

TÜBİTAK

2006-410
✓

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU
THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

Elektrik, Elektronik ve Enformatik Araştırma Grubu
Electrical, Electronical and Informatics Research Group

90969

**GELİŞMEKTE OLAN YER VE UYDU TABANLI
UYGULAMALAR İÇİN YENİ ANTENLER**

PROJE NO: 102E036 (COST-284)

Doç. Dr. Özlem Aydın Çivi
Doç. Dr. Şimşek Demir
Y.Doç.Dr. Lale Alatan
Prof. Dr. Tayfun Akın
Y.Müh. Kağan Topallı, Y.Müh. Mehmet Ünlü, Y.Müh. Sinan Onat, Y.Müh.
Emre Erdil, Y.Müh. Mehmet Altuntaş

Aralık 2006
ANKARA

ÖNSÖZ

COST 284 projesi kapsamında, RF-MEMS teknolojisi kullanılarak frekansı ayarlanabilen, bantı değiştirilebilen antenler tasarlanmış, üretilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, anten dizilerinde kullanılan demet şekillendirici devreler için MMIC vektör modülatör devresi tasarımları ve serimi yapılmıştır. Vektör modülatörün MEMS devre bileşenleri ile yapılabilmesi için çalışmalar yapılmış, devre bileşenleri tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Antenlerin tamamı ODTÜ MikroElektronik Tesislerinde mikroişleme teknolojisiyle, proje elemanları tarafından geliştirilen üretim süreci kullanılarak üretilmiştir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden ve lisansüstü öğrencilerinden oluşan bir ekip tarafından gerçekleştirilen bu proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

İçindekiler

ÖNSÖZ.....	2
Özet	8
Abstract.....	9
1. GİRİŞ.....	10
2. ÇİFT FREKANSLI ANTENLER.....	12
2.1. Giriş	12
2.2. Yarıkli RF-MEMS Anahtarlarla Şekillendirilebilir İki/Üç Bandlı Anten	15
2.2.1. Giriş.....	15
2.2.2. Tümeşik Çift Frekanslı Anten	15
2.2.3. Hibrit Üç Frekanslı Anten.....	19
2.3. Rezonans Frekansı Ayarlanabilir Mikroşerit Yama Anten.....	23
2.4. EDK Beslemeli Dikdörtgensel Yarık Anten.....	28
3. VEKTÖR MODÜLATÖR.....	37
3.1. Giriş	37
3.2. Vektör Modülatör MMIC Uygulama Devreleri.....	37
3.2.1. Vektör modülatör çeşitleri.....	38
3.2.2. Devre serimi	40
3.2.3. Sonuçlar ve değerlendirme.....	40
3.3. RF-MEMS Vektör Modülatör Çalışmaları	43
3.3.1. RF-MEMS Vektör Modülatör Devresi	43
3.3.2. Yeni nesil ayarlanabilir RF MEMS empedans uyumlama devresi.....	44
3.3.3. Yeni nesil empedans uyumlama devresinin ölçüm sonuçları	49
4. ODTÜ MİKROELEKTRONİK TESİSLERİNDE GELİŞTİRİLEN RF MEMS ÜRETİM SÜRECİ.....	53
5. PROJE BÜTÇESİ VE YAPILAN HARCAMALAR.....	56
6. SONUÇ.....	58
7. REFERANSLAR	60
Ek.1 Proje Kapsamında Yapılan Yayınlar.....	63
Ek.2 Proje Kapsamında Tamamlanan Tezler	66

Tablo Listesi

Tablo 1. MEMS anahtar için devre modelinde kullanılan değerler.....	47
Tablo 2. Tasarlanan MEMS empedans uyumlama devresinde kullanılan parametrelerin değerleri.....	48
Tablo 3. Proje kapsamında yapılan harcamalar (YTL).....	56

Şekil Listesi

Şekil 1. RF-MEMS anahtar yapıları	13
Şekil 2. Çift frekanslı tümleşik yama anten	16
Şekil 3. Anahtarlar açık durumdayken elde edilen EM benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	17
Şekil 4. Anahtarlar kapalı durumdayken elde edilen EM benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	17
Şekil 5. Işınım örüntüsü benzetim ve ölçüm sonuçları (a) E-düzlemi @ 6.5 GHz, (b) E-düzlemi @ 6.92 GHz, (c) H- düzlemi @ 6.5 GHz, (d) H- düzlemi @ 6.92 GHz, (e) E- düzlemi @ 8.5 GHz, (f) E- düzlemi @ 8.87 GHz, (g) H- düzlemi @ 8.5 GHz, (h) H- düzlemi @ 8.8 GHz.....	18
Şekil 6. Hibrit bağlantılı 3-frekanslı anten yapısı (a) Şematik gösterim, $L = 40.8$ mm, $W = 40.8$ mm, $l_s = 1$ mm, $l_f = 15.6$ mm, $w_f = 3.52$ mm, $l_{i1} = 12.8$ mm, $l_{i2} = 19.1$ mm, $w_i = 1$ mm, $l = 1.18$ mm, $w = 1.36$ mm, $w_s = 3.44$ mm (b) RF taban malzeme üzerinde anten yapısı (c)-(d) Girinti ve yarık üzerinde RF MEMS anahtar bağlantısı için detay.....	21
Şekil 7.. Hibrit anten için RF MEMS anahtarlar yerine metal şeritlerin kullanıldığı ölçüm sonuçlarının EM benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması. (a) 1.8 GHz (tüm anahtarlar açık) (b) 1.9 GHz (girinti anahtarları açık, yarık anahtarları kapalı) (c) 2.4 GHz (tüm anahtarlar kapalı).....	22
Şekil 8. Ayarlanabilir yama antenin genel görünümü.	24
Şekil 9. Üretilmiş antenin fotoğrafı.	25
Şekil 10. (a) Antenin kütük bölümünün SEM fotoğrafı. (b) köprü bölgesinin daha detaylı bir görüntüsü.....	25
Şekil 11. Üretilen antenin yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü.	26
Şekil 12. Antenin farklı DC gerilimler için ölçüm ve EM benzetim sonuçları.....	26
Şekil 13. 16.05 GHz frekansında köprülerin yukarı durumu için antenin ışınım örüntüsü sonuçları. (a) E-düzlemi (b) H-düzlemi.	27
Şekil 14. 15.75 GHz frekansında MEMS köprüler $1.4 \mu\text{m}$ yüksekliğine indirildiği durum için antenin ışınım örüntüsü sonuçları. (a) E-düzlemi (b) H-düzlemi.	27
Şekil 15. 50Ω empedansındaki eşdüzlemsel dalga kılavuzu (EDK) besleme hattının karşı kenarına kısa devre kütük eklenmesiyle elde edilen yarık anten yapısı.....	28

Şekil 16. 6 MEMS kapasitör ile yüklenen dikdörtgensel yarık antenin genel görünümü. ...	29
Şekil 17. Tek çapalı MEMS kapasitör yapısının kesit görüntüsü.	29
Şekil 18. Tek çapalı MEMS kapasitörlerle yüklenmiş yarık antenin EM benzetim sonuçları.	30
Şekil 19. EDK beslemeli dikdörtgensel yarık antenin yüklenmemiş halinin benzetim ve ölçüm sonuçları.	30
Şekil 20. EDK beslemeli dikdörtgensel yarık antenin yüklenmiş halinin benzetim ve ölçüm sonuçları.	31
Şekil 21. EDK beslemeli dikdörtgensel yarık anten yapısındaki tek çapalı MEMS köprüünün yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü.	31
Şekil 22. Tek çapalı köprülerin yükseklikleri 4 μm olarak benzetim yapıldığı durum ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	32
Şekil 23. Kapasitörlerin kanatlarının yukarı bükülmesini önlemek amacıyla tasarlanan yeni kapasitör yapısının kesit görüntüsü.	32
Şekil 24. EDK beslemeli dikdörtgensel yarık antenin uçları sabitlenmiş kapasitör yapılarıyla tasarlanmış halinin benzetim ve ölçüm sonuçları.	33
Şekil 25. Uçları çapalı kapasitör yapısının üretim sonrası yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü.	33
Şekil 26. Yarık antenin ışınım örüntüsünün ölçülebilmesi için oluşturulan düzenek.	34
Şekil 27. Ölçüm ve benzetimlerle elde edilmiş olan ışınım örüntüleri (a) 8.7 GHz'de E-düzlemi örüntüsü (b) 8.7 GHz'de H-düzlemi örüntüsü. (c) 10.57 GHz'de E-düzlemi örüntüsü. (d) 10.57 GHz'de H-düzlemi örüntüsü.	35
Şekil 28. Köprü yüksekliği 1.4 μm olan benzetimlerle elde edilmiş olan ışınım örüntüleri (a) 7.7 GHz'de E-düzlemi örüntüsü (b) 7.7 GHz'de H-düzlemi örüntüsü. (c) 10.22 GHz'de E-düzlemi örüntüsü. (d) 10.22 GHz'de H-düzlemi örüntüsü.	36
Şekil 29. I/Q vektör modülatör devresinin şeması.	38
Şekil 30. 0/180 anahtarlamalı vektör modülatör devresinin şeması.	39
Şekil 31. Shifted-Quadrant Vektör Modülatör.	39
Şekil 32. Üç vektörlü vektör modülatör devresinin şeması.	39
Şekil 33. (a) Eş fazlı birleştirici (toplayıcı) (b) İşaret bölücü (I/Q).	40
Şekil 34. (a) 0°/180° anahtarlamalı faz kaydırıcı (b) Pi şekilli kayıplı büyüklük ayarlayıcı.	41
Şekil 35. (a) İki vektörlü modülatör çıkış grafiği (b) Üç vektörlü Modülatör çıkış grafiği.	41
Şekil 36. İki vektörlü modülatör devre serimi.	42

Şekil 37. Önerilen vektör modülatörün blok şeması	43
Şekil 38. RF MEMS I/Q güç bölücü devresinin blok şeması	44
Şekil 39. RF MEMS üç kütüklü empedans uyumlama devresinin 3 boyutlu görünümü. ...	45
Şekil 40. Üçüncü nesil iki kütüklü empedans uyumlama devresinin şeması.....	46
Şekil 41. Empedans uyumlama devresinde kullanılan MEMS anahtarın üstten görünümü.	46
Şekil 42. MEMS anahtarın devre modeli.....	47
Şekil 43. Tasarlanan MEMS anahtarın devre ve HFSS benzetim sonuçları.....	47
Şekil 44. Empedans uyumlama devresinin S. Abağı üzerindeki empedans dağılımı (18GHz).....	48
Şekil 45. Üretilmiş olan MEMS empedans uyumlama devresinin fotoğrafı.	49
Şekil 46. Üretilmiş olan MEMS empedans uyumlama devresinin fotoğrafı. (a) MEMS anahtarın yakında görünümü. (b) Empedans uyumlama devresinin bir kütüğünün yakından görünümü.....	49
Şekil 47. MEMS anahtarın ölçülmüş S-parametreleri ve benzetimlerle karşılaştırılması. ...	50
Şekil 48. MEMS empedans uyumlama devresinin bazı örnek anahtar kombinasyonları için ölçülmüş olan S-parametreleri.	51
Şekil 49. MEMS empedans uyumlama devresinin 18 GHz'de bütün anahtar kombinasyonları için ölçülmüş Smith Abağı dağılımı.....	51
Şekil 50. ODTÜ Mikroelektronik Tesislerinde geliştirilen RF MEMS üretim sürecinin aşamaları.....	55

ÖZET

COST 284 projesi kapsamında, RF-MEMS teknolojisi kullanılarak, frekansı ayarlanabilen, bandı değiştirilebilen yeniden şekillendirilebilir antenler tasarlanmış, üretilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Üretilen antenlerin performansının tasarım kriterlerini sağladığı ve EM benzetimlerle uyumlu çıktığı görülmüştür. Ayrıca, anten dizilerinde, demet şekillendirici devrelerde kullanılmak üzere MMIC vektör modülatör devresi tasarımları ve serimi yapılmıştır. Yapılan EM benzetimleri ile iyi bir performans elde edildiği gösterilmiştir. Vektör modülatörün MEMS devre bileşenleri ile blok devre tasarımı yapılmış, bazı devre bileşenleri tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Antenlerin ve mikrodalga bileşenlerinin tamamı, proje elemanları tarafından geliştirilen yüzey mikroişleme teknolojisine dayalı üretim süreci kullanılarak ODTÜ MikroElektronik Tesislerinde üretilmiştir. Yapılan çalışmalar çeşitli konferanslarda sunulmuş ve uluslararası indekslerce taranan dergilerde makaleler yayınlanmıştır. Proje kapsamında 4 yüksek lisans tez çalışması tamamlanmış, iki doktora çalışması da sürmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çift frekanslı antenler, frekansı ayarlanabilen antenler, yeniden şekillendirilebilir antenler, Radyo Frekansı- MikroElektroMekanik Sistemler (RF-MEMS), Mikrodalga Tektaş Tümlleşik Devreler (MMIC), mikrodalga vektör modülatör devreleri

ABSTRACT

In this project, tunable frequency, multiband reconfigurable microstrip antennas using RF-MEMS technology have been designed, produced and measured. It is shown that the measurement results are in good agreement with the simulations and measured performance of the antennas satisfies the design criteria. Furthermore, vector modulator circuits that can be used in beamforming networks of phased arrays or smart antenna systems have been designed and produced by MMIC and RF-MEMS technology. All of the antennas and microwave components have been produced in METU-MicroElectronics facilities by using the surface micromachining process developed by RF-MEMS group members. Several conference papers have been presented in well known Conferences. Journal papers have been published. Four Master's theses were completed in the frame of this project. Furthermore two PhD works are in progress.

Key Words: Dual frequency antennas, tunable frequency antennas, reconfigurable antennas, RF-MEMS, MMIC, microwave vector modulator circuits

1. GİRİŞ

Bu raporda, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü bünyesinde yürütülmüş olan "Gelişmekte Olan Yer ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler (COST 284)" başlıklı araştırma projesi kapsamında yapılmış olan çalışmalar sunulmaktadır. COST284 aksiyonu kapsamında, TÜBİTAK tarafından desteklenen bu projede, özellikle yerüstü ve uzay iletişimde ve uzaktan algılama uygulamalarında kullanılacak farklı frekanslarda çalışabilen, çift/çoklu bantlı antenlerin tasarımı ve üretimi, ve faz dizili antenler için demet kaydırıcı-demet şekillendirici yeni mikrodalga devrelerinin tasarımı üzerine odaklanılmıştır. RF-MEMS (Radio frequency-MicroElectroMechanical Systems- MikroElektroMekanik Sistemler) teknolojisi kullanılarak literatürde daha önce yer almamış frekansı ayarlanabilen ya da çoklu bantlı yeniden şekillendirilebilir anten yapıları tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Ayrıca, faz dizili antenlerde ya da akıllı anten sistemlerinde istenen ışınma örüntüsünün oluşturulmasını ve ışın demetinin elektronik olarak kaydırılmasını sağlayan en önemli parçalardan biri olan vektör modülatör devreleri MMIC (monolithic microwave integrated circuit- Tek parça Mikrodalga Tümüleşik Devre) teknolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. Buna ek olarak, henüz literatürde yer almamış bir konu olarak vektör modülatör devresinin RF-MEMS teknolojisiyle tasarlanıp üretilmesi çalışmalarına başlanmıştır. Bu konuda önemli bir adım olan empedans uyumlayıcı devreler geliştirilmiş ve üretilip ölçülmüştür.

Çift-bantlı antenler, tüketicinin iki ayrı hizmeti tek bir ürünle elde etmesini sağlamak, uygulamada daha az alan kaplayarak maliyeti düşürmek için üzerinde yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu projede, çift frekanslı ya da frekansı kaydırılabilen mikroşerit antenler RF-MEMS teknolojisi kullanılarak üretilmiş ve literature yeni, yeniden şekillendirilebilir anten yapıları kazandırılmıştır. Geliştirilen yeni antenler arasında, iki ve üç bantlı, yama üzerinde yarık yerleştirilmiş, empedans uyumu RF-MEMS anahtarlarla sağlanan antenler Bölüm 2.2'de, frekansı ayarlanabilir çift bantlı, RF-MEMS değişken kapasitörlerle yüklenmiş kütüklü mikroşerit yama anten Bölüm 2.3'de, frekansı ayarlanabilir çift bantlı, RF-MEMS değişken kapasitörlerle yüklenmiş dikdörtgen yarık anten ise Bölüm 2.4'de anlatılmaktadır.

Günümüzde, faz kaydırmalı anten dizileri, telsiz iletişimi ve radar uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu anten dizilerinin en önemli özelliği, sistem mekanik olarak sabit olsa da ışın demetinin elektronik olarak hareket ettirilebilmesidir. Bu özelliği sağlayabilmek için dizide yer alan anten elemanlarının ya da anten gruplarının besleme faz ve

büyükliklerinin kontrol edilebilmesi gereklidir. Giriş işaretinin, aynı anda, hem fazını hem büyüklüğünü, tüm olası değerleri sağlayacak biçimde değiştirmek üzere tasarlanan devre vektör modülatör adı verilmektedir. Bir anten dizisinde çok sayıda vektör modülatör devre kullanılacağı için bu devreler bütün dizinin performansını ve maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir.

Vektör modülatör devrelerinin farklı teknolojiler kullanılarak üretilmesi mümkündür. Basit üretim teknolojisi ayrı devre elemanlarının hibrit yapıda birleştirilmesidir. Bu teknoloji tasarım açısından basit olsa da, performans ve maliyet açısından önemli sıkıntıları vardır. Bütün devre elemanlarının bu amaca uygun olarak tasarlanıp tek bir parça halinde üretilmesi bu konudaki çağdaş yaklaşımdır. Bu projede de MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) ve RF MEMS teknolojileri ile vektör modülatör tasarlanmış üretilmiştir. Tasarlanan vektör modülatörler Bölüm 3'te ayrıntıları ile verilmiştir.

Bu projede geliştirilen antenler ve mikrodalga devre bileşenleri, ODTÜ RF-MEMS grubu (proje grubu) tarafından geliştirilen RF-MEMS üretim süreciyle ODTÜ-MET (Mikro-Elektronik Tesisleri)'de üretilmiş, ve ölçümleri bölümümüzdeki Milimetrik Dalga Laboratuvarı yapılmıştır. Geliştirilen üretim süreci Bölüm 4'de sunulmuştur.

Projenin bütçesi ve yapılan harcamalarla ilgili açıklamalar Bölüm 5'te verilmiştir.

Bu proje kapsamında çıkan yayınların listesi Ek 1'de verilmiştir. Şimdiye kadar uluslararası indekslerce taranan dergilerde biri yayınlanmış, diğeri basılmak üzere kabul edilmiş iki yayı yapılmıştır. Bir makale daha hazırlanmış ve gönderilmek üzere.

Proje süresi boyunca yapılan COST 284 Yönetim kurulu toplantılarına katılmış ve yapılan çalışmalarla ilgili sunumlar yapılmıştır. Ayrıca, proje kapsamında çalışmalar yapan yüksek lisans öğrencisi Ufuk Temoçin, COST 284 projesinin Kısa Süreli Bilimsel Çalışma (Short Term Scientific Mission – STSM) programından yararlanarak İsviçre'nin Lozan kentindeki EPFL üniversitesinde bir haftalık bir çalışma gerçekleştirmiştir.

2. ÇİFT FREKANSLI ANTENLER

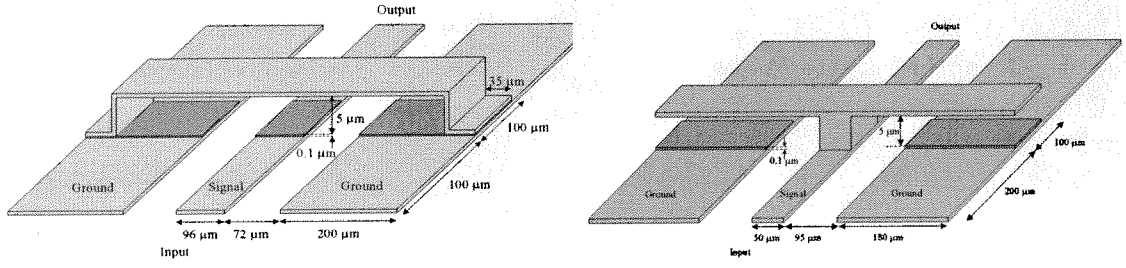
2.1. Giriş

Günümüzde kullanıcılar, birden çok mobil uygulamaya, - örneğin GSM, GPS, WLAN- tek bir cihazla erişmek istemektedir. Örneğin, dizüstü bilgisayarla farklı iki frekanstaki (2.4GHz-5GHz) WLAN hizmetine erişmek bunun yanında GPS bilgisini almak gibi. Bu farklı frekanslı uygulamalar için tek bir anten kullanmak hem daha az yer gerektirecek hem de maliyeti önemli ölçüde düşürecektir. Bu nedenlerle, son yıllarda çift frekanslı antenler üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Literatürde en çok rastlanan çift frekanslı anten yapıları şöyle sıralanabilir:

- Birden çok ışıyıcının kullanıldığı durumlar: örneğin çok katmanlı mikroşerit yapılar (stacked patches)
- Yarıkli, kısa devreli (shorting pins) yapılar: Buradaki temel prensip mikroşerit yama antenin TM_{30} modunun frekansını düşürerek ve TM_{10} moduyla birlikte çift frekanslı anten olarak kullanmak ya da TM_{10} modunun frekansını yükselterek TM_{30} ile birlikte kullanmaktır.
- Yama anteni kütük ya da değişken kapasitans ile yüklemek

Literatürde bu konularda yayınlanmış bir çok çalışma vardır, [[1][14].

Son yıllarda anahtarlar yardımıyla antenlerin büyüklükleri, şekilleri değiştirilerek birden çok frekansta çalışması sağlanmaktadır. Üretilen prototiplerde çoğunlukla pin diyot anahtarlar kullanılmaktadır. Bu projede ise RF-MEMS anahtarlarla şekillendirilebilir çift frekanslı antenler tasarlanmış ve üretilmiştir. RF-MEMS anahtarlar diğer anahtarlara göre önemli avantajlar sunmaktadır; araya girme kayıplarının az olması, izolasyonun yüksek olması, düşük güç tüketimleri, daha doğrusal bir karakteristik gibi. Bu projedeki antenlerde de kullanılan tipik anahtar örnekleri olarak, Şekil 1’de eş düzlemlı dalga kılavuzu (coplanar waveguide) üzerine yapılmış iki farklı tür anahtar yapısı görülmektedir. Bu yapılarda sinyal hattıyla üstteki plaka arasına DC gerilim uygulanarak, üstteki plaka aşağı çekilir ve anahtar kapanmış olur. Farklı anahtar ve kapasitör yapıları vardır. RF-MEMS anahtar ve kapasitör yapılarıyla ilgili daha ayrıntılı bilgi [15]’de bulunabilir.



Şekil 1. RF-MEMS anahtar yapıları

RF MEMS anahtarları aşağıda anlatılan yapılarda kullanılarak şekillendirilebilir anten elemanları elde etmek mümkündür:

A) Dipol Antenler:

Bir dipol antenin rezonans frekansını kaydırmanın en kolay yolu antenin uzunluğunu değiştirmektir. Bu da antenin yanına, birbirine DC-kontak RF MEMS anahtarlarla bağlanabilen metal plakalar konularak yapılabilir. Böylece istenen uzunlukta bir anten elde etmek için yapılması gereken tek şey, o uzunluğa denk gelen RF MEMS anahtarı kapatmaktır. Bu uygulama daha önce 0.1-3 GHz bandında başka anahtar türleriyle yapılmıştır, ama RF MEMS anahtarlar kullanılarak bu yapıların çalışma frekansları 120 GHz'e kadar çıkartılabilir [15]. Bu uygulamada önemli olan kullanılan RF MEMS anahtarların yalıtım seviyesidir ve -20 dB seviyesinde yalıtım bu uygulama için yeterlidir. RF MEMS anahtarlar, yukarı durumda seri bir kapasitans, aşağı durumda ise seri bir direnç olarak modellenebilir. Bu kapasitans ve direnç değerleri yaklaşık 1-10 fF ve 0.5-2 Ω civarında olduğundan, anten performansında bu değerlerden dolayı sadece %3-5'lik bir kayıp olmaktadır [15].

B) Yarık Antenler:

Yarık antenlerin rezonans frekansı, DC-kontak RF MEMS anahtarlar kullanılarak yarık uzunluğunun değiştirilmesiyle sağlanabilir. Burada genel olarak anahtarlar yarık içine doğru iki taraftan giren çentikler arasına yerleştirilir. Bunun sebebi RF MEMS anahtarların boylarının yarık genişliğinden az olmasıdır. $0.45-0.5\lambda$ boyunda yarık antenlerin genelde giriş empedansı 550-700 Ω arasında olduğundan, bu empedans değerini düşürmek için giriş besleme noktasını kaydırmak gerekmektedir (offset feed). Bir diğer çözüm de 0.9λ civarında olan diğer rezonans uzunluğunu yarık uzunluğu olarak kullanmaktır. Bu durumda anten

uzunluğun iki katına çıkması bir dezavantajdır, ama bu çözüm milimetre dalga frekanslarında geniş bantlı anten elde etmek için kullanılabilir [16].

