

IEEE 802.11a Uygulamaları için 4.2-5.4 GHz LC Gerilim Kontrollü Osilatör Tasarımı

Design of a 4.2-5.4 GHz LC VCO for IEEE 802.11a Applications

Onur Esame ve Ibrahim Tekin

Mikroelektronik Mühendisliği Bölümü
Sabancı Üniversitesi, İstanbul
oesame@su.sabanciuniv.edu

Özetçe

Bu çalışmada IEEE 802.11a standardı ile uyumlu, 4.2-5.4 GHz frekans bandında çalışan $-G_m$ LC Gerilim Kontrollü Osilatör Tümdevresi tasarımı sunulmuştur. Devrenin serimi Austria Micro Systems (AMS) 'in 0.35 μ m SiGe BiCMOS teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Serim sonrası benzetimlerin sonucunda faz gürültüsü 4.2 GHz taşıyıcı frekansından 1 MHz ofset uzaklıkta -113.5 dBc/Hz, 5.4 GHz taşıyıcı frekansından 1 MHz offset frekansında ise -110.7 dBc/Hz bulunmuştur. Yığılma modlu MOS varaktörlerin (A-MOS) kullanımıyla 1200 MHz akort aralığı elde edilebilmiştir. Çıkış gücü seviyesi tüm akort aralığı boyunca 3 mW ve 3.5 mW arasında değişmektedir. Osilatör devresi, tampon devre ile birlikte, 2.5 V besleme geriliminden 14.5 mA toplam akım çekmektedir. DC güç tüketimi 36.25 mW olup Si pul üzerinde 0.6 mm² yer kaplamaktadır.

Abstract

In this paper, a 4.2-5.4 GHz, $-G_m$ LC voltage controlled oscillator (VCO) for IEEE 802.11 a standard is presented. The circuit is designed with AMS 0.35 μ m SiGe BiCMOS process that includes high-speed SiGe Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs). Phase noise is -110.7 dBc/Hz at 1MHz offset from 5.4 GHz carrier frequency and -113.5 dBc/Hz from 4.2 GHz carrier frequency. A linear, 1200 MHz tuning range is obtained utilizing accumulation-mode MOS varactors. Phase noise is relatively low due to taking the advantage of differential tuning concept. Output power of the fundamental frequency changes between 3mW and 3.5mW depending on the tuning voltage. The circuit draws 2 mA without buffers and 14.5 mA from 2.5 V supply including buffer circuits leading to a total power dissipation of 36.25 mW. The circuit occupies an area of 0.6 mm² on Si substrate.

1. Giriş

5-6 GHz frekans bandı bir çok ülkede yüksek hızlı kablosuz yerel ağ bağlantısı (WLAN) uygulamaları için kabul edilmiş ve ticari kullanıma sunulmuştur. IEEE 802.11a/b ve g bu uygulamaların önemli örnekleri arasında sayılabilir. Bu alandaki ürünlerin sayısının ve çeşitliliğinin artması, böyle bir sistemin vazgeçilmez elemanlarından biri olan yüksek performanslı osilatör devrelerinin tasarımının önemini ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda düşük faz gürültülü, düşük güç tüketimli ve yüksek akort aralıklı gerilim kontrollü osilatörler

günümüz kablosuz haberleşme sistemlerinin önemli bileşenlerinden biridir [1].

Gerilim kontrollü osilatör (GKO) devresi radyo frekanslı (RF) modern alıcı-verici yapılarında frekans sentezi ya da saat işaretinin yakalanması gibi uygulamalarda kullanılır. Bu uygulamalar içinde bir kablosuz haberleşme sisteminin bloğu olarak GKO'nun tasarımı, performans parametrelerinin gerçekleştirilebilirliği açısından diğer uygulamalara göre daha zordur. Örneğin, tek taşıyıcı modülasyonlara göre faz gürültüsüne oldukça duyarlı olan OFDM tabanlı modülasyonun kullanıldığı IEEE 802.11a standardı için tanımlanan faz gürültüsü değeri, 1 MHz ofset frekansında en fazla -110 dBc/Hz olmalıdır [2].

