

Rf Uygulamaları İçin Düşük Gürültülü Yükselteç Tasarımı

Mustafa Samet ÇELİK - Üncan MEMOĞLU - Tuğçe Nur KESMÜK

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum Teknik Üniversitesi

Özet:

Düşük gürültülü yükselteçler (Low Noise Amplifiers-LNAs) birçok iletişim sisteminin girişindeki anahtar elemanlardır. Bu sistemler girişlerinde düşük seviyedeki sinyalleri alır ve mümkün olduğunca düşük gürültü ekleyerek yükseltirler. Yüksek frekans etkilerini minimuma indirmek için RF transistörlerinin kılıf tipleri diğer düşük frekans transistörlerine göre farklılık gösterir.

Birçok uygulamada LNA'lar mikrodalga sinyallerinin yükseltilmesi amacıyla kullanılırlar. Mikrodalgalar çok kısa boylu radyo dalgalarıdır. Elektromanyetik tayfta basit radyo dalgaları ile kızılötesi dalgalar arasında yer alan mikrodalga sinyaller yağmur, sis ve kirli hava içinden az miktarda zayıflama ile ilerleyebildiklerinden iletişim sistemlerinde tercih edilirler. Örneğin, telefon tesislerinin çok zor olarak kurulabileceği dağlık arazilerde haberleşme mikrodalgalarla sağlanır. Mikrodalga sinyaller 19. yüzyılında bilim insanlarının dikkatini çekmiş ve özellikle 2. Dünya Savaşı sonrasında radar ve radyo frekans uygulamalarında kullanımları yaygınlaşmıştır. Günümüzde haberleşme, sağlık, endüstriyel ve askeri uygulamalarında kendine geniş kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca FM radyo ve TV vericilerinin uzay haberleşmeleri de mikrodalga frekansları ile yapılmaktadır. Hafif ve küçük boyutlu olarak üretilen LNA'lar, radarlarda, cep telefonlarında, kablosuz internet erişiminde, Bluetooth kulaklıklarda, mağaza güvenlik sistemlerinde kullanılırlar.

Mikrodalga kuvvetlendiricilerin klasik tasarımı bazı güçlükler oluşturmaktadır. Bunlar sınırlı bant genişliği, gürültü faktörü, kararlılık, giriş-çıkış yansıma kaybı, toplam dönüştürücü kazancı olarak özetlenebilir. Mikrodalga kuvvetlendirici tasarım aşamaları aktif eleman seçimi, giriş uydurma devresi tasarımı, çıkış uydurma devresi tasarımı, DC kutuplama devresi tasarımı olarak dört ana başlıkta toplanmaktadır. Tasarımda dikkate alınması gereken kavramlar yansıma, saçılma (s) parametreleri, dönüş kaybı, duran dalga voltaj oranı ve kalite faktörüdür.

Bu çalışmada, bir LNA devresi tasarlanmış ve gerçekleştirilmişti. Bu yükselteç devresi üzerinde gerçekleştirilen ölçümler bu devrenin çeşitli haberleşme uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dřk Grltl Yükselteç, Yansıma, S Parametreleri, Duran Dalga Voltaj Oranı, Kararlılık.

Low Noise Amplifier Design For Rf Applications

Abstract:

Low-noise amplifiers are the key elements in the introduction of many communication systems. These systems require low-level signals at their inputs. The main aim of low-noise amplifiers is to strengthen these signals by keeping the noise as low as possible. To minimize the effects of high frequency (miller effect, other leakage capacitance, etc.), the package type of RF transistors differs from other low frequency transistors.

Microwaves are very short radio waves. In the electromagnetic spectrum these are located between simple radio waves and IR waves. Microwave rays can pass through rain, fog and dirty air. This is why they are used in communication. For example, in mountainous terrain where telephone installations can be very difficult, communication is provided by microwave (cordless telephone).

It arrived in the 19th century to recognize the microwaves. Since then, especially during World War II, radar and radio frequencies have become very popular. Later, navy, communication, industry and military field began to be widely used. In recent years, home microwave ovens and hand-held radios have entered my daily life well. It will be well understood that FM radio and TV transmitters will no longer be able to give up the shape of this beam if it will indicate that space communications are also made with microwave frequencies. Microwave amplifiers are lightweight, small size, use is very common due to the ease of production. Microwave amplifiers are used in radars, microwave ovens, mobile phones, wireless internet access, Bluetooth headphones, in store security systems.

In our work, a LAN amplifier design and made. Measurements made on the circuit show that this amplifier can be used for several communication applications.

Key words: Low Noise Amplifier, Reflection, S Parameters, Reflection, Voltage, Standing Wave Ratio, Stability.

1. Giriş

Mikrodalgalar çok kısa radyo dalgalarıdır. Elektromanyetik tayfta bunlar basit radyo dalgaları ile kızılötesi dalgalar arasında yer alırlar. Mikrodalga ışınları yağmur, sis ve kirli hava içinden geçebilirler. Bu nedenle haberleşme sistemlerinde kullanılırlar. Örneğin, telefon tesislerinin çok zor olarak kurulabileceği dağlık arazilerde haberleşme mikrodalgalarla sağlanabilir [3]. Mikrodalga üzerine çalışmalar 19. yüzyılda başlamıştır ve özellikle 2. Dünya Savaşı sırasında radar ve radyo sistemlerinde mikrodalga sinyallerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Sonraki dönemde ise sağlık, haberleşme, endüstriyel ve askeri uygulamalarda mikrodalga sinyallerden yararlanılmıştır. FM radyo ve TV vericilerinin, uzay haberleşmelerinin de mikrodalga frekansları ile yapıldığını düşünüldüğünde, bu ışın şeklinden artık vazgeçemeyeceğimiz otaya çıkmaktadır.

