

RF MEMS TEKNOLOJİSİ İLE AYARLANABİLİR EMPEDANS UYUMLAMA VE GÜÇ BÖLÜCÜ DEVRELERİ

M. Ünlü, H. Sağkol, K. Topallı, Ö. Aydın Çivi, Ş. Demir, S. Koç ve T. Akın

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
munlu@metu.edu.tr, sagkol@metu.edu.tr, kagan@metu.edu.tr, ozlem@metu.edu.tr, simsek@metu.edu.tr,
skoc@metu.edu.tr, tayfun-akin@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada RF MEMS teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen ayarlanabilir empedans uyumlama ve güç bölücü devrelerinin tasarımı ve üretimi sunulmaktadır. Ayarlanabilir empedans uyumlama devresi üç kütüklü (triple stub) uyumlama teorisi üzerine tasarlanmıştır. Kütüklerin boylarını değiştirilebilmesi ve gerekli geçirileri ekleyebilmesi kütüklerin üzerine yerleştirilmiş MEMS anahtarlarla sağlanmaktadır. İki uyumlama devresi kullanılarak tasarlanan güç bölücü ise, ayarlanabilir olduğundan, giriş gücünü, herhangi iki yükte sonlandırılmış iki kola, istenen oranda bölebilmektedir. Benzetim sonuçlarına göre uyumlama devresi, 50 Ω empedans değerini 16 Ω değerine uyumlama için ayarlandığında, 16.3 + j5.5 Ω değerine uyumlama yapmaktadır. Yapılar MEMS teknolojisi ile cam taban üzerinde üretilmiştir.

GİRİŞ

Empedans uyumlama mikrodalga devrelerindeki önemli problemlerden biridir. Başta antenlerin devreye bütünleştirilmesi ve yarıiletken yükselteçlerin giriş ve çıkışlarının düzenlenmesi olmak üzere empedans uyumlama devreleri, kablosuz iletişimin kullanıldığı her uygulamada yer almaktadır. Aynı şekilde güç bölücü devreler de, faz dizili anten uygulamaları başta olmak üzere birçok mikrodalga uygulamasında kullanılan önemli bir devre elemanıdır. Bu iki devre elemanının performansı sistemin performansını direkt olarak etkilemektedir. Dolayısıyla sistemlerden yüksek verim elde edebilmek için kaybı ve araya sokma yitimi düşük, yalıtımı yüksek, doğrusal çalışan empedans uyumlama ve güç bölücü devrelerine ihtiyaç vardır.

Mikro Elektro Mekanik Sistemler, veya MEMS adı verilen teknoloji, birçok elektronik yapının daha yüksek performanslı ve düşük maliyetli olarak gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Gelişmiş yarıiletken teknolojisini kullanan ve hassas mikroişleme yöntemlerine dayanan bu teknoloji ile RF uygulamaları için MEMS devre elemanları üretilmektedir. Bu yapılar rakiplerine oranla daha üstün bir performans göstermekte, daha küçük hacim kaplamakta ve çok daha ucuza üretilmektedirler. Üretilen yapılar arasında MEMS anahtarlar [1,2], faz kaydırıcılar [3] ve ayarlanabilir sığa [4] örnek olarak gösterilebilir. MEMS teknolojisi ile şu ana birkaç ayarlanabilir empedans uyumlama devresi yayınlanmıştır [5,6], ancak kütüklü uyumlama yöntemiyle tasarlanmış bir yapı mevcut değildir. Ayarlanabilir güç bölücü devresi ise ne klasik teknolojilerle, ne de MEMS teknolojisiyle üretilmemiştir.

Bu bildiride empedans uyumlama ve güç bölücü devrelerinin MEMS teknolojisi ile tasarımı ve üretimi anlatılmaktadır. Üretilen yapılar MEMS teknolojisinin getirdiği avantajlarla “ayarlanabilir” olarak tasarlanmıştır. Bu sayede empedans uyumlama devresi rakiplerine göre çok daha geniş bir empedans bandı sağlamakta ve Smith abağı üzerinde herhangi bir noktaya uyumlama yapabilmektedir. Empedans uyumlama devreleri kullanılarak yapılan ayarlanabilir güç bölücü ise, verilen gücü istenilen oranda iki parçaya bölebilmektedir.