CMOS veya BiCMOS GKO tasarımında sorun olan bir diğer parametre de osilatörün akort (tonlama) aralığıdır. P-N jonksiyonlu ya da evirtim-modlu MOS (I-MOS) varaktörlerin tonlama aralıklarının sınırlı olması sebebiyle geniş bantlı uygulamalarda sıklıkla yığılma-modlu MOS (A-MOS) varaktörler tercih edilir. A-MOS varaktörlerin tonlama aralıklarının diğer varaktörler göre daha yüksek olduğu ve tonlamanın daha lineer yapılabildiği önceki çalışmalardan bilinmektedir [3]. Bunun yanında varaktör duyarlılığı, yani yüksek C_{max}/C_{min} oranı da faz gürültüsünü kötüleştiren etkenlerden biridir. Diferansiyel akort yaklaşımıyla bu kötü etki ortadan kaldırılabılır [4]. Faz gürültüsü ve akort aralığının yanında çıkış gücü seviyesi de DC güç tüketimi de GKO tasarımının önemli parametrelerindedir. İyi bir tasarımda GKO, çıkışındaki miksera yeterli seviyede güç gönderebilmeli ve bunu yaparken olabildiğince az güç harcamalıdır.

IEEE 802.11a standardıyla uyumlu bir GKO tümdevresi çeşitli teknolojiler ve devre topolojileri kullanılarak tasarlanabilir. Burada teknoloji ile kastedilen malzeme sistemi ve kullanılan tranzistor çeşididir. Literatürde GaAs Heterojonksiyonlu Bipolar Tranzistor (HBT) [5], SiGe BiCMOS [6], Si CMOS [7] ve Yalıtkan üzerine Silikon (SOI) CMOS [4] teknolojileriyle gerçekleştirilmiş GKO devreleri bulunmaktadır. Bunlar arasında SiGe BiCMOS teknolojisi, içerdiği yüksek hızlı SiGe HBT tranzistorların getirdiği performans avantajı ve Si malzeme sisteminin getirdiği maliyet ve entegrasyon avantajları sebebiyle en uygun çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Devre topolojileri düşünüldüğünde ise bir RF GKO devresi rezonatör (LC) tabanlı, ring tabanlı ya da multivibrator yapıları olarak gerçekleştirilebilir. Multivibrator yapılarıyla teorik olarak oldukça yüksek akort aralıkları elde edilebilir. Aynı şekilde ring osilatörlerle de tatmin edici akort aralıkları elde edilebilmektedir. Ancak bu iki topoloji de endüktans elemanı içermediğinden frekans spektrumları rezonatör tabanlı yapılarla göre daha az saf olmakta ve bu da daha yüksek faz

gürültüsüne neden olmaktadır. Bu üç devre topolojisi arasında RF GKO tasarımında en çok tercih edileni LC osilatörlerdir [8].

Rezonatör tabanlı GKO devresinin çalışması, bir LC tankına geribesleme yoluyla negatif geçiş iletkenliği eklenmesi prensibine dayanır. LC tankının bir DC gerilimle akort edilmesiyle de istenen çalışma frekansı elde edilir. Geribesleme, Hartley, Colpitts ya da $-G_m$ devresi olmak üzere üç farklı şekilde sağlanabilir. Bunlar arasında da $-G_m$ devresi kablosuz haberleşme uygulamalarında en çok tercih edilen yapıdır. Diferansiyel yapıli mikseri sürebilmesinden, lineerliği artırmasından ve yüksek çıkış gücü seviyeleri elde edilebilmesinden dolayı $-G_m$ topoloji çoğunlukla diferansiyel olarak gerçekleştirilir. [9]

Tüm bu teknolojik ve topolojik gereksinimler dahilinde GKO devresinin tasarımı için 0.35 μm SiGe BiCMOS teknolojisinin kullanılması uygun bulunmuştur. Bu teknoloji kullanılarak 4.2-5.4 GHz arasında çalışabilen, en kötü durumda faz gürültüsü -110 dBc/Hz (1 MHz ofset frekansında) olan, 2.5 V besleme geriliminden 14.5 mA toplam akım çeken ve Si pul üzerinde 0.6 mm² yer kaplayan bir $-G_m$ LC GKO devresi tasarlanmıştır.

