında mikroşerit yapılar kullanılarak çeşitli tasarım adımları ile hedeflenen özelliklere ulaşılmıştır. Tasarım adımlarında devre modeli verilmiştir ve istenen özellikleri sağlaması için gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Benzetim işlemlerinde Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS) kullanılmıştır. Tasarlanan süzgecin S11 ve S21 amaçlanan karakteristikleri elde edilmiş ve arzu edilen sonuçlara ulaşılmıştır. Bu tasarımın sonucunda elde edilen süzgeç 1.5 GHz kesim frekansına sahip, 1.7 GHz'den 14.1 GHz'e kadar uzanan geniş bir durdurma bandına sahiptir. Elde edilen süzgeç, modern mikrodalga uygulamaları için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Geniş durdurma bandı, DGS, taban iletkeni kusurlu yapılar, alçak geçiren süzgeç, mikroşerit süzgeç.

Abstract

In this article, a microstrip low pass filter with defected ground structure is designed for various microwave applications. One of the objectives in the design is to acquire a broad stopband characteristic. Additionally, a sharpness is desired in the transition band. In this context, firstly, a filter is designed by using classical filter approximation and then design objectives are achieved by using microstrip structures with several design procedures. Equivalent circuit is given in the design procedures and required improvements to obtain desired specifications is performed. High Frequency Structure Simulator (HFSS) is used for the simulation processes. Objective frequency characteristics of S11 and S21 of the designed filter is obtained and the desired results are achieved. As a result of the design, obtained filter has 1.5 GHz cut off frequency, a broad stopband extending from 1.7 GHz to 14.1 GHz. Obtained filter can be used for modern microwave applications

Keywords: Broad stopband, DGS, defected ground structures, low pass filter, microstrip filter.



Şekil 1: Tasarlanan süzgecin geometrik görünümü (X_1 :4 mm, Y_1 :7 mm, X_2 :8 mm, Y_2 :2.2 mm)

1. Giriş

Elektromanyetik spektrum oldukça geniş frekans aralığına sahip olup, RF ve Mikrodalga uygulamalarının çalıştığı belirli bir frekans aralığı (300 kHz – 300 GHz) vardır. Bu frekans aralıklarında ise her özel uygulamanın çalışabildiği dar veya geniş bandlar bulunmaktadır. İlgili uygulamaya özel, bu bandlarda çalışabilen cihazların kullanılabilmesi için süzgeç elemanlarına ihtiyaç olmaktadır [1].

RF ve mikrodalga uygulamalarında önemli bir yere sahip olan süzgeçler kablosuz, mobil ve uydu haberleşmesi gibi birçok alanda kendine yer bulmuştur. Bilindiği üzere, süzgeçler ilgililenen frekans aralığını, tasarım hedefine uygun olarak, geçiren, durduran ve istenmeyen sinyal girişimlerinin önüne geçecek yetenekleri olan yapılardır. Bu yapıların band geçiren veya durduran, alçak veya yüksek geçiren, tüm geçiren türleri bulunmaktadır.

Modern mikrodalga haberleşme sistemlerinde, küçük boyut, keskin geçiş bandı, düşük araya girme kaybı gibi önemli gereklilikler ortaya çıkmaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanması için tasarlanan süzgeçler mikroşerit yapılardan oluşabilmektedir.

Alçak geçiren süzgeçler de (AGS) mikroşerit yapılarla tasarlanabilmektedir. AGS'lerin tasarımında, geniş durdurma bandı, daha iyi keskinlik faktörü, düşük geçirme bandı dalgalanması gibi amaçlar yer almaktadır. Dolayısıyla tasarlanacak alçak geçiren mikroşerit süzgecin, uygulamanın gerektirdiği koşulları sağlaması için, tasarım adımlarında uygun değişikliklerin yapılması önemlidir.

Son yıllarda mikroşerit süzgeç tasarımında taban iletkeni kusurlu yapılar (DGS) [2]-[3] giderek yaygınlaşmaya başlamıştır. Taban iletkeni kusurlu yapıların klasik süzgeç tasarımına uyarlanması sonucunda farklı bir mikroşerit süzgeç tasarım prosedürü ileri sürülmüştür. Bu amaçla klasik süzgeç yaklaşımında seçilen topolojide yer alan endüktansların, birer taban iletkeni kusurlu yapı olarak modellenmesi sonucunda daha küçük mikroşerit süzgeçler tasarlanabilmektedir [4], [5] ve [6].

Bu makalede geniş durdurma bandına sahip, görece küçük alçak geçiren bir mikroşerit süzgeç tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, klasik süzgeç yaklaşımından hareketle mikroşerit hatlar ve taban iletkenine açılan uçları eşkenar dik üçgen halter biçimli kusurlar kullanılarak bir süzgeç tasarımı önerilmiştir. Ek olarak, tasarım sonucunda elde edilen frekans karakteristiğinin iyileştirilmesi amacıyla tasarlanan süzgeç üzerinden üç aşamadan oluşan bir tasarım prosedürü ortaya konarak arzu edilen süzgeç karakteristiğinin elde edilmesi sağlanmıştır. Tasarlanan süzgeç 1.5 GHz'de -3dB kesim frekansına, 0.01dB geçirme bandı dalgalanmasına sahiptir ve -20dB'deki durdurma bant genişliği 1.7 GHz'den 14.1 GHz'e kadar uzanmaktadır. Süzgecin boyutları 46.86 x 30 x 0.79 mm³'tür. Tasarımın elektromanyetik benzetim işlemleri sonlu elemanlar yöntemini kullanan HFSS [7] programında yapılmıştır. Bu süzgeç modern mikrodalga haberleşme uygulamaları için uygun özelliklere sahiptir.