Şekillendirilebilir yarık antenler ile kalın yalıtkan tabanlar üzerinde tek yönlü hüzme elde edilebilmektedir. Ayrıca yarık anten arkasına manyetik toprak plakası konarak dipol anten durumuna yakın bant genişliği ve verim elde edilebilir [17].

C) Mikroşerit yama antenler (MŞA):

Mikroşerit yama antenler aşağıda anlatılan yöntemlerle yeniden şekillendirilebilir:

1) **Anten boyutlarının değiştirilmesi:** Bu yöntem MŞA'ların, -dipol ve yarık antenlerdeki gibi-, fiziksel boyutlarının RF MEMS anahtarlar yardımı ile değiştirilerek antenin rezonans frekansının değiştirilmesidir. Bu, mikroşerit yama antenin ışına yapan ucuna yakın metal plakalar ekleyerek ve bu metal plakaları iletim hatları üzerinden MŞAya seri RF MEMS anahtarlarla bağlayarak sağlanabilir. Böylece seri RF MEMS anahtarların her kombinasyonunda, antenin rezonans frekansı farklı bir değere kayar. Bu şekilde 24 GHz frekansında %1'lik bir bantta -10 dB altında giriş geri dönüş kaybı elde edilebilmektedir [18]. Yine aynı şekilde, toprak plaka etkilerini ve MŞA'nın karakteristiğini kullanarak ± 15 'lik bir bant değişimi elde etmek mümkündür.

2) **MŞA'nın reaktif olarak yüklenmesi:** Mikroşerit yama antenlerin rezonans frekansı, anteni reaktif olarak yükleyerek de değiştirilebilir. Bu, MŞA'ları kütüklerle (stub) yükleyerek elde edilebilir. Değişik kütük boyları kullanarak MŞA'yı değişik frekanslarda rezonansa getirmek mümkündür. Kütüklerin boylarının değiştirilmesi yüksek performanslı, seri RF MEMS anahtarlarla yapılabilir.

Dikdörtgen bir mikroşerit anten (DiMŞA) için kütük, ışınım olan veya ışınım olmayan kenarlara yerleştirilebilir. Kütük uzunluğu kısa olarak ayarlandığında, antenin rezonans frekansında ufak ayarlamalar yapılabilmektedir. Kütük uzunluğu $\lambda/4$ ile kıyaslanabilir olarak seçildiğinde anten çift-frekanslı olarak çalışabilmektedir. Aynı şekilde dairesel mikroşerit antenler (DaMŞA) de kütük ile yüklendiğinde, rezonans frekansında ufak ayarlamalar yapmak ve anteni çift-frekanslı olarak çalıştırmak da mümkündür [19].

3) MŞA'nın varaktör diyot (veya ayarlanabilir kapasitans) ile yüklenmesi:

Bu yöntemde, anten değişken bir kapasitans ile yüklenerek, antenin eşdeğer kapasitansı uygulanan gerilimle değiştirilmekte ve antenin rezonans frekansı kaydırılabilmektedir. Değişken kapasitans bir diyotun ters yön kapasitansı (reverse bias capacitance) olabileceği gibi, MEMS teknolojisi ile yapılabilecek ayarlanabilir bir kapasitans da olabilir. Ayarlanabilir

MEMS kapasitansların yüksek değişim oranları göz önünde bulundurulduğunda, rezonans frekanslarında büyük değişimler elde etmek mümkündür.

Bu bölümde proje kapsamında tasarlanıp üretilen üç tür çift frekanslı ya da frekansı ayarlanabilen anten yapısı anlatılacaktır.

2.2. Yarıkli RF-MEMS Anahtarlarla Şekillendirilebilir İki/Üç Bandlı Anten

2.2.1. Giriş

Bu bölümde çoklu-frekanslı, mikroşerit hat beslemeli, yarıkli tekrar-ayarlanabilir mikroşerit yama anten yapılarının tasarım, üretim ve ölçüm çalışmaları özetlenmiştir. Bu çalışmaların ayrıntıları Sinan Onat'ın tez yürütücüler Şimşek Demir ve Lale Alatan kapsamı çerçevesinde yürüttüğü Yüksek Lisans tezinde bulunabilir, [20]. Antenlerin üretim ve ölçüm aşamaları ODTÜ RF MEMS grubu tarafından yürütülmüştür.

Çalışmanın başlangıcında az yer kaplayan antenler incelenmiştir; daha sonraki süreç içerisinde anten boyutlarını küçültme üzerine de inceleme ilerletilmiştir. Sonuçta, yeniden şekillendirilebilir anten yapıları ile birden fazla işlevin tek bir yapı ile gerçekleştirilmesinin daha etkin sonuçlara götüreceği görülmüştür. Dünyada ve bölümümüzde geliştirilen RF MEMS teknolojisi de değerlendirilerek yeniden şekillendirilebilirlik özelliğinin bu teknoloji ile uygulanmasına karar verilmiştir.

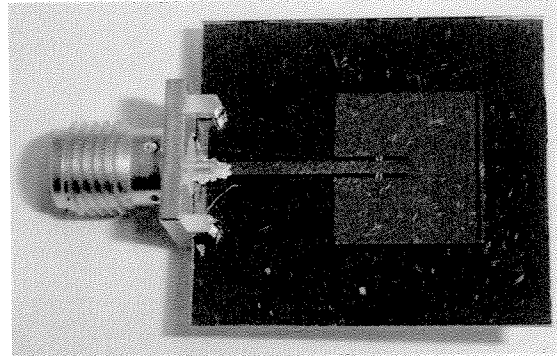
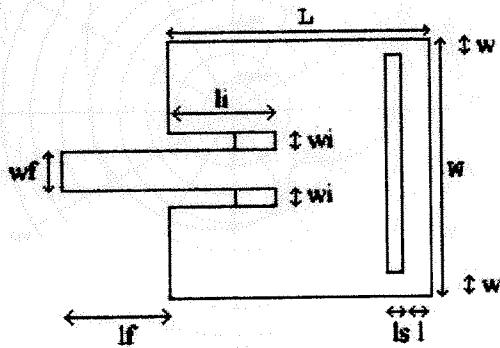
Bölüm 2.2.2'de üzerine yarık açılmış mikroşerit hat ile beslenmiş anten anlatılmıştır. Bölüm 2.2.3'de ise üç frekanslı bir anten yapısı verilmiştir. Buradaki antende, RF-MEMS anahtarlar ve mikroşerit hatla beslenmiş yarıkli yama anten farklı teknolojilerle üretilmiş ve daha sonra biraraya getirilmişlerdir. Ayrıca yarık şekillerinin çift frekanslı antenin ışıma karakteristiklerine etkileri de incelenmiştir, [21].

2.2.2. Tümlleşik Çift Frekanslı Anten

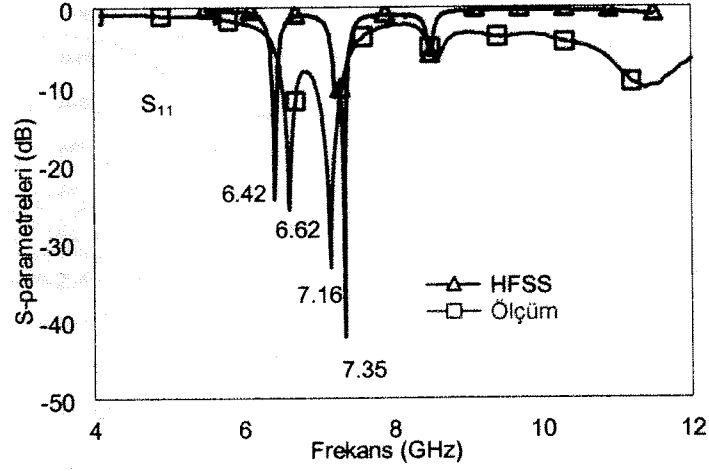
Bu çalışmadaki yeniden şekillendirilebilir anten, RF MEMS anahtarların elektriksel kontrolüyle empedans uyumunu koruyarak, bir rezonans frekansından diğere atlayacak şekilde tasarlanmıştır. Mikroşerit yama antene açılan yarık, bu antenin iki frekanslı olmasını sağlamıştır. Mikroşerit hat ile beslenen yama antenlerde, giriş empedans uyumunu sağlamak üzere mikroşerit hattın yamaya bağlandığı noktadan itibaren iki yana girintiler açılmıştır. Yarıkli anten iki ayrı frekansta çalıştığından, empedans uyumu için her frekansta ayrı bir

girinti uzunluğu gerekmektedir. Bu nedenle, her iki rezonans frekansında da giriş empedans uyumunu sağlamak üzere girintilere anahtarlar yerleştirilmiştir. Böylece giritinin uzunluğu anahtarlarla değiştirilerek empedans uyumu sağlanmıştır. Bu anten yapısına ilişkin çizim ve fotoğraflar Şekil 2’de görülmektedir. Antenin çalışma frekansları 6.5 GHz ve 8.5 GHz’dir. Anahtarlar açıkken anten 6.5 GHz’de, kapandığında ise 8.5 GHz’de çalışmaktadır. Anahtarları aktive etmek için gerekli DC voltaj ile RF sinyal bir konnektör ile antene uygulanmaktadır. Burada kullanılan anahtarlarla ilgili daha ayrıntılı bilgi 3. Gelişme raporunda verilmiştir, [22]. Antenler ve anahtarlar tümleşik olarak 0.5 mm kalınlığında cam ($\epsilon_r = 4.6$) tabaka üzerinde üretilmişlerdir.

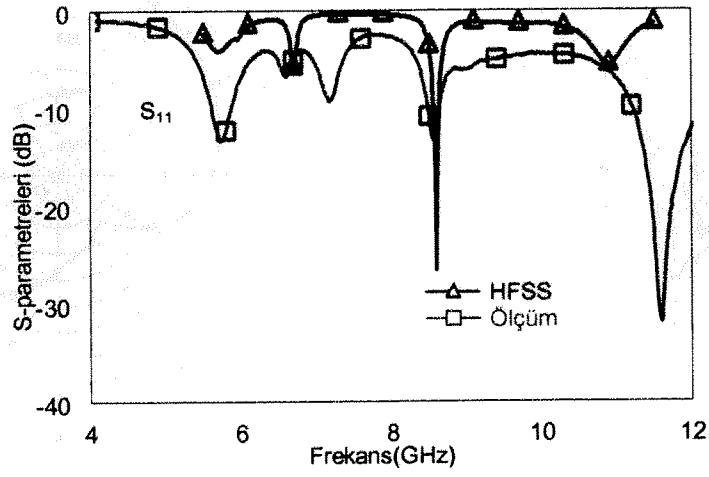
Anten tasarımı yapılırken, EM benzetimler için Ansoft HFSS yazılımı kullanılmıştır. Anten üretimi ODTÜ Mikroelektronik Tesislerinde, grubumuzun geliştirdiği mikroışlemeye dayalı üretim süreci kullanılarak üretilmiştir. Giriş geri dönüş kaybı ölçüm ve EM benzetim sonuçları Şekil 3 ve Şekil 4’te, anahtarların açık ve kapalı olduğu durumlar için verilmiştir. Şekil 3’de anahtarlar açık durumdadır, bu durumda anten 6.5 GHz civarında -20 dB’den daha iyi bir giriş geri dönüş kaybı göstermektedir; oysa 8.5 GHz’de giriş geri dönüş kaybı -5 dB’ler dolayındadır. Anahtarlar kapatıldığında ise, Şekil 4’den görülebileceği gibi, 6.5GHz’deki rezonans kötüleşmiş, 8.5GHz’deki ise daha iyileşmiş, -20 dB düzeyine inmiştir. EM benzetimlerle, ölçümler arasındaki ufak farkların, streten dolayı RF-MEMS anahtarlarda oluşan eğilmelerden ve anahtar kapatıldığında kısa devre olmasını engellemek için araya konulan yalıtkan katmanın her yerde aynı yükseklikte olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3’deki 7.3 GHz dolaylarında görünen rezonans frekansında düzgün bir ışımaya örüntüsü yoktur. Üretilen mikroşerit beslemeli antenin ışımaya örüntüleri bölümümüzdeki yansımaz odada ölçülmüştür. Şekil 5’de ışınım örüntüsüne ilişkin olarak yapılan benzetim sonuçları ve ölçüm sonuçları verilmiştir.



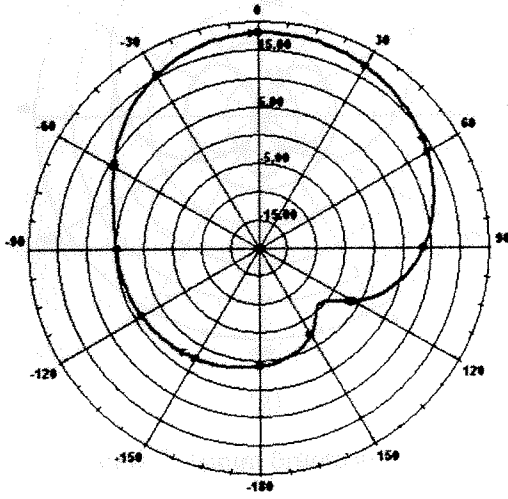
Şekil 2. Çift frekanslı tümleşik yama anten



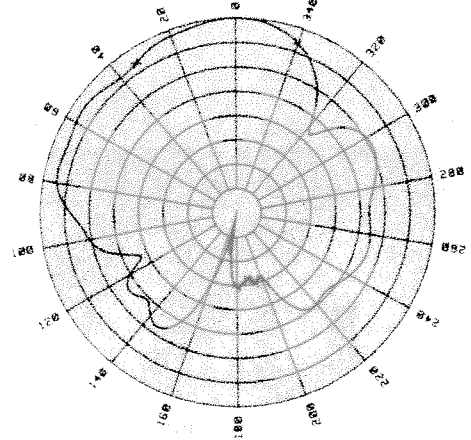
Şekil 3. Anahtarlar açık durumdayken elde edilen EM benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



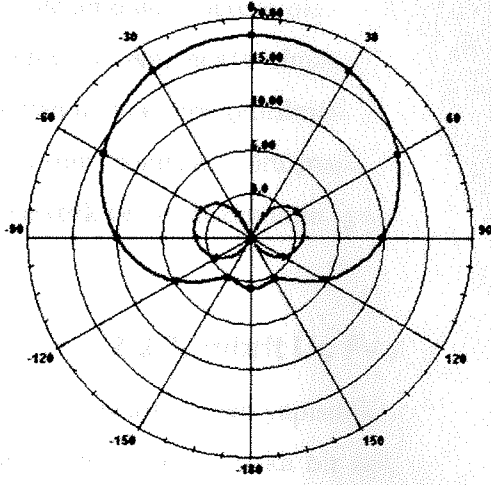
Şekil 4. Anahtarlar kapalı durumdayken elde edilen EM benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



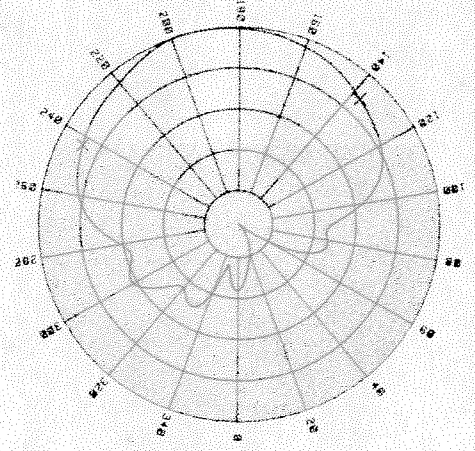
(a)



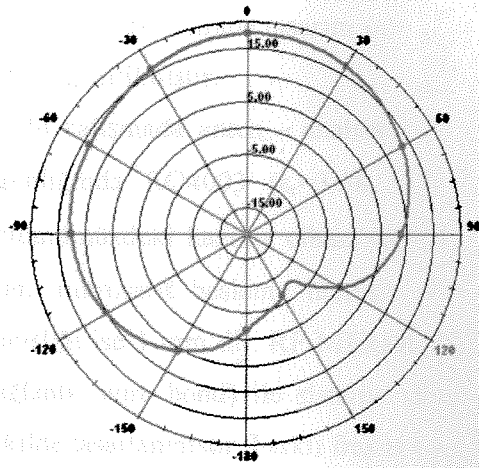
(b)



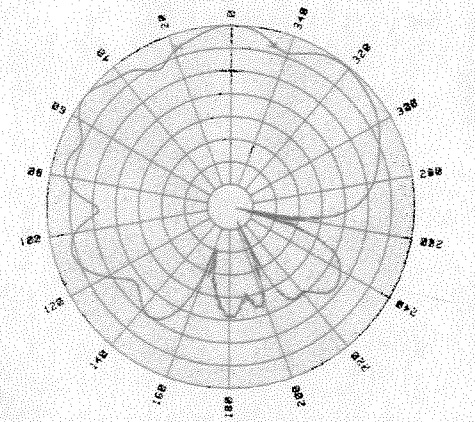
(c)



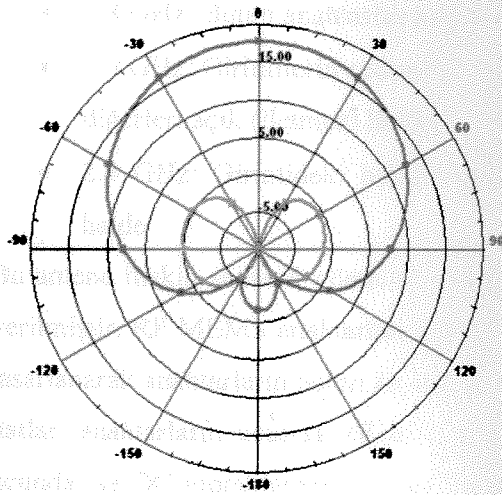
(d)



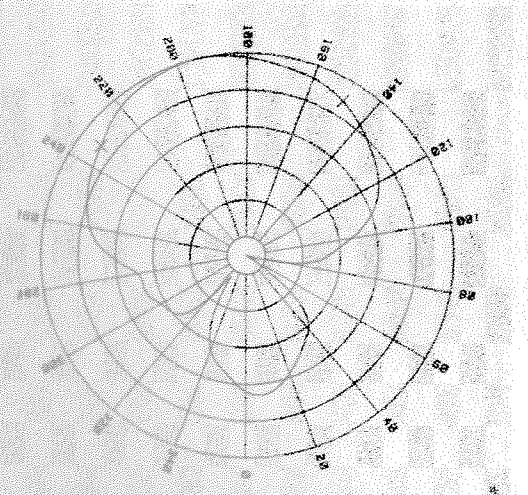
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 5. Işınım örüntüsü benzetim ve ölçüm sonuçları (a) E-düzlemi @ 6.5 GHz, (b) E-düzlemi @ 6.92 GHz, (c) H- düzlemi @ 6.5 GHz, (d) H- düzlemi @ 6.92 GHz, (e) E- düzlemi @ 8.5 GHz, (f) E- düzlemi @ 8.87 GHz, (g) H- düzlemi @ 8.5 GHz, (h) H- düzlemi @ 8.8 GHz.

Ölçümlerde 0 derece olarak gösterilen yer, EM benzetimlerle elde edilen örüntülerdeki 0 derece ile aynı nokta olmayabilmektedir. Kendi imalatımız olan ölçüm sisteminde bu iki noktanın aynı yere getirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Görüldüğü gibi, ölçümlerle EM benzetim sonuçları örtüşmektedir. Ölçümlerde görülen küçük dalgalanmaların antenin dielektrik ve yer düzleminin sonlu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

2.2.3. Hibrit Üç Frekanslı Anten

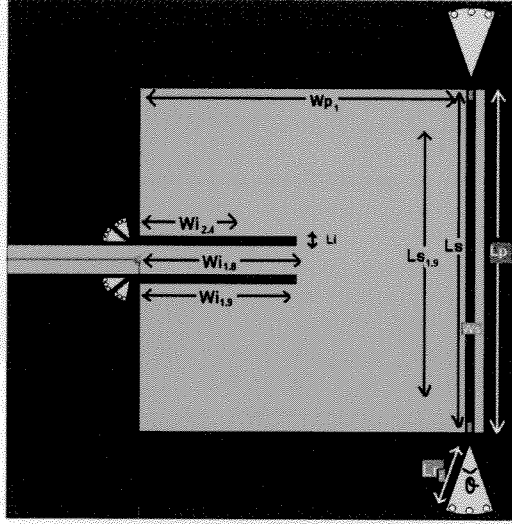
Çift frekanslı anten yapısındaki çalışma prensiplerini kullanarak iki frekans oluşturulması ile beraber, yapıya başka bir rezonans frekans eklemek için anten üzerindeki yarığın etkin uzunluğu, MEMS anahtarlar kullanılarak değiştirilebilir. Bu amaçla yarığa anahtar yerleştirilecek biçimde tasarım yapılmış ve yarığın etkin uzunluğu tıpkı girinti etkin uzunluğu gibi değiştirilmiştir.

Bu çalışmada anten - anahtar tümleşirmesi hibrit olarak tasarlanmıştır; anten 1.52mm kalınlığında RO4003 ($\epsilon_r=3.38$, $\tan\delta(\text{loss tangent})=0.0027$) dielektrik malzeme üzerine bölümümüzdeki kazıma cihazı kullanılarak üretilmiştir. Yamanın büyüklüğü 40.8mm×40.8 mm, mikroşerit besleme hattının uzunluğu 15.6mm ve genişliği 3.52mm'dir. Girintinin genişliği ise 1 mm'dir. RF MEMS anahtarlar ise üretim sonrasında epoksi yapıştırma ve tel bağlantı (wire bond) ile sisteme eklenmiştir. Bu anten 1.8, 1.9 ve 2.4 GHz'de çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Farklı frekanslar için anahtarların açık/kapalı olma durumları aşağıdaki gibi olmaktadır:

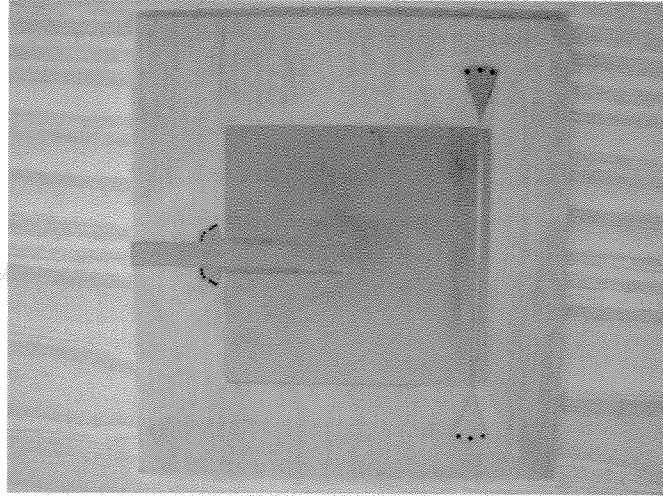
- 1.8 GHz: Bütün anahtarlar açık (iletmez) halde,
- 1.9 GHz: Girintilerin sadece en iç sırasındaki ve yarıklardaki anahtarlar kapalı (iletir), diğerleri açık (iletmez) halde,
- 2.4 GHz: Girintideki bütün anahtarlar kapalı (iletir), yarıklardakiler açık (iletmez) halde

Bu antene ilişkin şematik gösterim ve fotoğraflar Şekil 6'da, ölçüm sonuçları ise Şekil 7'de verilmiştir. RF MEMS anahtarları düzenlenen mimaride çalıştırmak için, DC bağlantı hatları tasarlanarak anahtarların uçları ile taşıyıcısı arasında gereken potansiyel fark sağlanmıştır. Bu hatlar, anahtarların ucunda RF-açık devre sağlayıp, herhangi bir RF kaçacağı önler, diğer ucunda ise DC-topraklamayı sağlar. Söz konusu RF-açık devreden kısa devre dönüştürümü besleme düzeneği ile birlikte sağlanır; seçilen besleme çeşidine göre ise hat genişliğinin değiştirildiği geçişlerle birlikte sağlanabilir. Ölçümlerde anahtarlar yerine metal şerit

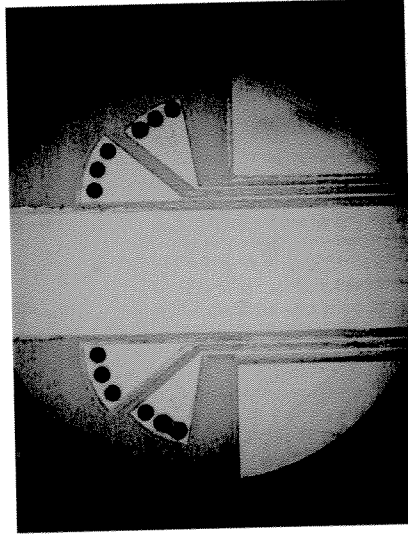
bağlantılar kullanılmıştır. Elde edilen grafiklerden de görüleceği gibi ölçüm sonuçlarıyla EM benzetim sonuçları uyum içerisinde.