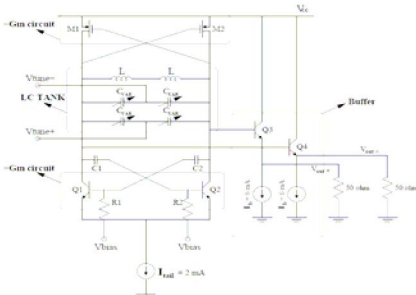
2. Diferansiyel $-G_m$ LC GKO Tasarımı

2.1. Çekirdek Devre

Tümdevrenin tasarımında AMS firması tarafından sağlanan 4-metal ve 2-poly katmanlı 0.35 μm SiGe BiCMOS teknolojisi kullanılmıştır. Çekirdek devrede kullanılan HBT'lerin f_T ve f_{max} değerleri sırasıyla 59 GHz ve 63 GHz'tir. Bipolar tranzistorlarda nispeten az katkılı baz bölgesi gürültü açısından en kritik bölge olduğundan, çift baz kontaklı npn tranzistorlar seçilmiş ve böylelikle baz seri direncinin yarıya düşürülmesi hedeflenmiştir.

Seçilen $-G_m$ LC GKO topolojisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Devre, $-G_m$ kısmı (Q1, Q2, M1 ve M2), LC tankı (L ve C_{var}) ve tamponlayıcı devre (Q3 ve Q4) olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. M1 ve M2 PMOS tranzistorları sayesinde osilatör çıkışının DC seviyesi ayarlanabilmekte ve devreye ek bir negatif direnç eklenmektedir. Bu sayede belirli bir tank akımı için tank genliği yaklaşık olarak iki katına çıkarılmış ve güç tüketimi yaklaşık olarak yarıya düşürülmüştür.

Çekirdek devredeki en önemli avantaj yüksek hızlı HBT'lardır. MOS tranzistorlarla karşılaştırıldığında bu tranzistorlar daha düşük 1/f gürültüsüne sahiptirler. Geniş bantlı shot gürültüleri ve termal gürültüleri de nispeten daha düşük olup belirli bir kutuplamada MOS tranzistorlara göre daha yüksek geçiş iletkenliği sağlarlar [10].



Şekil 1: Diferansiyel $-G_m$ LC GKO Devresi

Şekil 1'de verilen devre düşük güç tüketimi yüksek spectral saflık için "akım-sınırlı bölgede" çalıştırılmıştır. Akım sınırlı bölgede tank genliği kuyruk akımıyla ya da tank paralel eşdeğer direnciyle doğru orantılıdır. "Gerilim sınırlı bölgede ise tank genliğini besleme gerilimi sınırlamaktadır [9]. Bu bölgeler aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir;

$$\text{Akım Sınırlı Bölge: } V_{\text{tank}} = I_{\text{bias}} / g_{\text{tank}} \quad (1)$$

$$\text{Gerilim Sınırlı Bölge: } V_{\text{tank}} = V_{\text{limit}} \quad (2)$$

2.2. LC Tankı (Rezonatör)

LC tankı devresi varaktör ve endüktans elemanlarından oluşmaktadır. Geleneksel bir LC tankından farkı ise diferansiyel olarak akortlanan A-MOS varaktörlerin kullanılmasıdır. Diferansiyel akort sayesinde yüksek varaktör duyarlılığının faz gürültüsüne getireceği kötü etkiler giderilebilir. Burada yüksek varaktör duyarlılığı olarak bahsedilen küçük bir akort aralığı için yüksek bir C_{max}/C_{min} oranıdır. Bu etki Leeson tarafından lineer ve zamanla değişmeyen bir osilatör devresi için aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [4];

$$L(\mathcal{N}, k_v) = 10 \log \left\{ \left(\frac{f_0}{2Q\mathcal{N}} \right)^2 \left[\frac{FkT}{2P_s} \left(1 + \frac{f_c}{\Delta f} \right) \right] + \left(\frac{k_v v_n}{2k_{LC}\Delta f} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

