DÜMF Mühendislik Dergisi
web: http://dergipark.gov.tr/dumf

5.8 GHz adaptif güç yükselteci tasarımı

Bilge ŞENEL*
Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Isparta
bilgeturkel@sdu.edu.tr ORCID: 0000-0003-3612-936X, Tel: (246) 211 13 72

Mesud Kahriman
Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Isparta
mesudkahriman@sdu.edu.tr ORCID: 0000-0003-0731-0936

Fatih Ahmet ŞENEL
Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta
fatihsenel@sdu.edu.tr ORCID: 0000-0003-1918-7277

Geliş: 17.08.2018, Revizyon: 02.01.2019, Kabul Tarihi: 11.01.2019

Öz

Bu çalışmada 5.8 GHz frekansı ile uyumlu adaptif Güç Yükselteç (GY) sistem tasarımı yapılmıştır. Sistem, GY, mikrodenetleyicili besleme (V_{DC}) kontrol ünitesi, güç dedektörleri ve yönsel kuplörlerden oluşmaktadır. Çalışmada tasarımı yapılan sistem ile GY giriş gücü ($P_{giriş}$) ve çıkış gücü ($P_{çıkış}$) anlık olarak okunmakta, değişen RF $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$ değerlerine göre GY'yi besleyecek V_{DC} gerilimleri üretilmektedir. Adaptif sistem tasarımı, donanımsal tasarım ve yazılımsal tasarım olarak iki temel kısma ayrılmıştır. Sistem donanım alt yapısı, iki adet yönlü kuplör, iki adet RF güç dedektörü, R/2R sayısal analog dönüştürücü devresi, gerilim izleyici devresi, akım sensörü ve analog sayısal dönüştürücü devrelerinden meydana gelmektedir. Sistem yazılım alt yapısını oluşturan mikrodenetleyici ile sisteme adaptiflik özelliği kazandırılmıştır. Çalışmada GY'ye adaptiflik özelliği kazandıran tüm sistem elemanları ayrı ayrı tasarlanmıştır. Sistem yazılımının mikrodenetleyici ile yapılması maliyeti azaltmıştır. GY'ye adaptiflik özelliği kazandırmaktaki amaç, GY doğrusallık ve verim performansını kararlı hale getirmektir. Bu sebeple, çalışmada birisi 5 dB diğeri 10 dB olmak üzere farklı iki kazanç (G) değeri seçilmiştir. GY girişine gelmesi olası tüm $P_{giriş}$ değerleri için, GY G'sini seçilen değerlerde sabit tutacak V_{DC} gerilimleri tasarlanan adaptif sistem tarafından üretilmektedir. GY G'sinin sabit tutulmasındaki amaç, GY'nin sabit V_{DC} beslemesi ile oluşabilecek G bozulmasını kompanze etmek ve GY için doğrusallık kriteri olan P_{1dB} noktasını ötelemektir. Adaptif sistem ile GY için G kontrolü ile beraber verim kontrolü de yapılmakta ve GY veriminin belirli bir değerin altına düşmesi önlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Adaptif Güç Yükselteci; 5.8 GHz, DC koşullar; Mikrodenetleyicili kazanç kontrolü; P_{1dB}*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.454270

Giriş

Günümüz kablosuz haberleşme sistemlerinin, aynı elektronik teçhizat içerisinde, birçok kablosuz haberleşme standardını aynı anda desteklemesi gerekmektedir. Farklı haberleşme standartlarında, radyo spektrumunun verimli kullanılabilmesi için haberleşme sistemleri farklı frekans bantlarında çalışabilmelidir. İnsan hayatını kolaylaştırabilmek için, kablosuz haberleşme sistemleri tarafından desteklenen video, ses ve diğer multimedya servislerinin daha hızlı, uygun maliyetli ve uzun batarya ömürlü olmaları gerekmektedir. Bu talepleri karşılayabilmek için, yeniden yapılandırılabilir, çok bantlı, yüksek verimli ve yüksek doğrusal RF verici sistemleri gereklidir (Ashraf vd., 2016). Kablosuz haberleşme sistemlerinin kritik elemanları olan güç yükselteçlerinin, bu taleplerin tamamını birden karşılaması oldukça güçtür. Özellikle, doğrusallığa karşı verim ödünleşimi, Güç Yükselteci (GY) tasarımında kritik bir durumdur. GY verimi, genellikle cihaz çalışma koşulları (RF koşulları) doyuma yaklaştıkça artarken, GY doğrusallığı, tam tersine geri-çekil (back-off) bölgesinde iyileşmektedir. Aynı zamanda, birçok haberleşme sistemi için hem doğrusallık hem de verim son derece önemli özelliklerdir. Bu nedenle, verim-doğrusallık ödünleşimini optimize edebilmek için, en uygun GY tasarım stratejilerinin bulunması önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Giofrè vd., 2018). GY'ler, Çıkış Gücünü ($P_{çıkış}$) maksimize ederken Güç Ekli Verimi (GEV) de yüksek değerlerde muhafaza edebilmek için, genellikle 1 dB kazanç sıkıştırma noktasına (P_{1dB}) yakın çalıştırılırlar. P_{1dB} noktasına yakın doğrusal olmayan bölgede çalıştırılan GY'lerin, azalan doğrusallık performansının artırılması için ek yöntemlere ihtiyaç vardır (Cripps, 2002). Günümüzde, modern Yazılım Tabanlı Radyo (YTR-SDR) uygulamalarında, doğrusallaştırıcı yöntem olarak Sayısal Ön Bozunum (SÖB) tercih edilmektedir. Aynı zamanda, GY'de kullanılan transistörün çalışma noktasının statik veya dinamik kontrollü ile GY'lerde doğrusallık kontrolü yapılabilmektedir (Jędrzejewski vd., 2018). Bu statik veya dinamik çalışma noktası kontrolü, GY girişine uygulanan modüleli sinyalin zarf gücüne (Cao vd., 2018) veya GY giriş veya çıkışında dedekte edilen RF gücüne (Hwang vd., 2012; Couturier vd., 2013; Jaiswal vd., 2015) göre yapılmaktadır. Literatürde, çalışma noktası kontrollü GY tasarımı için temelde adaptif besleme, dinamik besleme ve zarf izleme yöntemleri olarak adlandırılan üç farklı yöntem bulunmaktadır. Adaptif besleme yönteminde, GY $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$'ı RF dedektörleri ile okunmakta, okunan güç değerlerine göre değişen DC gerilim veya akımlar üretilmektedir (Lee vd., 2017). Dinamik besleme yönteminde ise GY $P_{giriş}$ veya $P_{çıkış}$ bilgisi okunmakta, bu bilgiye göre DC koşullar değiştirilmektedir (Kim vd., 2013). Zarf izleme yönteminde ise GY girişine uygulanan modülasyonlu sinyal zarf dedektörleri ile okunmakta ve buna göre GY besleme koşulları değiştirilmektedir (Yusoff vd., 2016). Literatürde, adaptif besleme yöntemi, çoğunlukla Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (BMOYİ-CMOS) devre yapılarında kullanılmıştır (Cho vd., 2016). Adaptif besleme yöntemi kullanılmış BMOYİ GY'ler frekans (Chen vd., 2017), uygulama alanı (Jin vd., 2013; Chen ve Fan 2015), devre boyutu (Tsai vd., 2017) gibi farklılıklar göstermektedir. Dinamik besleme yönteminde ise BMOYİ yapılı GY'ler (Kim vd., 2013; Seth vd., 2016; Li vd., 2018) dışında, ayrık transistör yapısında tasarlanmış GY'lere de (Chen vd., 2016; Gecan vd., 2016) rastlamak mümkündür. Bu çalışmada ise GY'lerde doğrusallık performansının artırılması amacıyla, literatürde yer alan doğrusallık artırıcı yöntemlerden, adaptif besleme yöntemi tercih edilmiştir. Adaptif Besleme Devreli GY sistem tasarımı yapılmıştır. Sistem ile geniş bir $P_{giriş}$ aralığında, GY kazancını (G) seçilen değerlerde sabit tutan, DC besleme gerilimlerini (V_{DC}) üretecek mikrodenetleyicili adaptif sistem tasarımı amaçlanmıştır. Sistem WiMAX 5.8 GHz frekansı ile uyumlu çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Son yıllarda hızla gelişmekte olan WiMAX standardı kullanıcılara daha yüksek veri oranları, hizmet kalitesi ve geniş kapsama alanı sağlamaktadır. Sistem, SBB5089Z GY modülü, iki adet yönlü kuplör, iki adet RF güç dedektörü, adaptif DC besleme (V_{DC}) bloğundan meydana gelmektedir. LM324'lü gerilim izleyici devresi ve R/2R