Mikrodalga kuvvetlendiriciler hafif olmaları, küçük boyutları, üretiminin kolaylaşması sebebiyle kullanımı çok yaygındır. Radarlarda, mikrodalga fırınlarında, cep telefonlarında, kablosuz internet erişiminde, Bluetooth kulaklıklarda, mağaza güvenlik sistemlerinde, mikrodalga kuvvetlendiriciler kullanılır [4]. Mikrodalga kuvvetlendiricilerin klasik yollardan tasarımı bazı güçlükler oluşturmaktadır. Bunlar sınırlı bant genişliği, gürültü faktörü, kararlılık, giriş-çıkış yansıma kaybı, toplam dönüştürücü kazancı olarak özetlenmektedir. Mikrodalga kuvvetlendirici tasarım aşamaları aktif eleman seçimi, giriş devresi tasarımı, çıkış uydurma devresi tasarımı, DC kutuplama devresi tasarımı olarak dört ana başlıkta toplanabilir.

Bir mikrodalga kuvvetlendirici yükselticisinde en önemli tasarım gereksinimleri; kararlılık, güç kazancı, band genişliği, gürültü, voltaj-durağan dalga oranı (vswr) ve dc kutuplamadır.

RF alanda genel olarak iki yükselteç türü vardır. Bunlar küçük sinyal yükselteçleri ve büyük sinyal yükselteçleri olarak ikiye ayrılırlar. Küçük sinyal yükselteçleri genelde alıcılarda giriş yükselticisi olarak kullanılmaktadır. Bu yükselticilerin yükselttiği sinyaller gerçekten düşüktür. Bu tür yükselteçler LNA (Low Noise Amplifier) olarak

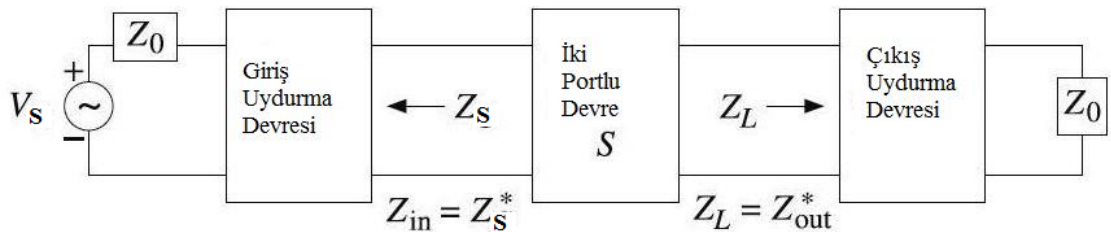
bilinirler. İdeal olarak bir LNA aşırı bozulmaya neden olmadan, yüksek seviyedeki sinyalleri alabilirken, RF ön uç mikserleri ve diğer bileşenler tarafından kullanılabilen düşük seviye sinyallerini dönüştürmek için yeterli kazanç sağlayabilir. Büyük sinyal yükselteçleri, sadece genliği büyük olan sinyalleri yükseltmek için kullanılırlar. Bu yükselteçler bildiğimiz çıkış katlarıdır, yani güç yükselticisi olarak bildiğimiz katlardır. Bu iki tür yükselteçler arasındaki önemli bir fark vardır. Yükselteci tasarlarken küçük sinyal yükselteci için veri sayfasında bulunabilecek Sparametreleri kullanabilir. Yüksek sinyal yükselteçleri için bu geçerli değildir. Burada sadece küçük sinyal yükselteçlerine bakıp IP2/IP3 parametreleri belirlenebilir (Yunseong, 2004) [9].

2. Mikrodalga Kuvvetlendirici Yapısı

Mikrodalga kuvvetlendirici giriş uydurma devresi, çıkış uydurma devresi ve transistörden oluşur. Tipik mikrodalga kuvvetlendirici blok şeması Şekil 1’de görülmektedir.

Kuvvetlendiriciler besleme kaynağından çekilen gücün bir kısmını giriş işareti biçiminde veya bu işaretin bir parçası olarak yüke aktaran elektronik devrelerdir. Beslemedeki gücün tamamına yakınının yüke aktarılması empedans uyumlaştırma ile mümkündür. Bu sebeple transistörün girişinde ve çıkışında empedans uyumlaştırma devreleri kullanılmaktadır.

Dönüştürücü güç kazancı hem Z_S ’e hem de Z_L ’ye bağlı olduğu için giriş ve çıkıştaki empedans uyumsuzluğunu gösteren en kullanışlı güç tanımıdır. Bu nedenle kuvvetlendiricilerin gücünden bahsedilirken genelde dönüştürücü güç kazancından bahsedilir [6].

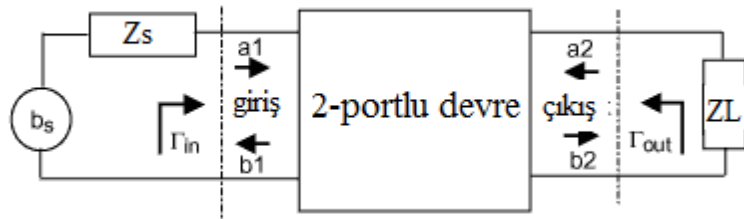


Şekil 1. Mikrodalga kuvvetlendirici blok şeması

Düşük gürültülü yükselt devresinin tasarımına devrenin kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak tasarım gereksinimlerinin belirlenmesi ile başlanır. Ardından bu gereksinimleri sağlayabilecek transistör seçimi gerçekleştirilir ve kararlılık ve kazanç kriterleri için uygun kaynak ve yük yansıma katsayıları hesaplanır. Koşulsuz kararlı bir yükselteçlerde pasif sonlandırma elemanı transistörü osilasyona götürmez. Ancak potansiyel kararsız transistör içeren bir tasarımda pasif sonlandırmaların kararlı bir yükseltici üretmesi için dikkatli analizler yapılmalıdır. Ayrıca tasarım için önemli bir diğer konu yükseltecin arzulan AC performansı göstereceği uygun DC çalışma noktasının belirlenmesi ve bu DC çalışma noktasını sağlayacak DC ağ topolojisinin oluşturulmasıdır [5].