2. Tasarımın Teorik Adımları

Tasarlanan süzgecin son hali Şekil 1'de verilmektedir. Tüm tasarım işlemlerinde kayıp tanjantı 0.02, bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 4.4 olan FR-4 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Tasarımda giriş ve çıkış portları 50 Ω karakteristik empedans ile uyumlu sonlandırılmıştır. Besleme hat genişliği 50 Ω 'a karşılık gelen 1.51 mm'dir.

Tasarlanmak istenen mikroşerit süzgecin özellikleri Tablo 1'de belirtilmektedir. Bu amaçla, öncelikle, Tablo 1'de belirtildiği gibi 0.01dB dalgalanma seviyesine sahip, 1.5 GHz kesim frekanslı, $8fc$ 'den büyük bir durdurma bant genişliği olan ve geçiş bandı keskinliği 0.6'dan büyük bir alçak geçiren mikroşerit süzgeç tasarımı amaçlanmıştır.

Arzu edilen süzgeç özelliklerini sağlayan bir tasarım için dört adımdan oluşan süzgeç tasarım prosedürü gerçekleştirilmiştir. İlk adımda klasik süzgeç tasarımı kullanılarak taban iletkeni kusurlu alçak geçiren bir mikroşerit süzgeç tasarlanmıştır. İkinci adımda, elde edilen frekans karakteristiği tasarım hedeflerini karşılamadığı için mevcut tasarımdaki mikroşerit hatlara paralel yan hatlar eklenerek durdurma bandının genişletilmesine çalışılmıştır. Üçüncü adımda, karakteristiğinin belirgin bir ölçüde iyileştirilmesine yönelik olarak, eklenen paralel yan hatların uç kısımları

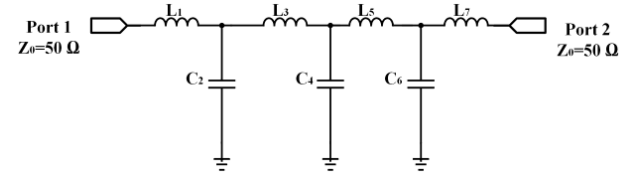
genişletilmiştir. Dördüncü ve son adımda ise üçüncü adımdaki süzgeç karakteristiğinin tam olarak arzu edilen süzgeç karakteristiğine yaklaştırmak amacıyla birinci adımda elde edilen paralel yan hatların yeniden düzenlenmesi söz konusudur.

Tablo 1: Süzgeç Özellikleri

Dalgalanma Seviyesi	0.01 dB
Kesim Frekansı	1.5 GHz
Durdurma Bandı Seviyesi	-20 dB
Durdurma Bant Genişliği	$>8fc$
Keskinlik Faktörü	$fc/f0 > 0.6$

Tablo 2 : Birinci adım için elde edilen normalize eleman değerleri (Chebyshev Prototipi: 0.01dB Dalgalanma Seviyesi, N=7)

g0	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
1	0.80	1.39	1.75	1.63	1.75	1.39	0.8	1



Şekil 2: Birinci adımda elde edilen devre topolojisi ve eleman değerleri ($L_1=3.17nH$, $C_2=2.22pF$, $L_3=6.96nH$, $C_4=2.60pF$, $L_5=6.96nH$, $C_6=2.22pF$, $L_7=3.17nH$)

Bu adımlar sonucunda hem düşük frekans bölgesinde ciddi değişimler yaşanmamış hem de arzu edilen süzgeç özellikleri sağlanmış olmaktadır.

Bu tasarım prosedürüne göre, ilk adımda, klasik süzgeç yaklaşımı ile Chebyshev tipi alçak geçiren süzgeç prototipinden hareket edilerek 0.01dB dalgalanma seviyeli, 2 GHz kesim frekanslı alçak geçiren mikroşerit süzgeç tasarımı yapılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak süzgeç derecesi N=7 olan Chebyshev prototipi için normalize eleman değerleri hesaplanmalıdır. Buna göre [8], elde edilen normalize eleman değerleri Tablo 2'de verilmektedir. Empedans ve frekans ölçeklemesi [8] sonucunda Şekil 2'de verilen devre topolojisi ve eleman değerleri ortaya çıkmaktadır.