Burada, f_0 osilasyon frekansı, Q tankın kalite faktörü, Δf taşıyıcı frekanstan ofset uzaklığı, F gürültü faktörü, k Boltzmann sabiti, T sıcaklık, P_s GKO'nun ürettiği RF işaretin gücü, f_c Flicker gürültüsü köşe frekansı, v_n ortak işaret gürültü gerilimi ve k_{LC} de rezonatör L and C elemanlarının fonksiyonu olan bir sabittir. Diferansiyel akortlamayla ortak işaret gürültü bileşenlerinin (ör, Flicker gürültüsü) taşıyıcı rekansta görülmesi engellenmiş ve bu sayede faz gürültüsü iyileştirilmiştir.

LC tankının elemanlarının çalışma frekansı bölgesinde ayrı ayrı analizleri yapılmıştır. Varaktör elemanın $\pm 800\text{mV}$ akort aralığı için C_{max} / C_{min} yaklaşık olarak üç bulunmuş, bu değerlerdeki kalite faktörünün de en düşük 20, en yüksek 60 olduğu belirlenmiştir. Tankın diğer elemanı olan endüktansın analizi sonucunda da 1.04 nH değerli bu endüktansın 5.8 GHz'teki kalite faktörü 11.8 olarak bulunmuştur. Tankın kalite faktörü ise varaktör ve endüktansın kalite faktörlerinin paralel eşdeğeriyle belirlenir. Bu durumda kalite faktörü nispeten düşük olan endüktansın tank kalite faktörünü belirleyici eleman olduğu söylenebilir. Bu da RF GKO devrelerinde yüksek kalite faktörlü endüktans elemanına olan ihtiyacı sebebi açıklamaktadır.

2.3. Tamponlayıcı Devre

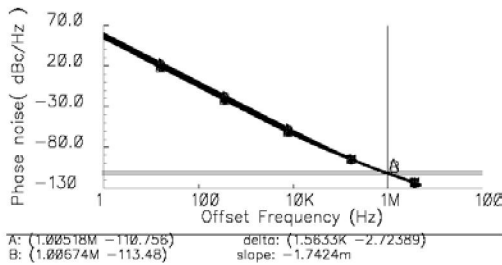
Bu kısım osilatörün çıkışının uygun bir şekilde çıkış portlarına bağlantısı için devreye eklenmiştir. En önemli görevi çıkışındaki 50-Ohm sonlandırılmalı çıkış portlarına yeterli seviyede güç aktarabilmektir. Buna ek olarak osilasyon düğümleri ve çıkış portları arasında yeterli bir izolasyon sağlayabilmelidir. Ölçüm cihazın osilasyon

düğümünün kalite faktörünü etkilememesi için tamponlayıcı devrenin giriş empedansının çok yüksek olması istenir. Çıkış empedansının ise 50-Ohm olması beklenir. Bu koşullar sağlamadığı sürece LC tankında üretilen işaret çıkışı aktarılamayabilir ya da bozulmuş olarak aktarılır.

3. Tartışma

Bu tasarımda öncelikli olarak düşük faz gürültüsü hedeflenmiştir. Yüksek ve lineer akort aralığı, düşük güç tüketimi ve yeterli çıkış gücü seviyesi diğer hedefler arasındadır.

