

Akı Borusu Kuplajlayıcıları Kullanılarak Manyetik Kuplajlı Ayarlanabilir Yığın Elemanlı Filtre Tasarımı

Magnetically Coupled Tunable Lumped Element Filter Design Using Flux-Pipe Couplers

Seyit Ahmet Sis

Elektrik Elektronik Müh., Mühendislik Fakültesi
Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye
seyit.sis@balikesir.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, manyetik olarak bağlaşımda bir çift LC rezonatör kullanılarak ikinci dereceden ve frekans ayarlı filtre tasarımı ve ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Bahsi geçen LC rezonatörler arasındaki bağlaşım bobinler arasında oluşan manyetik alan vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bobinler iki helik yapıda alt-bobinin ortak bir ferrit çekirdek üzerine sarılarak oluşturduğu akı-borusu formunda üretilmişlerdir. Akı borusu yapısı, alt-bobinler arası mesafenin mekanik olarak değiştirilmesine olanak sağlayan yapıdır. Alt bobinler arası bu mesafe değişimi de bobinlerin öz-endüktans değerini değiştirmekte ve dolayısıyla filtrenin merkez frekansını kaydırmaktadır. İki adet minyatürize boyutlarda akı borusu bobin bağlaştırmaları kullanarak bir HF filtre üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Alt-bobinler arası mesafenin 2 mm den 12 mm ye kadar sürekli değişimiyle, filtrenin merkez frekansı 9.4 MHz den 12.4 MHz'e kadar kaydırılabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ayarlı filtreler, akı borusu bağlaştırmacı, HF filtre, yığın elemanlı filtre.

Abstract

In this paper, we present a frequency tunable second order HF filter with two coupled lumped element LC resonators. Inter-resonator coupling is achieved through magnetic coupling between the inductors. The inductors are fabricated in the form of a flux-pipe structure, employing two helical sub-coils wound around a common ferrite core. The geometry of flux-pipe couplers is suitable for mechanically changing the separation between the sub-coils. Such a change, in turn, results in shifting the self-inductance of these couplers. An HF filter is fabricated with two miniaturized version of flux-pipe couplers. Filter's center frequency is tuned from 9.4 MHz to 12.4 MHz by changing the separation between sub-coils from 2 mm to 12 mm.

Keywords: Tunable filters, flux-pipe coupler, HF filter, lumped element filter.

1. Giriş

Ayarlanabilir ve anahtarlanabilir filtreler çoklu-band ve frekans-ayarlı kablosuz sistemlerin en önemli elemanlarından biridir. Bu tür filtreler alıcı-vericileri (transceiver) radyo frekans (RF) katlarında ya da ara frekans (IF) katında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayarlanabilir filtrelere bakıldığında, filtrenin merkez frekansı elektronik olarak [1]–[6], mekanik olarak [7], [8], ya da manyetik ayarlama teknikleri [4] kullanılarak değiştirilebilmektedir. Anahtarlanabilir filtrelerin nasıl uygulandığına bakıldığında ise, farklı frekanslarda çalışan dizi halinde ayrılcı filtrelerin giriş ve çıkışlarına kaskad bağlı mikroelektromekanik sistem (MEMS) temelli ya da yarı iletken temelli anahtarların bağlanmasıyla filtre bankası oluşturulduğu görülmektedir [9]. Anahtarları bir kontrol birimi vasıtasıyla kontrol ederek istenilen bantta ki filtre sinyal hattına bağlanmaktadır. Anahtarlanabilir filtre bankaları ayarlanabilir filtrelere göre daha geniş frekans aralığını kapsayabilmektedir; fakat, kapsadığı frekans aralığında ayrılcı şekilde frekans ayarı yapmakta ve ayarlanabilir filtreler göre daha geniş yer kaplamaktadırlar.

Son yıllarda piezoelektrik katsayısı dc voltajla anahtarlanabilen ferroelektrik ince filmler ön plana çıkmaktadır. Bu ince filmler kullanılarak üretilen özünden anahtarlamalı (intrinsically-switchable) akustik filtreler kompakt filtre bankalarının gerçekleştirilmesi için önerilmektedir [10], [11]. Bu filtreler harici RF anahtarları elimine etme potansiyeline sahiptirler; fakat ince film akustik dalga filtrelerin çok düşük frekanslarda ve yüksek güçlerde kullanımı sınırlıdır. Kompak HF band mikroelektromekanik filtreler düşük frekanslar için kullanılmışlardır [12], fakat yine bu filtrelerinde yüksek güçlü uygulamalarda kullanımı pek mümkün değildir.