Klasik süzgeç tasarımının taban iletkeni kusurlu yapılarla gerçekleştirilmesi işlemi için [2]'deki tasarım prosedürleri takip edilmiştir. Bu prosedüre göre, elde edilen endüktans ve kapasitelerin, mikroşerit hatlar ve tabana açılan kusurlar ile modellenmesi işlemi bulunmaktadır. Bu amaçla, her bir endüktans elemanı; uçları eşkenar dik üçgen halter biçimli DGS ile, her bir kondansatör elemanı ise ucu açık devre ile sonlandırılmış paralel yan hatlar ile modellenmiştir. Tasarımda taban iletkeni kusurlu yapılar kullanılacağı için ilk adımda, hedeflenen kesim frekansından daha yüksek bir kesim frekansı seçilmiştir. Çünkü mikroşerit süzgeç tasarımında taban iletkenine açılan kusurlar arzu edilen kesim frekansını değiştirmektedir ve bu değeri

İyileştirilmiş Geniş Durdurma Bandlı Taban İletkeni Kusurlu Alçak Geçiren Bir Mikroşerit Süzgeç Tasarımı

An Improved Broad Stopband Microstrip Low Pass Filter with Defected Ground Structure

Agâh Oktay Ertay¹, Mehmet Abbak¹, Can Suer¹

¹Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi (İTU)

aoertay@itu.edu.tr , abbak@itu.edu.tr , suerc@itu.edu.tr

Öz

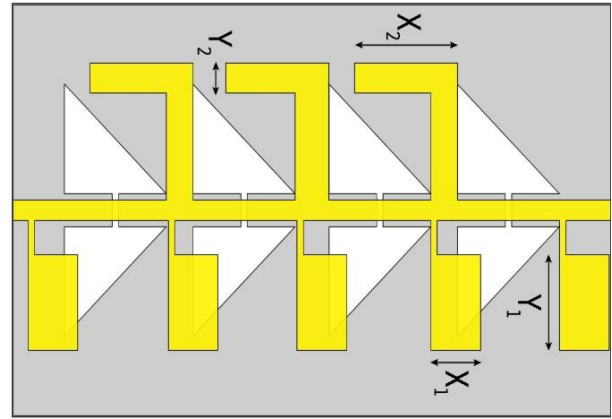
Bu makalede, çeşitli mikrodalga uygulamaları için kullanılacak, mikroşerit yapıda, taban iletkeni kusurlu bir alçak geçiren süzgeç tasarlanmıştır. Tasarımdaki hedeflerden biri geniş durdurma bandına sahip bir karakteristik elde etmektir. Ek olarak, geçiş bandında keskinlik istenmektedir. Bu amaçla öncelikle klasik süzgeç yaklaşımıyla bir süzgeç tasarlanmıştır ve sonrasında mikroşerit yapılar kullanılarak çeşitli tasarım adımları ile hedeflenen özelliklere ulaşılmıştır. Tasarım adımlarında devre modeli verilmiştir ve istenen özellikleri sağlaması için gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Benzetim işlemlerinde Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS) kullanılmıştır. Tasarlanan süzgecin S11 ve S21 amaçlanan karakteristikleri elde edilmiş ve arzu edilen sonuçlara ulaşılmıştır. Bu tasarımın sonucunda elde edilen süzgeç 1.5 GHz kesim frekansına sahip, 1.7 GHz'den 14.1 GHz'e kadar uzanan geniş bir durdurma bandına sahiptir. Elde edilen süzgeç, modern mikrodalga uygulamaları için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Geniş durdurma bandı, DGS, taban iletkeni kusurlu yapılar, alçak geçiren süzgeç, mikroşerit süzgeç.

Abstract

In this article, a microstrip low pass filter with defected ground structure is designed for various microwave applications. One of the objectives in the design is to acquire a broad stopband characteristic. Additionally, a sharpness is desired in the transition band. In this context, firstly, a filter is designed by using classical filter approximation and then design objectives are achieved by using microstrip structures with several design procedures. Equivalent circuit is given in the design procedures and required improvements to obtain desired specifications is performed. High Frequency Structure Simulator (HFSS) is used for the simulation processes. Objective frequency characteristics of S11 and S21 of the designed filter is obtained and the desired results are achieved. As a result of the design, obtained filter has 1.5 GHz cut off frequency, a broad stopband extending from 1.7 GHz to 14.1 GHz. Obtained filter can be used for modern microwave applications

Keywords: Broad stopband, DGS, defected ground structures, low pass filter, microstrip filter.



Şekil 1: Tasarlanan süzgecin geometrik görünümü (X_1 :4 mm, Y_1 :7 mm, X_2 :8 mm, Y_2 :2.2 mm)

1. Giriş

Elektromanyetik spektrum oldukça geniş frekans aralığına sahip olup, RF ve Mikrodalga uygulamalarının çalıştığı belirli bir frekans aralığı (300 kHz – 300 GHz) vardır. Bu frekans aralıklarında ise her özel uygulamanın çalışabildiği dar veya geniş bandlar bulunmaktadır. İlgili uygulamaya özel, bu bandlarda çalışabilen cihazların kullanılabilmesi için süzgeç elemanlarına ihtiyaç olmaktadır [1].

RF ve mikrodalga uygulamalarında önemli bir yere sahip olan süzgeçler kablosuz, mobil ve uydu haberleşmesi gibi birçok alanda kendine yer bulmuştur. Bilindiği üzere, süzgeçler ilgililenen frekans aralığını, tasarım hedefine uygun olarak, geçiren, durduran ve istenmeyen sinyal girişimlerinin önüne geçecek yetenekleri olan yapılardır. Bu yapıların band geçiren veya durduran, alçak veya yüksek geçiren, tüm geçiren türleri bulunmaktadır.