2.1 Yansıma

Şekil 2. deki devrede iki portlu bir devre gösterilmektedir. Bu devrede yansımayı en düşük seviyeye çekmek için giriş ve çıkış empedansları eşitlenmeli ya da birbirinin eşleniği olması gerekir. Aksi halde yük ucuna ilerleyen gerilim ve akım dalgaları, yansıyan akım ve gerilim dalgalarına sebep olacaktır yani maksimum güç transferi gerçekleşmeyecektir [7].



Şekil 2. İki portlu bir devrenin blok şeması

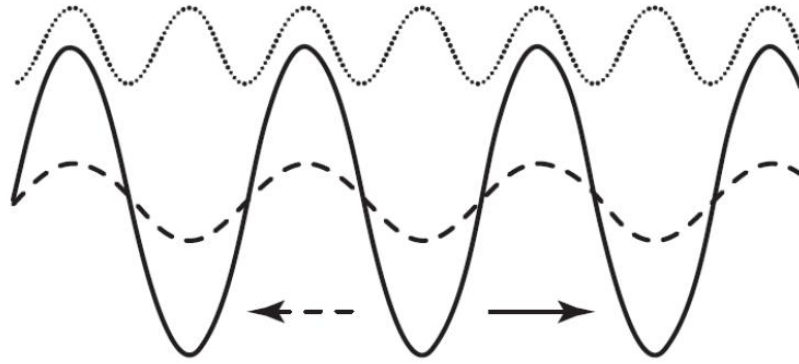
Yansıma katsayısı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir. Bu ifadede Z_S ve Z_L sırasıyla kaynak empedansını ve yük empedansını göstermektedir.

$$(1) \Gamma_L = \frac{\text{Yansıyan Dalga}}{\text{Gelen Dalga}} = \frac{Z_L - Z_S}{Z_L + Z_S}$$

2.2 Duran Dalga Voltaj Oranı (VSWR)

Gelen dalga ve yansıyan dalga zıt yönde ilerledikçe Şekil 4'te gösterildiği gibi bir duran dalga deseni ortaya çıkar. Duran dalga voltaj oranı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir [7].

$$(2) \quad VSWR = \frac{|V|_{\max}}{|V|_{\min}} = \frac{1+|\Gamma_L|}{1-|\Gamma_L|}$$



Şekil 3. Gelen dalga (sürekli), yansıyan dalga (çizgili) ve durağan dalga (noktalı)

VSWR'ın en düşük değeri olan 1'e eşit olması yansımanın olmadığını gösterir yani en iyi durumdur. VSWR'ın büyük olması durumu ise büyük bir güç kaybına işaret eder.

2.3 S-Parametreleri

S parametreleri S₁₁, S₂₂, S₁₂ ve S₂₁ olarak ifade edilirler ve kısaca aşağıdaki gibi tanımlanırlar.

S₁₁: Çıkış portu hattın karakteristik empedansına eşdeğer bir empedansla sonlandırıldığında girişteki yansıma katsayısı

S_{22} : Giriş portu hattın karakteristik empedansına eşdeğer bir empedansla sonlandırıldığında çıkıştaki yansıma katsayısı

S_{12} : Giriş portu hattın karakteristik empedansına eşdeğer bir empedansla sonlandırıldığı durumda 2. porttan 1. porta olan geri iletim kazancı

S_{21} : Çıkış portu hattın karakteristik empedansına eşdeğer bir empedansla sonlandırıldığı durumda 1. porttan 2. porta olan ileri iletim kazancı

Bipolar transistorun (BJT) S parametreleri o transistorun eş değer devresinden elde edilebileceği gibi direkt vektör network analizörle ölçüm yapılarak ta elde edilebilir. Genelde, güç kuvvetlendiricilerinde kullanılan RF transistorların S parametreleri, üretici tarafından o transistorun veri sayfasında ayrıntılı bir şekilde verilir. S parametrelerinin genlik ve faz açısı frekansa bağlı olarak değişim gösterir. Aşağıdaki şekilde bir BFG425W transistörü için örnek S parametreleri verilmiştir [7].

f		$\angle$		$\angle$		$\angle$		$\angle$
[MHz]	S11	S11	S21	S21	S12	S12	S22	S22
1300	0,356	- 118,246	10,586	92,144	0,043	47,01	0,534	-54,375
1400	0,344	-124,21	9,979	88,498	0,044	46,064	0,512	-56,248
1500	0,333	- 130,127	9,426	85,005	0,046	45,255	0,492	-58,029
1600	0,324	- 135,857	8,927	81,657	0,048	44,45	0,474	-59,798

Şekil 4. BFG425W için örnek S parametreleri

2.4 Kararlılık

Tasarlanan bir güç kuvvetlendiricisi için kararlılık çok önemli bir parametredir. İki portlu devrede eğer giriş ve çıkış port empedanslarının reel kısımları yani $|\Gamma_{in}| > 1$ ve $|\Gamma_{out}| > 1$ ise kuvvetlendirici osilasyon yapabilir. Γ_{in} ve Γ_{out} giriş ve çıkış uydurum devrelerine bağlı

olduğundan kuvvetlendiricinin kararlılığı aynı zamanda Γ_S ve Γ_L 'e de bağlıdır. İki tip kararlılık vardır.

- **Koşulsuz kararlılık:** Tüm pasif kaynak ve yük empedansları için $|\Gamma_{in}| < 1$ ve $|\Gamma_{out}| < 1$ ise kuvvetlendirici koşulsuz biçimde kararlıdır.
- **Koşullu kararlılık:** Belirli pasif kaynak ve yük empedans değerleri için $|\Gamma_{in}| < 1$ ve $|\Gamma_{out}| < 1$ ise kuvvetlendirici koşullu kararlıdır. Yani bazı pasif kaynak ve yük empedansları devrenin osilasyon yapmasına neden olur.