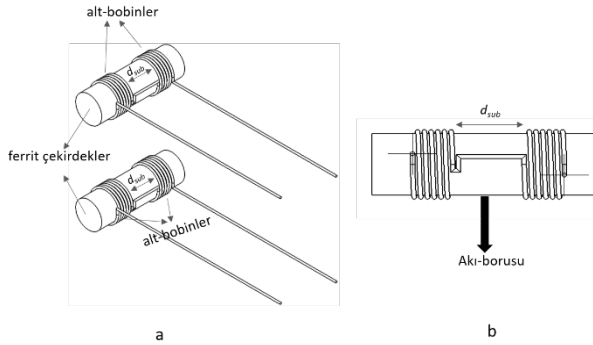
Bu çalışmada, yeni bir bobin türü kullanılarak ikinci dereceden mekanik olarak ayarlanabilir bir yığın eleman (lumped element) filtre tasarımı sunulmaktadır. İki LC rezonatör, bobinler arasında oluşan ortak manyetik alan

vasıtasıyla kuplajlanmaktadır. Buradaki bobinler esasında akı borusu kuplajlayıcılar olarak da anılmaktadırlar ve her bir bobin ya da kuplajlayıcı ortak bir ferrit çekirdek üzerine sarılmış alt bobinlerden oluşmaktadır. Akı borusu kuplajlayıcıları ilk olarak kablosuz güç aktarım sistemlerinde kullanılmışlardır [13]. Bu kuplajlayıcıların yapıları alt-bobinler arası mesafeyi değiştirmeye uygundur. Bu karakteristik de filtrenin merkez frekansının değiştirilmesine olanak sağlamaktadır.

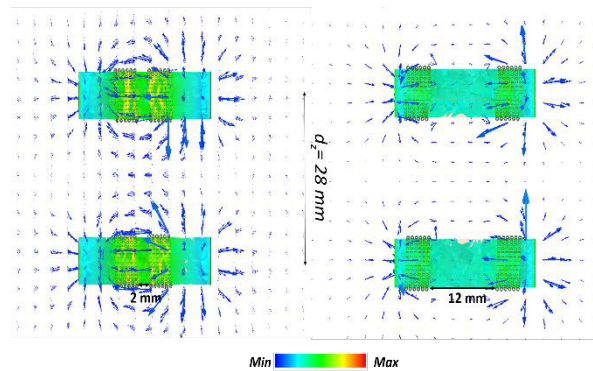
2. Kuplajlayıcı Yapısı ve Filtre Modeli

2.1. Akı-Borusu Kuplajlayıcı Yapısı

Bir akı borusu kuplajlayıcı iki adet alt-bobinin ortak bir ferrit üzerine sarılmasıyla elde edilmektedir. Alt-bobinler birbirlerine elektriksel olarak seri ya da paralel bağlıdır; fakat paralel bağlantı gerekli bobin değerlerinin elde edilebilmesi için çok sayıda sargı ve tel kullanımı gerektirmektedir. Bu nedenle bu çalışmada alt-bobinler arası bağlantının seri olarak gerçekleştirilmesi uygun görülmektedir. Şekil 1 (a) da kuplajlanmış bir çift akı borusu yapısı, Şekil 1 (b) de ise tek bir akı borusunun önden görüntüsü teknik çizim olarak verilmektedir.



Burada belirtilmesi gereken önemli bir husus seri bağlı alt-bobin bağlantılarının bağlantı konfigürasyonunun ferrit içerisinde her bir alt-bobinden dolayı oluşan manyetik akının yapıcı şekilde toplanmasını sağlayacak şekilde olması gerektiğidir [13]. Şekil 2 de bir elektromanyetik (EM) benzetim programında yapılan benzetim sonuçları verilmektedir. Görüldüğü üzere, alt bobinler tarafından oluşturulan manyetik alan ferrit içinde yapıcı şekilde toplanmaktadır.



Şekil 2: EM benzetim sonuçlarından elde edilen ve alt-

bobinler arası mesafelerin 2 mm ve 12 mm olduğu durumlar için Ferrit çekirdek içerisinde manyetik akı dağılımı.