Modern mikrodalga haberleşme sistemlerinde, küçük boyut, keskin geçiş bandı, düşük araya girme kaybı gibi önemli gereklilikler ortaya çıkmaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanması için tasarlanan süzgeçler mikroşerit yapılardan oluşabilmektedir.

Alçak geçiren süzgeçler de (AGS) mikroşerit yapılarla tasarlanabilmektedir. AGS'lerin tasarımında, geniş durdurma bandı, daha iyi keskinlik faktörü, düşük geçirme bandı dalgalanması gibi amaçlar yer almaktadır. Dolayısıyla tasarlanacak alçak geçiren mikroşerit süzgecin, uygulamanın gerektirdiği koşulları sağlaması için, tasarım adımlarında uygun değişikliklerin yapılması önemlidir.

Son yıllarda mikroşerit süzgeç tasarımında taban iletkeni kusurlu yapılar (DGS) [2]-[3] giderek yaygınlaşmaya başlamıştır. Taban iletkeni kusurlu yapıların klasik süzgeç tasarımına uyarlanması sonucunda farklı bir mikroşerit süzgeç tasarım prosedürü ileri sürülmüştür. Bu amaçla klasik süzgeç yaklaşımında seçilen topolojide yer alan endüktansların, birer taban iletkeni kusurlu yapı olarak modellenmesi sonucunda daha küçük mikroşerit süzgeçler tasarlanabilmektedir [4], [5] ve [6].

Bu makalede geniş durdurma bandına sahip, görece küçük alçak geçiren bir mikroşerit süzgeç tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, klasik süzgeç yaklaşımından hareketle mikroşerit hatlar ve taban iletkenine açılan uçları eşkenar dik üçgen halter biçimli kusurlar kullanılarak bir süzgeç tasarımı önerilmiştir. Ek olarak, tasarım sonucunda elde edilen frekans karakteristiğinin iyileştirilmesi amacıyla tasarlanan süzgeç üzerinden üç aşamadan oluşan bir tasarım prosedürü ortaya konarak arzu edilen süzgeç karakteristiğinin elde edilmesi sağlanmıştır. Tasarlanan süzgeç 1.5 GHz'de -3dB kesim frekansına, 0.01dB geçirme bandı dalgalanmasına sahiptir ve -20dB'deki durdurma bant genişliği 1.7 GHz'den 14.1 GHz'e kadar uzanmaktadır. Süzgecin boyutları 46.86 x 30 x 0.79 mm³'tür. Tasarımın elektromanyetik benzetim işlemleri sonlu elemanlar yöntemini kullanan HFSS [7] programında yapılmıştır. Bu süzgeç modern mikrodalga haberleşme uygulamaları için uygun özelliklere sahiptir.

2. Tasarımın Teorik Adımları

Tasarlanan süzgecin son hali Şekil 1'de verilmektedir. Tüm tasarım işlemlerinde kayıp tanjantı 0.02, bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 4.4 olan FR-4 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Tasarımda giriş ve çıkış portları 50 Ω karakteristik empedans ile uyumlu sonlandırılmıştır. Besleme hat genişliği 50 Ω 'a karşılık gelen 1.51 mm'dir.

Tasarlanmak istenen mikroşerit süzgecin özellikleri Tablo 1'de belirtilmektedir. Bu amaçla, öncelikle, Tablo 1'de belirtildiği gibi 0.01dB dalgalanma seviyesine sahip, 1.5 GHz kesim frekanslı, $8fc$ 'den büyük bir durdurma bant genişliği olan ve geçiş bandı keskinliği 0.6'dan büyük bir alçak geçiren mikroşerit süzgeç tasarımı amaçlanmıştır.

Arzu edilen süzgeç özelliklerini sağlayan bir tasarım için dört adımdan oluşan süzgeç tasarım prosedürü gerçekleştirilmiştir. İlk adımda klasik süzgeç tasarımı kullanılarak taban iletkeni kusurlu alçak geçiren bir mikroşerit süzgeç tasarlanmıştır. İkinci adımda, elde edilen frekans karakteristiği tasarım hedeflerini karşılamadığı için mevcut tasarımdaki mikroşerit hatlara paralel yan hatlar eklenerek durdurma bandının genişletilmesine çalışılmıştır. Üçüncü adımda, karakteristiğin belirgin bir ölçüde iyileştirilmesine yönelik olarak, eklenen paralel yan hatların uç kısımları

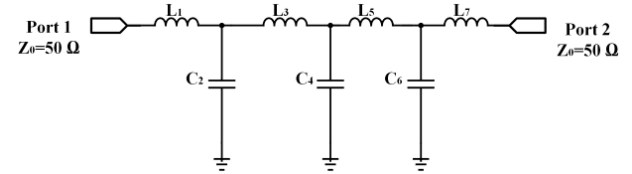
genişletilmiştir. Dördüncü ve son adımda ise üçüncü adımdaki süzgeç karakteristiğinin tam olarak arzu edilen süzgeç karakteristiğine yaklaştırmak amacıyla birinci adımda elde edilen paralel yan hatların yeniden düzenlenmesi söz konusudur.