sayısal analog dönüştürücü devresi ile desteklenmiş mikrodenetleyici adaptif V_{DC} bloğunu oluşturmaktadır. Çalışmada iki farklı sabit G değeri seçilmiştir. Seçilen iki G için, GY'ye gelmesi muhtemel $P_{giriş}$ değerlerine göre V_{DC} değiştirilmiş, GY kazancının seçilen değerlerde sabit kalması sağlanmıştır. Değişen $P_{giriş}$'e göre GY G'sinin sabit tutulması, P_{1dB} ve kazanç azalması (kazanç sıkışması) problemlerini ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede sistem ile GY Kazanç Bozulması (KB) kompanze edilerek, GY doğrusallık performansı artırılmıştır. Çalışmada, kazanç dışında, verim kontrolü de yapılmıştır. Değişen $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$'a göre, GY kazancını sabit tutacak her V_{DC} değeri için GY verimi de kontrol edilmiştir. Bu sayede verimin de belirli bir değerin altına düşmesi engellenmiştir.

Çalışmada önerilen sistem ile GY girişine gelmesi muhtemel $P_{giriş}$'e göre, V_{DC} adaptif olarak değiştirilerek, GY'nin $P_{çıkış}$, G ve verim kontrolü yapılmıştır. Özet olarak çalışmada tasarlanan sistem ile GY girişine gelmesi muhtemel $P_{giriş}$'e göre GY $P_{çıkış}$, G ve verim davranışını kontrol eden, adaptif V_{DC} değerleri üretilmektedir.

Çalışmanın izleyen bölümleri sırasıyla materyal ve yöntem, uygulama ve başarımlar, sonuçlar ve tartışma, teşekkür ve kaynaklardır.

Materyal ve yöntem

Çalışmada, 5.8 GHz frekansında çalışan, kazanç ve verim kontrollü, adaptif V_{DC} üniteli GY sistem tasarımı yapılmıştır. Sistem ile GY $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$ bilgileri anlık olarak okunarak, GY veriminden ödün vermeden, GY G'sini seçilen değerlerde sabit tutan V_{DC} değerleri üretilmektedir. Çalışmanın amacı, tasarlanan adaptif DC besleme devresi ile GY veriminden ödün vermeden doğrusallık performansının artırılmasıdır. GY'lerde birçok doğrusallık ve verim performans parametresi vardır. Bu çalışmada, GY doğrusallık performansı, $P_{çıkış}$, G ve P_{1dB} ile verim performansı ise Güç Ekli Verim (GEV) ve DC Güç Tüketimi (P_{DC}) ile karakterize edilmiştir.

GY'lerde kazanç, Watt cinsinden, GY $P_{çıkış}$'ının $P_{giriş}$'ine oranı (1) olarak tanımlanır. dBm cinsinden kazanç ise, GY $P_{çıkış}$-$P_{giriş}$ farkı (2) olarak tanımlanır.

$$G(dB) = 10log_{10}\frac{P_{çıkış(Watt)}}{P_{giriş(Watt)}} \quad (1)$$

$$G(dB) = P_{çıkış}(dBm) - P_{giriş}(dBm) \quad (2)$$

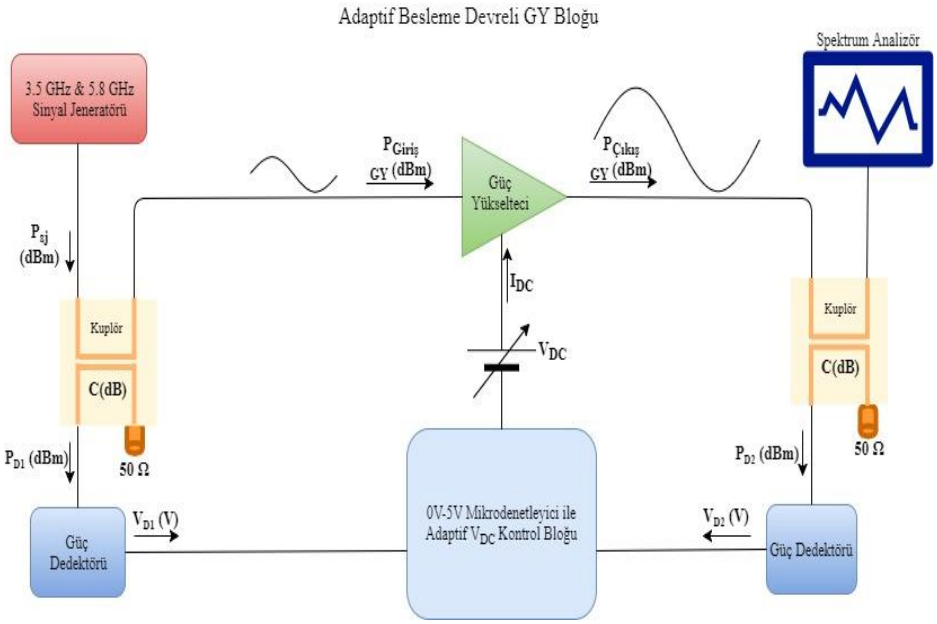
GY'lerde verimi ifade eden en önemli tanım GEV'dir. Watt cinsinden, GY $P_{çıkış}$'ı ile $P_{giriş}$'i arasındaki farkın, GY toplam DC güç tüketimine (P_{DC}) oranı olarak (3) ile ifade edilir.