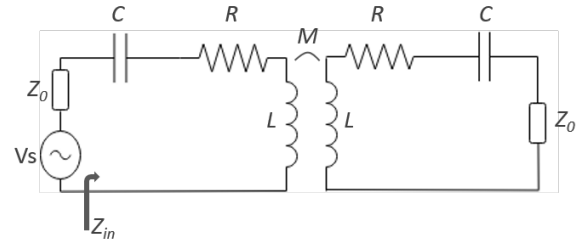
Yine aynı şekilden görüldüğü üzere alt-bobinler arası mesafe (dsub) 2 mm den 12 mm ye çıkarıldığında, ferritler içindeki akı dağılımı oldukça değişmektedir. Kablosuz güç transferi uygulamalarında ferrit içerisinde meydana gelen bu değişim bobinler (kuplajlayıcılar) arasındaki kuplaj sabitini ayarlamak, özellikle artırmak için kullanılmaktadır. Bu çalışma da ise, ilk defa alt bobinler arasında mesafe değişiminden kaynaklanan bu ferritler içindeki manyetik akı değişimi frekansı ayarlanabilir filtre tasarımında kullanılmaktadır.

2.2. Manyetik Olarak Kuplajlanmış İkinci Dereceden Filtre için Devre Modeli

Manyetik olarak kuplajlanmış ikinci dereceden filtrenin frekans cevabı Şekil 3 de verilen devre modeli kullanılarak elde edilebilir. Filtrenin araya girme kaybı bu model kullanılarak aşağıdaki gibi çıkarılabilir:

$$S_{21}(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{4Z_0^2 \omega^2 M^2}{4(R+Z_0)^2 \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2 + \left[(R+Z_0)^2 - \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + \omega^2 M^2 \right]} \right) \quad (1)$$

Burada ω , Z_0 , L , R , M ve C sırasıyla açısal frekansı ($2\pi f$), sistem empedansını, kuplajlayıcıların öz-endüktansını, kuplajlayıcıların kayıp direncini, kuplajlayıcılar arası karşılıklı endüktansı ve kuplajlayıcılara seri olarak bağlanan kapasitörleri temsil etmektedirler.



Şekil 3: İkinci dereceden manyetik olarak kuplajlanmış filtrenin devre modeli

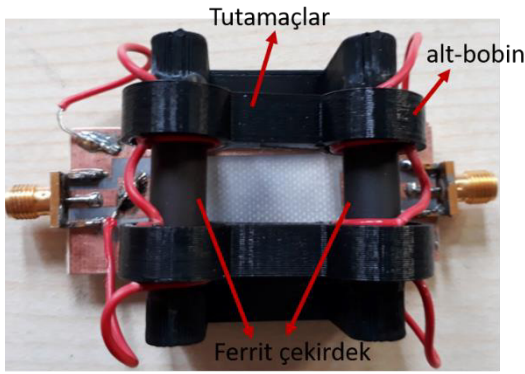
Filtrenin giriş yansıma katsayısı aşağıda denklem (2) de verildiği üzere elde edilmektedir. Elektromanyetik benzetim programı ve burada anlatılan devre modeli istenilen filtre cevabını elde etmek amacıyla tasarımda birlikte kullanılabilir.

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + \frac{(\omega M)^2}{R + Z_0 + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} - Z_0}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + \frac{(\omega M)^2}{R + Z_0 + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} + Z_0} \right) \quad (2)$$

3. Filtrenin Üretimi ve Ölçüm Sonuçları

Filtre üretimine ilk olarak alt bobinlerin bir kalıba sarılmasıyla başlanmıştır. Sargılar daha sonra kalıptan çıkarılıp bir hızlı yapıştırıcıyla sertleştirilmişlerdir. Daha sonra bu sargılarla elde edilen alt-bobinler 3-boyutlu (3-d) yazıcıda üretilen metalik olamayan tutamaç yapılarına yerleştirilmişlerdir.

Üretilen bu tutamaçlar, bobinler (kuplajlayıcılar) arası mesafeyi sabit tutmaya ve alt-bobinler arası mesafeyi kolayca değiştirmeye olanak sağlamaktadırlar. Son olarak da kuplajlayıcılar rezonans kapasitörlerine seri olarak bağlanmışlardır. Filtre 50 Ω sistem empedansına sahip ağ analizöründe ölçüleceği için, giriş çıkış portlarına bağlantılar 50 Ω karakteristik empedansına sahip mikroşerit hatlarla gerçekleştirilmektedir. Şekil 4 de üretimi gerçekleştirilen ikinci dereceden filtrenin fotoğrafı gösterilmektedir.