Kararlılık frekansa bağlıdır ve tasarlanan bir kuvvetlendirici bazı frekanslar için kararlı iken diğer frekanslarda kararsız olabilir. Eğer kuvvetlendirici tek taraflı ise yani $S_{21}=0$ 'sa $|S_{11}|<1$ ve $|S_{22}|<1$ için kuvvetlendirici koşulsuz kararlıdır. Kararlılık simit abağı yardımıyla incelenebilir. Simit abağında $|\Gamma_{in}|=1$ ve $|\Gamma_{out}|=1$ değerleri giriş ve çıkış kararlılık çemberlerini gösterir [8].

Bir kuvvetlendiricinin kararlılığını incelemek için Rollette kararlılık faktörü K da incelenebilir. Eğer $K>1$ ve $|\Delta|<1$ ise kuvvetlendirici koşulsuz kararlıdır. K ve $|\Delta|$ aşağıdaki ifadelerle hesaplanabilirler.

$$(3) K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}| * |S_{21}|}$$

$$(4) |\Delta| = \det(S) = S_{11} * S_{22} - S_{12} * S_{21}$$

Mikrodalga Kuvvetlendirici Tasarımı

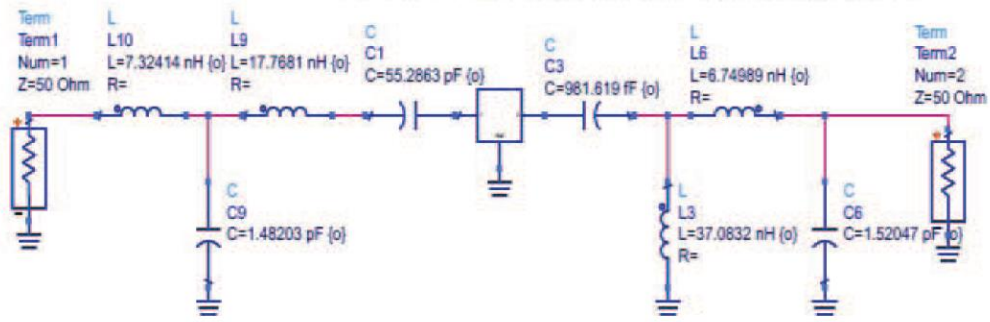
Devre tasarımlarının simülasyonu AWR programı ile yapılmıştır. AWR yüksek frekanslı devre ve sistem ürün geliştirmeleri için açık bir tasarım platformudur. Bu projeye başlarken hedeflenen tasarım hedefleri aşağıdaki gibidir.

- VSWR <1.5
- Yansıma <-10dB
- Gain >10dB

- Frekans Aralığı 1.4-1.6 GHz arası

3.1. İdeal Elemanlarla Mikrodalga Kuvvetlendirici Devre Tasarımı

Çalışmada merdiven (ladder) topolojisi reaktif elemanlar kullanılarak uyumlaştırma (matching) tekniği kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda kapasitörlerin ve indüktörlerin, seri veya paralel bağlandığındaki empedansa etkisini göz önüne alınarak kendi dizaynımız tasarlanmıştır. Aşağıdaki şekilde AWR programında gerçekleştirdiğimiz tasarım gösterilmektedir.