Tablo 1: Süzgeç Özellikleri

Dalgalanma Seviyesi	0.01 dB
Kesim Frekansı	1.5 GHz
Durdurma Bandı Seviyesi	-20 dB
Durdurma Bant Genişliği	$>8fc$
Keskinlik Faktörü	$fc/f0 > 0.6$

Tablo 2 : Birinci adım için elde edilen normalize eleman değerleri (Chebyshev Prototipi: 0.01dB Dalgalanma Seviyesi, N=7)

g0	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
1	0.80	1.39	1.75	1.63	1.75	1.39	0.8	1



Şekil 2: Birinci adımda elde edilen devre topolojisi ve eleman değerleri ($L_1=3.17nH$, $C_2=2.22pF$, $L_3=6.96nH$, $C_4=2.60pF$, $L_5=6.96nH$, $C_6=2.22pF$, $L_7=3.17nH$)

Bu adımlar sonucunda hem düşük frekans bölgesinde ciddi değişimler yaşanmamış hem de arzu edilen süzgeç özellikleri sağlanmış olmaktadır.

Bu tasarım prosedürüne göre, ilk adımda, klasik süzgeç yaklaşımı ile Chebyshev tipi alçak geçiren süzgeç prototipinden hareket edilerek 0.01dB dalgalanma seviyeli, 2 GHz kesim frekanslı alçak geçiren mikroşerit süzgeç tasarımı yapılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak süzgeç derecesi N=7 olan Chebyshev prototipi için normalize eleman değerleri hesaplanmalıdır. Buna göre [8], elde edilen normalize eleman değerleri Tablo 2'de verilmektedir. Empedans ve frekans ölçeklemesi [8] sonucunda Şekil 2'de verilen devre topolojisi ve eleman değerleri ortaya çıkmaktadır.

Klasik süzgeç tasarımının taban iletkeni kusurlu yapılarla gerçekleştirilmesi işlemi için [2]'deki tasarım prosedürleri takip edilmiştir. Bu prosedüre göre, elde edilen endüktans ve kapasitelerin, mikroşerit hatlar ve tabana açılan kusurlar ile modellenmesi işlemi bulunmaktadır. Bu amaçla, her bir endüktans elemanı; uçları eşkenar dik üçgen halter biçimli DGS ile, her bir kondansatör elemanı ise ucu açık devre ile sonlandırılmış paralel yan hatlar ile modellenmiştir. Tasarımda taban iletkeni kusurlu yapılar kullanılacağı için ilk adımda, hedeflenen kesim frekansından daha yüksek bir kesim frekansı seçilmiştir. Çünkü mikroşerit süzgeç tasarımında taban iletkenine açılan kusurlar arzu edilen kesim frekansını değiştirmektedir ve bu değeri

şiklik açılan kusurun alanı ile ters orantılıdır [2]. Bu işlemler sonucunda eş kenar dik üçgen halter biçimli DGS'nin bağlantı bölgesinin uzunluğu, genişliği ve ilgili üçgen DGS'nin kenar uzunluğu sırasıyla 2.4mm, 0.5mm ve 8mm olarak alınmıştır. Her bir endüktansa karşılık gelebilecek en uygun DGS boyutları [2]'deki ve [4]'teki prosedüre uygun olarak eğri uydurma adımları ile çıkarılmıştır. Kondansatör elemanına karşılık gelen ucu açık devre ile sonlandırılmış paralel yan hatların modellenmesi için (1) [1] ve (2) [1] ifadeleri kullanılmıştır.

$$l = \frac{\lambda_g}{2\pi} \tan^{-1}(Z_0 \omega C) \Leftrightarrow l < \frac{\lambda_g}{4} \quad (1)$$

$$\lambda_g = \frac{300}{f(\text{GHz})\sqrt{\epsilon_{re}}} \text{mm} \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2)'de yer alan l , λ_g , Z_0 , ω , C , f ve ϵ_{re} ifadeleri sırasıyla ucu açık devre ile sonlandırılmış paralel yan hattın uzunluğunu, kılavuzlanmış dalga boyunu, ilgili paralel yan hattın karakteristik empedansını, açılma frekansını ve kondansatörün kapasite değerini, çalışma frekansını ve etkin dielektrik sabitini göstermektedir. (1)'deki denklem yoluyla her bir kondansatöre karşılık gelen ucu açık devre ile sonlandırılmış mikroşerit hattın uzunluk ve genişlikleri hesaplanmıştır. Buna göre, Şekil 2'deki $C_2=C_6$ değerleri için hesaplanan hat genişlik ve uzunlukları sırasıyla 2.09 mm ve 10 mm'dir. C_4 değeri için hesaplanan hat genişliği ve uzunluğu sırasıyla 2.66 mm ve 10 mm'dir.

Şekil 3'te her bir tasarım adımını gösteren prosedür görülmektedir. Şekil 3'teki her adımda taban iletkeni kusurlu yapılar Şekil 1'deki haliyle yer almaktadır ve her adımda aynı boyutlarda alınmıştır.