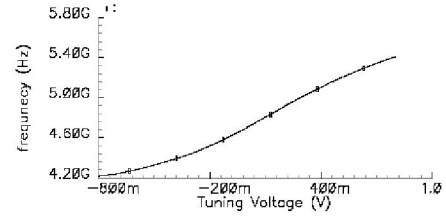
Lineer zamanla değişen bir osilatör devresinin faz gürültüsü (3) ile de belirtildiği gibi rezonatör kalite faktörü Q yükseltilecek, taşıyıcı frekandaki işaretin gücü artırılarak ya da varaktör duyarlılığı azaltılarak iyileştirilebilir. Tampon devre kullanımı her ne kadar tank kalite faktörünün düşmesini engelse de burada esas belirleyici unsur endüktansın kalite faktörüdür. Bu yüzden tasarımda AMS kütüphanesindeki en yüksek kalite faktörlü endüktans (Q=11.8) seçilmiştir. İstenen merkez frekans değeri için endüktans ve kapasite değerleri belirlendikten sonra osilasyon için gerekli olan minimum tank akımı belirlenmiştir (0.25 mA). Bu minimum akımı kullanmak iki yönden sakıncalıdır; ilk olarak proses parametreleri de gözönünde bulundurulduğunda bu sınır değer güvenli bir osilasyon için yeterli olmayabilir. Ayrıca çıkış işaretinin genliğinin düşük olması faz gürültüsünü de kötü yönde etkileyecektir. Güvenli osilasyon ve faz gürültüsü gibi kriterler düşünüldüğünde hesaplanan minimum akımın 3-4 katı kadar bir akımın osilasyon düğümlerine paylaşılması uygun olacaktır. Bu durumda kuyruk akımı 1 mA olarak belirlenmiştir. Kuyruk akımını daha fazla artırmanın devrenin güç tüketimini artıracığı da dikkate alınmalıdır. Faz gürültüsünü iyileştirmek için kullanılan diğer bir strateji de varaktör duyarlılığının minimize etmektir. Bu da daha önce anlatıldığı gibi diferansiyel akort konsepti ile sağlanmıştır. Faz gürültüsü için, serim sonrasında 4.2 GHz ve 5.4 GHz arasında çeşitli noktalar için periyodik gürültü benzetimleri yapılmış ve bu simülasyonlar sonucunda en iyi faz gürültüsü değerinin 4.2 GHz taşıyıcı frekanslı işaretin 1 MHz uzağında, en kötü faz gürültüsünün ise 5.4 GHz taşıyıcı frekanslı işaretin 1 MHz uzağında olduğu bulunmuştur (Şekil 2). En kötü durumdaki faz gürültüsü -110.7 dBc/Hz, en iyi durumdaki ise -113.5 dBc/Hz bulunmuştur. Bu değerler IEEE 802.11a standardının belirlediği -110 dBc/Hz değerinden iyi olup literatürde 0.35µm litografiyle ve aynı topolojiyle gerçekleştirilen osilatörlerin faz gürültüsünden düşüktür.



Şekil 2: Faz gürültüsünün ofset frekansıyla değişimi

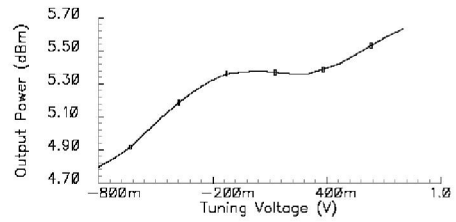
Frekans akordu diferansiyel $V_{\text{tune}(+)}$ and $V_{\text{tune}(-)}$ akort gerilimlerini 1.2 V DC gerilim üzerinden ± 800 mV

değiştirilmesi ile sağlanmıştır. 1.2 V değeri yaklaşık $V_{\text{cc}}/2$ kadardır ve daha geniş ve lineer bir tonlama aralığı için besleme geriliminin ortasında seçilmiştir. Akort geriliminin 1.2 V DC gerilimin ± 800 mV çevresinde değiştirilmesi efektif akort geriliminin 0.4V ve 2V arasında değişmesi anlamına gelmektedir. Bu aralık devrenin lineer olarak akort edilebildiği bölgedir. 0.4 V'un altında ve 2 V'un üstünde varaktör kapasitesi gerilimle çok fazla değişmemekte ve dolayısıyla akort lineerliği bozulmaktadır. Sonuç olarak silatör devresi 0.4 V ve 2 V gerilimleri arasında 4.2 GHz'ten 5.4 GHz'e kadar akort edilebilmektedir (Şekil 3).