AYARLANABİLİR EMPEDANS UYUMLAMA DEVRESİ

Empedans uyumlama devresi temel olarak kütüklü empedans eşleme teorisine dayanmaktadır [7]. Standart olarak kullanılan iki kütüklü empedans eşleme devresi, bilindiği gibi, sabit uzunlukta iletim hattı ve ona paralel olarak bağlı, kısa devre ile sonlandırılmış, uzunluğu değişebilen kütüklerden oluşmaktadır. Giriş empedansını verilen bir empedansa uyulamak için, kütüklerin sonlarındaki kısa devrelerin yeri değiştirilmekte ve böylece iletim hattının, yani kütüğün boyu ayarlanarak istenilen miktarda geçiri eklenebilmektedir.

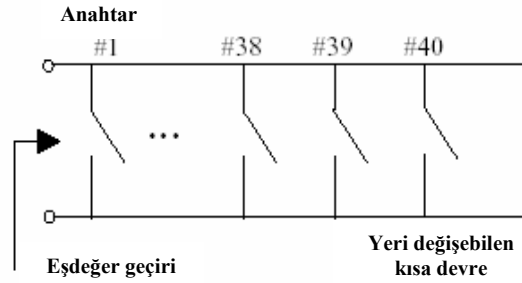
Bu bildiride sunulan ayarlanabilir empedans uyumlama devresinde ise, üç kütüklü empedans eşleme kullanılmıştır. Bu yöntemi kullanmanın avantajı, iki kütüklü yöntemin aksine, Smith abağı üzerinde herhangi bir nokta üzerine uyumlama yapmaya imkan vermesidir. Yapıda iletim hattı olarak eşdüzlemlı dalga kılavuzu (EDK) kullanılmıştır. Kütükler arası mesafe $\lambda/8$ olarak seçilmiştir. Ayrıca yük empedansının bağlandığı noktadan ilk kütüğe kadar ve son kütükten giriş empedansı noktasına kadar 200 μm boyunda EDK, bağlantı

alnabilmesi için eklenmiştir. Kütüklerin uzunluğu pozitif ve negatif geçiri eklenebilmesi için 10 GHz frekansında $\lambda/2$ olarak seçilmiştir. Kütük uzunluğunu ayarlanması MEMS anahtarlarla yapılmaktadır.

Yapıda kullanılan MEMS anahtarlar EDK için tasarlanmış, paralel, köprü tipi anahtarlardır. Anahtarın genişliği $100 \mu\text{m}$ 'dir. Anahtar açık durumdayken EDK'nın $5 \mu\text{m}$ üstünde havada asılı olarak durmakta ve 22 fF civarında bir sığa ile hattı yüklemektedir. Anahtar, üzerine voltaj uygulandığında oluşan elektrostatik çekim ile aşağı çekilmekte ve EDK üzerine yapışmaktadır. Böylece aşağı yapışan köprü canlı ve toprak hatları arasında yüksek bir sığa oluşturmaktadır. Arada oluşan göre 4.64 pF civarındaki sığa 10 GHz için canlı hattı toprak hattına yaklaşık olarak kısa devre hale getiren bir değerdir. Sonuç olarak köprü, anahtarın indiği noktada, EDK'nın canlı hattı toprak hattına kısa devre olmaktadır.

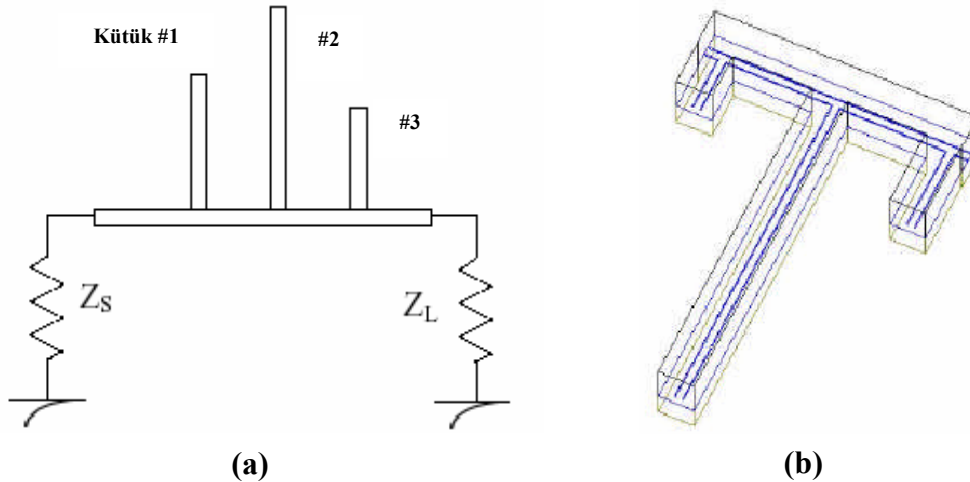
MEMS anahtarların elektrostatik benzetimi Coventorware, RF benzetimi de Ansoft HFSS programı ile yapılmıştır. Anahtarın kapanması için gerekli olan voltaj 32 voltur. Yapımı DA güç tüketimi olmadığından, bu voltajı düşük değerli voltaj kaynaklarından kolayca elde etmek mümkündür. Anahtarın araya sokma yitimi 0.014 dB olduğu için arka arkaya çok sayıda bağlansa bile fazla bir işaret kaybı oluşturmamaktadır.