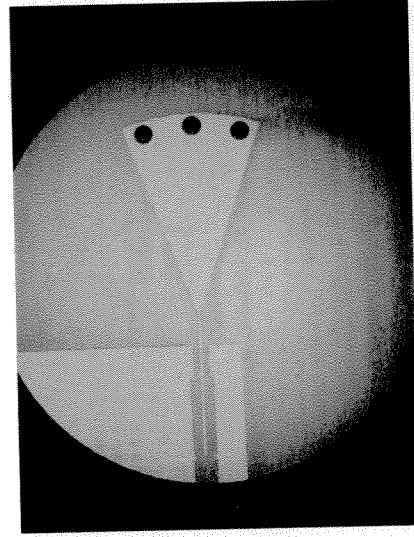
(a)



(b)

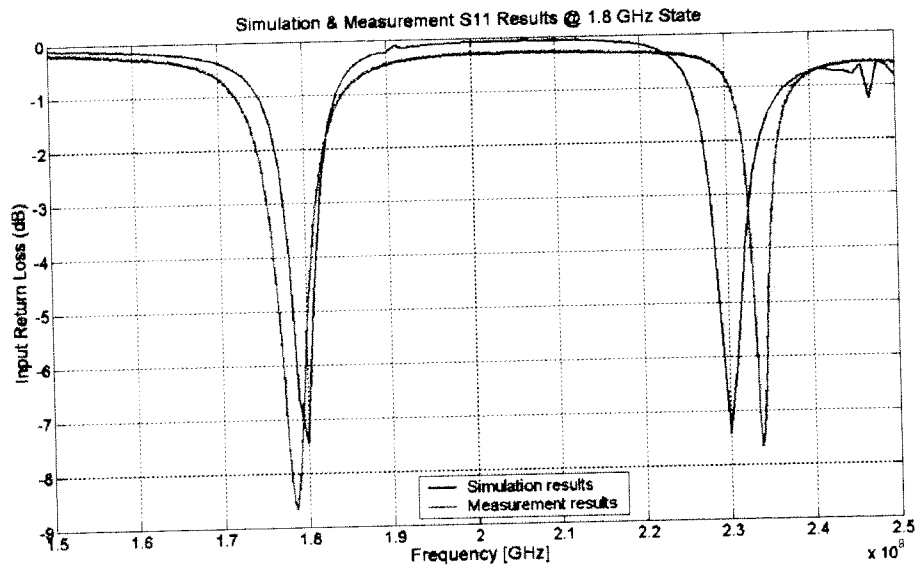


(c)

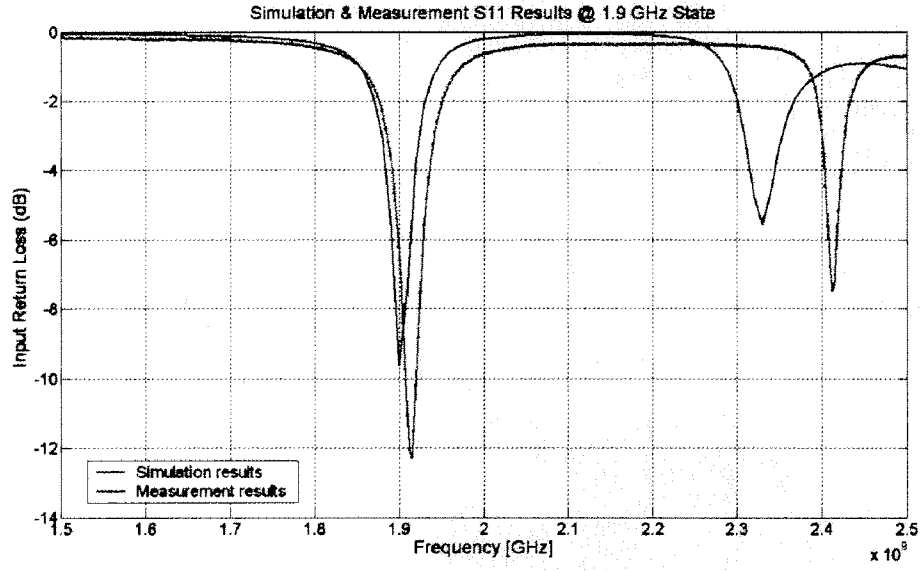


(d)

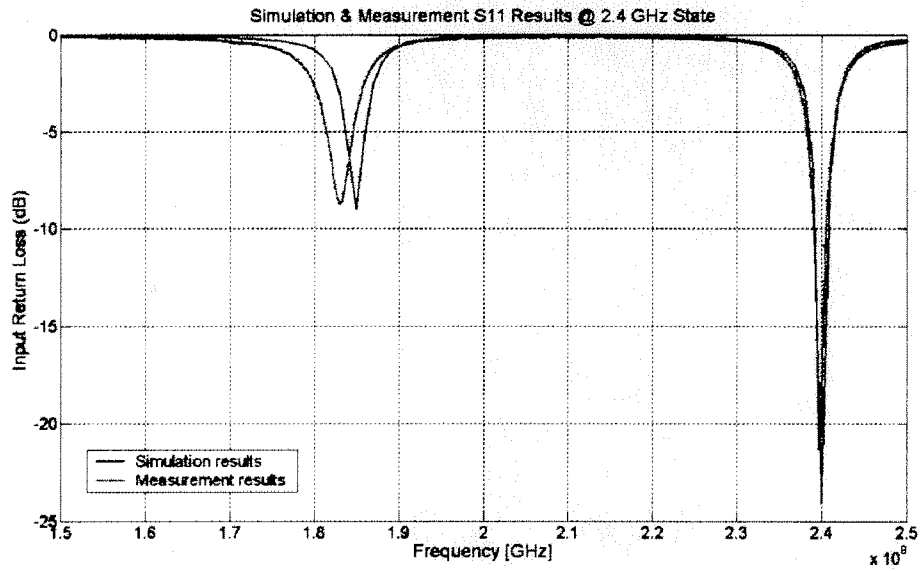
Şekil 6. Hibrit bağlantılı 3-frekanslı anten yapısı (a) Şematik gösterim, $L = 40.8 \text{ mm}$, $W = 40.8 \text{ mm}$, $l_s = 1 \text{ mm}$, $l_f = 15.6 \text{ mm}$, $w_f = 3.52 \text{ mm}$, $l_{i1} = 12.8 \text{ mm}$, $l_{i2} = 19.1 \text{ mm}$, $w_i = 1 \text{ mm}$, $l = 1.18 \text{ mm}$, $w = 1.36 \text{ mm}$, $w_s = 3.44 \text{ mm}$ (b) RF taban malzeme üzerinde anten yapısı (c)-(d) Girinti ve yarık üzerinde RF MEMS anahtar bağlantısı için detay.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.. Hibrit anten için RF MEMS anahtarlar yerine metal şeritlerin kullanıldığı ölçüm sonuçlarının EM benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması. (a) 1.8 GHz (tüm anahtarlar açık) (b) 1.9 GHz (girinti anahtarları açık, yarık anahtarları kapalı) (c) 2.4 GHz (tüm anahtarlar kapalı)

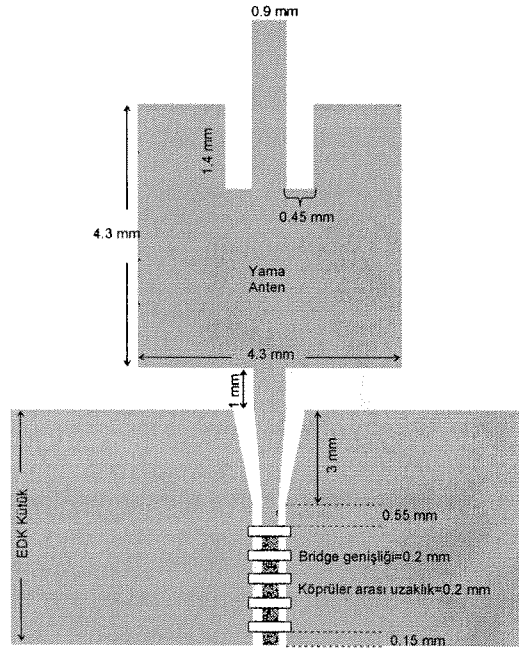
2.3. Rezonans Frekansı Ayarlanabilir Mikroşerit Yama Anten

Raporun bu bölümünde proje kapsamındaki çalışmalarla tasarımı, üretimi ve ölçümü gerçekleştirilen rezonans frekansı ayarlanabilir mikroşerit yama anten yapısı sunulmaktadır, [23][24]. Bu yapı bir mikroşerit yama anten ve eşdüzlemsel dalga klavuzu (EDK) kütük yapısından oluşmaktadır. Yama anten ile EDK kütük arasında mikroşerit-EDK geçişi kullanılmaktadır. Kütüklü yama anten çift frekansta rezonansa gelen bir yapıdır, [19]. Antenin rezonans frekansının ayarlanabilmesi için, EDK kütük üzerine değişken kapasitör işlevi gören MEMS köprüler yerleştirilmiştir. Şekil 8’de antenin genel görünümü verilmiştir. Kütük üzerindeki MEMS köprülerin yüksekliği, dolayısıyla yüklem kapasitansı, sinyal hattı ile köprü metali arasına DC gerilim uygulanarak kontrol edilmektedir. Şekil 9’da üretilmiş antenin fotoğrafı görülmektedir. Bu antenin üretimi, ODTÜ’de geliştirilen yüzey mikroişleme teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (bkz Bölüm 4). Bu üretim süreci ile üretilen antenin taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope) ile çekilen fotoğrafları Şekil 10’da sunulmuştur. Üretilen antenin köprü yüksekliği yüzey profilleyicisi cihazı ile yapılan ölçümlerde $1.5 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Antenin MEMS bölgesinin yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü Şekil 11’de verilmiştir. Yapı üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerde, yapının istenen rezonans frekanslarında çalıştığı görülmüştür. Şekil 12’te bu ölçüm sonuçlarının, EM benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması sunulmuştur. Antenin DC gerilim uygulanmadan 16.05 GHz ’de elde edilen rezonans frekansı 11.9 V gerilim uygulandığında 15.75 GHz frekansına kaymıştır. 12 V DC gerilim uygulandığında MEMS köprüler sinyal hattı üzerindeki dielektrik tabakasının üzerine çökmektedir. Yapının üretiminde kullanılan metal katmanların öziletkenliği $2.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ ile $2.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ arasındadır. EM benzetimlerde $2.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ değeri kullanılmıştır. EM benzetim ve ölçüm sonuçlarındaki yansıma katsayısının büyüklükleri arasındaki farklılık SMA konnektörün etkileri göz önünde bulundurularak açıklanabilir. Mikroşerit hatlar üzerinde aynı konnektörler kullanılarak yapılan ölçümlerde özellikle 10 GHz sonrasındaki frekanslarda iletim hattı karakteristiğinde ölçüm-benzetim arasındaki farklılığın $4-5 \text{ dB}$ seviyelerinde olduğu görülmüştür. Konnektörün uç kısmının mikroşerit hatta eklendiği bölgede koaksiyel-mikroşerit geçişindeki seri endüktans ve paralel kapasitans olarak modellenebilen etkilerin sözü edilen frekans bölgesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

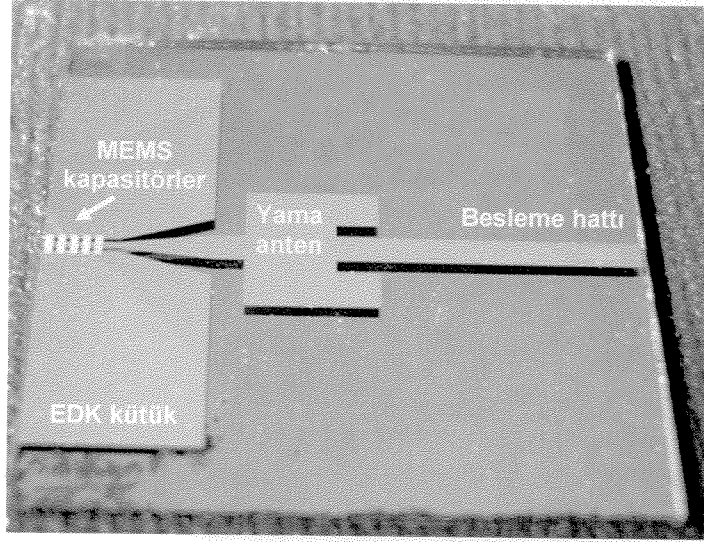
Antenin ışınım örüntüsü ölçümleri ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’ndeki Milimetrik Dalga Laboratuvarında yankısız odada yapılmıştır. Şekil 13’de

MEMS köprülere DC gerilim uygulanmadığı durumda 16.05 GHz frekansındaki ışınım örüntüsü ölçümleri, köprülerin 1.5 μm yüksekliğinde olduğu durum için gerçekleştirilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılarak sunulmuştur. E-düzlemi ve H-düzlemi ölçüm sonuçları, EM benzetimlerle uyum içerisindedir. E-düzlemindeki asimetri ve maksimum ışınım noktasındaki kayma antenin besleme hattının ve EDK kütüğün etkileri düşünüldüğünde kabul edilebilir seviyelerdedir. Şekil 14'de 15.75 GHz frekansında, MEMS köprülerin 1.4 μm yüksekliğindeki durumu için ışınım örüntüsü benzetim sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi antenin ışınım örüntüsü köprü yüksekliğindeki değişikliklerden etkilenmemektedir.

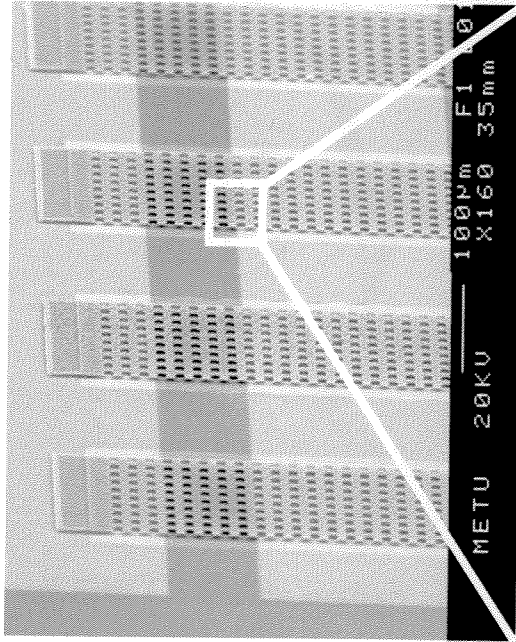
Rezonans frekansı ayarlanabilir mikroşerit anten yapısında kullanılan EDK kütük yapısı her ne kadar antenden büyük olsa da, bu yöntem mikroşerit yama antenin rezonans frekansının kaydırılabilmesi için kullanılacak basit bir yöntemdir. Bu yapı grubumuza rezonans frekansı ayarlanabilir antenler konusunda daha iyi tasarımların gerçekleştirilmesini sağlayacak olan önemli deneyimler kazandırmıştır.



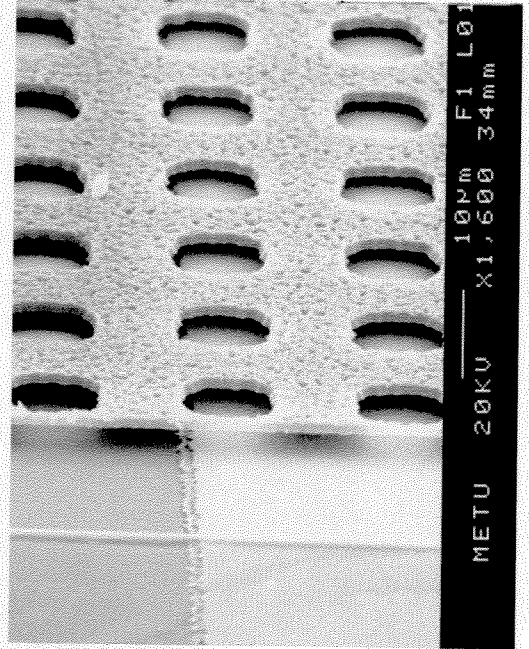
Şekil 8. Ayarlanabilir yama antenin genel görünümü.



Şekil 9. Üretilmiş antenin fotoğrafı.

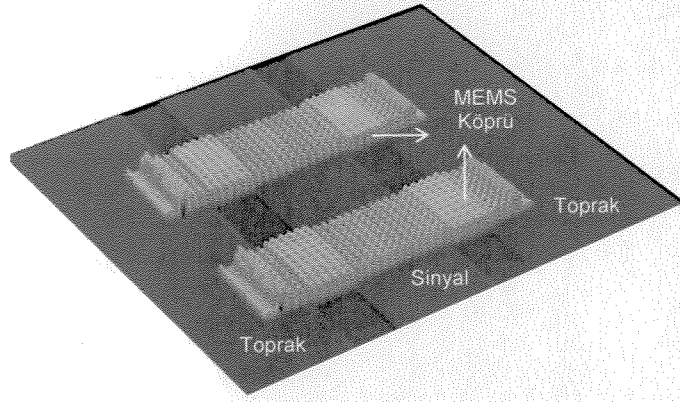


(a)

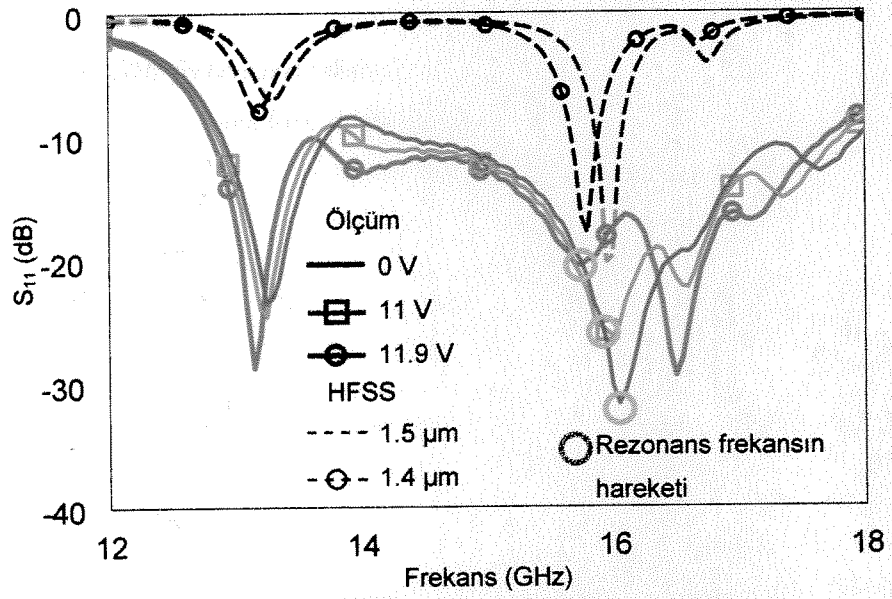


(b)

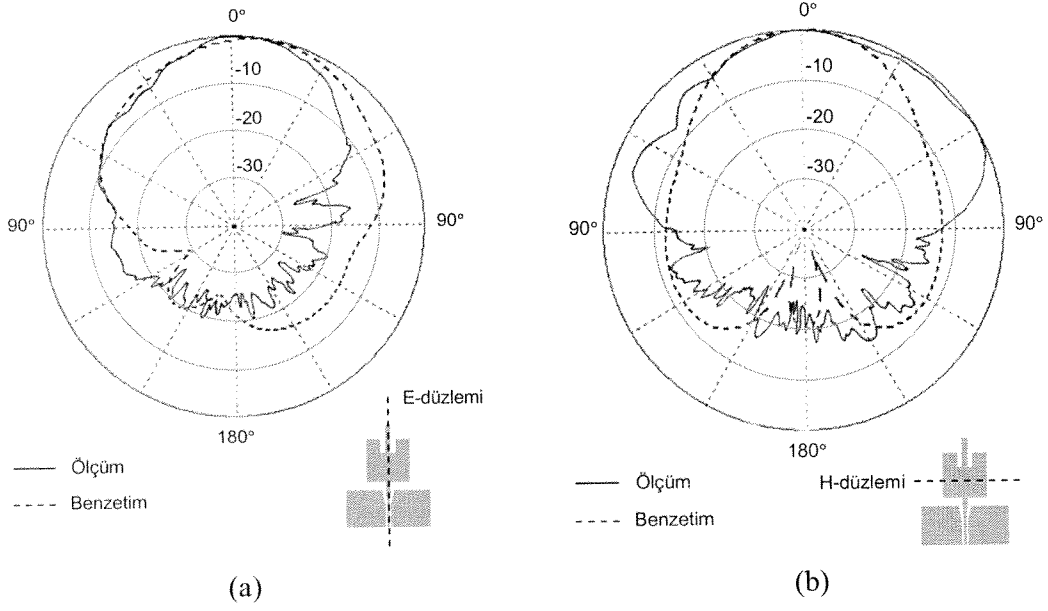
Şekil 10. (a) Antenin kutük bölümünün SEM fotoğrafı. (b) köprü bölgesinin daha detaylı bir görüntüsü.



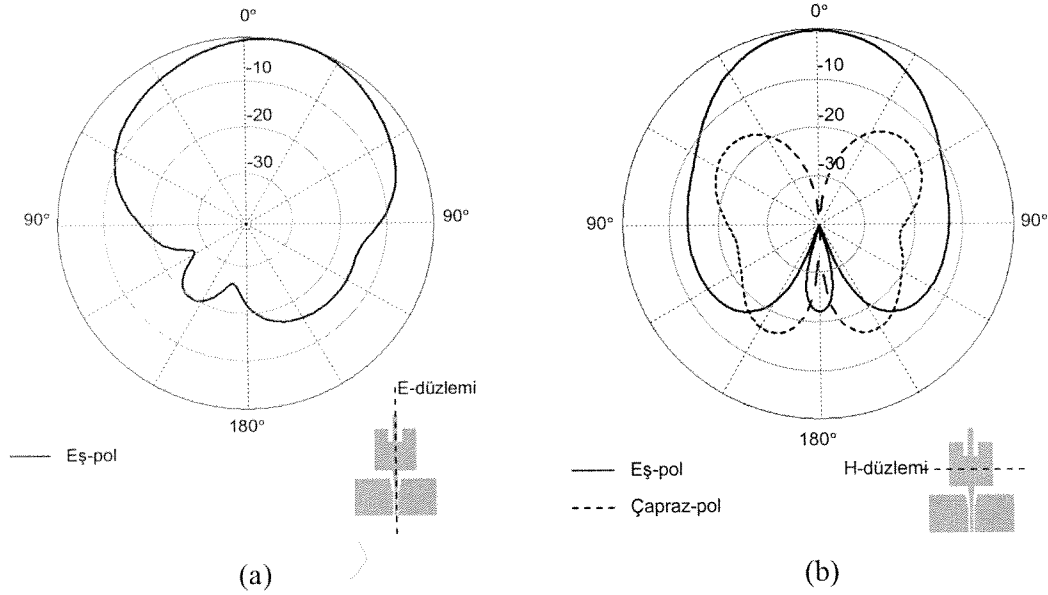
Şekil 11. Üretilen antenin yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü.



Şekil 12. Antenin farklı DC gerilimler için ölçüm ve EM benzetim sonuçları.



Şekil 13. 16.05 GHz frekansında köprülerin yukarı durumu için antenin ışınlam örüntüsü sonuçları. (a) E-düzlemi (b) H-düzlemi.

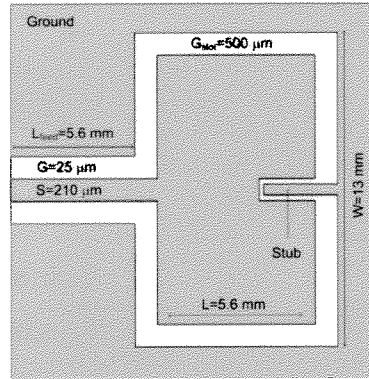


Şekil 14. 15.75 GHz frekansında MEMS köprüler 1.4 µm yüksekliğine indirildiği durum için antenin ışınlam örüntüsü sonuçları. (a) E-düzlemi (b) H-düzlemi.

2.4. EDK Beslemeli Dikdörtgensel Yarık Anten

Raporun bu bölümünde EDK beslemeli frekansı ayarlanabilir dikdörtgensel yarık antenin tasarım, üretim ve ölçüm sonuçları sunulmaktadır, [24]. MEMS teknolojisinde eşdüzlemsel dalga kılavuzlarının kullanımı uygun olduğundan, önceki tasarımlarda dalga kılavuzundan mikroşerit hatta ve tersi geçişler gerekmekte ve bu da antenin boyutlarını büyütme ve performansta düşüşe neden olmaktadır. Bu noktalar göz önünde bulundurularak mikroşerit anten yerine eşdüzlemsel dalga kılavuzu ile beslenen dikdörtgensel yarık anten kullanılarak yeni tasarımlar yapılmıştır, [25][27]. Bu tasarımda daha önceki çalışmalarda uygulanan mikroşerit anten ile eşdüzlemsel dalga kılavuzunun uyumlu çalışabilmesi için kullanılan geçişe veya kapasitif yükleme amacıyla antenin dışına doğru uzanan bir hatta gerek kalmamıştır.