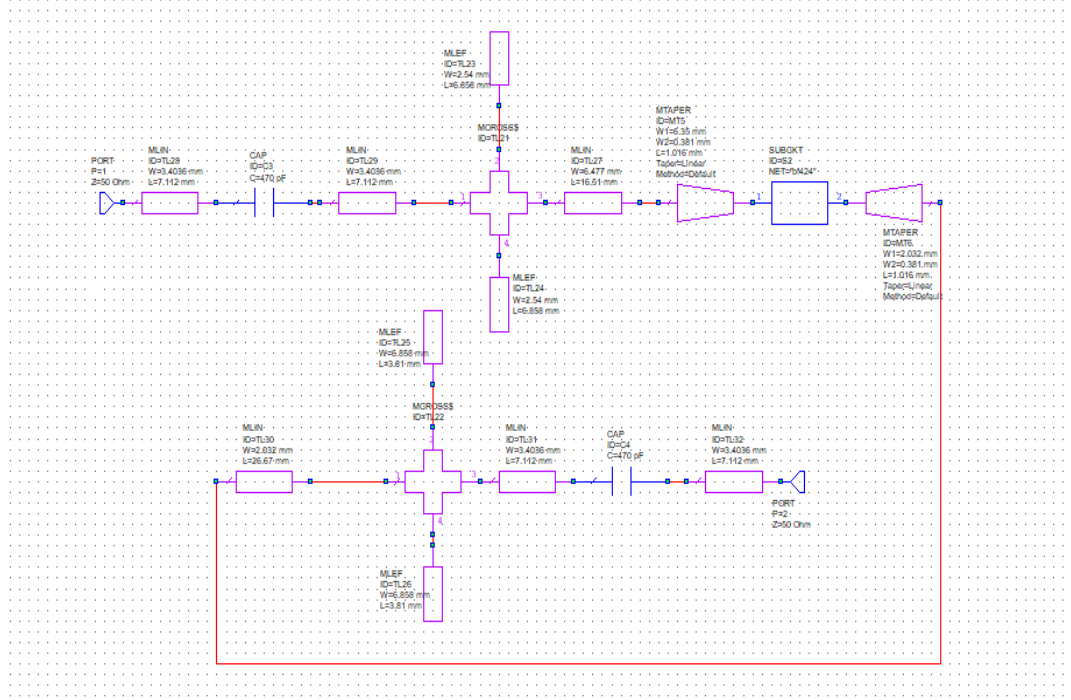


Şekil 5. İdeal elemanlarla tasarlanan devre

3.2. Mikroşerit Elemanlarla Mikrodalga Kuvvetlendirici Devre Tasarımı

Devre başlangıçta ideal elemanlar ile tasarlanmış ve minimum sayıda elemanlar ile tasarım hedefleri elde edildikten sonra seri bağlı indüktörler ve toprağa bağlı kapasiteler mikroşerit elemanlara dönüştürülmüştür. Ayrıca transistörün ön gerilimlenmesi için gerekli DC kutuplama devresi eklenmiştir. Değiştirilen elemanlar değerleri optimize edilerek hedef değerlere mümkün olduğunca yaklaşılması amaçlanmıştır. Optimizasyon sonucunda değeri çok azalan elemanların devreye etkisi önemli olmayacağından devreden çıkarılmışlardır. Sonuç olarak elde edilen devre Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu tasarım FR4 bakır plakası için yapılmıştır. Şekil 6'da tasarımıımızın mikroşerit hatlara çevrilmiş hali görülmektedir. Bu

tasarımda ideal eleman olarak sadece 2 adet kondansatör bulunmaktadır. Bu kondansatörler ölçümler sırasında sinyal analizör korunması için devreye eklenmiştir. Kondansatörler DC sinyali engelleyerek cihaza zarar korur.

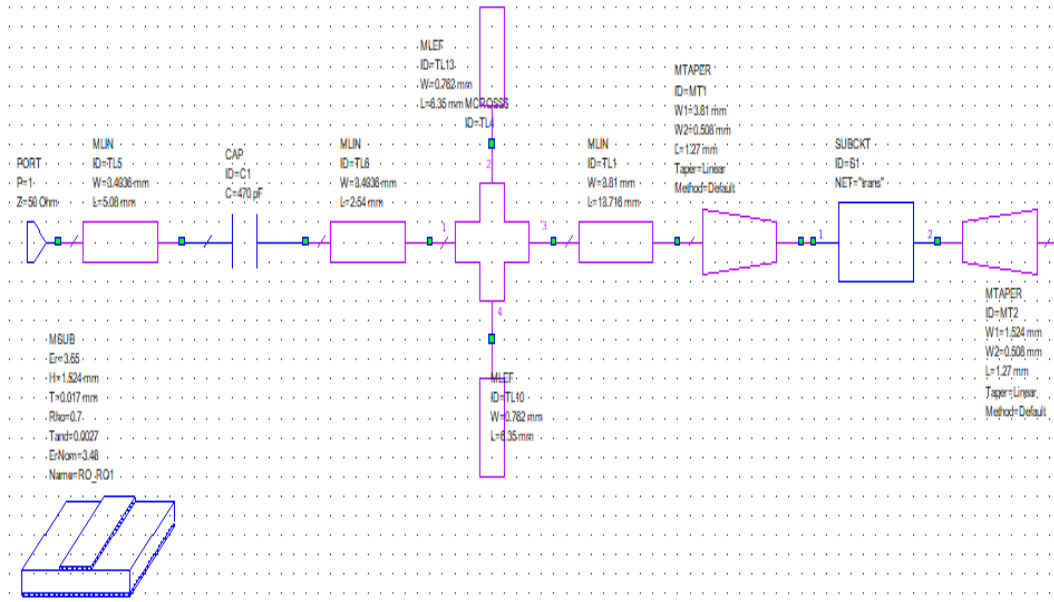


Şekil 6. AWR programı ile tasarlanan yükselteç devresinin tam gösterimi

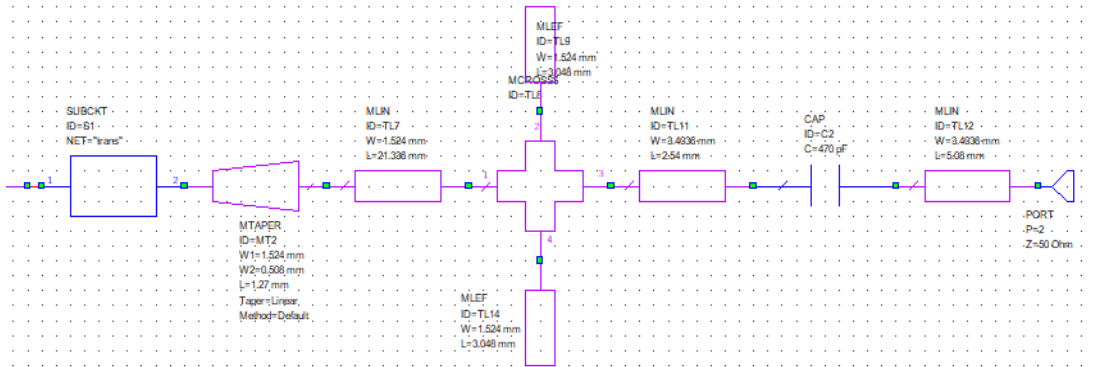
Tasarımın mikroşerit hatlarla yapılması aşağıdaki avantajları sağlar [8].

- 1- Fabrikasyonu kolaylaştırmak
- 2- Tasarımı daha hassas hale getirmek (ideal elemanlarda standart empedans değerlerin dışına çıkılamamasından dolayı)
- 3- Ölçüm esnasında bakır bantların kullanılması
- 4- İdeal elemanların montajından dolayı oluşan parazitik etiklerin olmaması

Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilen giriş ve çıkış uyumlama devreleri ile transistörün giriş ve çıkış empedansı birbirlerinin eşleniği olacak şekilde ayarlanmıştır. Devrenin girişine anten bağlanacağından ve antenlerin yaklaşık empedans değerinin 50Ω olduğundan dolayı giriş ve çıkış empedanslarının değerini 50 Ω seçilmiştir.