Yukarıda anlatılan MEMS anahtarlardan her bir kütük üzerine eşit aralıklarla 40'ar adet yerleştirilmiştir. Anahtarlar arasındaki mesafe $200 \mu\text{m}$ 'dir ve 10 GHz'de $\lambda/40$ uzunluğa denk gelmektedir. Bu sayede, istenilen yerdeki MEMS anahtar indirilerek o noktada bir kısa devre oluşturulmakta ve istenilen uzunlukta, kısa devre ile sonlandırılmış kütük elde edilmektedir. Kütüğün şeması Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1. MEMS anahtarlar ile uzunluğu ayarlanabilen, kısa devre ile sonlandırılmış kütüğün şeması.

Ayarlanabilir uzunlukta kısa devre ile sonlandırılmış kütükler ile üç kütüklü empedans uyumlama devresi Şekil 2 (a)'da görülen biçimde yapılmıştır. Burada, verilen yük ve giriş empedans değerleri için hesaplanan mesafeye en yakın anahtarlar kapatılır ve o noktada kısa devre elde edilir. Böylece ana EDK üzerine gerekli miktarlarda girinti eklenir ve empedans eşleme gerçekleştirilmiş olur.



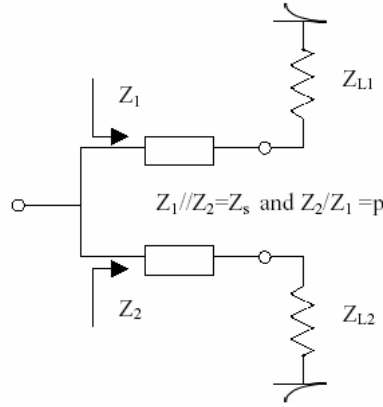
Şekil 2. (a) Üç kütüklü empedans eşleme devresinin şeması. Şekilde, kütük uzunlukları MEMS anahtarlarla ayarlanarak Z_s değeri Z_L değerine eşlenmektedir. (b) Ansoft HFSS benzetiminde kullanılan üç kütüklü empedans eşleme devresi modeli.

MEMS anahtarlar belli aralıklarla yerleştirildiği için kütük uzunluğu sürekli olarak değiştirilememektedir. Olması gereken kütük uzunluğu ile MEMS anahtarın kapatıldığı mesafe arasındaki fark şu şekilde kapatılabilir: kapatılması gereken anahtardan önceki bütün anahtarlara kapanma voltajından küçük, belli bir voltaj uygulanır, böylece kapanacak anahtara kadar olan EDK'nın karakteristik empedansı değişir, dolayısıyla elektriksel uzunluk değişir ve ana hatta eklenen girinti miktarı değişmiş olur.

Üç kütüklü yapının tamamının benzetimi Ansoft HFSS benzetim yazılımı ile yapılmıştır. Benzetim modellemesine MEMS anahtarlar dahil edilmemiştir, fakat MEMS anahtarların kapalı durumunda kısa devre yerine kullanılan sığa değerleri hesaplamalara katılmıştır. Ayrıca, EDKların bağlantılarından oluşan T-bağlantılarının etkileri de hesaplamalara dahil edilmiştir. Benzetim sırasında kullanılan model Şekil 2 (b)'de görülebilir.