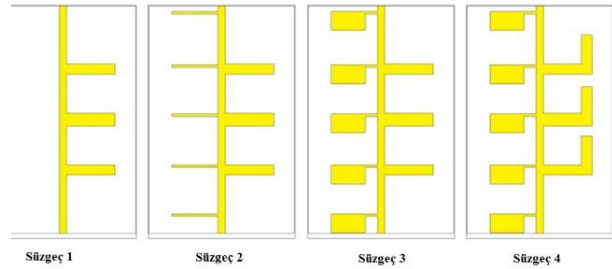
İlk tasarım adımı sonucunda endüktansa karşılık gelen bir taban iletkeni kusurlu yapı, kondansatöre karşılık gelen ucu açık devre ile sonlandırılmış bir paralel yan hat modellemesi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda Şekil 3'te yer alan "Süzgeç 1" tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım adımına ait frekans karakteristiği Şekil 4'te "Ver1" olarak gösterilmektedir. Buna göre "Süzgeç 1"nin kesim frekansı 1.53 GHz civarında çıkmış olup -20dB seviyesindeki durdurma bantları sırasıyla 2.18 GHz -7.2 GHz, 8.17 GHz -9.86 GHz ve 10.26 GHz -13.5 GHz aralıklarında oluşmuştur. Keskinlik faktörünün ise 0.56 seviyelerinde olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla arzu edilen tasarım hedeflerine henüz ulaşamamıştır. Bu nedenle ikinci adıma geçilmiştir.

İkinci adımda Şekil 3'te görüldüğü gibi ucu açık devre ile sonlandırılmış paralel yan hatlara "Süzgeç 1" yapısına eklenmiştir. Bu işlem sonucunda Şekil 4'teki "Ver2" ile gösterilen frekans karakteristiği elde edilmiştir. Bu karakteristiğe göre, alçak frekanslarda kayda değer bir değişiklik oluşmamakla beraber 3 GHz-5 GHz aralıklarında daha iyi durdurma bandı elde edilmiştir. Keskinlik faktörü ve kesim frekansı değerleri Süzgeç 1 ile aynı olup istenilen özellikler tamamen sağlanamadığı için üçüncü adıma geçilmiştir.

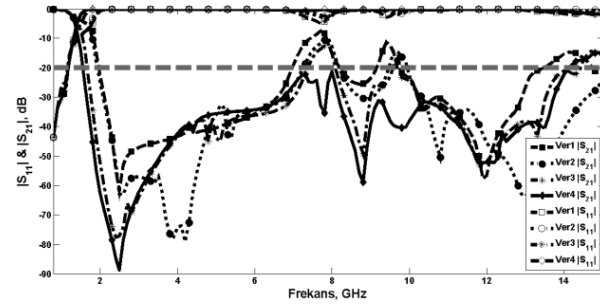
Üçüncü adımda Şekil 3'te gösterildiği üzere, "Süzgeç 2"de eklenen paralel yan hatlara farklı empedansa sahip mikroşerit hatlar ilave edilmiştir. Bu yolla frekans karakteristiğinin önemli derecede değiştiği Şekil 4'te "Ver3" olarak görülmektedir. Bu

işlem sonucunda kesim frekansı 1.50 GHz yakınlara inmiş olup keskinlik faktörü ise 0.6 seviyelerine çıkmıştır. Buna rağmen geniş durdurma bandı özelliği ($>8fc$) henüz sağlanamamıştır. Bu sebeple, son adım "Süzgeç 3"e uygulanmıştır.

Dördüncü ve son adımda Şekil 3'te görüldüğü gibi, "Süzgeç 1"de tasarlanmış olan ucu açık devre ile sonlandırılmış paralel yan hatlara mikroşerit hatlar eklenerek tasarım düzenlenmiştir. Şekil 4'teki son adım ile oluşan frekans karakteristiği "Ver4" olarak gösterilmektedir.



Şekil 3: Süzgeç tasarım adımları



Şekil 4: Tasarlanan süzgeçlerin frekans karakteristiklerinin görünümü

Buna göre, kesim frekansı 1.5 GHz olan, keskinlik faktörü 0.6'dan büyük, geniş durdurma bandına sahip ($>8fc$) alçak geçiren bir mikroşerit süzgeç tasarımı elde edilmiştir. Dolayısıyla, arzu edilen süzgeç özelliklerini sağlayan bir mikroşerit alçak geçiren süzgeç tasarlanabilmektedir.

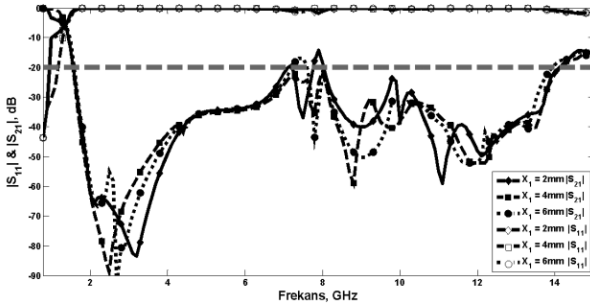
3. Parametrik Analizler

Şekil 1'de ve Şekil 3'te (Süzgeç 4) amaçlanan süzgecin son hali görülmektedir. Bu aşamaya gelene kadar, en uygun tasarım parametrelerinin bulunması için birçok parametrik analiz yapılmıştır. Bu makalede yapılan parametrik analizler mikroşerit yapılar ve DGS'lere ait tasarım parametrelerini içermektedir. Bu işlemler sonucunda görüldü ki, mikroşerit hatlarda yer alan her bir parametre süzgecin frekans karakteristiğinde ciddi değişiklikler yapabilmektedir.