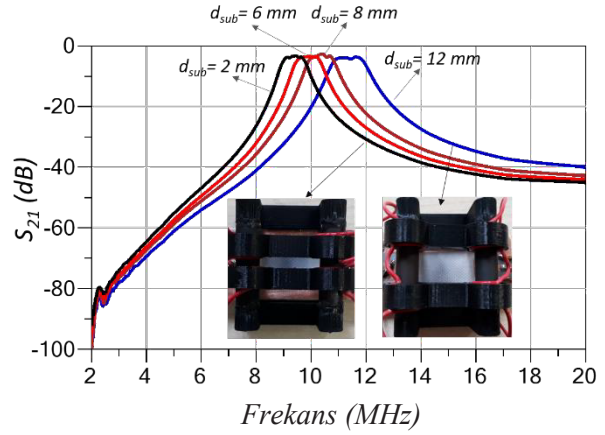
Şekil 4: Üretimi gerçekleştirilen filtrenin fotoğrafı

Ferrit çekirdekler dairesel kesitli yarıçapı 8 mm ve uzunluğu 26 mm olan çubuk şeklinde yapıdadırlar. Ferritlerin bağlı manyetik geçirgenliği (μ_r) 125 dir. Akı boruları arası mesafe 26 mm dir ve bu mesafe, alt-bobinler arası mesafe 6 mm iken, akı boruları arası 0.82 μH değerinde karşılıklı endüktans (M) değeri oluşmasını sağlamaktadır. Alt bobinler arası çeşitli mesafeler (d_{sub}) için bobinlerin ölçülen öz endüktans değerleri aşağıda Tablo 1 de verilmektedir. Akı boruları 22 pF değerinde seri bağlı kapasitörlerle rezonansa sokulduklarında, 10 MHz merkez frekansında ve 750 kHz band genişliğinde bir band geçiren filtre cevabı sergilemektedirler. Burada alt bobinler arası mesafe (d_{sub}) 6 mm dir. Filtrelerin ölçümü Rohde & Schwarz FSH8 Spectrum + Network markalı bir ağanalizörü ile gerçekleştirilmiştir.

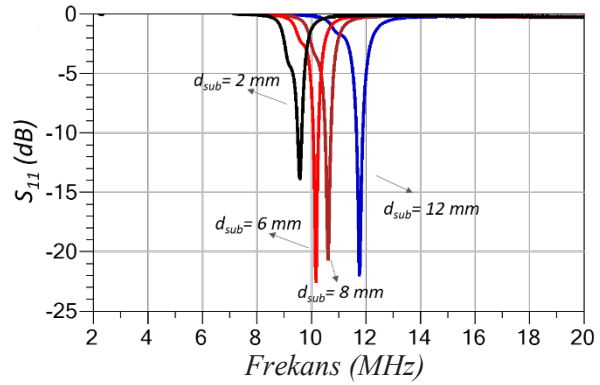
Tablo 1: Çeşitli d_{sub} değerleri için bobinlerin ölçülen öz endüktans değerleri

d_{sub}	2 mm	6 mm	8 mm	12 mm
L	13.2 μH	11.5 μH	10.8 μH	9 μH

Şekil 5 ve Şekil 6 da ağ analizöründen ölçülen araya grime kaybı (S_{21}) ve giriş yansımaya katsayısı (S_{11}) değerlerinin frekansa göre değişim grafikleri verilmektedir. Burada her iki veri de alt bobinler arası mesafelerin hem 2 mm hem de 12 mm olduğu durumlar için gösterilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere, filtreler alt-bobinler arası mesafenin 8 mm ye kadar olduğu durumlar için yaklaşık 3.5 dB araya girme kaybı sergilemektedir. Fakat alt-bobinler arası mesafe 12 mm iken araya girme kaybı yaklaşık 4.2 dB ye kadar çıkmaktadır. 12 mm de araya girme kaybındaki bu artış kuplajlanma sabiti değerinin çok yüksek olmasından dolayıdır. Filtrenin merkez frekansı 9.4 MHz den 11.4 MHz değerine alt bobinler arası mesafenin mekanik olarak 2 mm den 12 mm ye değiştirilmesiyle kaydırılabilmektedir. Tablo 2 ölçülen filtrenin performansını tüm mekanik ayarlama durumları için özet olarak vermektedir.