$$GEV(\%) = 100\frac{P_{çıkış}(Watt) - P_{giriş}(Watt)}{V_{DC} * I_{DC}} \quad (3)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi çalışmada, GY'lerde doğrusallık performansını artırmak için, GY $P_{çıkış}$-$P_{giriş}$ farkına göre V_{DC} üreten adaptif DC besleme bloklu GY sistem tasarımı yapılmıştır. Adaptif DC besleme bloğu ile GY $P_{çıkış}$ ve $P_{giriş}$ değerleri, 200mS'lik periyotlar ile okunmuş, $P_{çıkış}$-$P_{giriş}$ farkını seçilen değerlerde sabit tutan V_{DC} gerilimleri üretilmiştir. Çalışmada, muhtemel RF $P_{giriş}$ değerlerinde, GY kazanç bozulmasını kompanze edebilmek için, iki farklı kazanç değeri seçilmiştir. Seçilen kazanç değerleri, GY P_{1dB} noktasındaki kazançlardan daha düşüktür. Sistem ile GY'nin $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$ değerleri okunmakta, $P_{çıkış}$-$P_{giriş}$ farkını, seçilen kazanç değerlerinde sabit tutan V_{DC} üretilmektedir. Çalışmada adaptif V_{DC} üretimi mikrodenetleyici ile sağlanmıştır. Sabit kazanç değerleri ise 5 dB ve 10 dB olarak seçilmiştir. Adaptif DC besleme bloklu sistem tasarımındaki asıl amaç GY kazanç bozulmasını kompanze etmektir. Adaptif sistem ile kazanç kontrolü haricinde, GY verimini belirli değerde tutmak amacıyla verim kontrolü de yapılmıştır. Kazanç kontrolünde (1) ve (2) denklemleri, verim kontrolünde ise (3) denklemi kullanılmıştır. Mikrodenetleyici yazılımı bu durumlar esas alınarak tamamlanmıştır.

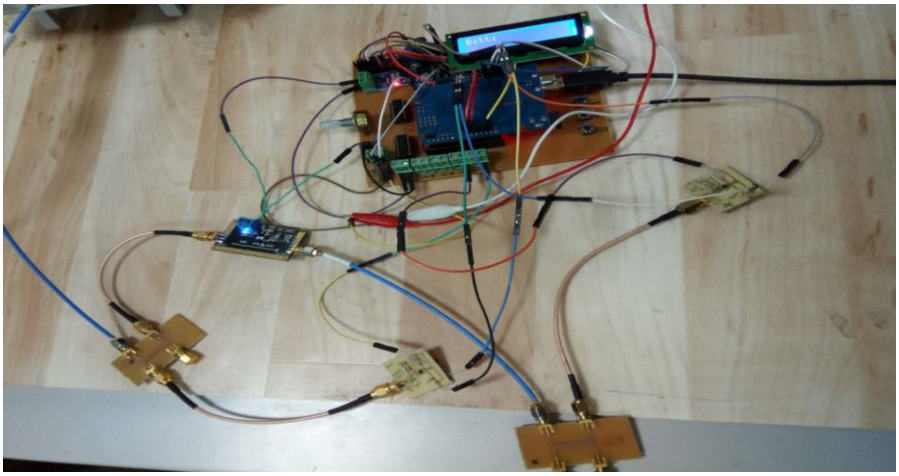
Sistem tasarımı, GY seçimi, adaptif V_{DC} kontrol bloğu elemanları tasarımı ve sistem yazılımını

oluşturan mikrodenetleyici programlanması şeklinde tamamlanmıştır.

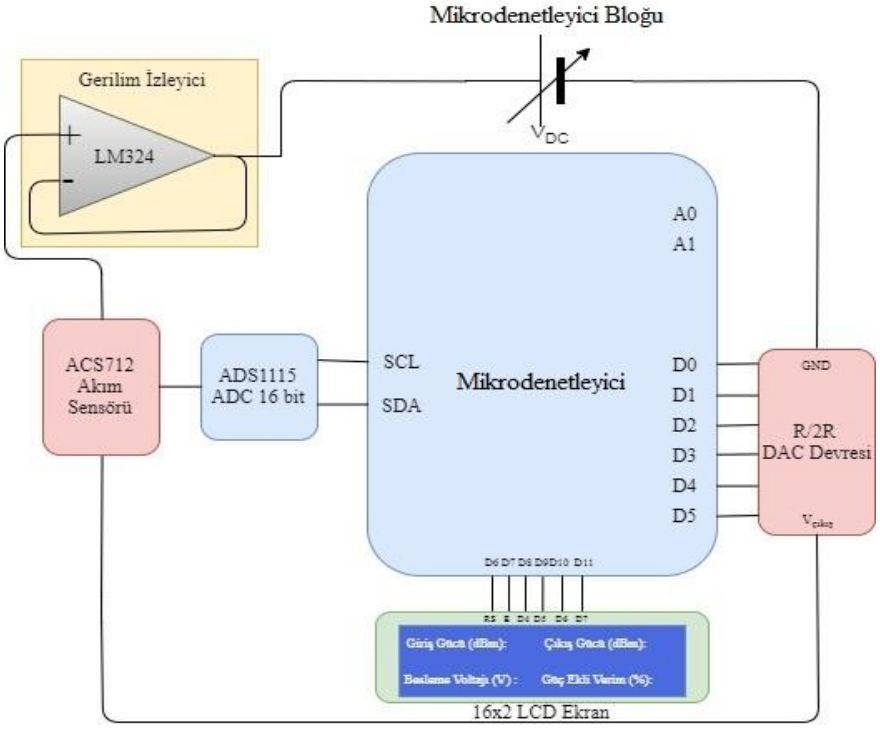


Şekil 1. Adaptif GY sistemi

Adaptif V_{DC} kontrol üniteli GY sistemi, sistem giriş ve çıkışında kullanılan iki adet yönlü kuplör, iki adet RF güç dedektörü, mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu ve GY'den meydana gelmektedir. Sisteme adaptiflik özelliği kazandıran mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu ise, mikrodenetleyici, LM324'lü gerilim izleyici devresi, R/2R sayısal analog dönüştürücü (merdiven devresi) devresi, ACS712 akım sensörü ve ADS 1115 16 bit analog sayısal dönüştürücü devrelerinden meydana gelmektedir. Ayrıca, $P_{giriş}$, $P_{çıkış}$, GEV (%) ve mikrodenetleyicili blok tarafından üretilen V_{DC} değerlerini yazdırmak üzere 16x2'lik LCD ekran kullanılmıştır. Adaptif GY sistemi Şekil 1'de, adaptif GY sistemi gerçeklenmiş hali Şekil 2'de, mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu ise Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Adaptif GY sistemi gerçeklenmiş hali