Şekil 7. Giriş Uyumlama Devresi

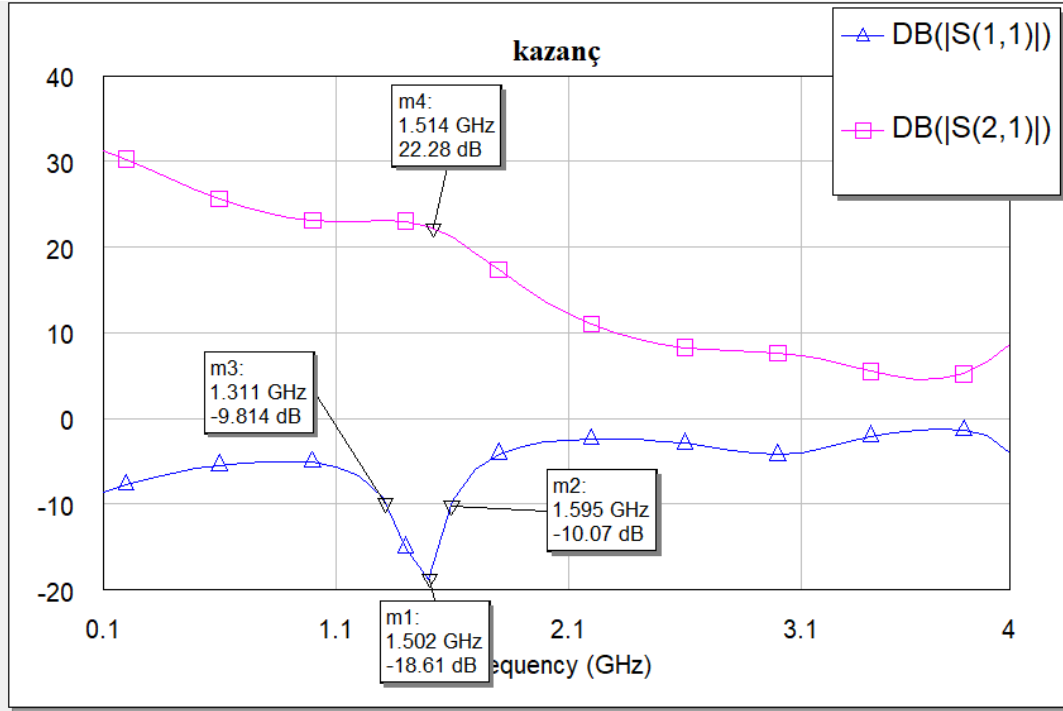


Şekil 8. Çıkış Uyumlama Devresi

3.3 Simülasyon sonuçları

Aşağıdaki şekillerde AWR programı ile elde edilen simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 9'da 1.5 GHz için 22.28 dB'lik kazanç elde edildiği görülmektedir. Devrenin pratik uygulamasında bu değerlerin bakır kayıpları, PCB baskısında meydana gelecek kazıma hataları, transistörün pratik çalışmadaki kaybı,

DC beslemedeki meydana gelebilecek kayıplar vs. etkisi ile düşeceğini göz önüne alındığında elde edilen sonucun mümkün olduğunca yüksek olması amaçlanmıştır.

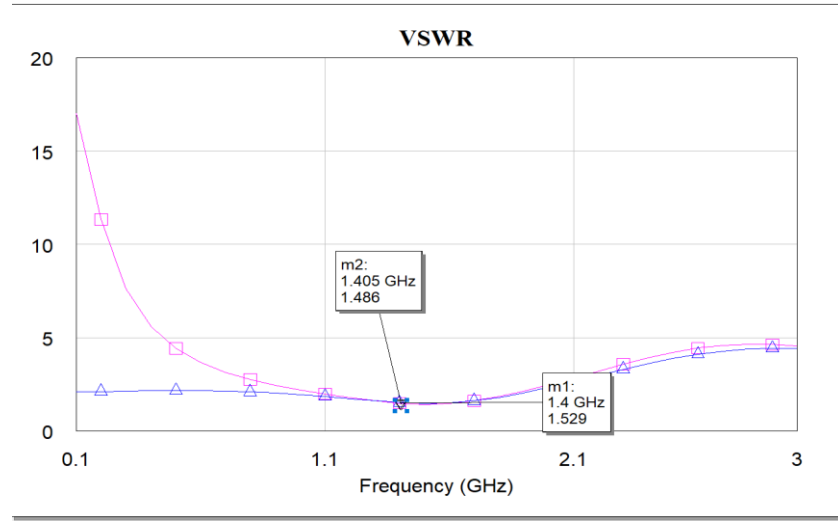


Şekil 9. Giriş ve Çıkış Kazancı

Yükselteç devresinin kazancı G , S_{11} ve S_{21} 'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [8].

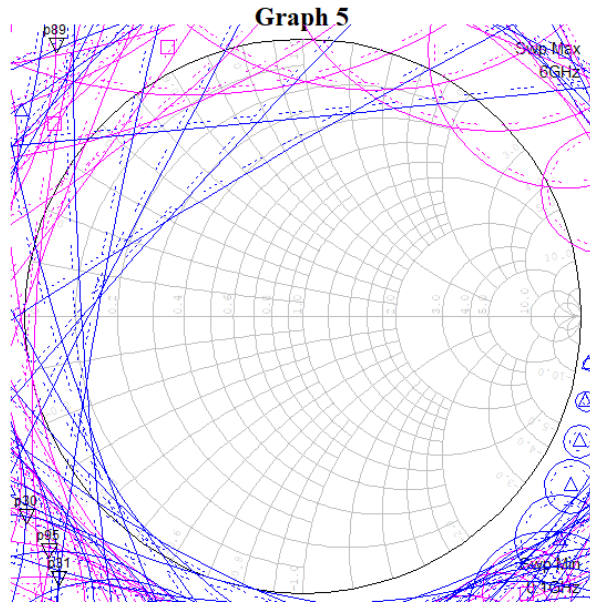
$$(5) \quad G = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2}$$