Şekil 5: Çeşitli d_{sub} değerleri için araya girme kaybının frekansa göre değişimi



Şekil 6: Çeşitli d_{sub} değerleri için giriş yansımaya katsayısının frekansa göre değişimi

Tablo 2: Ölçülen filtrenin çeşitli ayarlama durumları için elektriksel performansı

d_{sub}	Araya Girme Kaybı	Merkez Frekansı	1 dB Bant genişliği
2 mm	~ 3.6 dB	9.4 MHz	685 kHz
6 mm	~ 3.6 dB	9.9 MHz	750 kHz
8 mm	~ 3.4 dB	10.4 MHz	820 kHz
12 mm	~ 4.2 dB	11.4 MHz	1070 kHz

Üretilen bu filtrelerin çalışma frekansları mevcut ferritlerin yüksek frekans performanslarıyla sınırlıdır. Düşük manyetik geçirgenliğe sahip ve güç elektroniği devrelerinde de sıklıkla kullanılan Nikel Çinko (NiZn) malzemeden yapılan ferrit çekirdekler birkaç on MHz lere düşük kayıplarda sabit geçirgenlik değerlerini koruyabilmektedirler.

4. Sonuç

Bu makalede, ikinci dereceden mekanik olarak frekansı ayarlanabilen bir yığın eleman tasarımı ve ölçüm sonuçları sunulmaktadır. İki adet LC rezonatör arasındaki bağlaşım bobinler arasındaki manyetik alan kuplajlanmasıyla sağlanmaktadır. Bobinler esasında akı-borusu olarak isimlendirilen kuplajlayıcı yapısındadırlar. Akı borusu yapısı bir filtre tasarımı için ilk defa kullanılmıştır.

Kaynaklar

- [1] T. S. Kalkur *et al.*, “Low Voltage Tunable Band Pass Filters Using Barium Strontium Titanate Parallel Plate Capacitors,” *Integr. Ferroelectr.*, vol. 112, no. 1, pp. 1–7, 2010.
- [2] C. Schuster *et al.*, “Performance analysis of reconfigurable bandpass filters with continuously tunable center frequency and bandwidth,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 11, pp. 4572–4583, 2017.
- [3] H. Aldeeb and T. S. Kalkur, “Tunable dual band filter with BST capacitors,” *Integr. Ferroelectr.*, vol. 157, no. 1, pp. 95–100, 2014.
- [4] A. S. Hussaini, R. Abd-Alhameed, and J. Rodriguez, “Tunable RF filters: Survey and beyond,” in *2011 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 2011, pp. 512–515.
- [5] X. Wang, P. Bao, T. J. Jackson, and M. J. Lancaster, “Tunable microwave filters based on discrete ferroelectric and semiconductor varactors,” *IET microwaves, antennas Propag.*, vol. 5, no. 7, pp. 776–782, 2011.
- [6] E. Fourn *et al.*, “Bandwidth and central frequency control on tunable bandpass filter by using MEMS cantilevers,” in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003*, 2003, vol. 1, pp. 523–526.
- [7] S. Kurudere and V. B. Ertürk, “Novel microstrip fed mechanically tunable combline cavity filter,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 578–580, 2013.
- [8] Y. Ishikawa *et al.*, “Mechanically tunable MSW bandpass filter with combined magnetic units,” in *IEEE International Digest on Microwave Symposium*, 1990, pp. 143–146.
- [9] S. Mahon, J. Zepess, M. Andrews, and T. Semiconductor, “BAW flip-chip switched filter bank delivers dramatic form factor reduction,” in *High Freq. Electron.*, 2008, pp. 24–28.
- [10] S. A. Sis, S. Lee, V. Lee, and A. Mortazawi, “An intrinsically switchable, monolithic BAW filter using ferroelectric BST,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 26, no. 1, pp. 25–27, 2016.
- [11] V. Lee, S. Lee, S. A. Sis, and A. Mortazawi, “Intrinsically Switchable Frequency Reconfigurable Barium Strontium Titanate Resonators and Filters,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 9, pp. 3221–3229, 2017.
- [12] F. D. Bannon, J. R. Clark, and C.-C. Nguyen, “High-Q HF microelectromechanical filters,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 4, pp. 512–526, 2000.
- [13] M. Budhia, G. Covic, and J. Boys, “A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 2487–2492, 2010.



Seyit Ahmet Sis

2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü elektronik mühendisliği bölümünden lisans derecesini aldıktan sonra 2007 yılına kadar TÜBİTAK-UEKAE elektromanyetik uyumluluk (EMC) laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmıştır. 2008 ve 2014 yıllarında, sırasıyla Syracuse Üniversitesi ve Michigan Üniversitesi (Ann Arbor) elektrik mühendisliği bölümlerinden yüksek lisans ve doktora derecelerini almıştır. 2014 yılından beri Balıkesir Üniversitesi elektrik elektronik mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları RF & Mikrodalga devre ve sistemleri, kablosuz güç transfer sistemleri ve elektromanyetik cihazlar üzerinedir.