Şekil 3 Mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu

Şekil 1'de gösterilen, adaptif GY sisteminde, kuplörler, GY giriş ve çıkış güçlerinden örnek almak için kullanılmıştır. Yönlü kuplörler, 10 dB kuplaj katsayısı ile 5.8 GHz frekansında, mikroşerit formda tasarlanmıştır. Tasarımda Keysight ADS simülatörü kullanılmıştır. Tasarlanan yönlü kuplör 1.6mm, 4.3 ε_r, FR_4 cam elyaf üzerine üretilmiştir. Yönlü kuplör S-parametreleri ölçümleri, Anritsu MS4624B vektör network analizörü ile yapılmıştır. Çalışmada LTC5508 RF güç dedektörü entegresi tercih edilmiştir. Dedektörler, 300 MHz-7 GHz frekans aralığında, 32 dBm ile 12 dBm RF güç skalasında kullanılmaktadır. 2.7V-6V arası gerilim değerleri ile kutuplanabilmektedir. 5.8 GHz frekansı için LTC5508'li güç dedektörü tasarımında dedektör veri kataloğundan yararlanılmıştır. Yönlü kuplörler gibi, sistem giriş ve çıkışında kullanılmak üzere iki güç dedektörü gerçeklenmiştir. Dedektörler FR_4 cam elyaf üzerine üretilmiş, her iki dedektörde de aynı değerli yüzey montajlı elemanlar kullanılmıştır. Dedektörlerin, RF $P_{giriş}$- DC $V_{çıkış}$ ölçümlerinde, SMF 100A RF sinyal jeneratörü ve DC voltmetre kullanılmıştır. RF güç dedektörleri, GY'nin RF giriş gücü ve çıkış gücü değerlerini, mikrodenetleyici için anlamlı olan gerilim bilgisine dönüştürmede kullanılmıştır. Akım sensörü ise GY tarafından çekilen akımı okumak için kullanılmıştır. RF güç dedektörleri ile okunan gerilim bilgileri (Volt) ve akım sensörü tarafından okunan akım bilgisi (Amper) mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır. Dedektörler vasıtası ile mikrodenetleyiciye aktarılan gerilim bilgileri mikrodenetleyici içerisinde yeniden güce (dBm) dönüştürülmekte, kablo zayıflamaları (dB), kuplör iletim katsayıları (S_{21}) ve kuplör kuplaj katsayıları (S_{31}) da dikkate alınarak, GY $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$'ları mikrodenetleyici tarafından hesaplanmaktadır. $P_{giriş}$-$P_{çıkış}$ farkından GY'nin G'si hesaplanmaktadır.

Çalışmada, GY doğrusallığını artırmak ve kazanç bozulmasını kompanze etmek amacıyla,

5 dB ve 10 dB'lik iki kazanç değeri seçilmiştir. Adaptif sistem ile GY'ye gelebilecek tüm RF $P_{giriş}$ değerleri için, GY G'sini 5 dB veya 10 dB'de sabit tutan, V_{DC} üretilmektedir. Akım sensöründen okunan akım bilgisi ile de GY P_{DC} ve GEV'i hesaplanmaktadır.

Çalışmada RF güç ölçümlerinde, Rohde&Schwarz SMF 100A RF sinyal jeneratörü ve Agilent ESA-E serisi E4405B 9 kHz-13.2 GHz spektrum analizörü kullanılmıştır.

Mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu

Daha önce de bahsedildiği gibi, Şekil 3'te gösterilen mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu, mikrodenetleyici, sayısal analog dönüştürücü, analog sayısal dönüştürücü, gerilim izleyici ve akım sensöründen oluşmaktadır. Mikrodenetleyici dijital çıkış pinlerindeki sinyali, GY için anlamlı hale getirebilmek amacıyla, R/2R devresi tasarlanmış ve mikrodenetleyici dijital çıkış pinlerine entegre edilmiştir. GY maksimum DC çalışma gerilimi ile çalıştırıldığı zaman 70 mA'ya yakın akım çekmektedir. Mikrodenetleyici GY için yeterli akımı veremediğinden dolayı, R/2R devresinden sonra LM324'lü gerilim izleyici devresi kullanılmıştır. GY, gerilim izleyici devresi ile sürülmüştür. Akım sensörü ise adaptif sistemde GY tarafından çekilen akımı ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Akım sensöründen okunan analog akım bilgisi, analog sayısal dönüştürücü ile mikrodenetleyiciye aktarılmıştır.

Güç dedektörleri eğri uydurma işlemi

Daha önce de bahsedildiği ve Şekil 1'de gösterildiği gibi, adaptif sistem giriş ve çıkışında kullanılmak üzere iki güç dedektörü gerçeklenmiştir. Sistem giriş ve çıkışında kullanılan her iki güç dedektörü de aynı bakır plaka üzerine üretilmiş, aynı değerlerde yüzey montajlı elemanlar kullanılmıştır. Fakat giriş ve çıkış güç dedektörlerinin RF $P_{giriş}$- DC $V_{çıkış}$ eğrilerinin küçük oranda birbirinden farklı oldukları görülmüştür. Bu farklılıktan dolayı her iki güç dedektörü için farklı eğri uydurma işlemi yapılmıştır.

Tasarlanan sistemde, giriş ve çıkış güç dedektörleri gerilim bilgileri mikrodenetleyici tarafından okunmaktadır. Volt cinsinden okunan gerilim bilgisi, mikrodenetleyici tarafından yeniden güce (dBm) dönüştürülmektedir. Mikrodenetleyici tarafından yapılan Volt-dBm dönüşümü için eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilmiş matematiksel eşitlikler kullanılmıştır. Giriş ve çıkış dedektörlerinden okunan gerilim değerleri, eğri uydurma işlemi neticesinde elde edilmiş matematiksel eşitlikler ile güce dönüştürülmektedir. Giriş ve çıkış dedektörü güç değerleri, kuplör kuplaj katsayısı, iletim oranı, kablo zayıflamaları ile toplanarak GY giriş ve çıkışındaki RF güç değerleri hesaplanmıştır. GY $P_{çıkış}$-$P_{giriş}$ farkını sabit değerlerde tutan V_{DC} gerilimlerinin üretilmesi, sisteme adaptiflik özelliği kazandırılmasının temelini teşkil ettiği için, giriş ve çıkış dedektörleri tarafından okunan gerilim bilgisi kritik öneme sahiptir. Çalışmada, giriş ve çıkış dedektörleri $P_{giriş}$-$V_{çıkış}$ ölçüm eğrilerindeki bu çok küçük fark dikkate alınmıştır. Bu sebeple, eğri uydurma işlemi, giriş ve çıkış dedektörleri, $P_{giriş}$-$V_{çıkış}$ grafikleri için ayrı ayrı yapılmıştır.