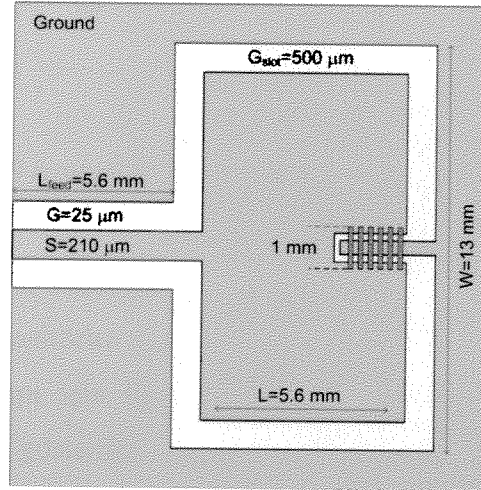
Dikdörtgensel yarık antenler genel olarak çift frekanslı davranış gösterirler. Ancak ikinci rezonans frekansının H-düzleminde yüksek çapraz polarizasyon bileşeni vardır. 50 Ω empedansındaki eşdüzlemsel dalga kılavuzu (EDK) besleme hattının karşı kenarına Şekil 15'te gösterildiği gibi kısa devre kütük eklenmesi H-düzlemindeki çapraz polarizasyon bileşenini -30 dB seviyesinin altına çekmektedir. Bu kütüğün karakteristik empedansı rezonans frekans değerlerini ve bu frekanslar arasındaki bandı belirlemektedir.



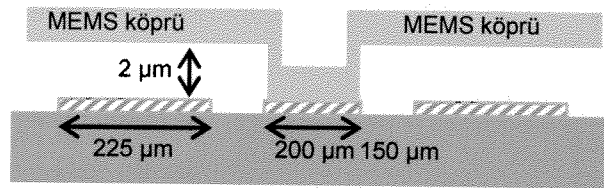
Şekil 15. 50 Ω empedansındaki eşdüzlemsel dalga kılavuzu (EDK) besleme hattının karşı kenarına kısa devre kütük eklenmesiyle elde edilen yarık anten yapısı.

Anteni dinamik olarak yükleyebilmek ve kütüğün karakteristik empedansını değiştirebilmek amacıyla 6 adet tek çapalı köprü tipi RF MEMS kapasitör kütüğün üzerine yerleştirilmiştir. MEMS kapasitörlerle yüklenen dikdörtgensel yarık antenin genel görünümü Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 17'de görülebileceği gibi, kapasitörlerin çapaları kütüğe bağlıdır ve köprüler çapının her iki yanından RF sinyal taşıyan iletkene doğru uzanmaktadır. RF sinyal hattı ile kapasitörler arasında DC gerilim uygulayarak kapasitörler elektrostatik kuvvetle

hareketlendirilmektedir. Söz konusu yapıda kapasitans, köprülerle RF sinyal taşıyan iletken arasında oluşmaktadır. Kapasitörlerin başlangıç yüksekliği $2 \mu\text{m}$ 'dir ve elektrostatik hareketlendirmeyle yükseklik $1.4 \mu\text{m}$ 'ye indirilerek yükleme yapılmakta ve kapasitörlerin bağlı olduğu kütüğün karakteristik empedansı değiştirilerek rezonans frekansında kayma sağlanmaktadır.

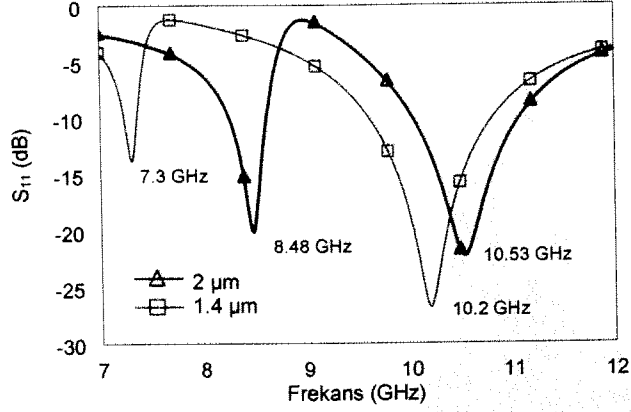


Şekil 16. 6 MEMS kapasitör ile yüklenen dikdörtgenel yarık antenin genel görünümü.



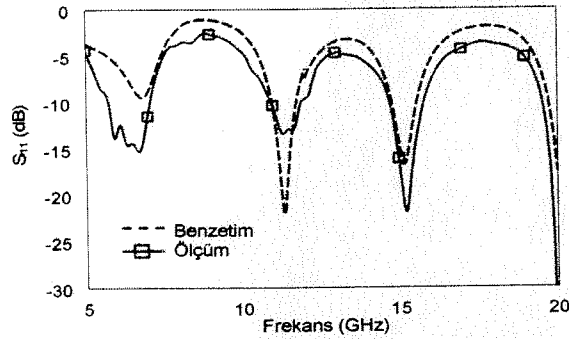
Şekil 17. Tek çapalı MEMS kapasitör yapısının kesit görüntüsü.

Yapının Ansoft HFSS ile elde edilen EM benzetim sonuçları Şekil 18'de verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre kapasitör yüksekliği $2 \mu\text{m}$ iken rezonans 8.48 GHz (10 dB BW: %4.2) ve 10.53 GHz (10 dB BW: %10) frekanslarında oluşmaktadır. Kapasitör yüksekliği $1.4 \mu\text{m}$ 'ye indirildiğinde ise rezonans frekanslar 7.3 GHz 'e (10 dB BW: %1.6) ve 10.2 GHz 'e (10 dB BW: %11.7) kaymaktadır.

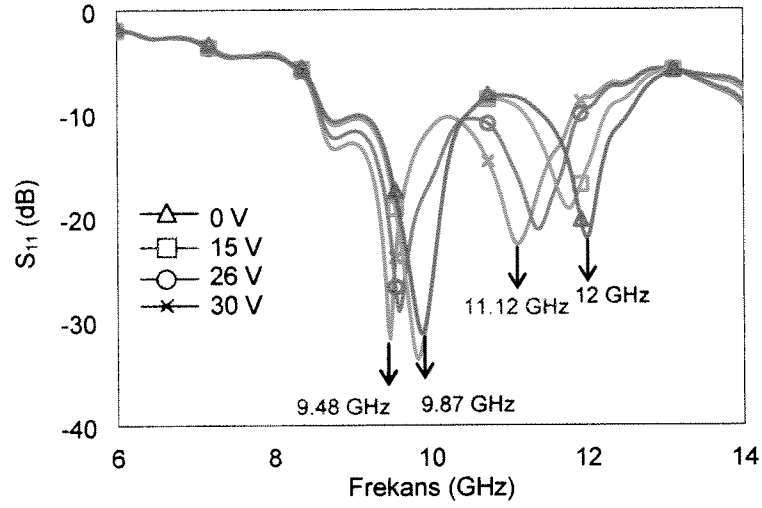


Şekil 18. Tek çapalı MEMS kapasitörlerle yüklenmiş yarık antenin EM benzetim sonuçları.

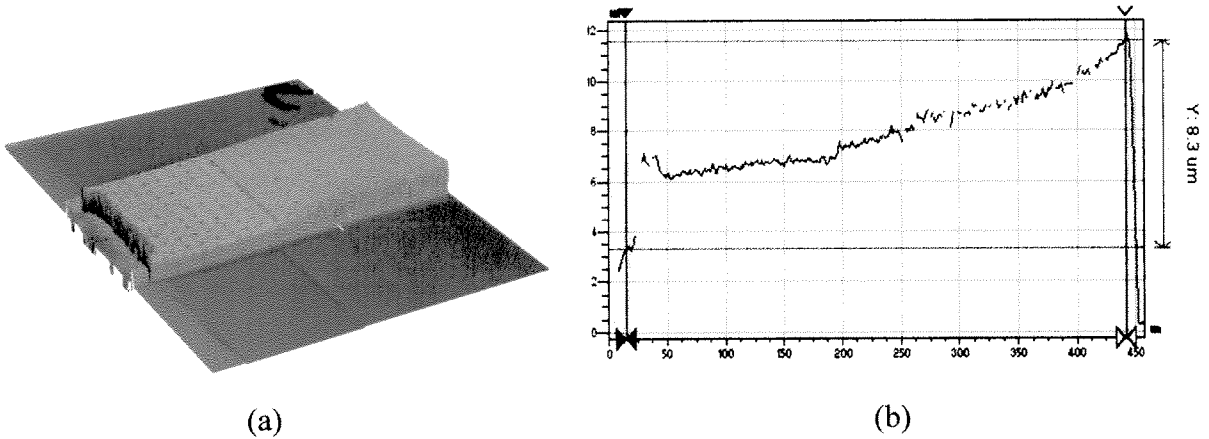
EM benzetimlerin ve üretim sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla ilk olarak Şekil 15’de gösterilen yüklenmemiş (kapasitörler yokken) anten yapısı üretilmiş ve ölçülmüştür. Şekil 19’da görüldüğü gibi bu yapı için ölçüm ve benzetim sonuçları oldukça iyi bir uyum göstermektedir. Şekil 16’da gösterilen MEMS köprülü anten yapısının üretim sonuçlarına göre ise rezonans frekanslar 0-32 V aralığında 12 GHz - 11.2 GHz ve 9.87 GHz - 9.48 GHz arasında ayarlanabilmektedir. Bu yapı için ölçüm sonuçları Şekil 20’de sunulmuştur. Üretim ve benzetim sonuçları arasındaki farklılık tek çapalı köprü tipi kapasitörlerin üretiminde oluşan stresten dolayı kapasitörlerin uçlara doğru kıvrılmasından kaynaklanmaktadır. Bu kıvrılma elektrostatik hareketlendirme öncesi kapasitörlerin başlangıç yüksekliklerinin ortalama 4 μm olmasına neden olmaktadır. Yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen ölçüm sonuçlarında köprü tipi kapasitörlerin uçlara doğru büküldüğü görülmüştür. Yüzey profilleyici cihazının ölçüm sonuçları Şekil 21’de sunulmuştur.



Şekil 19. EDK beslemeli dikdörtgensel yarık antenin yüklenmemiş halinin benzetim ve ölçüm sonuçları.



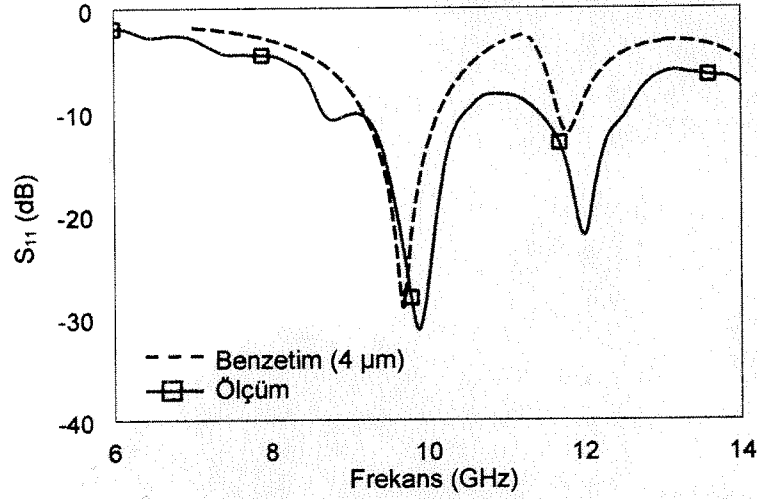
Şekil 20. EDK beslemeli dikdörtgensel yarı antenin yüklenmiş halinin benzetim ve ölçüm sonuçları.



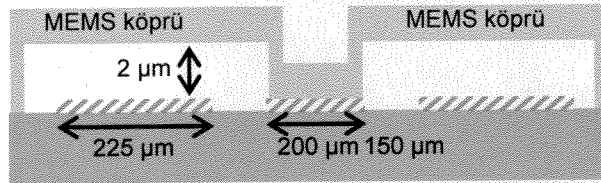
Şekil 21. EDK beslemeli dikdörtgensel yarı anten yapısındaki tek çapalı MEMS köprüünün yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü.

Köprü yükseklikleri $4 \mu\text{m}$ olarak benzetim yapıldığında ölçüm sonuçlarıyla benzetim sonuçlarının iyi bir uyum gösterdikleri görülmüştür. Bu sonuçlar Şekil 22’de gösterilmiştir. Köprülerin yukarı doğru kıvrılmasından dolayı oluşan uyumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla aynı yapı üzerinde kapasitörlerin tipleri değiştirilmiş ve serbest uçlar iki adet yeni çapayla sabitlenmiştir. Kapasitörlerin uçlarındaki çapalar anten üzerinde açılan açıklıklara doğrudan cam taban üzerine yerleştirilmiştir. Kapasitörlerin yan görünümü Şekil 23’de gösterilmiştir. Yapının benzetim ve ölçüm sonuçları Şekil 24’de verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre kapasitör yüksekliği $2 \mu\text{m}$ iken rezonanslar 8.58 GHz (10 dB BW: %4.2) ve 10.53 GHz (10 dB BW: %10) frekanslarında oluşmaktadır. Yükseklik $1.4 \mu\text{m}$ ’ye

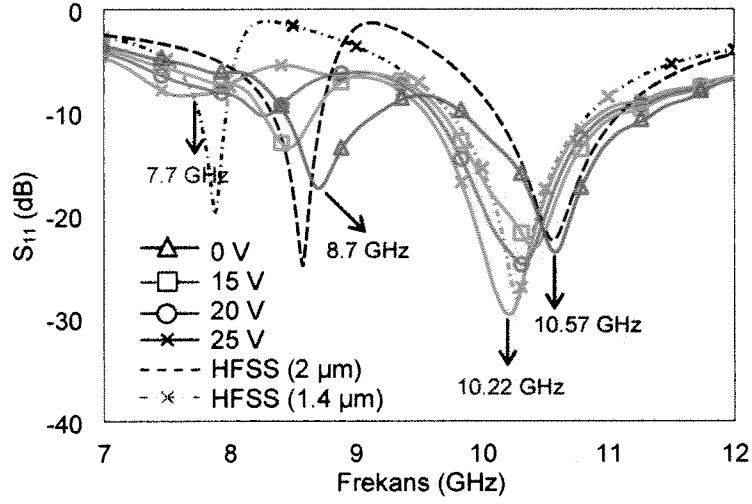
indirildiğinde rezonans frekanslar 7.3 GHz'e (10 dB BW: %1.6) ve 10.2 GHz'e (10 dB BW: %11.7) kaymaktadır. Ölçüm sonuçlarına göre ise rezonans frekanslar 0-25 V aralığında 8.7 GHz - 7.7GHz ve 10.57 GHz - 10.22 GHz aralığında kaymaktadır. Bu tasarımda, ölçüm sonuçları benzetim sonuçlarıyla çok iyi uyum göstermekte ve rezonans frekanslarında 1 GHz ve 350 MHz kaymalar sağlanmaktadır. Şekil 25'de gösterilen yüzey profili görüntüsünden de anlaşılacağı üzere kapasitör yapıları istenen yüksekliklerde üretilebilmektedir ve dolayısıyla üretilen anten yapısı istenen rezonans frekanslarında çalışabilmektedir.



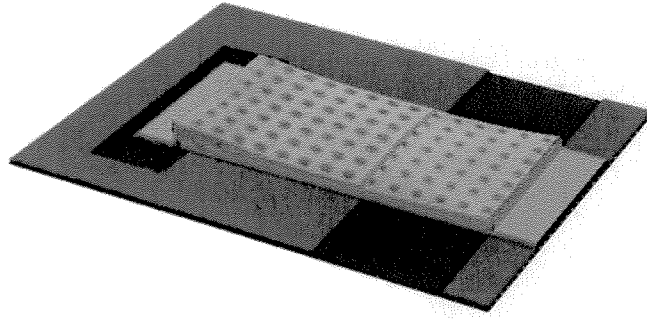
Şekil 22. Tek çapalı köprülerin yükseklikleri 4 μm olarak benzetim yapıldığı durum ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.



Şekil 23. Kapasitörlerin kanatlarının yukarı bükülmesini önlemek amacıyla tasarlanan yeni kapasitör yapısının kesit görüntüsü.

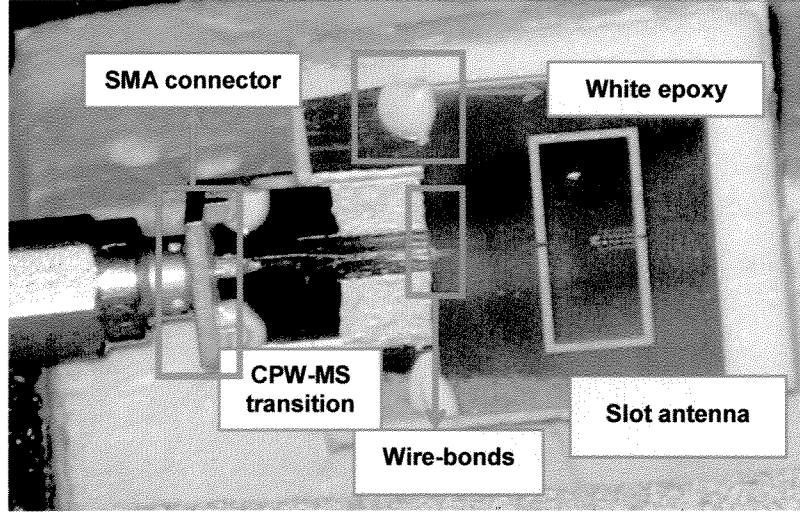


Şekil 24. EDK beslemeli dikdörtgensel yarık antenin uçları sabitlenmiş kapasitör yapılarıyla tasarlanmış halinin benzetim ve ölçüm sonuçları.

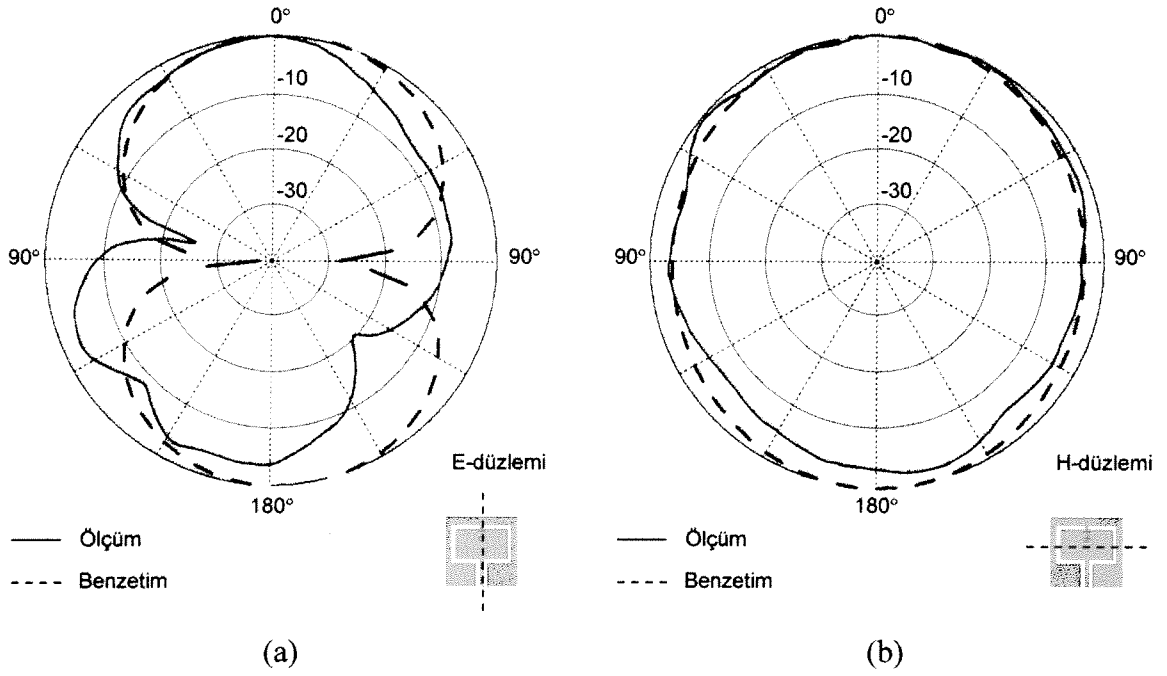


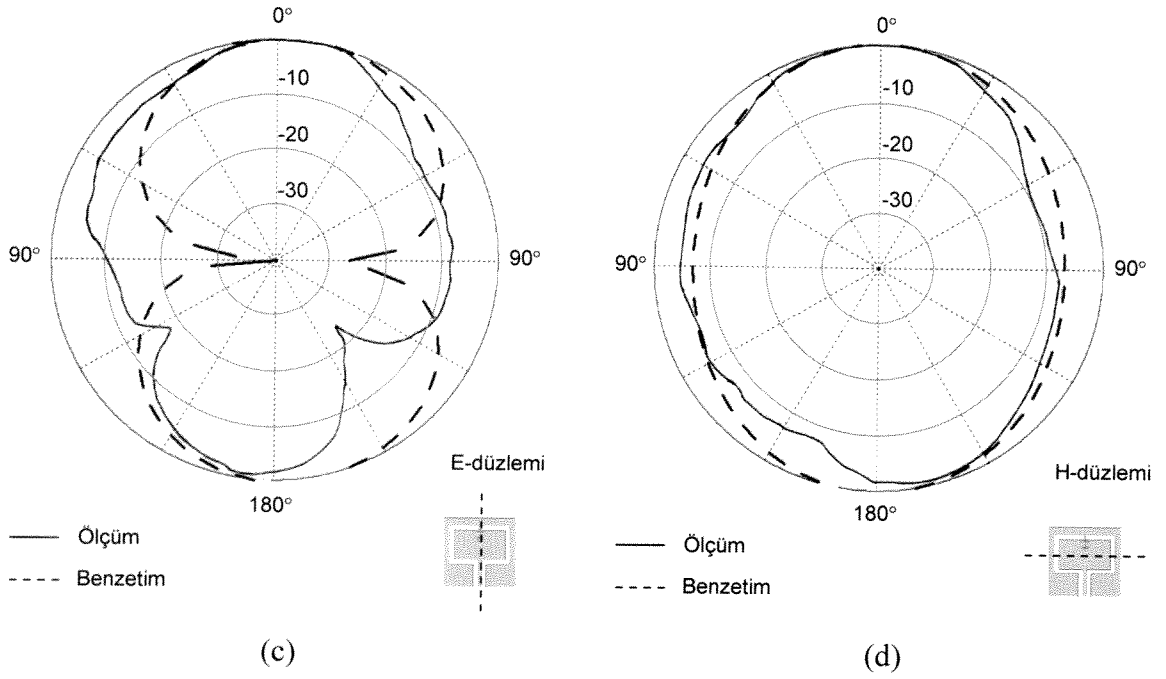
Şekil 25. Uçları çapalı kapasitör yapısının üretim sonrası yüzey profilleyici cihazı ile elde edilen görüntüsü.

Anten yapısının ışınım örüntüsü ölçümlerini elde edebilmek amacıyla EDK-mikroşerit hat geçisi anten yapısına entegre edilmiş, mikroşerit hatta SMA konektör takılmıştır, (Şekil 26). Şekil 27’de MEMS köprülere DC gerilim uygulanmadığı durumdaki rezonans frekansları olan 8.7 GHz ve 10.57 GHz frekanslarındaki ışınım örüntüsü sonuçları görülmektedir. Benzetim ve ölçüm sonuçları iyi bir uyum içerisindedir. Şekil 28’da köprü yüksekliği 1.4 μm olarak yapılan benzetimlerle elde edilen ışınım örüntüsü sonuçları verilmiştir. Şekil 27 ve Şekil 28’deki ışınım örüntüleri incelendiğinde, ışınım örüntülerinin köprü yüksekliğinin değişmesinden etkilenmediği gözlenmektedir.