Bu ifadeden S_{21} 'in artmasının kazancı artıracağı, S_{11} in artmasının ise kazancı azaltacağı görülür. Bu nedenle tasarımımızda 1.5 GHz için S_{21} mümkün olduğunca yüksek S_{11} mümkün olduğunca düşük olması amaçlanmıştır. Şekil 10'da ise simülasyon sonucu elde edilen VSWR grafiği gösterilmektedir. Bu şekilden tasarım hedefimize uygun olarak VSWR'in 1.5 GHz yakınlarında 1.5'den küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 10. VSWR grafiği

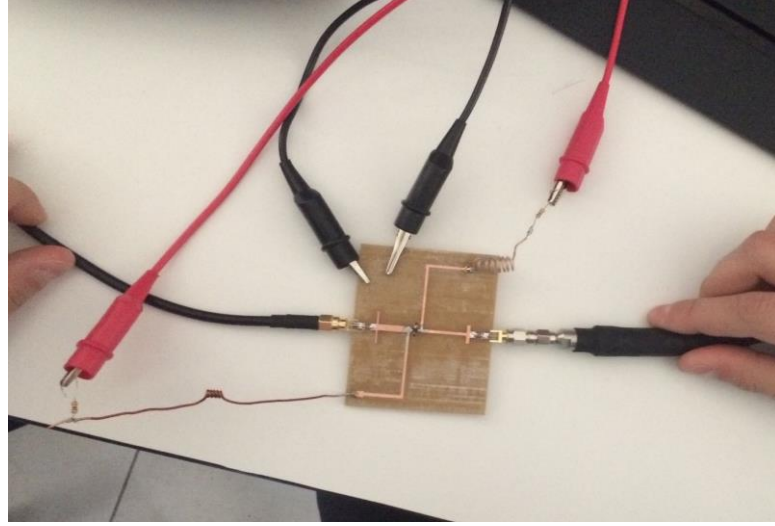
Şekil 11’de ise simülasyon sonucu elde edilen kararlılık çemberi gösterilmektedir. Bizim çalıştığımız frekans bandında(kırmızı kutu) giriş çemberlerinin(kırmızı) içinde olduğu için kararlıdır. Grafikte giriş çemberinin çizgilerinin sol üst tarafta çalıştığımız frekans bandını içine aldığını görebilmekteyiz. Çıkış kararlılık çemberlerinin(mavi) taralı alanın dışında kaldığı için kararlıdır. Yani dikkat edersek çıkış kararlılık çemberleri(mavi) sağ alt köşede yoğunluk göstermektedir. Bizim çalıştığımız frekans bandı(kırmızı kutu) ise sol üst tarafa denk düşmektedir.



Şekil 11. Bizim devremiz için kararlılık çemberleri

3.4 Ölçüm sonuçları

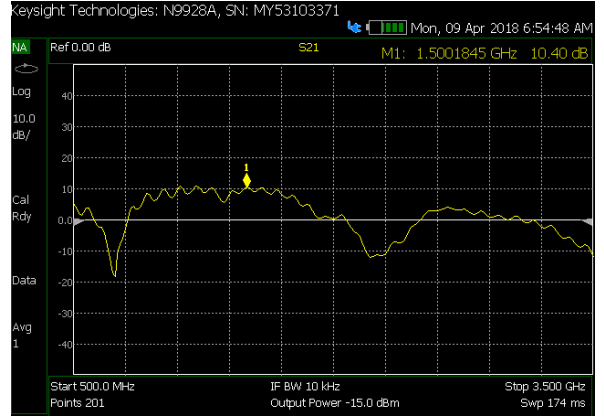
Mikrodalga kuvvetlendirici devresinin serim tasarımı tamamlandıktan sonra devrenin PCB makinasında çizimi ve transistör ve kondansatörlerin montajı gerçekleştirilmiştir. Transistorlarının kutuplama akım ve gerilimleri multimetre kontrolünde ayarlanarak network analizörle yükselteç devresinin S parametrelerinin ölçümü ve spektrum analizörle çıkış gücü ölçümü yapılmıştır. Şekil 12’de elde edilen yükselteç devresi ve Şekil 13’de ölçüm sonucunda elde edilen S parametreleri gösterilmektedir.