Bir sistemin performans analizi için matematiksel model oluşturabilmek çok önemlidir. Herhangi bir sistemin girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel modeller oluşturulur. Matematiksel modeller, deneysel yöntemler ile elde edilmiş veri setleri esas alınarak oluşturulur. Simülasyon, ölçüm, vb. yollarla elde edilen veri setleri kullanılarak, belirli bir hata oranı ile matematiksel modeller oluşturulur ve modele bağlı fonksiyonlar yazılır. Bu fonksiyonlar sayesinde, sistem hakkında bilgi sahibi olunur (Karadede 2014). Çalışmada, $P_{giriş}$'e karşılık $V_{çıkış}$'ı ölçülen güç dedektörlerinin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Dedektörlerin $P_{giriş}$-$V_{çıkış}$ matematiksel modellerinin oluşturulması için doğrusal olmayan eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 1'de gösterilen adaptif sistemde, sinyal jeneratöründen alınan, RF giriş sinyali, yönlü kuplör ile bölünmektedir. Kuplörün iletim katsayısı (S_{21}) oranında gücün bir kısmı GY'ye,

kuplörün kuplaj katsayısı (S_{31}) oranında bir kısmı ise dedektöre aktarılmaktadır. Kuplörden dedektöre aktarılan güç, dedektör vasıtası ile gerilime dönüştürülmekte ve mikrodenetleyici analog girişi tarafından okunmaktadır. Okunan bu gerilim bilgisi ise eğri uydurma işlemi neticesinde elde edilmiş matematiksel fonksiyonlar ile mikrodenetleyici yazılımı tarafından güce (Watt'a) dönüştürülmektedir. Mikrodenetleyici tarafından hesaplanan güç değerlerine (dBm) kablo zayıflamaları, kuplör 2.port ve 3.port zayıflatma oranları eklenerek, GY $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$'ı dBm olarak elde edilmektedir.

Çalışmada, dedektörlerin ölçülen RF $P_{giriş}$-DC $V_{çıkış}$ verileri için tek bir eğri uydurma grafiğinin istenilen düzeyde başarı elde edemediği görülmüştür. Bu nedenle, ölçüm verileri gruplara ayrılarak, her bir grup için ayrı ayrı eğri uydurma işlemi yapılmıştır. Toplamda tüm verilerin ortalama beş farklı gruba ayrıldığı durumda, minimum hata ile en iyi sonuç elde edilmiştir. Her bir grup için uydurulan eğrilerin doğruluk oranları ölçüldüğünde R^2 performans parametresi ortalama 0.99 olarak hesaplanmıştır. R^2, RF güç değerleri Watt'a dönüştürülerek hesaplanmıştır. R^2 Denklem (4)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Tahmin_i - Ölçüm_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Ölçüm_i - Ölçüm_{Ortalama})^2} \quad (4)$$

N, ölçülen örnek sayısını, $Tahmin_i$, i. örneğin eğri uydurma ile elde edilen değerini, $Ölçüm_i$, i. örneğin ölçülen değerini, $Ölçüm_{Ortalama}$ ise, ölçülen değerlerin aritmetik ortalamasını temsil etmektedir.

Eğri uydurma işlemi neticesinde, giriş ve çıkış güç dedektörleri için elde edilen matematiksel fonksiyonlar sırasıyla (5) ve (6)'da gösterilmiştir.

$$f(P_{giriş}) = \begin{cases} -32 & 0 \le V_{çıkış} < 300.5 \\ \dfrac{-0.71 * V_{çıkış}}{V_{çıkış} - 293.66} & 300.5 \le V_{çıkış} < 303.0 \\ \dfrac{-265.23}{V_{çıkış} - 286.35} - 7.43 & 303.0 \le V_{çıkış} < 370.0 \\ 1.26 * 10^{-3} * V_{çıkış} + 7.86 - \dfrac{6594.85}{V_{çıkış}} & 370.0 \le V_{çıkış} < 1050.0 \\ \dfrac{-74825.30}{V_{çıkış} + 2157.29} + 26.60 & 1050.0 \le V_{çıkış} < 5000.0 \end{cases} \quad (5)$$

$$f(P_{giriş}) = \begin{cases} -32 & 0 \le V_{çıkış} < 228.3 \\ -3.72 * 10^{-2} * V_{çıkış} - \frac{4.15 * 10^{-1} * V_{çıkış}}{V_{çıkış} - 224.35} & 228.3 \le V_{çıkış} < 231.0 \\ \dfrac{-326.62}{V_{çıkış} - 210.69} - 7.19 & 231.0 \le V_{çıkış} < 310.0 \\ 4.09 * 10^{-3} * V_{çıkış} + 2.67 - \frac{4177.24}{V_{çıkış}} & 310.0 \le V_{çıkış} < 1055.0 \\ 1.68 * 10^{-3} * V_{çıkış} + 9.44 - \frac{8852.62}{V_{çıkış}} & 1055.0 \le V_{çıkış} < 5000.0 \end{cases} \quad (6)$$

Eğri uydurma sonucunda elde edilen, $V_{çıkış}$'a bağlı $P_{giriş}$ fonksiyonları mikrodenetleyiciye yüklenmiştir. Güç dedektörleri tarafından algılanan $V_{çıkış}$ gerilim değerleri, bu fonksiyonlar ile güce dönüştürülmüştür.

GY Kazanç kontrolünde kullanılan formüller (7) ile (11) arasında verilmiştir. Burada, $P_{D1}(dBm)$ dBm cinsinden giriş güç dedektörüne gelen gücü, $P_{D2}(dBm)$ dBm cinsinden çıkış güç dedektörüne gelen gücü, $V_{D1}(V)$ giriş güç dedektörü tarafından okunan gerilim değerini, $V_{D2}(V)$ ise çıkış güç dedektörü tarafından okunan gerilim değerini ifade etmektedir. Zayıflama (dB) ise sistemde kullanılan kablo zayıflamalarını ifade etmektedir.
(7)-(11) arasındaki formüllerle hesaplanan kazanç değerine göre adaptif DC besleme bloğu 4.75 dB<G(dB)<5.25 dB veya 9.75 dB<G(dB)<10.25 dB şartlarını sağlayacak şekilde V_{DC} üretmektedir. GY verim kontrolünde ise (12), (13) ve (14)'teki eşitlikler kullanılmıştır. Burada, $P_{D1}(Watt)$ Watt olarak giriş güç dedektörüne gelen gücü, $P_{D2}(Watt)$ Watt olarak çıkış güç dedektörüne gelen gücü ifade etmektedir. (12)-(14) arasındaki formüllerle hesaplanan GEV(%) değerine göre adaptif DC besleme bloğu GEV(%) performansı %7'den büyük olacak şekilde V_{DC} üretmektedir.