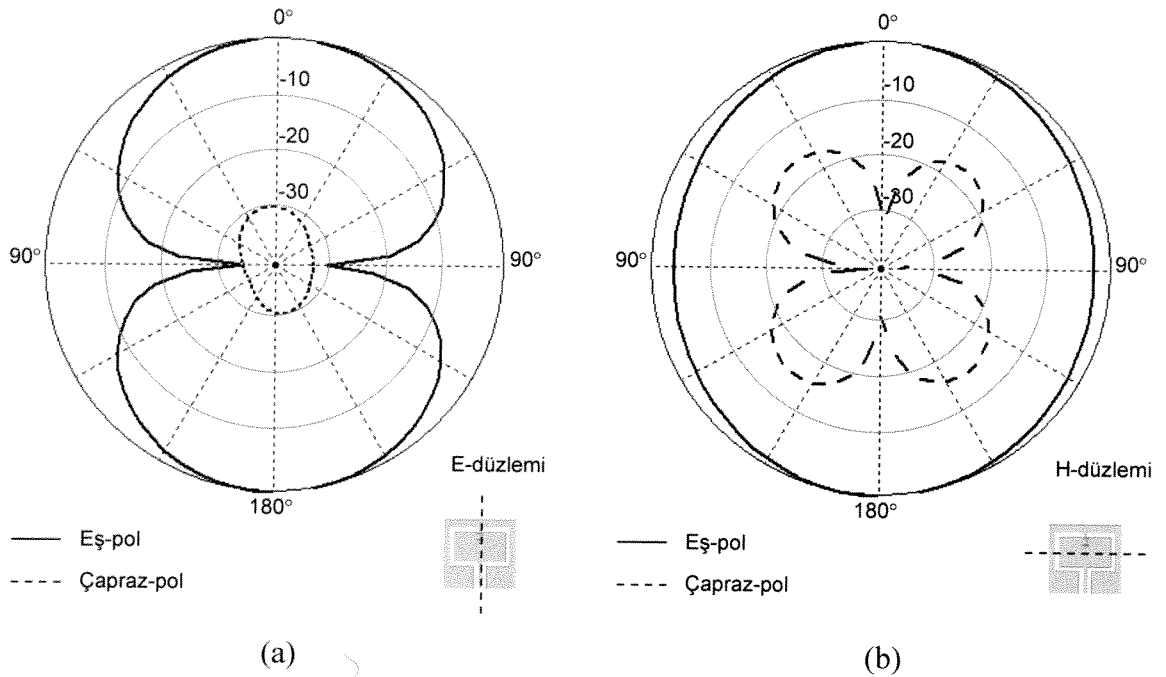


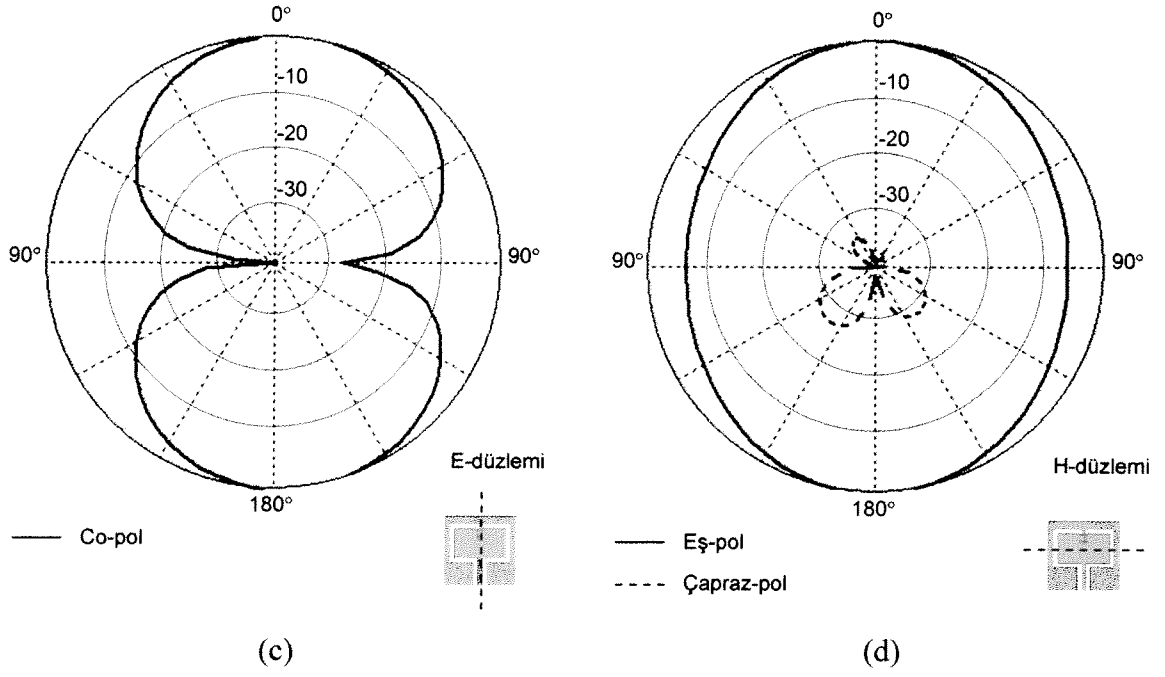
Şekil 26. Yarık antenin ışınım örüntüsünün ölçülebilmesi için oluşturulan düzenek.





Şekil 27. Ölçüm ve benzetimlerle elde edilmiş olan ışınım örüntüleri (a) 8.7 GHz'de E-düzlemi örüntüsü (b) 8.7 GHz'de H-düzlemi örüntüsü. (c) 10.57 GHz'de E-düzlemi örüntüsü. (d) 10.57 GHz'de H-düzlemi örüntüsü.





Şekil 28. Köprü yüksekliği $1.4 \mu\text{m}$ olan benzetimlerle elde edilmiş olan ışıma örüntüleri (a) 7.7 GHz'de E-düzlemi örüntüsü (b) 7.7 GHz'de H-düzlemi örüntüsü. (c) 10.22 GHz'de E-düzlemi örüntüsü. (d) 10.22 GHz'de H-düzlemi örüntüsü.

3. VEKTÖR MODÜLATÖR

3.1. Giriş

İletişim ve elektronik harp gibi çeşitli sivil ve askeri uygulamalarda, işaretin faz ve büyüklük ayarlamasına gereksinim duyulmaktadır. Vektör modülatör devreleri büyüklük ve faz ayarlama işlemlerini aynı anda gerçekleştirmek amacı ile kullanılırlar. Sadece faz kaydırıcı kullanılması durumunda farklı faz ayarlarında araya giriş kaybı da değişecektir, benzer biçimde zayıflatıcı kullanırken farklı zayıflatma değerlerinde araya giriş fazı değişecektir. Bu nedenle faz kaydırıcı ve zayıflatıcının birlikte kontrol edilmesi gereklidir. Oysa, vektör modülatör devreleri her iki faktörü, faz ve büyüklük faktörlerini aynı anda kontrol ettiği için sistem içerisinde kullanımı daha kolaydır. Özellikle faz taramalı anten dizileri için vektör modülatör çok önemli bir devre elemanıdır. Anten dizisi uygulamaları dışında da özel uygulama alanları vardır. Örneğin, geri ya da ileri besleme devrelerinde, döngü içerisinde büyüklük ve fazı ayarlayarak istenen döngü fonksiyonunun oluşturulmasında kullanılırlar. Vektör modülatörlerle ilgili literatür özeti Birinci Gelişme raporunda sunulmuştur, [28].

3.2. Vektör Modülatör MMIC Uygulama Devreleri

Bu çalışmada 9-10 GHz frekans aralığında çalışacak vektör modülatör devre tasarımları yer almaktadır. Bu devrelerin MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) ile gerçekleştirilmesi için teknolojik gereksinimler önemlidir, ancak üretim sonrası devre elemanlarının değerlerinin değiştirilmesi (post production tuning) mümkün olmadığından devre tasarımı çok dikkatli gerçekleştirilmelidir [29]. Bu nedenle farklı devre yapıları üzerine çalışılmıştır.

MMIC devreleri yurtdışındaki tesislerde üretilmektedir. Bu tesislerin devre bileşenleri üzerine sağladıkları tasarım kütüphaneleri kullanılmakta, yapılan tasarımlar üretim sonrası ölçülmektedir. Proje başlangıcında Bookham MMIC üretimi için seçilmiştir. Ancak, tasarım üretime dönüşmeden önce bu firma çalışma alanını değiştirdiğini açıklamış; GaAs tabanlı üretimleri bırakmıştır. Bu değişiklik proje akışında önemli bir sorun yaratmıştır. Sonrasında bulunan firmalar tek çip için sipariş kabul etmemekte, tüm pul için üretim yaptırmak ise bizim bütçemizi aşmaktaydı. Kısa bir süre önce üretim süreçleri çok da olgunlaşmış olmayan OMMIC firması ortaya çıkmıştır. Bu firmanın kütüphaneleri kullanılarak çeşitli tasarımlar

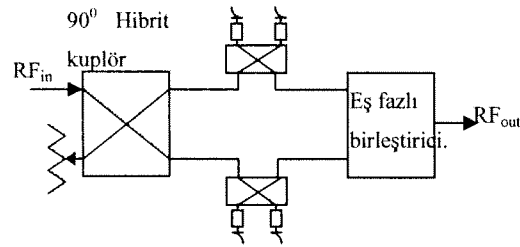
oluşturulmuştur. Ancak, oluşturulan tasarımların üretime gönderilmesi, önceki gecikmeler de gözönüne alındığında, pratik süreç açısından gerekli görülmemiştir; yeterince gerçekçi sonuçlar verecek serim sonrası benzetimlerle tasarımlar değerlendirilmiştir. Farklı tasarımların performansları karşılaştırılmıştır.

3.2.1. Vektör modülatör çeşitleri

Literatürde çok farklı tasarım teknikleri yer almaktadır. Bu teknikler detaylı olarak Birinci Gelişme raporunda ve Mehmet Altuntaş'ın gerçekleştirdiği Yüksek Lisans tezinde yer almaktadır [29][30]. Genelde iki tür vektör modülatör devre yapısı bulunmaktadır. Bunlardan ilki giriş işaretini iki vektöre ayırıp vektörler üzerinde işlem yapma, diğeri ise üç vektöre ayırıp vektörler üzerinde işlem yapma prensibine dayanır.

İki vektöre ayırma yöntemi ile çalışan vektör modülatörler

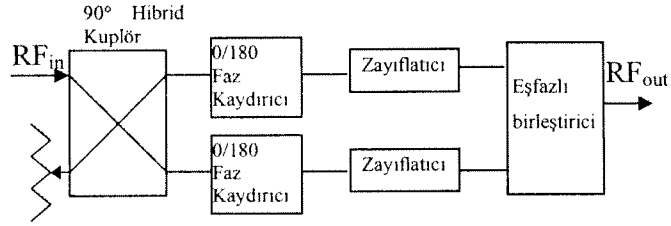
İki vektöre ayırma yöntemi ile çalışan vektör modülatörlere ilk örnek I/Q vektör modülatördür. Bu yapıda ilk olarak giriş işareti aralarında 90° faz farkı olan iki parçaya ayrılır. Polar düzleme göre bu iki işareti I ve Q (reel ve imajiner) olarak isimlendirebiliriz. Sonra her bir işaret (I & Q) 3-dB yönlü güç aktarıcısı çıkışına eklenen ayarlanabilir empedans ile istenen oranda yansıtılır. Son olarak elde edilen işaretler eş fazlı birleştirici ile toplanır. Bu işlemin şematik gösterimi Şekil 29'da verilmektedir.



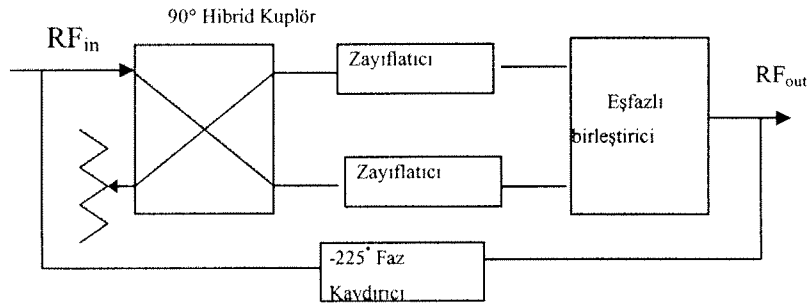
Şekil 29. I/Q vektör modülatör devresinin şeması.

İki vektöre ayırma yöntemi kullanılan ikinci yapı $0^\circ/180^\circ$ anahtarlamalı vektör modülatördür [31]. Bu yapıda giriş işareti reel ve imajiner olarak ikiye ayrıldıktan sonra her bir işaret $0^\circ/180^\circ$ anahtar yardımı ile koordinat ekseninde istenen bölgeye taşınır ve istenen oranda zayıflatmaya uğratıldıktan sonra toplanır. Bu işlemin şematik gösterimi Şekil 30'da görülebilir.

İki vektöre ayırma yöntemi kullanılan üçüncü yapı ise kaydırılmış çeyrek (shifted-quadrant) vektör modülatör yapısıdır [32]. Bu yapıda reel ve imajiner olarak ikiye ayrılan işaretler istenen oranda zayıflatıldıktan sonra eş zamanlı olarak toplanır. Toplam sonucu elde edilen işaret, giriş işaretine -225° lik faz kayması eklenmiş bir başka işaret ile toplanır. Bu işlemin şematik gösterimi Şekil 31’de görülebilir.



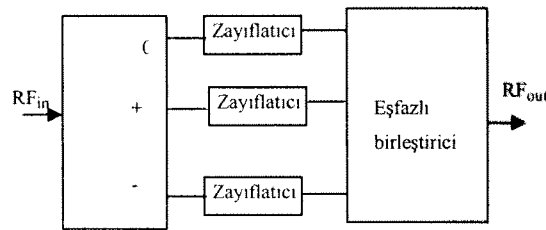
Şekil 30. 0/180 anahtarlamalı vektör modülatör devresinin şeması.



Şekil 31. Shifted-Quadrant Vektör Modülatör

Üç vektöre ayırma

Bu yöntemde giriş işareti önce aralarında 120° faz farkı kalacak şekilde üç eşit parçaya bölünür [33]. Sonra elde edilen her bir vektör üzerinde istenen oranda zayıflatma yapılır ve eş fazlı olarak toplanır. Bu işlemin şematik gösterimi Şekil 32’de görülebilir.



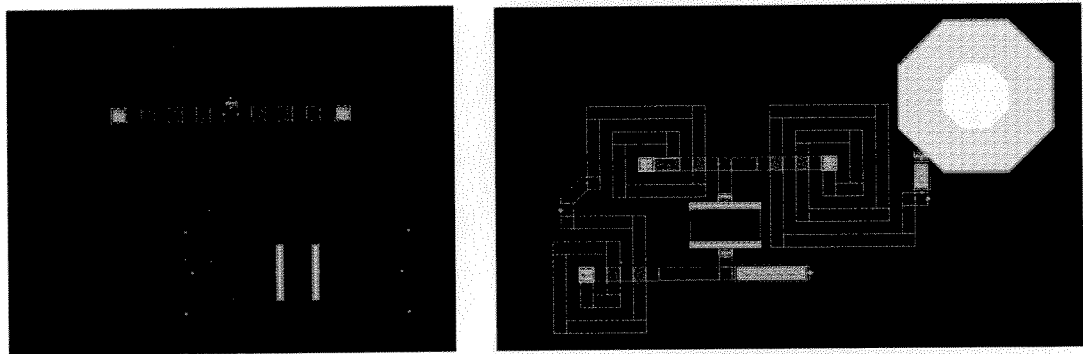
Şekil 32. Üç vektörlü vektör modülatör devresinin şeması.

3.2.2. Devre serimi

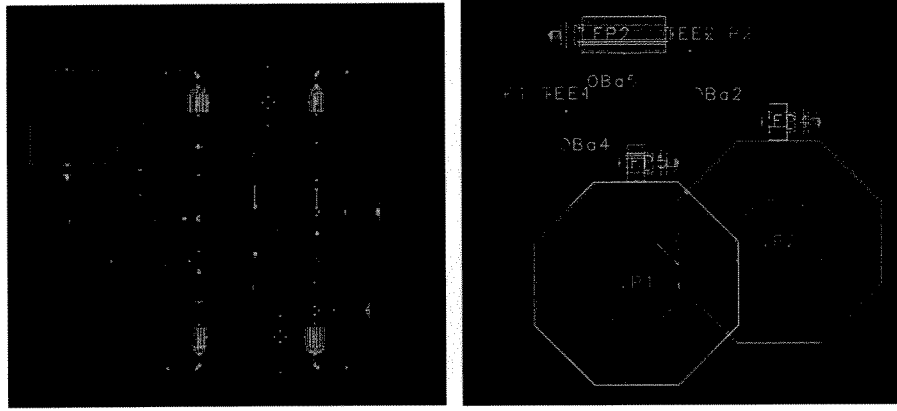
Devre ADS2005 Microwave Circuit Design programında OMMIC firmasının teknolojisi kullanılarak hazırlanmıştır. I/Q modülatör için ilk olarak 3-dB Wilkinson güç bölücü tasarlanmıştır. Daha sonra bir kola $+45^\circ$ diğerine ise -45° faz farkı oluşturacak devre tasarlanıp eklenmiştir (Şekil 33-b). Böylece I ve Q vektörleri elde edilmiştir. Daha sonra $0^\circ/180^\circ$ anahtarlamalı paralel bağlı yüksek geçiren / alçak geçiren faz kaydırıcı devresi tasarlanmış ve her kola eklenmiştir (Şekil 34-a) [34]. Böylece vektörleri 4 bölgeden istenilen ikisine taşıma imkanı elde edilmiştir. Vektörler üzerinde zayıflatma yapabilmek için ise üç transistörü pi şeklinde düzenleyip DC voltajları ayarlanmıştır (Şekil 34-b). Son olarak eş zamanlı birleştirici devre tasarlanmıştır (Şekil 33-a).

3.2.3. Sonuçlar ve değerlendirme

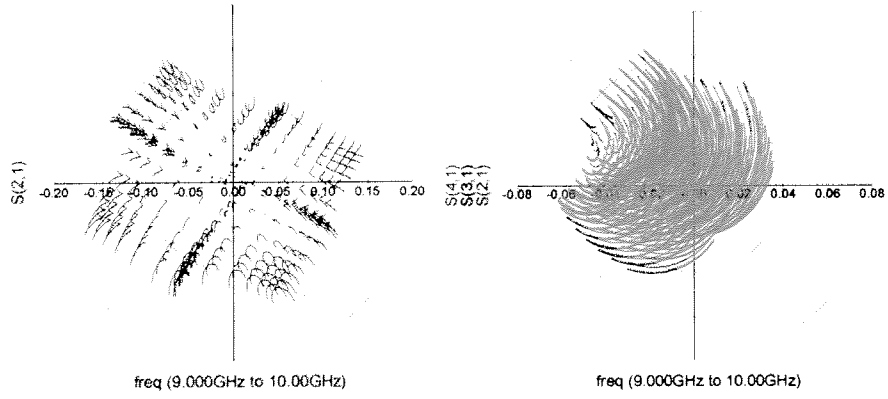
Şekil 36'de serimi verilen iki vektörlü modülatör devresinin benzetim sonucu Şekil 35-a'da görülmektedir. Üç vektörlü modülatör benzetim sonucu ise Şekil 35-b'de görülmektedir. Şekil 35-b'de görülebileceği gibi üç vektörlü modülatör tasarımı ile giriş işareti en az 23 dB en fazla 50 dB zayıflatılmış ve 360° lik bölgede istenen miktarda faz farkı eklenebilmiştir. Şekil 35-a'dan görülebileceği gibi iki vektörlü modülatör tasarımı ile giriş işareti en az 16 dB en fazla 44 dB zayıflatılmış ve 360° lik bölgede istenen miktarda faz farkı eklenebilmiştir.



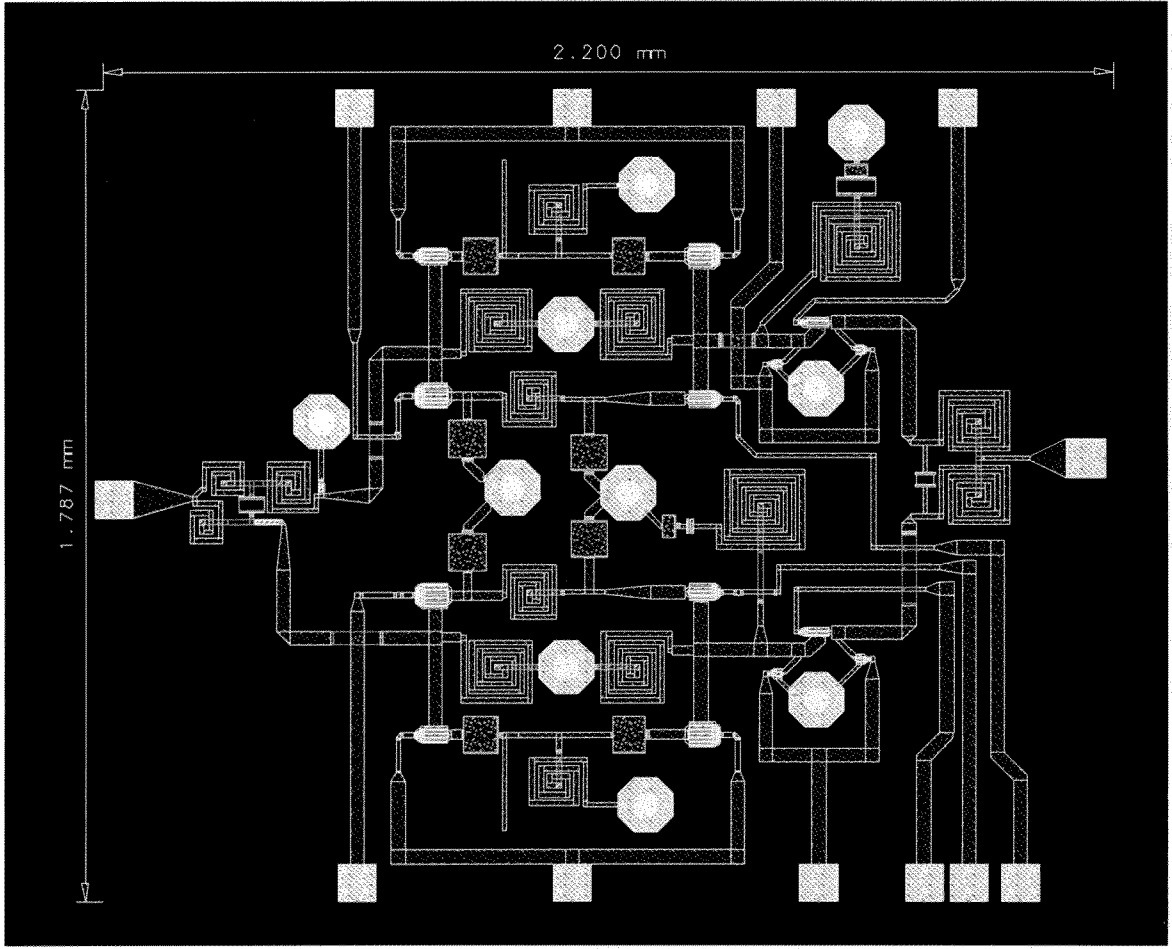
Şekil 33. (a) Eş fazlı birleştirici (toplayıcı) (b) İşaret bölücü (I/Q).



Şekil 34. (a) $0^\circ/180^\circ$ anahtarlamalı faz kaydırıcı (b) Pi şekilli kayıplı büyüklük ayarlayıcı.



Şekil 35. (a) İki vektörlü modülator çıkış grafiği (b) Üç vektörlü Modülator çıkış grafiği.

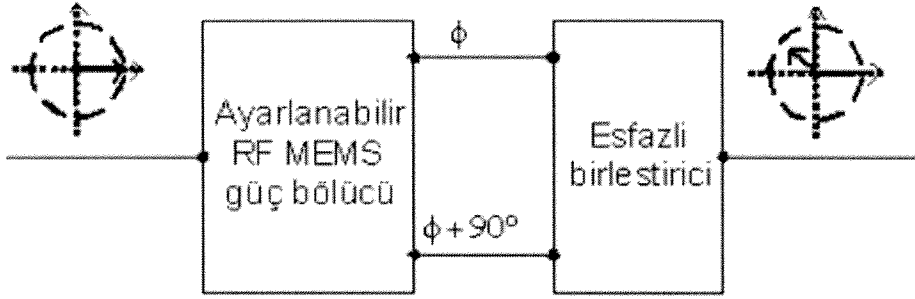


Şekil 36. İki vektörlü modölatör devre serimi.

3.3. RF-MEMS Vektör Modülatör Çalışmaları

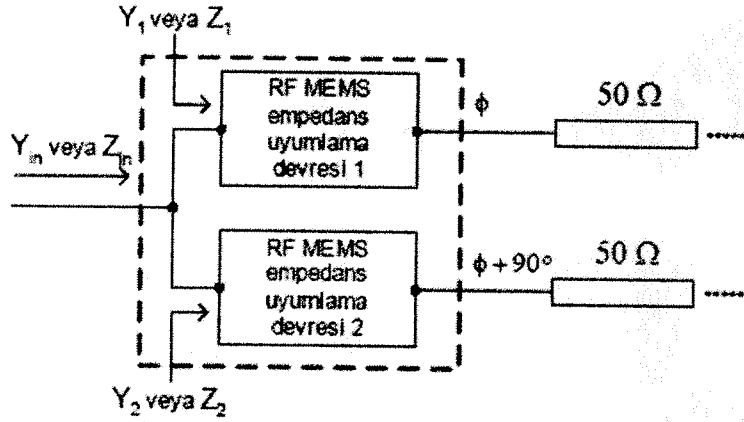
3.3.1. RF-MEMS Vektör Modülatör Devresi

Raporun bu bölümünde RF-MEMS Vektör modülatör devresi tasarımı ve üretimiyle ilgili çalışmalar sunulmuştur. Burada tasarlanan vektör modülatör devresi temel olarak Şekil 29’da blok şeması verilen yapıdadır. RF MEMS teknolojisinin getirdiği ayarlanabilir devre elemanları yapabilme kabiliyeti sayesinde I/Q çıkışı olan ayarlanabilir güç bölücü yapmak mümkündür. Bu çalışma kapsamında önerilen yapıda ise I/Q bölücü, genlik kontrolü ve faz ayarı blokları yerine tek bir RF MEMS I/Q güç bölücü devresi kullanılarak çok daha basit bir hale getirilmeye çalışılacaktır. Bu vektör modülatör devresinin blok şeması Şekil 37’de verilmiştir.