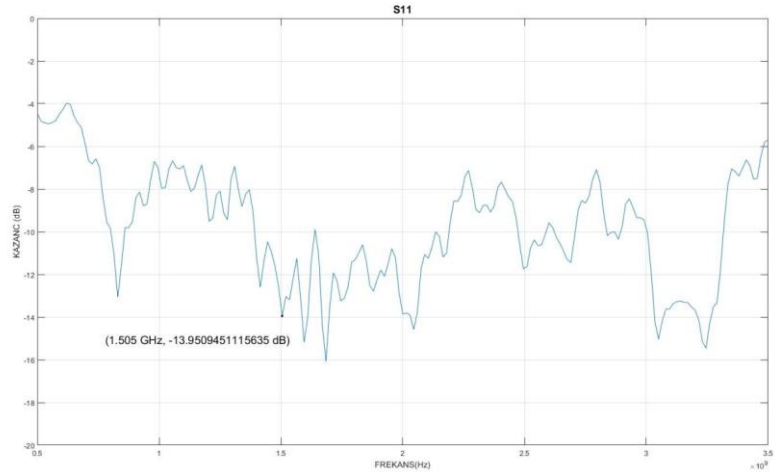
Şekil 12. Elde edilen tasarım



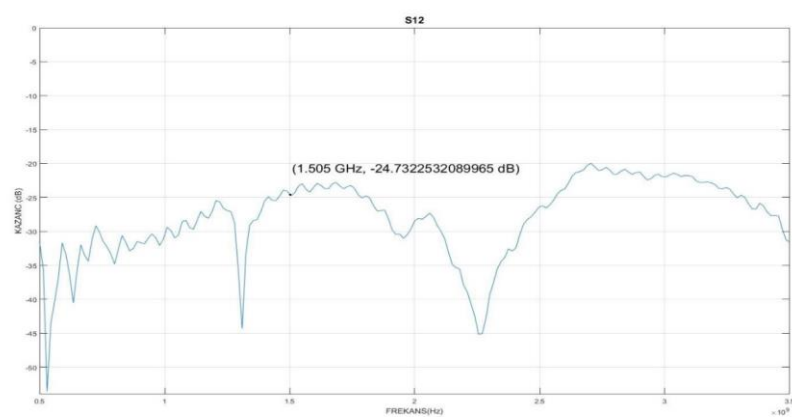
Şekil 13. Devreye uygulanan gerilim görünümü



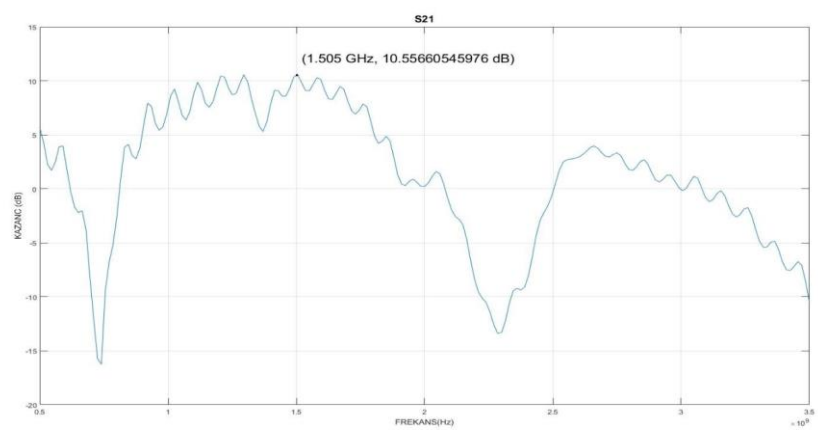
Şekil 14. Spektrum analizör



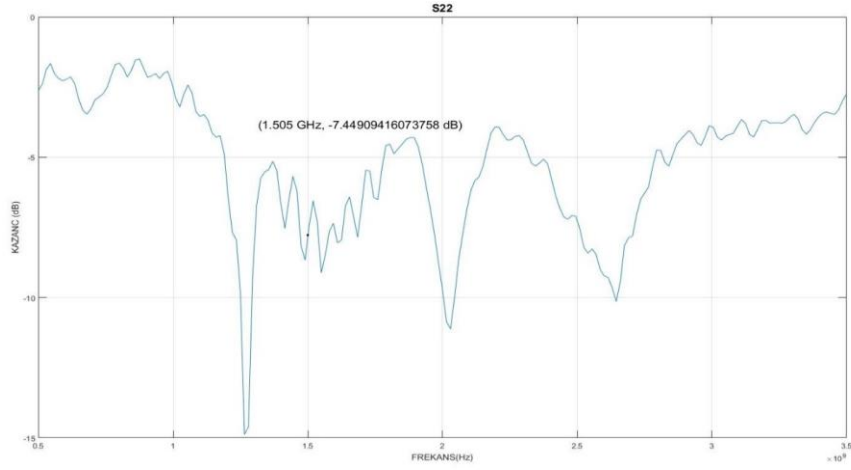
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 15. S11 (a), S12 (b), S21 (c) ve S22 (d) ölçüm sonuçları

Ölçüm sonuçları elde edilen RF gerilim yükselteci amaçlandığı gibi 1.4 GHz ile 1.6 GHz arasında oldukça doğrusal çalıştığı ve yaklaşık 10.55dB gerilim kazancı sağladığını göstermektedir. Düşük güçle çalışan birçok sistemde tasarlanan bu tek katlı güç kuvvetlendiricisi iyi bir performansla çalışacak ve girişine gelen işareti yaklaşık 10.55 dB kuvvetlendirerek çıkışındaki devreye aktaracaktır.

Teşekkür

Bu çalışmaya değerli fikirleri ile yön veren Dr. Öğr. Ü. Çağlar DUMAN ve Dr. Öğr. Ü. Fatih KABURCUK'a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] An Ultrawideband CMOS Low-Noise Amplifier for 3.1–10.6-GHz Wireless Receivers
Andrea Bevilacqua, *Student Member, IEEE*, and Ali M. Niknejad, *Member, IEEE*
- [2] Oral Melih ALPAN, Low Noise Amplifier Design And Optimization, DOKUZ EYLÜL UNIVERSITY, March 2010
- [3] Kılıçkaya M. S., Temel Fizik, Cemalcılar A, Anadolu Üniversitesi Yayınları
- [4] 0.8-1.9 GHz Mikrodalga Kuvvetlendirici Tasarımı 0.8-1.9 GHz Microwave Amplifier Design Onur Koç, Sedat Kılınç , Ramazan Köprü , Sıddık Yarman
- [5] Gonzalez, G., Microwave transistor amplifiers: Analysis and Design, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall Inc,1984.
- [6] Yarman, B. S., Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks, John Wiley & Sons, 2010.
- [7] Elif Pınar KESİK ,2006. UHF GÜÇ KUVVETLENDİRİCİSİ TASARIMI VE GERÇEKLENİMİ,İstanbul.
- [8] Pozar, D. M., 2005. Microwave Engineering Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- [9] Suna Beyza ARDIÇ, 2.4 GHz ISM Bandı Kablosuz Haberleşme Sistemleri İçin Yükselteç Tipi Aktif Mikroşerit Anten Tasarımı, Sayısal Simülasyonu ve Gerçeklenmesi, 2010.