Benzetim için 16Ω değerini 50Ω değerine uyumlayacak kütük uzunlukları hesaplanmış ve benzetim yapılmıştır. Kullanılan kütük uzunlukları 0.094λ , 0.374λ , 0.061λ dır. Bu şekilde yapılan benzetimde yapı 50Ω değerini $16.3 + j5.5 \Omega$ değerine getirmiştir. Benzetim sonuçlarıyla elde edilenle, beklenen sonuç arasında fark elektromanyetik benzetim programlarındaki artık hatadan kaynaklanmaktadır.

Yapının sanal yüklere (bir MESFET'in giriş empedansı gibi) uygulanabilirliğini göstermek için, başka bir kütük uzunluğu kümesiyle $1.8 + j25 \Omega$ değerini 50Ω değerine uyumlamak üzere benzetim yapılmıştır. Bu durumda da yapı $1.0 + j24.5 \Omega$ değerine uyumlama yapabilmektedir. Benzetim sonuçları, beklenenden farklılık göstermesine rağmen tatminkardır. Ölçüm sonuçlarının bu farklılıkların anlaşılmasında faydalı olması beklenmektedir.



Şekil 3. Ayarlanabilir güç bölücü şeması ve 1/p oranında güç bölümü için gerekli empedans oranları

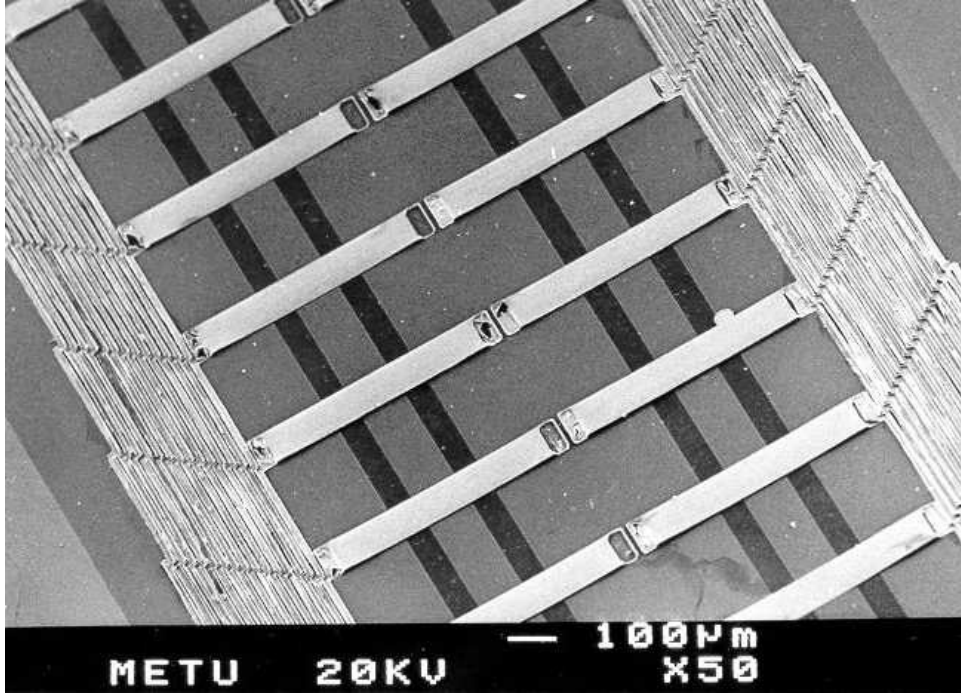
AYARLANABİLİR GÜÇ BÖLÜCÜ DEVRESİ

Ayarlanabilir güç bölücü, basitçe, iki empedans uyumlama devresinden oluşmaktadır. Empedans uyumlama devreleri, girişleri birbirine bağlı, çıkışları da iki farklı yük ile sonlandırılarak, paralel olarak bağlanmıştır. Empedans uyumlama devreleri yük empedanslarını istenen bir değere dönüştürebilmektedir. Dolayısıyla, empedans uyumlayıcıların girişlerindeki empedansların paralel eşdeğerleri, yine 50Ω olacak şekilde ayarlanırlarsa, örneğin 62.5Ω ve 250Ω , bu noktadan görülen eşdeğer empedans yine 50Ω olduğu için yansıma olmayacaktır. Fakat iki kolda görülen empedans değerleri farklı olduğu için güç aralarında oranlı olarak bölünecektir. Güç bölünme oranı empedans uyumlama devrelerinden içeri doğru görülen empedans oranına eşittir (bu durum için 4:1). Bu şekilde empedans uyumlama devrelerinin empedans dönüştürme oranları ile ayarlanabilir oranlı bir güç bölücü elde edilmiştir. Aynı yapı bir güç birleştirici olarak da kullanılabilir, ama bu durumda yalıtım problemi ayrıca incelenmelidir. Yapının toplam boyutu EM benzetim yapmak için yeterince küçük değildir. Bu sebepten ötürü, üç kütüklü empedans uyumlama devresinin sonuçlarına dayanılarak güç bölücü yapısı tasarlanmış ve üretilmiştir. Devrenin şeması Şekil 3'te görülebilir.