Şekil 37. Önerilen vektör modülatörün blok şeması

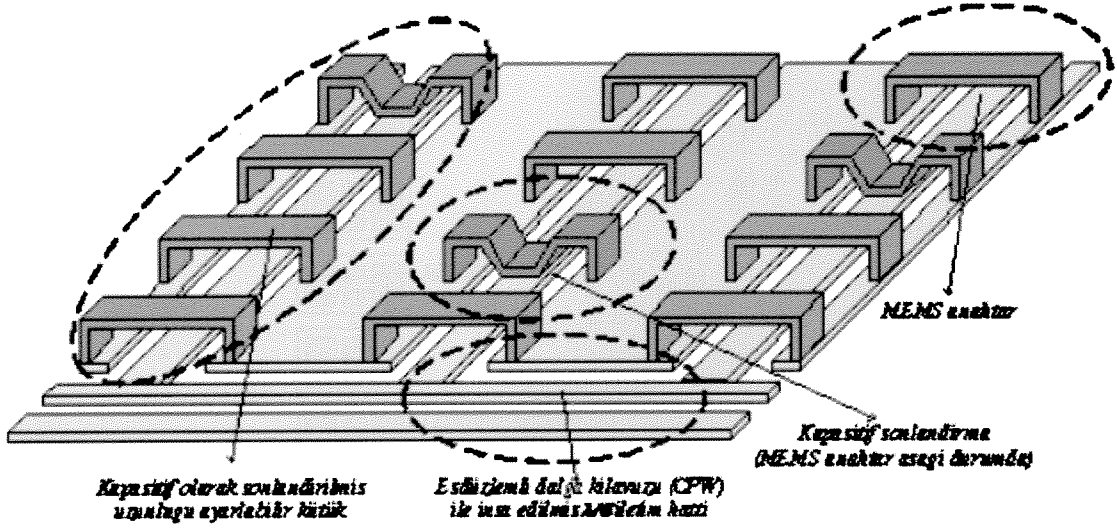
RF MEMS I/Q güç bölücü devresi, Şekil 38’de görüldüğü gibi, temel olarak iki adet empedans uyumlama devresini paralel olarak bağlayarak elde edilmektedir. RF MEMS teknolojisinin getirdiği ayarlanabilir devre elemanları üretebilme yeteneği ile Smith Abağı üzerinde çok sayıda noktaya empedans dönüşümü yapabilen empedans uyumlama devreleri yapmak mümkündür. Bu devrelerden iki tanesi Şekil 38’de görüldüğü gibi bağlandığında 50 Ω empedansı istenilen Z_1 (Y_1) ve Z_2 (Y_1) gibi empedanslara (admitanslara) dönüştürecek şekilde ayarlanabilmektedir, [35]. Çeşitli RF-MEMS empedans uyumlama devresi tasarımları yapılmıştır. Bu süreçte elde edilen deneyimlerle sürekli geliştirilen tasarımlar sonucunda bir Bölüm 3.3.2’de anlatılan yeni nesil RF MEMS empedans uyumlama devresine erişilmiştir.



Şekil 38. RF MEMS I/Q güç bölücü devresinin blok şeması

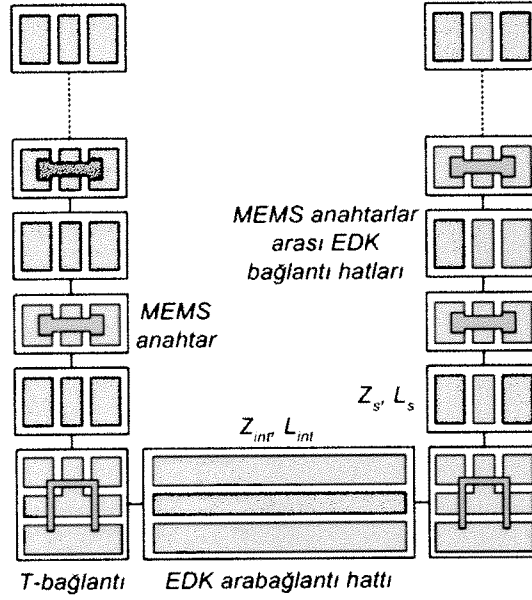
3.3.2. Yeni nesil ayarlanabilir RF MEMS empedans uyumlama devresi

Proje süresince ayarlanabilir RF MEMS empedans uyumlama devreleri için hem iki kütüklü, hem de üç kütüklü çeşitli tasarımlar yapılmıştır. Yapıların çalışabilmesi için gerekli olan uzunluğu ayarlanabilir kütükler, RF MEMS anahtarların $\lambda/2$ uzunluğundaki kütük üzerine $\lambda/5$ veya $\lambda/10$ aralıklara yerleştirilerek istenilen kütük uzunluğuna en yakın anahtarın kapatılması ve o noktada bir kapasitif sonlandırma oluşturularak kütük uzunluğunun ayarlanması ile gerçekleştirilmektedir. Üç kütüklü yapının üç boyutlu ve ölçüsüz görünümü Şekil 39'da görülmektedir. Öncelikle, Dördüncü ve Beşinci Gelişme raporunda tasarımı ve üretim sonuçları verilen iki nesil tasarım yapılmıştır, [35][36]. Üretilen bu yapıların ölçümleri yapılmış ve EM benzetimlerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Fakat ölçümler sırasında, TRL kalibrasyon tekniği için gerekli olan uzantıların yapının gerçek performansını etkilediği gözlenmiştir. Ayrıca kütükleri eğmek için kullanılan eşdüzlemsel dalga kılavuzu (EDK) köşeler ve T-bağlantıların da yapının performansını etkilediği görülmüştür. Bu sebeplerden, SOLT kalibrasyon tekniği ile ölçülebilen ve T-bağlantı etkilerinin de hesaba katıldığı yeni nesil bir tasarım yapılmıştır. ODTÜ RF MEMS Grubu'nun geliştirdiği üçüncü nesil empedans uyumlama devresi olan bu tasarımda, yapının karakterizasyonunu kolaylaştırmak ve etkileri ayrı ayrı belirlemek amacıyla kütük sayısı üçten ikiye, anahtar sayısı da 36'dan 10'a indirilmiştir.

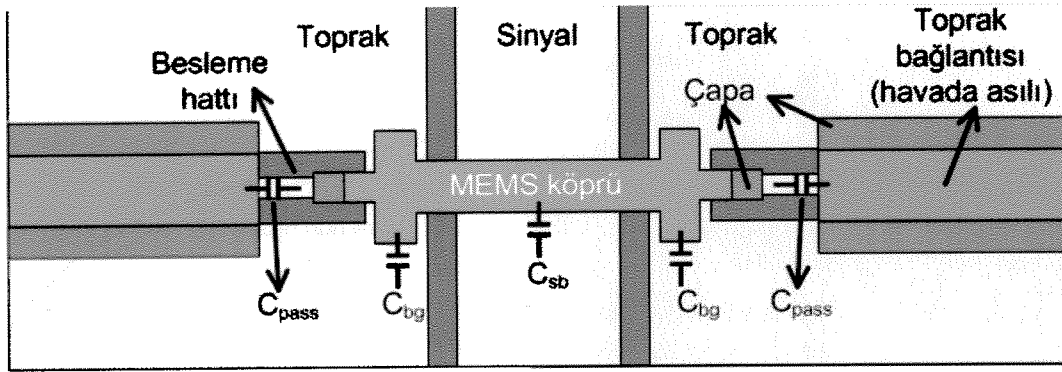


Şekil 39. RF MEMS üç kütüklü empedans uyumlama devresinin 3 boyutlu görünümü.

Tasarlanmış olan yeni nesil ayarlanabilir RF MEMS empedans uyumlama devresinin şeması Şekil 40'da görülebilir. Yapı, iki adet uzunluğu ayarlanabilir kütük, iki adet T-bağlantı ve kütükleri T-bağlantılar ile birbirine bağlayan bir arabağlantı hattından oluşmaktadır. Her iki kütük yapısı da 5'er adet MEMS anahtar ile bu anahtarları bağlayan EDK hatlardan oluşmaktadır. Yapıda kullanılan MEMS anahtarlar bu yapı için özel olarak tasarlanmıştır. Burada klasik MEMS anahtar yapısının aksine bir yerine üç adet ayarlanabilir kapasitör kullanılmıştır. Bunun sebebi ise her MEMS anahtara ayrı DC gerilim uygulanması gerekmesi ve bu sebeple MEMS köprülerin çapa noktalarının EDK toprakları üzerine indirilmesi yerine kapasitif kuplaj yapılmasıdır. MEMS anahtarın üstten görünümü Şekil 41'de görülmektedir.



Şekil 40. Üçüncü nesil iki kütüklü empedans uyumlama devresinin şeması.

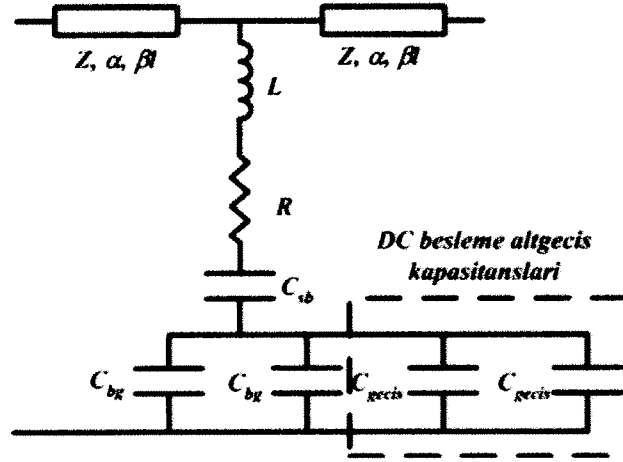


Şekil 41. Empedans uyumlama devresinde kullanılan MEMS anahtarın üstten görünümü.

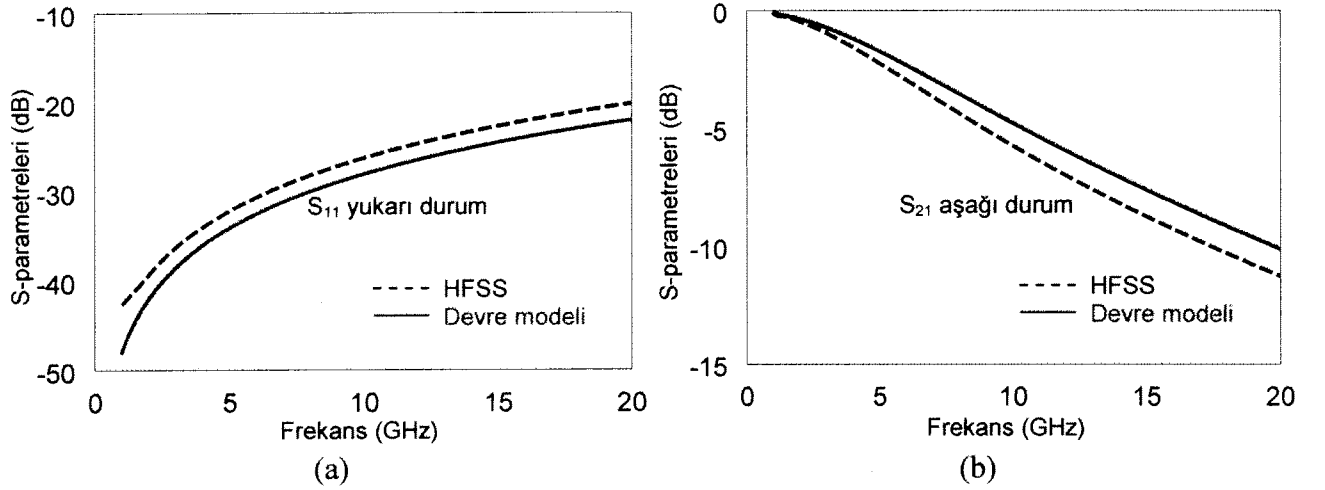
Yapıda kullanılan MEMS anahtarların tasarımları ve devre benzetimleri önce Microwave Office 2006 programı ile yapılmış, daha sonra HFSS programı kullanılarak tüm dalga EM benzetimlerle doğrulanmıştır. Anahtarın devre denetimi için kullanılan model Şekil 42’de görülmektedir. Yapının devre modeli ve HFSS benzetimlerinin karşılaştırmalı sonuçları ise Şekil 43’de verilmiştir.

EM benzetim sonuçları incelendiğinde sonuçların genel olarak uyum içinde olduğu gözlenmektedir. Aradaki bir miktar farklılığın sebebi ise yukarı durum devre benzetimlerinde kapasitans değerlerinin kenar etkilerini de hesaba katan kapalı formüller kullanılarak hesap edilmesidir. Yani kapasitans değerlerinde herhangi bir ayarlama yapılmamıştır. Kullanılan formül [37]’de bulunabilir. Anahtarların aşağı durumunda ise kapasitanslar paralel plaka formülü kullanılarak hesap edilmiş, endüktans ve direnç değerleri ise literatürde bu eleman

değerlerini hesap etmek için kapalı formüller bulunmadığından eğri uyumlaması kullanılarak bulunmuştur. Devre modelinin eleman değerleri *Tablo 1*'de görülebilir.



Şekil 42. MEMS anahtarın devre modeli.

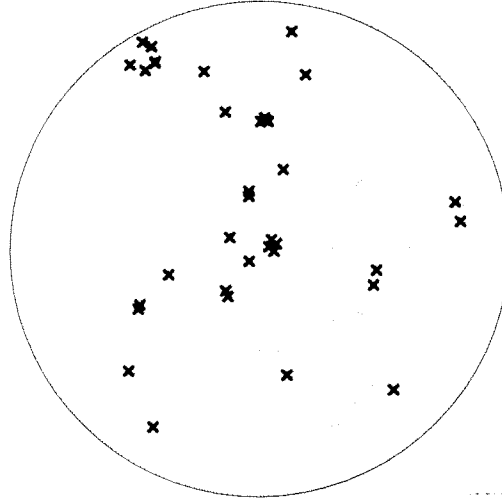


Şekil 43. Tasarlanan MEMS anahtarın devre ve HFSS benzetim sonuçları.

Tablo 1. MEMS anahtar için devre modelinde kullanılan değerler.

	Yukarı durum	Aşağı durum
C_{sb} (pF)	0.044	1.63
C_{bg} (pF)	0.033	0.91
C_{gecis} (pF)	0.003	0.003
L (pH)	6.7	6.7
R (Ω)	0.14	0.24
Z (Ω)	55	
l (μm)	175	
ϵ_{eff}	2.78	
α (dB/cm)	0.30	

MEMS anahtarın tasarımından sonraki adım, empedans uyumlama devresinin tasarımının tamamlanmasıdır. Tasarımda kullanılan parametreler kütükler arası kullanılan EDK hattın karakteristik empedansı ve uzunluğu (Z_{int} , L_{int}), MEMS anahtar sayısı ile MEMS anahtarlar arasındaki EDK hatların karakteristik empedansları ve uzunluklarıdır (Z_s , L_s). Bu parametrelerle oynanarak Smith Abağı üzerinde olabildiğince yaygın bir empedans dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Yapıların devre benzetimleri Microwave Office 2006 programıyla EDK hatları ve MEMS anahtarların devre modellerini arka arkaya sıralayarak yapılmıştır. Ayrıca tasarımlar üzerinde önemli bir etkisi olan T-bağlantılar da hem devre modeli hem de tüm dalga EM benzetimleri yapılarak tasarımlara dahil edilmiştir. Tasarım ile elde edilebilen empedans noktalarının Smith Abağı üzerindeki dağılımı Şekil 44'te, kullanılan parametrelerin değerleri ise *Tablo 2*'de görülebilir.



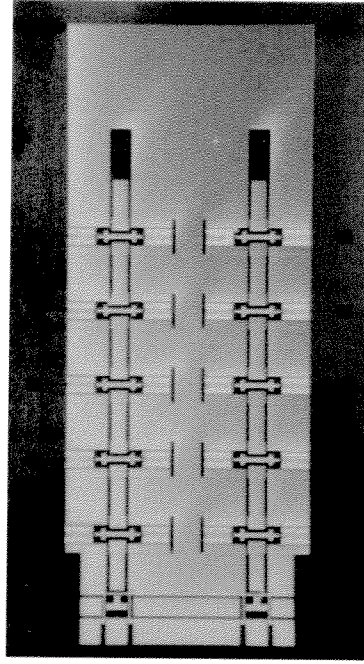
Şekil 44. Empedans uyumlama devresinin S. Abağı üzerindeki empedans dağılımı (18GHz)

Tablo 2. Tasarlanan MEMS empedans uyumlama devresinde kullanılan parametrelerin değerleri

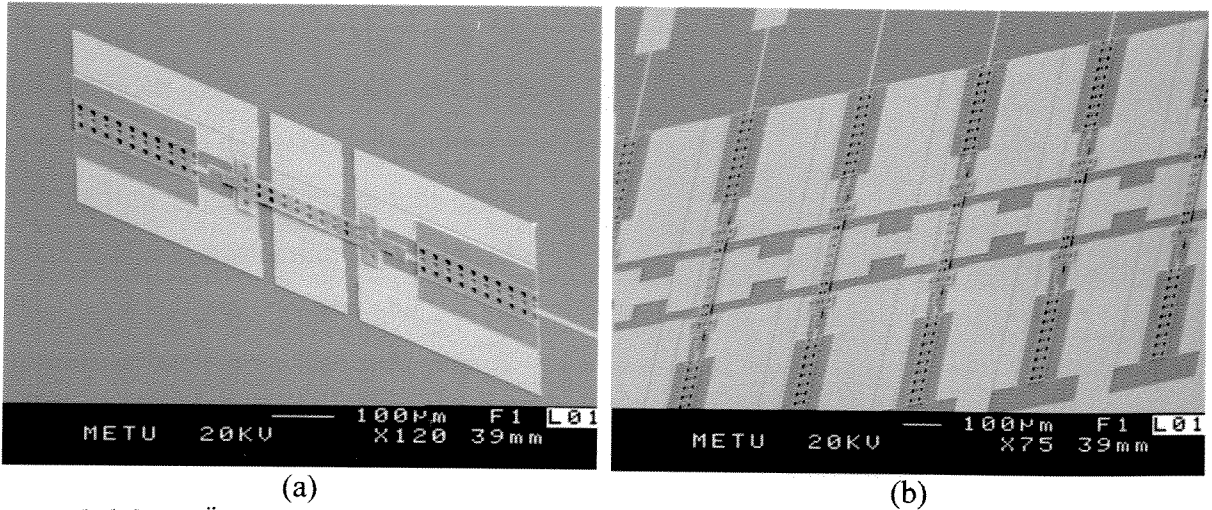
Kütük sayısı = 2		
MEMS anahtar sayısı = 10		
Kütükler arası hat parametreleri		
Z_{int} (Ω)	L_{int} (μm)	α (dB/m)
47	1090	50
MEMS anahtarlar arasındaki hatların parametreleri		
Z_s (Ω)	L_s (μm)	α (dB/m)
60	380	50

3.3.3. Yeni nesil empedans uyumlama devresinin ölçüm sonuçları

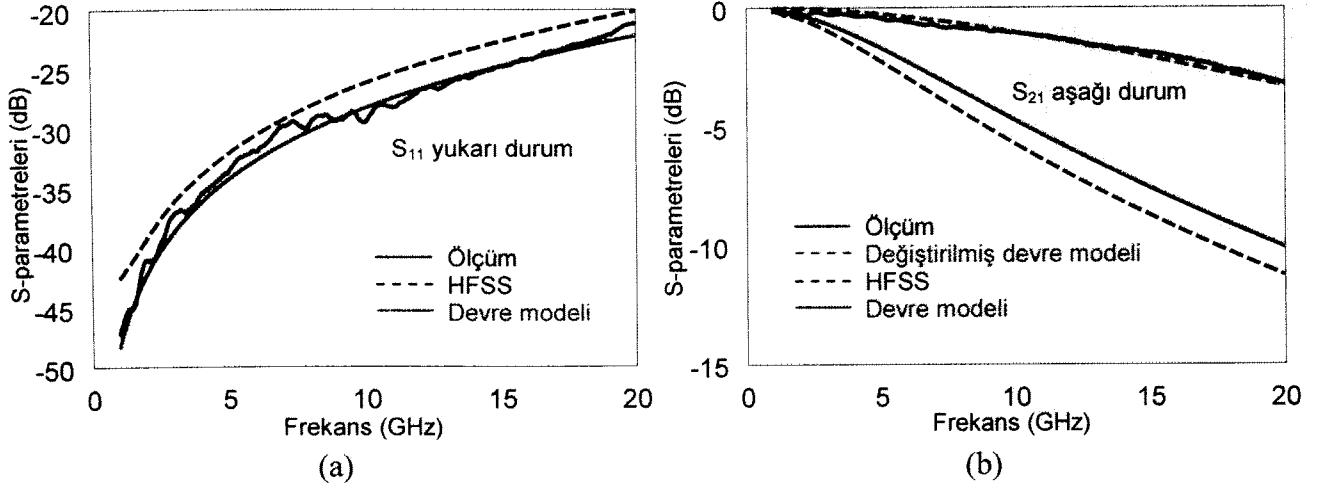
Tasarlanan yapılar ODTÜ Mikroelektronik Tesisleri'nde geliştirilen ve detayları Bölüm 4'de verilen üretim süreci ile üretilmiştir. Üretilmiş olan yapıların fotoğrafı Şekil 45'de ve SEM fotoğrafları da Şekil 46'da görülebilir. Üretilen yapılar ODTÜ Milimetrikdalga Laboratuvarı'nda Agilent 8720D ağ analizörü ile 1-20 GHz bandında ölçülmüştür. Yapının ana birim parçası olan MEMS anahtarın ölçüm sonuçları Şekil 47'de verilmiştir.



Şekil 45. Üretilmiş olan MEMS empedans uyumlama devresinin fotoğrafı.



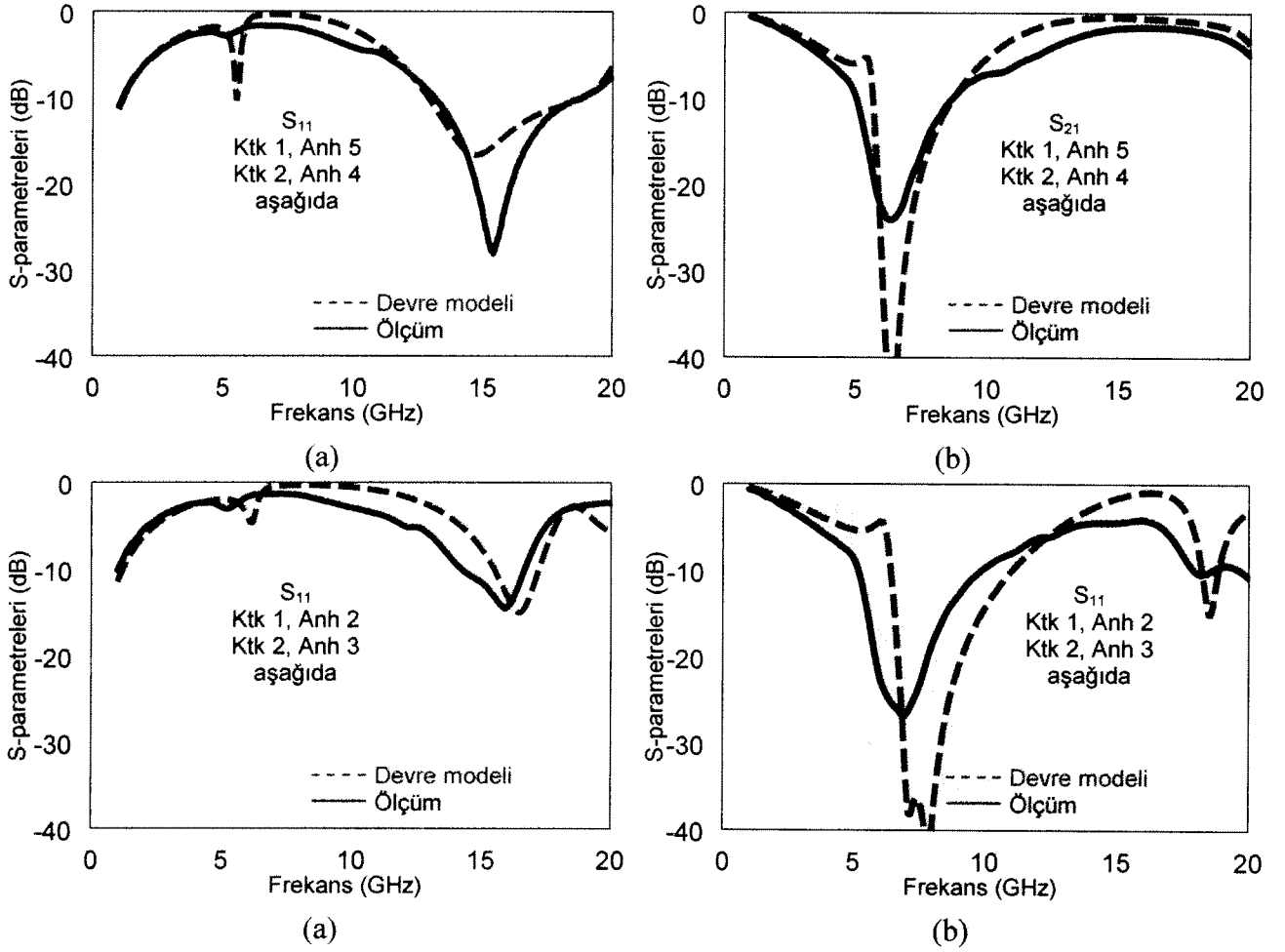
Şekil 46. Üretilmiş olan MEMS empedans uyumlama devresinin fotoğrafı. (a) MEMS anahtarın yakında görünümü. (b) Empedans uyumlama devresinin bir kütüğünün yakından görünümü.