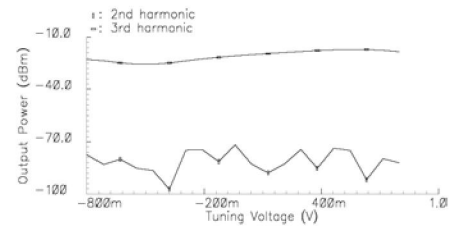


Şekil 3: Taşıyıcı frekansın diferansiyel akort gerilimiyle değişimi

Tasarlanan GKO'nun çıkış gücünün mikseri sürebilecek seviyede olması istenir. Tampon devre ve 50-Ohm sonlandırması yapıldıktan sonra çıkış gücü 4.2 GHz taşıyıcı için 3 mW, 5.4 GHz taşıyıcı için 3.5 mW olarak bulunmuştur (Şekil 4). Çıkış güç seviyeleri arasındaki bu fark kaplanan frekans spektrumunun genişliğiyle açıklanabilir. Bu güç seviyeleri otomatik genlik ayarlayıcı devreler yardımıyla eşitlenebilir. Ancak bu devrelerin güç tüketimini ve devre karmaşıklığını artırıcı etkileri gözönünde bulundurularak kullanılmamasına karar verilmiştir. Tamponlayıcı devre çıkışındaki diferansiyel işaretin tepeden tepeye değeri de 1.2 V kadardır. Yeterli taşıyıcı işaret seviyesinin yanı sıra ikinci ve üçüncü harmonik bileşenlerinin de olabildiğince bastırılması hedeflenmiştir. Diferansiyel topoloji sayesinde ikinci harmonik bileşen -70 dBm kadar bastırılmıştır. Bu oran üçüncü harmonik bileşen için -20 dBm kadardır (Şekil 5).

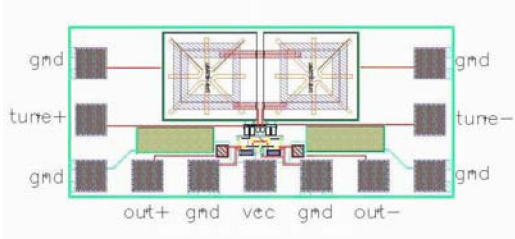


Şekil 4: Taşıyıcı frekans çıkış güç seviyesi



Şekil 5: İkinci ve Üçüncü harmonik güç seviyeleri

Faz gürültüsü, akort aralığı ve çıkış gücünün yanında tasarımda dikkat edilen bir diğer nokta da DC güç tüketiminin minimize edilmesidir. Bunun için tanzistorlar maksimum f_T değerleri ile maksimum DC akım kazançları (β) arasında kutuplanmıştır. Bu kutuplama sonrasında 2 mA'ı çekirdek devreden akmak üzere 2.5 V besleme geriliminden 14.5 mA akım çekilmektedir. Bu da 36.25 mW güç tüketimi anlamına gelmektedir. Bu kısımda son olarak devrenin serimi sırasında dikkat edilen noktalara değinilecektir. GKO devresinin pul üzerindeki serimi Şekil 6'da verilmiştir. Devrenin diferansiyel olması sebebiyle seriminde simetriye oldukça fazla özen gösterilmiştir.