Uygulama ve başarımlar

Çalışmada, 5.8 GHz frekansı ile uyumlu, kazanç ve verim kontrollü adaptif GY sistem tasarımı yapılmıştır. Sistem ile GY girişine gelmesi muhtemel RF giriş gücü değerlerinde, GY kazancını seçilen değerlerde sabit tutan V_{DC} gerilimi üretilmektedir. Çalışmada, GY'nin P_{1dB} noktasındaki kazanç değerlerinden daha düşük değerli sabit iki kazanç seçilmiştir.

$$P_{D1}(dBm) = f(V_{D1}(V)) \tag{7}$$

$$P_{D2}(dBm) = f(V_{D2}(V)) \tag{8}$$

$$P_{giriŞGY}(dBm) = P_{D1}(dBm) + C(dB) + Zayıflama(dB) \tag{9}$$

$$P_{ÇıkışGY}(dBm) = P_{D2}(dBm) + C(dB) + Zayıflama(dB) \tag{10}$$

$$G(dB) = P_{ÇıkışGY}(dBm) - P_{giriŞGY}(dBm) \tag{11}$$

$$P_{giriŞGY}(Watt) = \frac{10^{P_{giriŞGY}(dBm)}}{10^3} \tag{12}$$

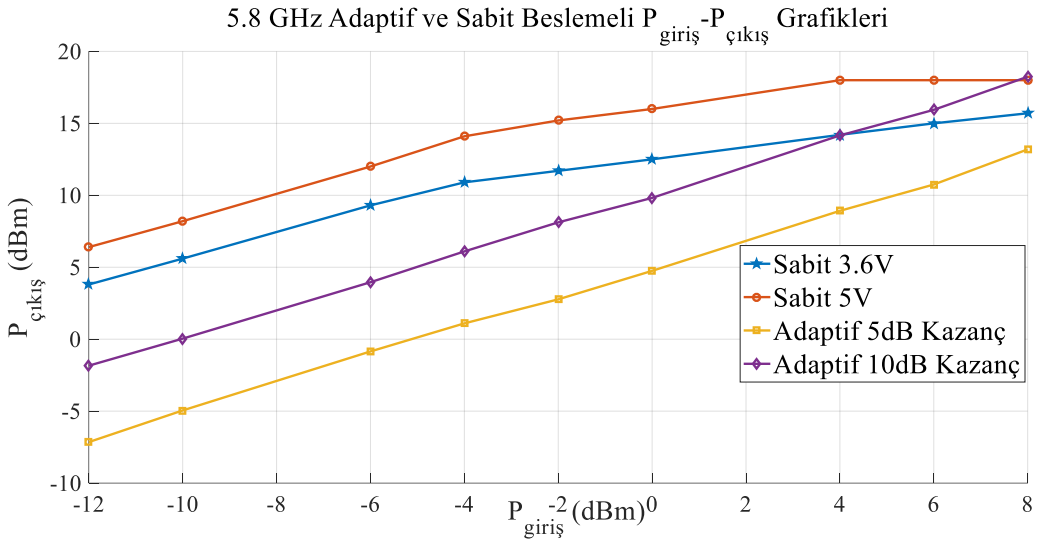
$$P_{ÇıkışGY}(Watt) = \frac{10^{P_{ÇıkışGY}(dBm)}}{10^3} \tag{13}$$

$$GEV(\%) = 100 * \frac{P_{ÇıkışGY}(Watt) - P_{giriŞGY}(Watt)}{P_{DC}} \tag{14}$$

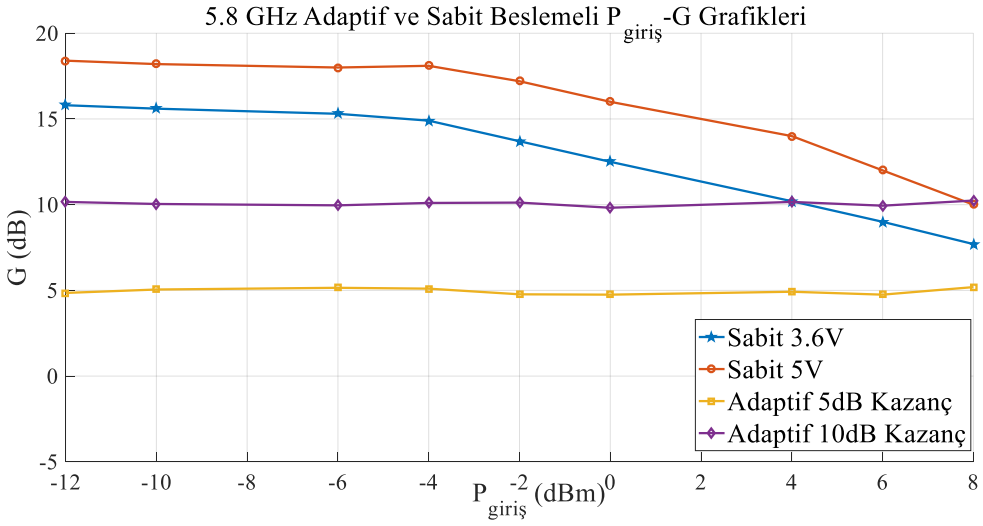
Çalışmada, kazancın P_{1dB} noktasından daha düşük değerli seçilmesindeki amaç, GY kazanç bozulmasının önüne geçip, kazanç sıkışmasını kompanze ederek, GY doğrusallık performansının artırılmasıdır. Çalışmada GY'nin doğrusallık performansını artırmaya yönelik kazanç kontrolü dışında, GY DC güç tüketimini makul sınırlar içerisinde tutmak amacıyla verim kontrolü de yapılmıştır. Adaptif GY sistemi, ticari bir GY, yönlü kuplörler, RF güç dedektörleri ve mikrodenetleyicili adaptif V_{DC} kontrol bloğu ekipmanlarından oluşmaktadır. GY dışındaki tüm sistem elemanları ayrı ayrı tasarlanmış ve sistem entegrasyonu başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Tasarlanan adaptif sistem ile yapılan ölçümlerde, GY RF $P_{giriş}$'i, belirli değer aralıklarında değiştirilmiş, değişen $P_{giriş}$'e göre, GY kazancını seçilen değerlerde sabit tutan V_{DC}'nin başarılı bir şekilde sistem tarafından üretildiği gözlenmiştir. Çalışmayı literatürdeki bu alanda yapılmış diğer çalışmalardan ayıran temel fark, çalışmada kullanılan GY'nin ayrık transistör yapıda olması, tüm sistem elemanlarının ayrı ayrı tasarlanarak sistem entegrasyonun başarılı bir şekilde tamamlanmış olmasıdır. Ayrıca sisteme yazılım olarak adaptiflik özelliği maliyet açısından oldukça düşük değerli bir mikrodenetleyici ile kazandırılmıştır. Literatürde adaptif DC beslemeli yapılar genellikle seri üretim gerektiren BMOYİ yapılar veya daha yüksek maliyetli FPGA ile gerçeklenmiştir.