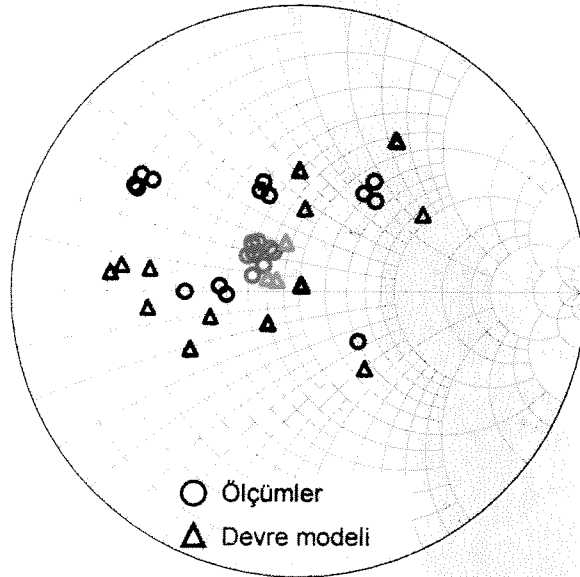
Şekil 47. MEMS anahtarın ölçülmüş S-parametreleri ve benzetimlerle karşılaştırılması.

MEMS anahtarın ölçülmüş performansı incelendiğinde yukarı durumdaki performansın benzetimlerle uyum içerisinde olduğu, ancak aşağı durum performansında bir miktar farklılık olduğu gözlenebilir. Yapılan incelemeler sonucunda bu durumun aşağı durum kapasitansındaki azalmadan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu gözlem sonucunda aşağı durum kapasitansları 0.37 gibi bir çarpan ile çarpıldığında aşağı durum sonuçlarının da benzetimlerle uyum içerisinde olduğu gözlenmektedir. Literatürdeki yayınları incelediğimizde aynı sorunlarla karşılaşılıp, üretim ve tasarlanan arasındaki kapasitans farkının yaklaşık 0.37 olduğu görülmüştür [38[39].

MEMS anahtarın ölçümlerinden sonra empedans uyumlama devresinin ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sırasında, MEMS anahtarlara DC gerilim taşımak için kullanılan DC uçlar yapıya dokundurulduğunda, RF performansın çok ciddi olarak etkilendiği ve beklenenden farklı sonuçları verdiği gözlenmiştir. Bu durumu engellemek amacıyla, ilk yapıda birtakım değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler, yapıya yüksek bir direnç üzerinden DC gerilim uygulayabilmek için direnç yerleri eklenmesi ve DC gerilim taşıyan hattın RF hatta kuplajını azaltabilmek için havada asılı toprak bağlantısının daraltılmasıdır (Şekil 41). Bu şekilde yapı doğru bir şekilde ölçülebilmektedir. Yapının bazı örnek anahtar kombinasyonları için ölçülmüş olan S-parametreleri Şekil 48’de, 18 GHz’de bütün anahtar kombinasyonları için ölçülmüş Smith Abağı dağılımı ise Şekil 49’da görülebilir.



Şekil 48. MEMS empedans uyumlama devresinin bazı örnek anahtar kombinasyonları için ölçülmüş olan S-parametreleri.



Şekil 49. MEMS empedans uyumlama devresinin 18 GHz'de bütün anahtar kombinasyonları için ölçülmüş Smith Abağı dağılımı.

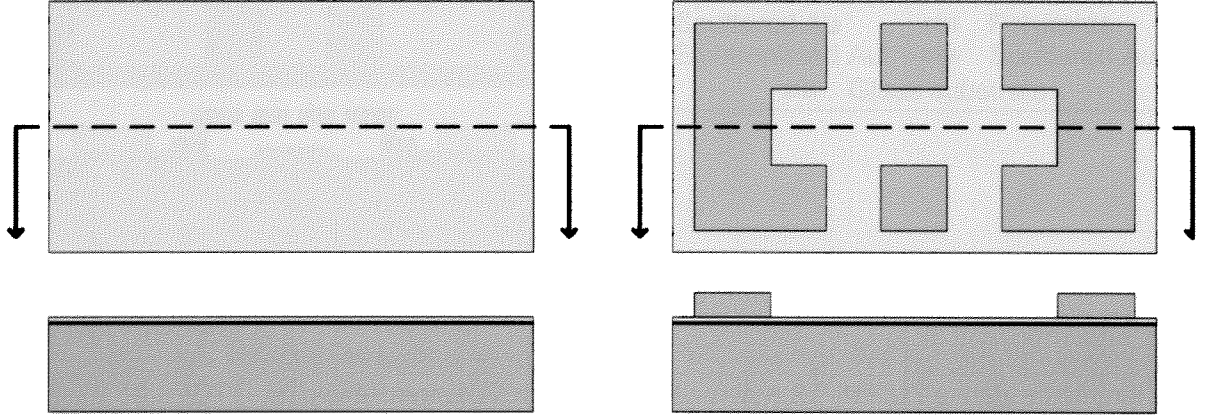
Ölçüm sonuçları incelendiğinde, benzetimlerdeki bazı parametrelerin değerleri ölçüm sonuçlarına göre düzeltilindiğinde, ölçümlerle benzetimlerin uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu durumda, tasarlanan yapının düzgün bir şekilde çalıştığı ve istenilen sonuçları verdiği söylenebilir. Ölçümlerden elde edilen parametreler, bir sonraki tasarım sırasında dikkate alındığında çok daha başarılı sonuçlar elde edileceği beklenmektedir.

RF-MEMS vektör modülatör devresinin tamamının üretimi, üretimde kullanılan bazı ekipmanın alım ve kurulumundaki gecikmeler ve üretim sürecinin geliştirilmesinde karşılaşılan sorunların çözümüyle olgunlaşmış bir üretim sürecine ulaşılmadaki gecikmeler nedeniyle proje süresi içerisinde tamamlanamamıştır. Fakat, vektör modülatör yapısının en önemli parçası olan empedans uyumlama devresinin üretimi ve ölçümü başarıyla tamamlanmıştır. Bu çalışma literatürde yer alabilecek özgünlüktedir. Bundan sonraki adım vektör modülatör devresinin bu tasarım, üretim ve ölçümlerden elde edilen deneyimle tasarlanmasıdır.

4. ODTÜ MİKROELEKTRONİK TESİSLERİNDE GELİŞTİRİLEN RF MEMS ÜRETİM SÜRECİ

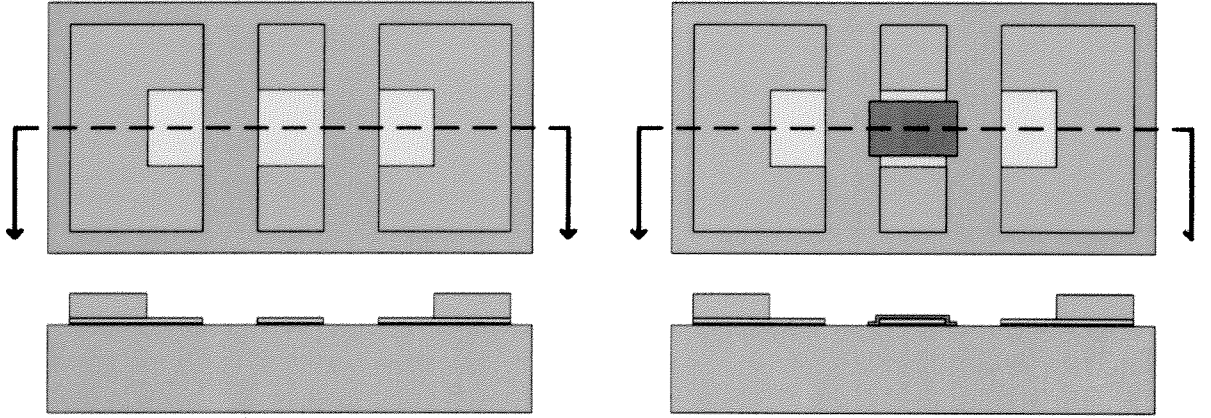
Proje kapsamında tasarlanan anten yapıları ve mikrodalga devreleri ODTÜ RF-MEMS grubunca geliştirilen üretim süreci kullanılarak ODTÜ-Mikroelektronik tesislerinde üretilmiştir. TÜBİTAK 101E023 nolu “MEMS Teknolojisi ile RF Devre Elemanları Geliştirilmesi” projesiyle geliştirilmeye başlanan yüzey mikroişleme teknolojisine dayanan RF-MEMS üretim süreci bu proje kapsamında da geliştirilmeye devam edilmiştir. Projenin gelişme raporlarından bu sürecin gelişimi izlenebilir. Üretim süreci son haliyle burada anlatılmaktadır. Taban malzemesi olarak 500 µm kalınlığındaki Pyrex 7740 cam pul kullanılmaktadır. Üretimin ilk aşaması olarak pullar piranha ($H_2SO_4:H_2O_2$ 1:1.2) temizliğinden geçirilmektedir. Birinci metal katmanın yüzeye iyi tutunabilmesi için Buffered HF asidi kullanılarak yüzey bir miktar pürüzlendirilmektedir. Ardından 100/2500 Å kalınlığında Ti/Au tohum katmanı (seed layer) sputter (tozutmaya) yöntemiyle serilmektedir [Şekil 50 (a)]. SPR-220-3 fotorezisti yardımıyla daha kalın metal büyütülecek yerler belirlenmekte ve 2 µm kalınlığında Au katmanı elektrokaplama tekniğiyle büyütülerek EDK hatların kalın metalizasyonlu bölgeleri elde edilmektedir [Şekil 50 (b)]. Geri kalan Ti/Au tohum katmanı, S1828 fotorezistiyle yapılan litografinin ardından altın (Transene TFA-Gold etchant) ve titantum ($HF:H_2O_2:DI$ 1:1:640) aşındırıcılar kullanılarak EDK hatlar tamamlanmaktadır [Şekil 50 (c)]. Köprüler aşağı indiği durumda DC kısa devrenin oluşmasını engellemek amacıyla 3000 Å kalınlığında Si_xN_y katmanı PECVD (Plasma enhanced chemical vapor deposition) cihazı ile büyütülmektedir. S1828 ile litografinin ardından RIE (Reactive Ion Etching) cihazı ile uygun gaz oranları kullanılarak Si_xN_y katmanı şekillendirilmektedir [Şekil 50 (d)]. EDK hatlar ve köprüler arasındaki boşluğu oluşturmak üzere 2 µm kalınlığında PI2737 polyimide ara katmanı serilmekte ve litografi ile şekillendirilmektedir [Şekil 50 (e)]. 1.2-1.5 µm kalınlığında Au katmanı köprüleri oluşturmak üzere düşük stresli metal büyütme için kullanılan süreç reçeteleri kullanılarak büyütülmekte ve S1828 veya Ma-N 1420 (maskenin polaritesine bağlı olarak) ile yapılan litografinin ardından altın aşındırıcı kullanılarak şekillendirilmektedir [Şekil 50 (f)]. Üretim sürecinin son aşaması olarak polyimide ara katmanı aşındırılmaktadır [Şekil 50 (g)]. Burada iki türlü süreç geliştirilmiştir: a) SVC-175 içerisinde 24 saat tutulan örnekler, aseton ve alkol banyosunun ardından kritik nokta kurutucusunda kurutulmakta ve havada duran hareketli

köprüler elde edilmektedir. b) RIE cihazı içerisinde uygun gaz oranlarıyla PI2737 katmanı kuru olarak aşındırılmaktadır. Böylelikle havada duran hareketli köprüler elde edilmektedir.



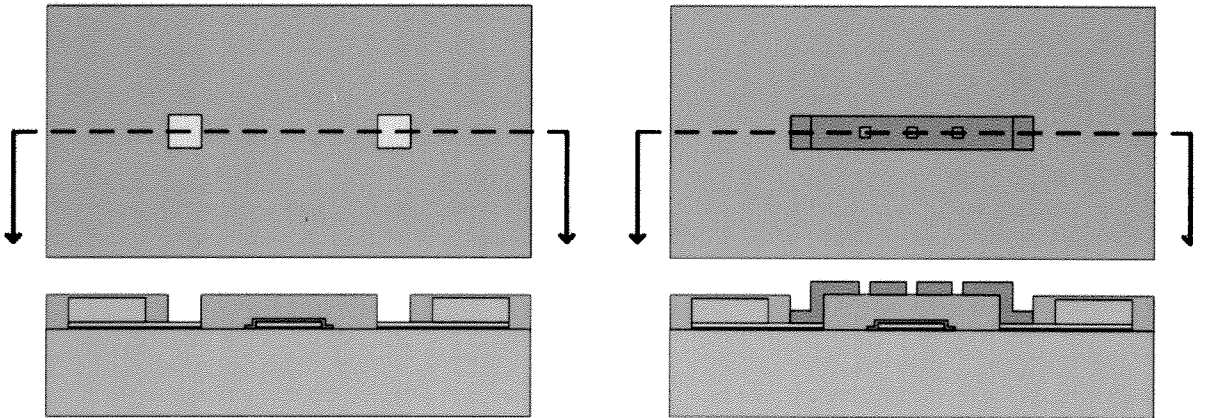
(a) Ti/Au büyütülmesi

(b) Au büyütülmesi



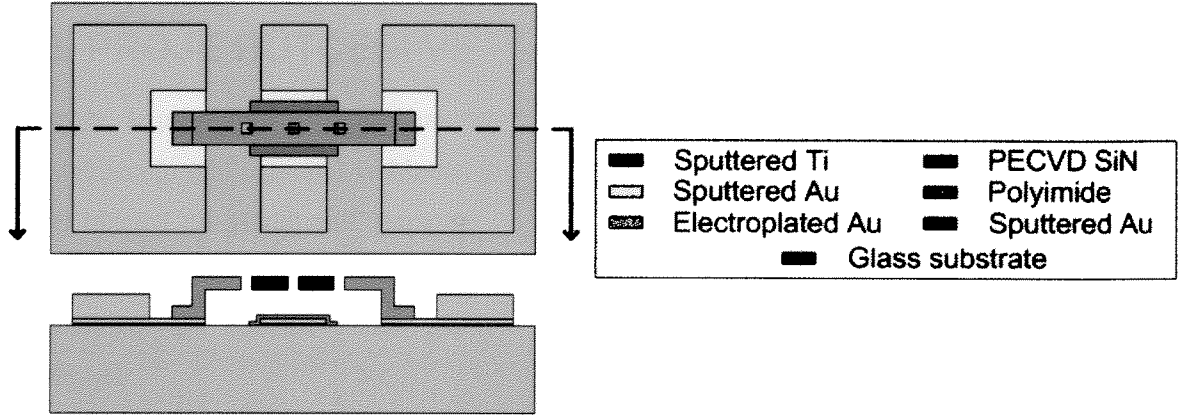
(c) Ti/Au şekillendirilmesi

(d) Si₃N₄ büyütülmesi ve şekillendirilmesi



(e) Polyimide serilmesi ve şekillendirilmesi

(f) Au büyütülmesi ve şekillendirilmesi



(g) Ara katmanın aşındırılması

Şekil 50. ODTÜ Mikroelektronik Tesislerinde geliştirilen RF MEMS üretim sürecinin aşamaları.

5. PROJE BÜTÇESİ VE YAPILAN HARCAMALAR

Proje kapsamında yapılan harcamalar *Tablo 3*'de verilmektedir. *Tablo 3*'den de görülebileceği gibi personel ve hizmet alımı kalemlerinde ödeneğin tamamı harcanmamıştır. Proje bütçesi onayladığında, personel kaleminde iki öğrenci için burs ödeneği ayrılmıştı. Fakat Nisan 2005'den bu yana öğrencilerden biri doğrudan TÜBİTAK bursu almaya hak kazanmıştır. Bu nedenle Nisan 2005'ten itibaren yalnızca bir öğrenciye doktora bursu verilmiştir.

Hizmet alımı kaleminde RF-MEMS devreler için maske yapımı ve MMIC yapımı için ayrılan ödenekler kullanılmamıştır. RF-MEMS antenler ve devreler başka projelerden (DPT, AMICOM Mükemmelliyet ağı (Avrupa Komisyonu 6. Çerçeve projesi)) ödenen maskelerin üzerine konmuştur. Dolayısıyla bu harcamaya gerek kalmamıştır. Proje başlangıcında MMIC üretimi için Bookham firması seçilmiştir. Ancak, tasarım üretime dönüşmeden önce bu firma çalışma alanını değiştirdiğini açıklamış; GaAs tabanlı üretimleri bırakmıştır. Bu değişiklik proje akışında önemli bir sorun yaratmıştır. Sonrasında bulunan firmalar tek yonga için sipariş kabul etmemişler, tüm pul için üretim yaptırmak ise bizim bütçemizi aşmıştır. Kısa bir süre önce, daha önce üretim süreçleri çok da olgunlaşmış olmayan OMMIC firması ortaya çıkmıştır. Bu firmanın kütüphaneleri kullanılarak çeşitli tasarımlar oluşturulmuştur. Ancak, oluşturulan tasarımların üretime gönderilmesi, önceki gecikmeler de gözönüne alındığında, pratik süreç açısından uygun olmamış; tasarımlar yeterince gerçekçi sonuçlar verecek serim sonrası benzetimlerle değerlendirilmiştir.

Seyahat harcamaları COST284 toplantı ve çalıştaylarına katılmak için kullanılmıştır.

Tablo 3. Proje kapsamında yapılan harcamalar (YTL)

102E036 (COST-284)	TEÇHİZAT	SARF	HİZMET ALIMI	SEYAHAT	PERSONEL	AÇIKLAMA
HARCAMALAR						
	10-Kas-03	4.214,037557				metal kaynakları ~ 2.197 \$ KURT J. LESKER
	17-Kas-03	3.355,92				2 adet PC
	30-Ara-03					600 2 kişi Aralık bursu
	30-Oca-04					600 2 kişi Ocak bursu
	03-Mar-04					600 2 kişi Şubat bursu
	10-Mar-04		2.052,2			ADS yazılım lisans (1.320\$) SPARK
	02-Nis-04					600 2 kişi Mart bursu

21-Nis-04	12.997,7				5 adet standart anten SANGARI
05-May-04					600 2 kişi Nisan bursu
07-Haz-04			4.426,928178		Ö.A.Çivi, Ş.Demir İsveç
31-May-04					600 2 kişi Mayıs bursu
08-Tem-04					600 2 kişi Haziran bursu
02-Ağu-04					600 2 kişi Temmuz bursu
07-Eyl-04			4.136,321864		Ö.A.Çivi, G.Dural İspanya
26-Ağu-04					600 2 kişi Ağustos bursu
01-Eyl-04	8.850				adaptörler SANGARI
30-Eyl-04					600 2 kişi Eylül bursu
01-Kas-04					600 2 kişi Ekim bursu
26-Kas-04					600 2 kişi Kasım bursu
16-Ara-04	856,68				mahsup
03-Oca-05					600 2 kişi Aralık bursu
28-Oca-05			4.322,055		Ö.Çivi,M.Kuzuoğlu İsviçre
09-Şub-05					600 2 kişi Ocak bursu
28-Şub-05					600 2 kişi Şubat bursu
30-Mar-05					600 2 kişi Mart bursu
18-Nis-05	5.032,7	2.633,71			ADS lisans ve photo-resist alımı mahsup
02-May-05					300 1 kişi Nisan bursu
27-May-05					300 1 kişi Mayıs bursu
01-Tem-05					300 1 kişi Haziran bursu
28-Tem-05					300 1 kişi Temmuz bursu
01-Eyl-05					300 1 kişi Ağustos bursu
27-Eyl-05					300 1 kişi eylül bursu
09-Kas-05					300 1 kişi ekim bursu
06-Ara-05					300 1 kişi kasım bursu
30-Ara-05					300 1 kişi Aralık bursu
09-Mar-06					800 1 kişi Ocak,Şubat bursu
13-Nis-06					400 1 kişi Mart bursu
11-May-06					400 1 kişi Nisan bursu
15-Haz-06					400 1 kişi Mayıs bursu
12-Tem-06					400 1 kişi Haziran bursu
14-Ağu-06					400 1 kişi Temmuz bursu
22-Eyl-06					400 1 kişi Ağustos bursu
11-Eki-06					400 1 kişi Eylül bursu
T.ÖDENEK	16.354	20.441	39.345,9	13.125	21.600
T.HARCAMA	16.353,62	18.953,417557	4.685,910304	12.885,305042	15.900
T.KALAN	0,38	1.487,82443	34.659,989696	239,694958	5.700

6. SONUÇ

Bu projede RF-MEMS teknolojisi kullanılarak özgün çift/üç bandlı yeniden şekillendirilebilir, frekansı ayarlanabilir antenler tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Cep telefonu ve WLAN frekanslarında çalışabilecek (1.8, 1.9, 2.4 GHz) yeniden şekillendirilebilir anten ile üç frekansta da giriş geri dönüş kayıpları azaltılmıştır. RF-MEMS kapasitörlerle yüklenmiş yarık anten ile anten rezonans frekansının 10 GHz'de %10'luk bir band içinde ayarlanabileceği gösterilmiştir.

Faz dizili antenlerde ya da akıllı anten dizilerinde ışın demetini döndürmek, istenen ışınma örüntüsünü elde etmek amacıyla kullanılacak vektör modülatör yapıları üzerine çalışılmıştır. Hem MMIC hem de RF-MEMS teknolojisi için tasarımlar yapılmıştır. MMIC üç vektörlü modülatör tasarımı ile giriş işareti en az 23 dB en fazla 50 dB zayıflatılmış ve 360°'lik bölgede istenen miktarda faz farkı eklenebilmiştir. MMIC iki vektörlü modülatör tasarımı ile de giriş işareti en az 16 dB en fazla 44 dB zayıflatılmış ve 360°'lik bölgede istenen miktarda faz farkı eklenebilmiştir. RF-MEMS teknolojisiyle, literatürde örneğine rastlanmamış yeni bir vektör modülatör yapısı önerilmiştir. Bu tasarımda kullanılacak, ayrıca tek başına başka mikrodalga devrelerinde de empedans uyumlama için kullanılacak iki ve üç kütüklü empedans uyumlama devreleri tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarında devrelerin istenildiği gibi çalıştığı gözlenmiştir. Bu tasarımlarda kütüklerin empedansları kütükler üzerine yerleştirilen RF-MEMS köprülerle ayarlanmaktadır.

Proje kapsamında yapılan çalışmalarla ilgili olarak uluslararası indekslerce taranan dergilerde biri yayınlanmış, diğeri basılmak üzere kabul edilmiş iki yayın yapılmıştır. Bir makale daha hazırlanmış ve gönderilmek üzeredir. Ayrıca yapılan çalışmalar çeşitli uluslararası saygınlığı tanınmış konferanslarda sunulmuştur.

Bu proje kapsamında çalışılan anten ve mikrodalga devrelerini üretebilmek için TÜBİTAK 101E023 nolu "MEMS Teknolojisi ile RF Devre Elemanları Geliştirilmesi" projesiyle ve DPT projeleriyle üzerinde çalışılmaya başlanan yüzey mikroışleme teknolojisine dayalı bir RF-MEMS üretim süreci geliştirilmiştir. Bu teknoloji Türkiye'de ilk defa geliştirilmiş, bu teknolojiyle üretim yapılmış ve üretilen devre ve antenlerin çalıştığı görülmüştür. Geliştirilen üretim süreciyle üretilmiş anahtarlar üzerinde yaşam süresi testlerine başlanmıştır. Yapılan ilk ölçümlerde bu anahtarların 100 milyon kez açılıp kapandığı (açılıp-kapanma frekansı:700 MHz) gösterilmiştir. Bu üretim sürecini daha da iyi

bir hale getirerek üretilen devre bileşenlerinin daha uzun süreler çalıştırılabilmesi hedeflenmektedir.