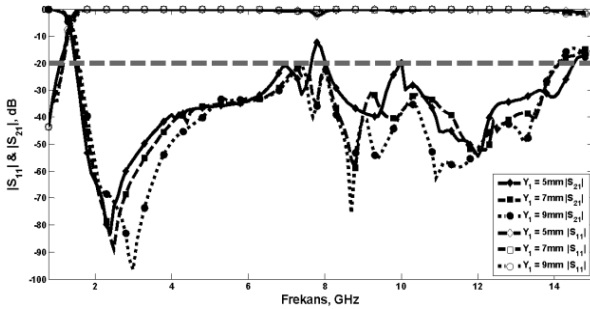
Bu bölümdeki parametrik analizler önceki bölümdeki son tasarım adımı ile elde edilen süzgecin ("Süzgeç 4") en uygun karakteristiği vermesine yönelik benzetimleri içermektedir. Buna göre, "Süzgeç 3"te eklenmiş olan mikroşerit hattın uzunluğunun (Y_l) ve genişliğinin (X_l) durdurma bandı karakteristiğini

etkilediği görülmüştür. Şekil 4'te görüldüğü gibi, arzu edilen geniş durdurma bandı karakteristiğinin elde edilmesi açısından X_1 'in alabileceği en uygun değerin 4 mm olduğu gözlenmiştir. Ek olarak, Y_1 uzunluğunun da bu amaçla en uygun seçilmesi önemlidir. Bu sebeple yapılan parametrik analizler sonucunda en uygun değerin 7 mm olduğu Şekil 6'den görülmektedir. Ayrıca X_1 ve Y_1 uzunluklarının mevcut süzgecin rezonans frekansında değişiklikler oluşturarak keskinlik faktörünü etkilediği görülmüştür.

Süzgecin frekans karakteristiğini etkileyen diğer önemli parametreler ise, son tasarım adımında eklenen mikroşerit hattın genişliği (Y_2) ve uzunluğu (X_2)'dur. Şekil 7'de X_2 'nin parametrik analizi sonucunda elde edilen frekans karakteristiği görülmektedir. Buna göre X_2 'nin uygun aralıklarda olması özellikle 8 GHz civarındaki iletim karakteristiği seviyesinin düşürülmesinde önemlidir. Bu sebeple, X_2 'nin alabileceği en uygun değerin 8 mm olduğu gözlenmiştir. Y_2 uzunluğunun Şekil 8'de görüldüğü gibi süzgecin geçirme bandı ve geçiş bandında önemli bir değişiklik oluşturmadığı fakat geniş durdurma bandı elde edilmesinde önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Sonuçta Y_2 için en uygun değerin 2.2 mm olduğu gözlenmiştir.



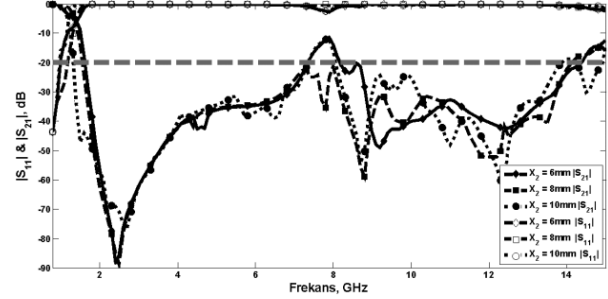
Şekil 5: X_1 uzunluğunun son süzgeç karakteristiğine etkisi



Şekil 6: Y_1 uzunluğunun son süzgeç karakteristiğine etkisi

Tamamen bir tasarım amacına yönelik adımların izlendiği bu makalede, taban iletkeni kusurlu yapılardan ve paralel yan hatlardan oluşan bir mikroşerit alçak geçiren süzgeç tasarlanmıştır. Bu tasarım sonucunda Şekil 9'da yer alan frekans karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, tasarlanan mikroşerit süzgecin 1.5 GHz'lik -3dB kesim frekansına, -20dB seviyesindeki durdurma bandı yeteneğinin 1.7 GHz'den 14.1 GHz'e kadar uzandığı ($>8fc$), durdurma bandında özellikle 2 GHz-3

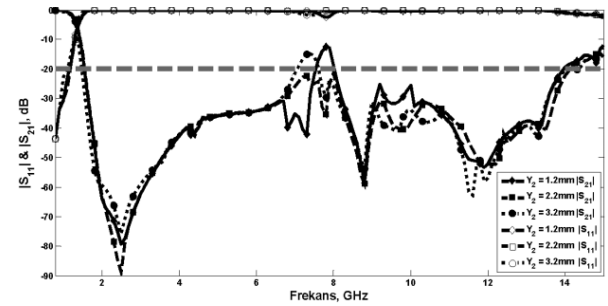
GHz aralığında -40dB seviyelerini gördüğü ve yer yer -50dB ye varan iletim karakteristikleri (9 GHz ve 12 GHz civarı) oluştuğu gözlenmiştir.