Çalışmadaki temelinde, doğrusallık performansının artırılması fikri olduğu için kazanç kontrolü birinci öncelik olmuştur. Sabit kazanç değerleri 5 dB ve 10 dB olarak seçilmiştir. Adaptif sistem ile GY girişine gelmesi muhtemel RF $P_{giriş}$ aralığında, GY G'sini sabit 5 dB veya 10 dB'de tutacak V_{DC} gerilimleri üretilmektedir. Özetle, Adaptif sistem, GY $P_{giriş}$ ve $P_{çıkış}$'ını 200mS'lik periyotlar ile okumakta ve $P_{çıkış}$-$P_{giriş}$ farkını 5 dB veya 10 dB'de sabit tutacak V_{DC} üretmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, sabit ve adaptif beslemeli GY'nin, $P_{giriş}$-$P_{çıkış}$, $P_{giriş}$-G, $P_{giriş}$-GEV(%) ve $P_{giriş}$-P_{DC} grafikleri ayrı ayrı verilmiştir. Bu sayede, sabit beslemeli ve adaptif beslemeli GY'nin performans parametreleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Besleme gerilim değerlerinin GY performansına olan etkisini incelemek amacıyla 3.6 V ve 5 V'luk iki sabit V_{DC} değeri seçilmiştir. GY, $P_{çıkış}$, G, GEV ve P_{DC} ölçümleri Sabit 3.6 V, Sabit 5V, Adaptif 5 dB Kazanç, Adaptif 10 dB Kazanç isimli grafikler ile karşılaştırılmıştır. Dedektörler, -30 dBm ile 12 dBm aralığındaki güç seviyelerinde çalıştıkları için, dedektörlere bu aralık dışında RF güç uygulanmamıştır. Dedektör girişlerine uygulanması gereken RF sinyal -36 dBm ile 12 dBm arasında olunca, kuplör ve dedektörden geçen ve kablo zayıflamalarına maruz kalan RF sinyal GY girişine -7 dBm ile 15 dBm arasında ulaşmaktadır. Bu sebeple GY $P_{giriş}$'i -7 dBm ile 15 dBm arasında ölçeklendirilmiştir.



Şekil 4. 5.8 GHz Sabit ve adaptif beslemeli GY $P_{giriş}$- $P_{çıkış}$ grafikleri

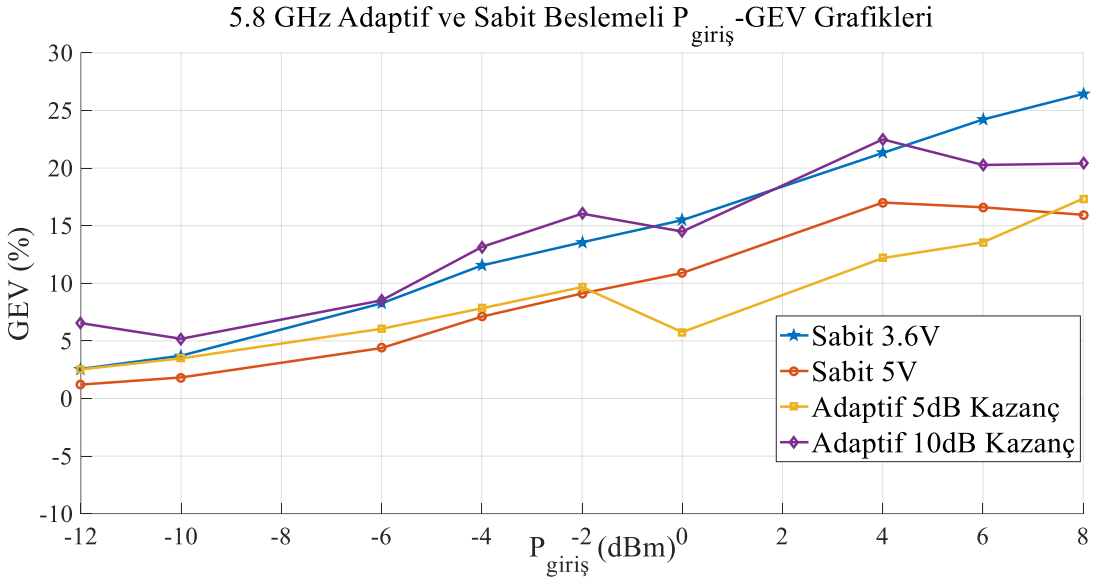


Şekil 5. 5.8 GHz Sabit ve adaptif beslemeli GY $P_{giriş}$- G grafikleri

Sistemde, $P_{çıkış}$ ve akım ölçümleri değişen V_{DC} değerleri için csv dosyası olarak kayıt edilerek, csv dosyalarından alınan veriler ile grafikler çizdirilmiştir. 5.8 frekansında, sabit 3.6V V_{DC} ve sabit 5V V_{DC} beslemeli GY ile adaptif beslemeli 5 dB kazançlı GY ve adaptif beslemeli 10 dB kazançlı GY, $P_{giriş}$-$P_{çıkış}$ $P_{giriş}$-G grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te karşılaştırılmıştır.

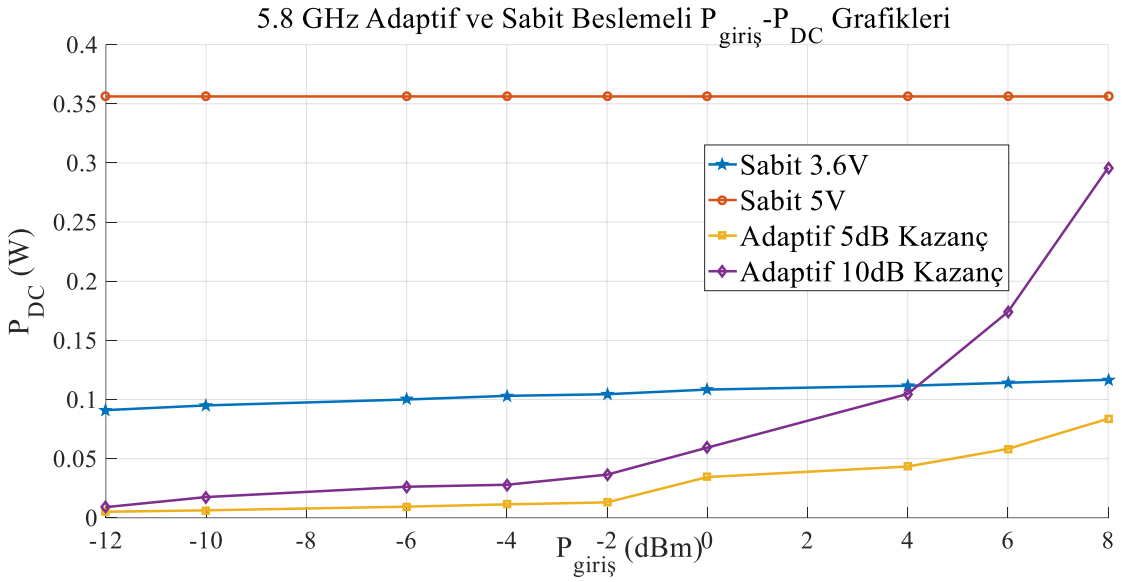
Şekil 4 ve Şekil 5'e göre, sabit 3.6V V_{DC} için, -5 dBm'lik $P_{giriş}$ P_{1dB} değerinde, GY 10 dBm $P_{çıkış}$ ve 15 dB G'ye sahiptir. 5V V_{DC} için ise -1 dBm $P_{giriş}$ P_{1dB} değerinde, GY 15.4 dBm $P_{çıkış}$ ve 16.4 dB G'ye sahiptir. Adaptif 5 dB kazançlı GY'nin G'si, -12 dBm ile 8 dBm $P_{giriş}$ aralığında sabit olup, 5 dB iken, GY $P_{çıkış}$'ı $P_{giriş}$ seviyesinin, 5 dB fazlası olarak değişmektedir. Benzer şekilde adaptif 10 dB kazançlı GY'nin, G'si,-12 dBm ile 8 dBm $P_{giriş}$ aralığında sabit 10 dB olup, $P_{çıkış}$, GY girişine gelen $P_{giriş}$'in 10 dB fazlası