ÜRETİM

Yapılar temel olarak üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman eşdüzlemli dalga kılavuzlarının gerçekleştirildiği 1. metal katmandır. İkincisi ise doğru akım yalıtımını sağlayan yalıtkan katmandır. Üçüncüsü de hareketli kısımların oluşturulmasında kullanılan yapısal katman olarak da bilinen ve bazı kısımları havada duran 2. metal katmandır. Bu üç katmanlı yapıyı oluştururken şu süreç takip edilmiştir: 1) İlk metal katmanı olarak $0.1 \mu\text{m}/0.9 \mu\text{m}$ Cr/Au serilip şekillendirilmesi, 2) Yalıtım için $0.2 \mu\text{m}$ Si_3N_4 serilip şekillendirilmesi, 3) Yapısal katmanın havada kalan kısımlarını desteklemek amacıyla $5 \mu\text{m}$ kalınlığında fotodirenç (photoresist)

serilip şekillendirilmesi, 4) yapısal metal katmanın elektrokaplama tekniğiyle büyütülüp şekillendirilmesi, 5) Yapıların havada kalması amacıyla daha önce serilen fotodirencin kaldırılması. Şekil 4'te üretilmiş empedans uyumlama devresinin iki kütüğü ve üzerlerinde MEMS anahtarlar görülebilir.



Şekil 4. Elektron taramalı mikroskop (SEM) kullanılarak elde edilmiş empedans uyumlama devresinin fotoğrafı

SONUÇ

Bu çalışmada iki yeni RF MEMS yapısı sunulmaktadır. Üç kütküklü empedans uyumlama devresi, teorisi iyi bilinen bir yapı olmasına rağmen, MEMS teknolojisi kullanılarak ilk kez gerçekleştirilmektedir. Bu yapı elektriksel olarak kontrol edilebildiğinden diğer yarı iletken devre elemanlarıyla bütünleştirilmeye uygundur. İki uyumlama devresinden oluşan ayarlanabilir güç bölücü ise, daha önce hiçbir şekilde gerçekleştirilmemiştir, çünkü MEMS teknolojisinin getirdiği faydalar olmadan bu yapının gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu yapı, ayarlanabilir olmasıyla, faz dizili anten uygulamalarında kullanılmak üzere gelecek vadettmektedir. Yapılar tasarlanmış, bilgisayar benzetimleri yapılmış ve üretilmiştir. Ölçüm sonuçları konferansta sunulacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] J.B. Muldavin ve G.M. Rebeiz, "High-Isolation CPW MEMS Switches Part 1: Modeling," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 48, s. 1045-1052, Haziran 2000.
- [2] J.B. Muldavin ve G.M. Rebeiz, "High-Isolation CPW MEMS Switches Part 2: Design," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 48, s. 1053-1056, Haziran 2000.
- [3] N. Scott Barker ve Gabriel M. Rebeiz, "Distributed MEMS True-Time Delay Phase Shifters and Wide-Band Switches," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, s. 1881-1890, Kasım 1998.
- [4] Z. Feng, H. Zhang, W. Zhang, B. Su, K.C. Gupta, V.M. Bright, Y.C. Lee, "MEMS Based Variable Capacitor for Millimeter Wave Applications," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, s. 255-258, Haziran 2000.
- [5] Sanghwa Jung, Kyungteh Kang, Jae-Hyoung Park, Ki-Woong Chung, Yong-Kweon Kim, Youngwoo Kwon, "Micromachined Frequency-Variable Impedance Tuners using Resonant Unit Cells", Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International , Volume:1, 2001, s. 333-336
- [6] K.L. Lange, J. Papapolymerou, C.L. Goldsmith, A. Malczewski, J. Kleber, "A Reconfigurable Double-Stub Tuner using MEMS Devices," Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International , Volume:1, 2001s. 337-340.
- [7] R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, Mc Graw Hill, 1992.