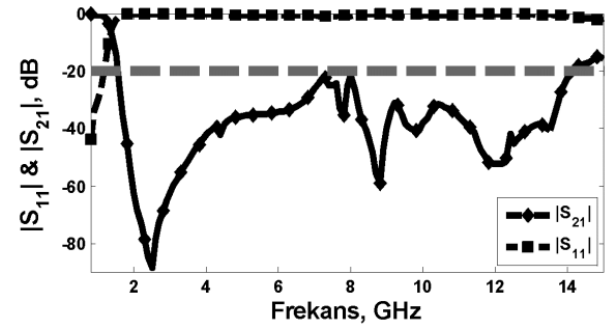
Şekil 7: X_2 uzunluğunun son süzgeç karakteristiğine etkisi

4. Sonuç

Bu çalışmada, 1.5 GHz kesim frekansına sahip, kesim frekansının 8 katından daha fazla bir durdurma bandına sahip alçak geçiren bir mikroşerit süzgeç tasarlanmıştır. Bu özelliklerin sağlanması için dört adımdan oluşan bir süzgeç tasarım prosedürü amaçlanmıştır. Bundan hareketle öncelikle klasik süzgeç yaklaşımı ile bir tasarım yapılmıştır ve bu tasarımdan yola çıkarak arzu edilen tasarıma ulaşmak için mikroşerit yapılar kullanılarak iyileştirmeler yapılmıştır. En uygun sonucu elde edebilmek için çeşitli parametrik analizler yapılmıştır. Tüm benzetimlerde HFSS programı kullanılmıştır. Tasarlanan süzgecin mikrodalga uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür.



Şekil 8: Y_2 uzunluğunun son süzgeç karakteristiğine etkisi



Şekil 9: Amaçlanan son süzgecin frekans karakteristiği

5. Bilgilendirme

Yazarlar, değerli görüşlerini paylaştığı için Doç. Dr. Serkan Şimşek'e teşekkür etmektedir.

6. Kaynaklar

[1] Hong, Jia-Shen G. and Michael J. Lancaster., *Microstrip filters for RF/microwave applications*, John Wiley & Sons, 2004.

[2] Ahn, Dal, J. S., Kim, C. S., Kim, J., Qian, Y., & Itoh, T. "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* "49.1, 86-93, 2001.

[3] Ertay, A., O., "Taban iletkeni kusurlu mikroşerit yapılarla filtre tasarımları", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ocak 2014.

[4] Lim, Jong-Sik, v.d., "Design of low-pass filters using defected ground structure." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 53.8, 2539-2545, 2005.

[5] Park, Jongkuk, Jeong-Phill Kim, ve Sangwook Nam. "Design of a novel harmonic-suppressed microstrip low-pass filter." *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* 17.6, 424-426, 2007.

[6] Abdel-Rahman, Adel B., v.d., "Control of bandstop response of Hi-Lo microstrip low-pass filter using slot in ground plane." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 52.3, 1008-1013, 2004.

[7] Ansys Corp., High Frequency Structure Simulator (HFSS) v.11. Pittsburgh, PA, 2010.

[8] Kinayman, N. ve Aksun, I., *Modern microwave circuits*. Artech House, 2005.



Agâh Oktay Ertay

Lisans derecesini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinden, yüksek lisans derecesini İstanbul Teknik Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliğinden sırasıyla 2010 ve 2014 yıllarında almıştır. 2011 yılından bugüne kadar İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Kendisinin ilgi ve araştırma alanları; mikrodalga mühendisliği, elektromanyetik teori, mikrodalga filtrelerin tasarımı ve üretilmesidir.



Mehmet Abbak

Lisans ve yüksek lisans derecelerini Sabancı Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği ve Elektronik Mühendisliği programlarından, doktora derecesini ise İstanbul Teknik Üniversitesi Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama programından sırasıyla, 2006, 2008 ve 2015 yıllarında almıştır. 2010 yılından bu yana MITOS Medikal Teknolojiler 'de araştırmacı olarak çalışmaktadır. Araştırma alanları; mikroşerit antenler, filtreler ve mikrodalga görüntüleme oldukça geniş bantlı antenlerinde dâhil olduğu mikrodalgada pasif elemanlardır.



Can Suer

2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini aldı. 2014 yılında ise İstanbul Teknik Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği Bölümü'nden Yüksek Lisans derecesi sahibi oldu. Aynı yıl, aynı bölümde doktora yapmaya başladı. 2011 yılından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Araştırma Görevliliği yapmakta olan Can Suer, düz ve ters saçınım, nümerik yöntemler ve kompleks fonksiyonlar üzerinde çalışmaktadır. Dahil olduğu ITU ERG grubunda ise çok katmanlı ortamlarda gömülü cisim bulma, kompleks ortamların dielektrik profillerinin çıkarılması gibi konular üzerinde araştırmalar yapmaktadır.