Şekil 6: GKO serimi

RF işaretin üretildiği pozitif ve negatif osilasyon düğümleri kapasitif ve rezistif parazitiklere karşı oldukça duyarlı olduğundan bu düğümler prostekteki en üst metal katmanı ile serilmiş, bu sayede tabanla yapılacak parazitik kapasite azaltılmıştır. Bu metal tabakasının serimi diğerlerine göre daha kalın gerçekleştirildiğinden hat parazitik direnci de diğer metallerle yapılan bağlantılara göre daha az olacaktır. Yine osilasyon düğümüne bağlı olan kapasitelerde yüksek kalite faktörlü ve lineer Metal-Yalıtkan-Metal (MIM) kapasite kullanılmıştır. Bu sayede tank kalite faktörünün daha da iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ancak LC tankının kalite faktörünü baskın olarak endüktans elemanı belirlediğinden MIM kapasite kullanımıyla bu kalite faktörünün çok fazla artması beklenmemektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada kablosuz haberleşme standartlarından biri olan IEEE 802.11a standardıyla uyumlu, 4.2-5.4 GHz arasında çalışabilen bir GKO devresi tasarımı sunulmuştur. Derve 0.35 μm SiGe BiCMOS teknolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. Serim sonrası benzetim sonuçlarında, DC akort gerilimi 0.4V ve 2V arasında (diferansiyel olarak 1.2 V DC gerilim üzerinden $\pm 800\text{mV}$) değiştirilerek 1200 MHz akort aralığı elde edilmiştir. Tasarlanan devre 5.4 GHz'te 3.5mW bir güç seviyesini 50-Ohm empedanslı çıkış portlarına aktarabilmektedir. Bu durumda DC güç tüketimi tampolayıcı devre dahil olmak üzere 36.44 mW olarak bulunmuştur. İkinci ve üçüncü harmonik bileşenlerinin güçlerinin ortalama değerleri sırasıyla -82 dBm ve -21 dBm'dir. Faz gürültüsü 4.2 GHz taşıyıcıdan 1 MHz uzakta -113.5 dBc/Hz, 5.4 GHz taşıyıcıdan 1 MHz uzakta ise -110.7 dBc/Hz bulunmuştur. Bu değerler en iyi ve en kötü durumları ifade etmektedir ve en kötü durumda bile standardın belirlediği -110 dBc/Hz değerinden daha düşük bir faz gürültüsü değeri elde edilmiştir. Tasarlanan GKO devresi Si pul üzerinde 0.6 mm²'lik yer kaplamaktadır. Bunların yanı sıra, her metal hatın birim alan başına akım taşıma kapasitesi belirli olduğundan

çok ince metal hatlar kullanılmamıştır. RF işaretin geçtiği hatlarda ise köşelerden ve sivri bölgelerden kaçınılmış bu sayede RF işaretinin bozulmamasından çıkışa aktarılabilmesi hedeflenmiştir. Devrenin serimi 1.6 mm*0.52 mm boyutunda olup pul üzerinde 0.6 mm² yer kaplamaktadır.

5. Teşekkür

Bu çalışma TARGET- "Top Amplifier Research Groups in a European Team" organizasyonu çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve Avrupa Birliği'nin IST-1-507893-NOE kontratlı "Information Society Technologies" Programı tarafından desteklenmiştir.

6. Kaynakça

- [1] A. J. Joseph et al., "Status and direction of communication technologies-SiGe BiCMOS and RF CMOS", *Proc. Of the IEEE*, vol. 93, no. 9, pp. 1539-1558, Sept 2005.
- [2] IEEE Std. 802.11 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed physical layer in the 5 GHz band, Sept 1999.
- [3] R. L. Bunch and S. Raman, "Large-Signal Analysis of MOS Varactors in CMOS Gm LC VCOs", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 38, no.8, pp. 1325-1332, Aug 2003.
- [4] N. H. W. Fong et al., "A 1-V 3.8-5.7-GHz Wide-Band VCO With Differentially Tuned Accumulation MOS Varactors for Common-Mode Noise Rejection in CMOS SOI Technology," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques* Vol. 51 No. 8, pp. 1952-1959, Aug. 2003.
- [5] B. J. Buck et al., "GaAs MMICs for 5.2GHz HIPERLAN", *RF and Microwave Circuits for Commercial Applications, IEE Colloquium*, pp. 8/1-8/7, Feb 1997.
- [6] L. Dermentzoglou, G. Kamoulakos, A. Arapoyanni, "An Extra Low Noise 1.8GHz Voltage Controlled Oscillator in 0.35 SiGe BiCMOS Technology", *IEEE 9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, vol. 1, pp. 89-92, 2002.
- [7] J. Bhattacharjee et al., "A 5.8 GHz Fully Integrated Low Power Low Phase Noise CMOS LC VCO for WLAN Applications", *2002 IEEE MTT-S Digest*, pp: 585-588.
- [8] J. Rogers and C. Plett, "Radio Frequency Integrated Circuit Design," *Artech House Inc.*, 2003.
- [9] A.Hajimiri and T.H.Lee, "Design Issues in CMOS differential LC oscillators," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 34, pp. 717-724, May 1999.
- [10] D. I. Sanderson, "5-6 GHz Silicon-Germanium VCO with Tunable Polyphase Outputs", *MSc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia*, May 2003.