RF-MEMS teknolojisinin yeniden şekillendirilebilir yapıları olanaklı kılması, pek çok yeni anten ve mikrodalga bileşeni tasarımına yol açacaktır. Grubumuz bu konudaki çalışmalarına devam edecektir.

Dünyada RF-MEMS teknolojiyle üretim yapabilen kuruluş/şirket sayısı oldukça azdır. Bu projeyle yapılan bu çalışmalarla Türkiye’de RF-MEMS teknolojisiyle üretim yapabilme yeteneğine sahip bir merkez olduğu dünyadaki bilimsel çevrelere ve konuyla ilgili araştırma ve üretim merkezlerine gösterilmiştir. RF-MEMS konusunda yaptığımız çalışmaların bir sonucu olarak grubumuz AMICOM adlı Avrupa komisyonu 6. çerçeve kapsamında desteklenen mükemmeliyet ağının (Network of Excellence: NoE) da bir üyesi olmuştur. COST284 kapsamındaki işbirliklerinin 7. Çerçeve programında da Avrupa’daki üniversite ve araştırma kurumlarıyla, antenler ve özellikle RF-MEMS uygulamaları konusunda ortak projeler içerisinde yer almamızı sağlayacağı öngörülmektedir.

7. REFERANSLAR

- [1] Long, S.A. and M.D. Waton, "A dual-frequency stacked circular-disc antenna", *IEEE Trans.*, Vol. AP-27, No. 3, pp. 281-285, 1979.
- [2] Waterhouse, R.B, "Design of probe-fed stacked patches", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol: 47 No: 12, pp.1780-1784, Dec 1999.
- [3] Targonski, S.D.; Waterhouse, R.B.; Pozar, D.M., "Wideband aperture coupled stacked patch antenna using thick substrates", *Electronics Letters*, Vol: 32 No: 21, pp. 1941 –1942, 10 Oct 1996.
- [4] S.C. Gao, L.W. Li, T.S. Yeo, and M.S. Leong, "Small, dual-frequency microstrip patch antenna", *Radio Science*, Vol. 36, No. 6, p. 1669-1683, 2001
- [5] Chen, H.-M, "Single-feed dual-frequency rectangular microstrip antenna with a π -shaped slot", *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol: 148 No: 1, pp.60-64 Feb. 2001
- [6] Yang M; Chen Y, "A novel U-shaped planar microstrip antenna for dual-frequency mobile telephone communications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol: 49 No: 6, pp.1002-1004, June 2001.
- [7] Maci, S., Gentili G.B., "Dual frequency patch antennas", *Antennas and Propagation Magazine*, Vol.39, No.6, pp.13-20, Dec. 1997.
- [8] Richards, W.F., S.E. Davidson and S.A. Long, Dual-band reactively loaded microstrip antenna, *IEEE Trans.*, Vol. AP-33, No.5, pp. 556-560, 1985
- [9] F.Yang, Y. Rahmat-Samii, "Patch Antenna with Switchable Slott (PASS): Dual frequency operation", *Microwave Opt. & Tech. Lett.*, vol.31, p.165-163, 2001.
- [10] T. Taga, Hirasawa and Haneishi, "Analysis of planar inverted-F antennas and antenna design for portable radio equipment", *Analysis, Design, and Measurement of Small and Low Profile Antennas*, Artech House, Boston/London, 1992, pp. 161- 180.
- [11] M. Martínez-Vázquez, M. Geissler, D. Heberling, A. Martínez-González and D. Sánchez-Hernández, "Compact dual-band antenna for mobile handsets", *Microw. and Optical Tech. Lett.*, Vol. 32, no. 2, Jan. 2002, pp. 87-88.
- [12] Tavkoli, A., Damavandi, N. and Mazandaran, R. M., Analysis of cross-shaped dual-polarized microstrip antenna, 1995 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest* vol.2, pp. 994-997.

- [13] S.O. Kundukulam, M.Paulson, C.K. Aanandan and P. Mohanan, 'Slot loaded compact microstrip antenna for dual frequency operation', *Micro. And Opt. Tech. Lett.* , vol. 31, p.315-317, 2001.
- [14] J. George, et al, New compact microstrip antenna, *Electron. Lett.*, vol. 32, no.6, pp.508-509, 1996.
- [15] G. M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, John Wiley & Sons, 2003.
- [16] D. F. Filipovic, S. S. Gearhart, and G. M. Rebeiz, "Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses," *IEEE Trans. MTT*, vol. 41, pp. 1738-1743, October 1993.
- [17] S. Sievenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces," Ph. D. Thesis, UCLA, 1999.
- [18] R. Simons, D. Chun, and L. P. B. Katehi, "Microelectromechanical system actuators for antenna reconfigurability," *IEEE MTT-S*, pp. 215-218, June 2001.
- [19] G. Kumar ve K.P.Ray, *Broadband Microstrip Antennas*, Artech House, 2003
- [20] Sinan Onat, "Re-Configurable Microstrip Antennas Controlled by RF-MEMS Switches", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Aralık 2006 (Tez danışmanları: Şimşek Demir, Lale Alatan)
- [21] Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler Projesi İkinci Gelişme Raporu, TÜBİTAK Proje No: 102E036 (COST-284), Ekim 2004.
- [22] Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler Projesi Üçüncü Gelişme Raporu, TÜBİTAK Proje No: 102E036 (COST-284), Nisan 2005.
- [23] E. Erdil, K. Topalli, M. Unlu, O. Aydın Civi, and T. Akin, "Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna using RF MEMS Technology," accepted to be published in *IEEE Trans. Antennas and Propagation*.
- [24] Emre Erdil, "", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 2005 (Tez danışmanı: Özlem Aydın Civi)
- [25] A.A. Eldek, A.Z. Elsherbeni, C.E. Smith and K.F. Lee, "Wideband Rectangular Slot Antenna For Wireless Communication Systems", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.44, no.5, pp.146-155, Oct. 2002.
- [26] A.Z. Elsherbeni, A.A. Eldek, B.N. Baker, C.E. Smith and K.F. Lee, "Wideband Coplanar Patch-Slot Antennas for Radar Applications", 2002 *IEEE Int. Symp. On Antennas and Prop.*, pp, 436-439, San Antonio, June 2002.

- [27] J.S.Chen, "Dual-Frequency Slot Antennas fed by Capacitively Coplanar Waveguide", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.32, no.6, pp.452-453, March 20,2002.
- [28] Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler Projesi Birinci Gelişme Raporu, TÜBİTAK Proje No: 102E036 (COST-284), Mayıs 2004.
- [29] L. M. Devlin and B. J. Minnis, "A versatile vector modulator design for MMIC," *IEEE MTT-S Dig.* pp.519-522, 1990.
- [30] Mehmet Altuntaş, "MMIC Vector Modulator", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Aralık 2004 (Tez danışmanı: Şimşek Demir).
- [31] F. L. M. Van Den Bogaart and R. Pyndiah, " A 10-14 GHz Linear MMIC Vector Modulator With Less Than 0.1 dB and 0.8° Amplitude and Phase Error" *IEEE MTT-S Digest*, pp. 465-468, 1990.
- [32] D. K. A. Kpogla, C.Y.Ng ve I.D. Robertson, "Shifted-quadant vector modulator", *IEEE Electronics Letters*, vol. 39, pp. 1058-1059, July 2003.
- [33] J. Grajal, J. Gismero and M. Mahfoudi. "MMIC Vector Modulator for Crosbar BFN" *IEEE Electronics Letters*, vol:32, nop:13, 20th June 1996.
- [34] Erdinç Erdil "X-band 7-bit MMIC Phase Shifter Design", M.Sc. Thesis, Dept. of Electrical and Electronics Eng., Middle East Technical University, Sept. 2006.
- [35] Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler Projesi Dördüncü Gelişme Raporu, TÜBİTAK Proje No: 102E036 (COST-284), Ekim 2005.
- [36] Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler Projesi Beşinci Gelişme Raporu, TÜBİTAK Proje No: 102E036 (COST-284), Nisan 2006.
- [37] K. Goel, "High-speed VLSI interconnections," Wiley-Interscience, 1994.
- [38] T. Vähä-Heikkilä and G. M. Rebeiz, "A 4–18-GHz Reconfigurable RF MEMS Matching Network For Power Amplifier Applications," *Wiley Periodicals* 2004.
- [39]T. Vähä-Heikkilä, J. Varis, J. Tuovinen, and G. M. Rebeiz, "A 20–50 GHz RF MEMS Single-Stub Impedance Tuner," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 4, April 2005.

EK.1 PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Uluslararası İndekslerce Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. E. Erdil, K. Topalli, M. Unlu, O. Aydın Civi, and T. Akin, "Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna using RF MEMS Technology," accepted to be published in *IEEE Trans. Antennas and Propagation*.
2. K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydın Civi, S. Koc, and T. Akin, "New Approach for Modeling Distributed MEMS Transmission Lines," *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, Vol. 153, No. 2, pp. 152-162, April 2006.

Konferans Kitapçıklarında Yayınlanan Bildiriler

3. H. I. Atasoy, K. Topalli, M. Unlu, I. Istanbuluoglu, E. U. Temocin, O. Bayraktar, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc and T. Akin, "Metal-to-metal and capacitive contact RF MEMS shunt switch structures," *7th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 154-156, Orvieto, Italy, 27-30 June 2006.
4. K. Topalli, E. Erdil, O. Aydın Civi, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," *URSI GA 2005*, pp. , New Delhi, India, 23-29 October 2005.
5. E. Erdil, S. Onat, K. Topalli, I. Istanbuluoglu, M. Unlu, S. Demir, L. Alatan, O. Aydın Civi, S. Koc, and T. Akin, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," *6th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 35-38, Lausanne, Switzerland, 23-24 June 2005.
6. E. Erdil, K. Topalli, O. Aydın Civi, and T. Akin, "Reconfigurable CPW-fed dual frequency rectangular slot antenna," *2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington D.C., vol.2A, pp. 392-395, 3-8 July 2005.
7. S. Onat, M. Unlu, L. Alatan, S. Demir, T. Akin, "Design of a re-configurable dual frequency microstrip antenna with integrated RF MEMS switches" *2005 IEEE AP-S*

- International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington D.C., vol.2A, pp. 384-387, 3-8 July 2005.
8. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission lines," *European Microwave Conference*, Amsterdam, The Netherlands 11-15 October 2004, pp.1157-1160.
 9. K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 113-116, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
 10. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Design and Modeling of a Reconfigurable Triple Stub Impedance Matching Network using Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 117-120, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
 11. K. Topalli, M. Unlu, H. Sagkol, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc, and T. Akin, "A New Model for Distributed MEMS Transmission Lines", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
 12. S. Onat, L. Alatan, S. Demir, "Design of Triple-Band Reconfigurable Microstrip Antenna Employing RF-MEMS Switches", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
 13. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Siralanmis MEMS iletim hatlari icin yeni bir model," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 435-437, 8-10 September 2004.
 14. Sinan Onat, Lale Alatan, Simsek Demir, "RF MEMS anahtar kontrollu coklu-frekans mikroserit anten," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 99-101, 8-10 September 2004.
 15. Sinan Onat, Simsek Demir, Lale Alatan, "Farkli yarik sekilli cift-frekansli mikroserit yama anten yapilari," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 354-356, 8-10 September 2004.

16. Emre Erdil, Ozlem Aydin Civi, "RF MEMS teknolojisi ile rezonans frekansi ayarlanabilir mikroserit yama anten," National URSI Symposium Turkey, pp. 351-353, 8-10 September 2004.

EK.2 PROJE KAPSAMINDA TAMAMLANAN TEZLER

Yüksek Lisans Tezleri

1. Sinan Onat, “Re-Configurable Microstrip Antennas Controlled by RF-MEMS Switches”, ODTÜ, Aralık 2006 (Tez danışmanları: Şimşek Demir, Lale Alatan)
2. Emre Erdil, “Tunable Frequency Microstrip Antennas by RF-MEMS Technology”, ODTÜ, Mayıs 2005. (Tez danışmanı: Özlem Aydın Çivi)
3. Yusuf Okuducu, “Dual Band Microstrip Patch Antenna Structures”, ODTÜ, Aralık 2005. (Tez danışmanı: Özlem Aydın Çivi)
4. Mehmet Altuntaş, “MMIC Vector Modulator”, ODTÜ, Aralık 2004 (Tez danışmanı: Şimşek Demir)

Proje kapsamında başlatılmış, devam etmekte olan doktora tezleri

5. Mehmet Ünlü, “Analysis, Design And Implementation Of Rf Mems Structures For Microwave Applications”, (Tez danışmanı: Şimşek Demir)
1. Göker Şener, “Analysis And Design Of Microstrip Patch Antennas With Arbitrary Slot Shapes”, (Tez danışmanı:Lale Alatan, Mustafa Kuzuoğlu)

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Kodu: 102E036 (COST 284)
Proje Başlığı: Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler
Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Özlem Aydın Çivi, Şimşek Demir, Lale Alatan, Tayfun Akın Lisansüstü Öğrenciler: K. Topalli, E. Erdil, S. Onat, M.Ünlü, M.Altuntaş
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1.Ekim.2003-30.Eylül.2006
Öz (en çok 70 kelime): Bu projede, RF-MEMS teknolojisi kullanılarak frekansı ayarlanabilen, bantı değiştirilebilir yeniden şekillendirilebilir antenler tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Üretilen antenlerin performansının tasarım kriterlerini sağladığı ve EM benzetimlerle uyumlu çıktığı görülmüştür. Ayrıca, anten dizilerinde, demet şekillendirici devrelerde kullanılmak üzere MMIC vektör modülatör devresi tasarımları ve serimi yapılmıştır. Yapılan EM benzetimleri ile iyi bir performans elde edildiği gösterilmiştir. Vektör modülatörün MEMS devre bileşenleri ile blok devre tasarımı yapılmış, bazı devre bileşenleri tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Antenlerin ve mikrodalga bileşenlerinin tümü, proje elemanlarının geliştirilen yüzey mikroişleme teknolojisine dayalı üretim süreci kullanılarak ODTÜ MikroElektronik Tesislerinde üretilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Çift frekanslı antenler, frekansı ayarlanabilen antenler, yeniden şekillendirilebilir antenler, Radyo Frekansı- MikroElektroMekanik Sistemler (RF-MEMS), Mikrodalga Tektaş Tümüleşik Devreler (MMIC), vektör modülatör
Projeden Kaynaklanan Yayınlar: Uluslararası İndekslerce Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler 1. E. Erdil, K. Topalli, M. Unlu, O. Aydın Civi, and T. Akin, "Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna using RF MEMS Technology," <i>IEEE Trans. Antennas and Propagation</i> basılmak üzere kabul edildi. 2. K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydın Civi, S. Koc, and T. Akin, "New Approach for Modeling Distributed MEMS Transmission Lines," <i>IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.</i> , Vol. 153, No. 2, pp. 152-162, April 2006. Konferans Kitapçıklarında Yayınlanan Bildiriler 1. H. I. Atasoy, K. Topalli, M. Unlu, I. Istanbuluoglu, E. U. Temocin, O. Bayraktar, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc and T. Akin, "Metal-to-metal and capacitive contact RF MEMS shunt switch structures," <i>7th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)</i> , pp. 154-156, Orvieto, Italy, 27-30 June 2006. 2. K. Topalli, E. Erdil, O. Aydın Civi, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," <i>URSI GA 2005</i> , pp. , New Delhi, India, 23-29 October 2005. 3. E. Erdil, S. Onat, K. Topalli, I. Istanbuluoglu, M. Unlu, S. Demir, L. Alatan, O. Aydın Civi, S.

- Koc, and T. Akin, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," *6th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 35-38, Lausanne, Switzerland, 23-24 June 2005.
4. E. Erdil, K. Topalli, O. Aydin Civi, and T. Akin, "Reconfigurable CPW-fed dual frequency rectangular slot antenna," *2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington D.C., vol.2A, pp. 392-395, 3-8 July 2005.
 5. S. Onat, M. Unlu, L. Alatan, S. Demir, T. Akin, "Design of a re-configurable dual frequency microstrip antenna with integrated RF MEMS switches" *2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington D.C., vol.2A, pp. 384-387, 3-8 July 2005.
 6. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission lines," *European Microwave Conference*, Amsterdam, The Netherlands 11-15 October 2004, pp.1157-1160.
 7. K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 113-116, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
 8. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Design and Modeling of a Reconfigurable Triple Stub Impedance Matching Network using Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 117-120, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
 9. K. Topalli, M. Unlu, H. Sagkol, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc, and T. Akin, "A New Model for Distributed MEMS Transmission Lines", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
 10. S. Onat, L. Alatan, S. Demir, "Design of Triple-Band Reconfigurable Microstrip Antenna Employing RF-MEMS Switches", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
 11. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Siralanmis MEMS iletim hatlari icin yeni bir model," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 435-437, 8-10 September 2004.
 12. Sinan Onat, Lale Alatan, Simsek Demir, "RF MEMS anahtar kontrollu coklu-frekans mikroserit anten," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 99-101, 8-10 September 2004.
 13. Sinan Onat, Simsek Demir, Lale Alatan, "Farkli yarik sekilli cift-frekansli mikroserit yama anten yapilari," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 354-356, 8-10 September 2004.
 14. Emre Erdil, Ozlem Aydin Civi, "RF MEMS teknolojisi ile rezonans frekansi ayarlanabilir mikroserit yama anten," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 351-353, 8-10 September 2004.

Bilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği – Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga

Doçentlik B. Dalı Kodu: 905

- Koc, and T. Akin, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," *6th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 35-38, Lausanne, Switzerland, 23-24 June 2005.
4. E. Erdil, K. Topalli, O. Aydin Civi, and T. Akin, "Reconfigurable CPW-fed dual frequency rectangular slot antenna," *2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington D.C., vol.2A, pp. 392-395, 3-8 July 2005.
 5. S. Onat, M. Unlu, L. Alatan, S. Demir, T. Akin, "Design of a re-configurable dual frequency microstrip antenna with integrated RF MEMS switches" *2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington D.C., vol.2A, pp. 384-387, 3-8 July 2005.
 6. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission lines," *European Microwave Conference*, Amsterdam, The Netherlands 11-15 October 2004, pp.1157-1160.
 7. K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 113-116, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
 8. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Design and Modeling of a Reconfigurable Triple Stub Impedance Matching Network using Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 117-120, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
 9. K. Topalli, M. Unlu, H. Sagkol, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc, and T. Akin, "A New Model for Distributed MEMS Transmission Lines", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
 10. S. Onat, L. Alatan, S. Demir, "Design of Triple-Band Reconfigurable Microstrip Antenna Employing RF-MEMS Switches", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
 11. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Siralanmis MEMS iletim hatlari icin yeni bir model," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 435-437, 8-10 September 2004.
 12. Sinan Onat, Lale Alatan, Simsek Demir, "RF MEMS anahtar kontrollu coklu-frekans mikroserit anten," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 99-101, 8-10 September 2004.
 13. Sinan Onat, Simsek Demir, Lale Alatan, "Farkli yarik sekilli cift-frekansli mikroserit yama anten yapilari," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 354-356, 8-10 September 2004.
 14. Emre Erdil, Ozlem Aydin Civi, "RF MEMS teknolojisi ile rezonans frekansi ayarlanabilir mikroserit yama anten," *National URSI Symposium Turkey*, pp. 351-353, 8-10 September 2004.

Bilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği – Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga

Doçentlik B. Dalı Kodu: 905

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Kodu: 102E036 (COST 284)
Proje Başlığı: Gelişmekte Olan Yer Ve Uydu Tabanlı Uygulamalar İçin Yeni Antenler
Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Özlem Aydın Çivi, Şimşek Demir, Lale Alatan, Tayfun Akın Lisansüstü Öğrenciler: K. Topallı, E. Erdil, S. Onat, M.Ünlü, M.Altuntaş
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1.Ekim.2003-30.Eylül.2006
Öz (en çok 70 kelime): Bu projede, RF-MEMS teknolojisi kullanılarak frekansı ayarlanabilen, bandı değiştirilebilen yeniden şekillendirilebilir antenler tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Üretilen antenlerin performansının tasarım kriterlerini sağladığı ve EM benzetimlerle uyumlu çıktığı görülmüştür. Ayrıca, anten dizilerinde, demet şekillendirici devrelerde kullanılmak üzere MMIC vektör modülatör devresi tasarımları ve serimi yapılmıştır. Yapılan EM benzetimleri ile iyi bir performans elde edildiği gösterilmiştir. Vektör modülatörün MEMS devre bileşenleri ile blok devre tasarımı yapılmış, bazı devre bileşenleri tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Antenlerin ve mikrodalga bileşenlerinin tümü, proje elemanlarınca geliştirilen yüzey mikroişleme teknolojisine dayalı üretim süreci kullanılarak ODTÜ MikroElektronik Tesislerinde üretilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Çift frekanslı antenler, frekansı ayarlanabilen antenler, yeniden şekillendirilebilir antenler, Radyo Frekansı- MikroElektroMekanik Sistemler (RF-MEMS), Mikrodalga Tektaş Tümlleşik Devreler (MMIC), vektör modülatör
Projeden Kaynaklanan Yayınlar: Uluslararası İndekslerce Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler 1. E. Erdil, K. Topallı, M. Unlu, O. Aydın Civi, and T. Akin, "Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna using RF MEMS Technology," accepted to be published in IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2. K. Topallı, M. Unlu, S. Demir, O. Aydın Civi, S. Koc, and T. Akin, "New Approach for Modeling Distributed MEMS Transmission Lines," <i>IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.</i> , Vol. 153, No. 2, pp. 152-162, April 2006. Konferans Kitapçıklarında Yayınlanan Bildiriler 1. H. I. Atasoy, K. Topallı, M. Unlu, I. Istanbuluoglu, E. U. Temocin, O. Bayraktar, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc and T. Akin, "Metal-to-metal and capacitive contact RF MEMS shunt switch structures," <i>7th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)</i> , pp. 154-156, Orvieto, Italy, 27-30 June 2006. 2. K. Topallı, E. Erdil, O. Aydın Civi, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," <i>URSI GA 2005</i> , pp. , New Delhi, India, 23-29 October 2005. 3. E. Erdil, S. Onat, K. Topallı, I. Istanbuluoglu, M. Unlu, S. Demir, L. Alatan, O. Aydın Civi, S. Koc, and T. Akin, "Reconfigurable Antenna Structures using MEMS technology," <i>6th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)</i> , pp. 35-38, Lausanne, Switzerland, 23-24 June 2005. 4. E. Erdil, K. Topallı, O. Aydın Civi, and T. Akin, "Reconfigurable CPW-fed dual frequency rectangular slot antenna," <i>2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting</i> , Washington D.C., vol.2A, pp. 392-395, 3-8 July 2005. 5. S. Onat, M. Unlu, L. Alatan, S. Demir, T. Akin, "Design of a re-configurable dual frequency microstrip antenna with integrated RF MEMS switches" <i>2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting</i> , Washington D.C., vol.2A, pp. 384-387, 3-8 July 2005.

6. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission lines," *European Microwave Conference*, Amsterdam, The Netherlands 11-15 October 2004, pp.1157-1160.
7. K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "A Parametric Modeling Study on Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 113-116, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
8. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Design and Modeling of a Reconfigurable Triple Stub Impedance Matching Network using Distributed MEMS Transmission Lines," *5th Workshop on MEMS for MilimeterWave Communications (MEMSWAVE)*, pp. 117-120, Uppsala, Sweden, 30 June-2 July 2004.
9. K. Topalli, M. Unlu, H. Sagkol, S. Demir, O. A. Civi, S. Koc, and T. Akin, "A New Model for Distributed MEMS Transmission Lines", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
10. S. Onat, L. Alatan, S. Demir, "Design of Triple-Band Reconfigurable Microstrip Antenna Employing RF-MEMS Switches", *2004 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey-USA, 20-26 June 2004.
11. M. Unlu, K. Topalli, S. Demir, O. Aydin Civi, S. Koc, and T. Akin, "Sıralanmis MEMS iletim hatlari icin yeni bir model," National URSI Symposium Turkey, pp. 435-437, 8-10 September 2004.
12. Sinan Onat, Lale Alatan, Simsek Demir, "RF MEMS anahtar kontrollu coklu-frekans mikroserit anten," National URSI Symposium Turkey, pp. 99-101, 8-10 September 2004.
13. Sinan Onat, Simsek Demir, Lale Alatan, "Farkli yarık sekilli çift-frekansli mikroserit yama anten yapıları," National URSI Symposium Turkey, pp. 354-356, 8-10 September 2004.
14. Emre Erdil, Ozlem Aydin Civi, "RF MEMS teknolojisi ile rezonans frekansi ayarlanabilir mikroserit yama anten," National URSI Symposium Turkey, pp. 351-353, 8-10 September 2004.

Bilim Dalı:Elektrik-Elektronik Mühendisliği – Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga

Doçentlik B. Dalı Kodu: 905