olacak şekilde değişmektedir. Sabit ve adaptif beslemeli GY, $P_{çıkış}$ ve G performansları karşılaştırıldığında, sabit beslemeli GY'nin P_{1dB} noktasındaki $P_{çıkış}$ ve G değerlerinin, adaptif beslemeli GY'nin $P_{çıkış}$ ve G'sinden yüksek olduğu görülmektedir. Fakat çalışılan -12 dBm ile 8 dBm $P_{giriş}$ aralığındaki, kazanç sıkışması incelendiğinde, adaptif beslemeli sistemin, sabit beslemeli sisteme göre, çok daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Sabit 3.6V beslemeli GY kazanç sıkışması yaklaşık 10 dB, sabit 5V beslemeli GY kazanç sıkışması yaklaşık 8 dB'dir. Adaptif beslemeli GY için ise kazanç sıkışması, maksimum 0.5 dB olacak şekilde programlanmıştır. Bu durumda, örneğin, sabit 5V beslemeli GY'ye -1 dBm'den yüksek RF $P_{giriş}$ değerlerinde RF sinyal uygulandığında, GY doğrusal davranışı bozulacak, GY'ye uygulanan RF sinyal ısıya ve Modülasyonlar Arası Bozunum (MAB-IMD) ürünlerine dönüşüp, sistem performansı bozulacaktır. GY'nin adaptif beslemeli yapı ile entegrasyonu neticesinde, bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Adaptif beslemeli GY'nin, -12 dBm ile 8 dBm'lik $P_{giriş}$ skalasında GY kazanç sıkışması maksimum 0.5 dB olacağı için, adaptif sistem ile GY kazanç sıkışması kompanze edilmiştir. Özetle adaptif besleme ile GY kazanç sıkışması kompanze edilmiş, doğrusallık performansı artırılmıştır.



Şekil 6. *5.8 GHz Sabit ve adaptif beslemeli GY $P_{giriş}$- GEV(%) grafikleri*

Şekil 6'daki Sabit ve adaptif beslemeli GY $P_{giriş}$-GEV davranışları karşılaştırıldığında, sabit 3.6V için, GY -5 dBm'lik P_{1dB} $P_{giriş}$ seviyesinde, %10.64'lük GEV'e, sabit 5V beslemeli GY %4'lük GEV'e adaptif 5 dB kazançlı GY %7'lik GEV'e, adaptif 10 dB kazançlı GY %11'lik GEV'e sahiptir. Sabit 5V besleme için GY, -1 dBm'lik P_{1dB} $P_{giriş}$ seviyesinde, %9.680'lik GEV'e, adaptif 5 dB kazançlı GY %9'luk GEV'e, adaptif 10 dB kazançlı GY ise %15'lik GEV'e sahiptir. P_{1dB} noktasında adaptif beslemeli 10 dB kazançlı GY GEV performansının, sabit 3.6V ve sabit 5V beslemeli GY GEV performanslarından daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 7. *5.8 GHz Sabit ve adaptif beslemeli GY $P_{giriş}$-P_{DC}(%) grafikler*

(-12 dBm-8 dBm) GY $P_{giriş}$ aralığı incelendiğinde ise sabit 3.6V, 5V ve adaptif beslemeli 5 dB kazançlı GY GEV performanslarının birbirine yakın olduğu, adaptif beslemeli 10 dB kazançlı GY'nin ise en iyi GEV performansa sahip olduğu görülmüştür. Adaptif beslemeli sistem ile GY doğrusallık performansı haricinde GEV performansı da artırılmıştır.

Sabit ve adaptif beslemeli GY'nin, $P_{çıkış}$, G, GEV performansları haricinde, Şekil 7'deki $P_{giriş}$-P_{DC} grafikleri incelendiğinde, 3.6V beslemeli GY'nin (-12 dBm-8 dBm) $P_{giriş}$ aralığında, 0.1W P_{DC}'ye, 5V beslemeli GY'nin ise 0.35W P_{DC}'ye sahip olduğu görülmüştür. Adaptif beslemeli 5 dB kazançlı GY'nin -5 dBm $P_{giriş}$ için 10mW P_{DC}'ye, -1 dBm $P_{giriş}$ için ise 23mW P_{DC}'ye sahip olduğu görülmüştür. Adaptif beslemeli 10 dB kazançlı GY ise, -5 dBm $P_{giriş}$ değerinde yaklaşık 10mW, -1 dBm $P_{giriş}$ değerinde ise 48mW güç tüketimine sahiptir. Ayrıca (-12 dBm-8 dBm) $P_{giriş}$ aralığında, adaptif beslemeli 5 dB kazançlı GY'nin sabit 3.6V beslemeli GY'den daha düşük güç tüketimine, adaptif 10 dB GY'nin ise, sabit 5V beslemeli GY'den daha düşük güç tüketimine sahip olduğu görülmüştür. Ölçülen $P_{giriş}$-P_{DC} değerlerine göre, çalışmada tasarlanan, adaptif beslemeli sistemin GY güç tüketimini azalttığı görülmüştür. Adaptif sistem ile azalan güç tüketimi ile GY ısıl duyarlılığı da artırılmıştır.

Sonuçlar ve tartışma

Çalışmada, 5.8 GHz frekansında, kazanç ve verim kontrollü adaptif DC beslemeli GY tasarımı yapılmıştır. Adaptif sistem, GY modülü, mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu, yönlü kuplör ve RF güç dedektörlerinden oluşmaktadır. Sisteme adaptiflik özelliği mikrodenetleyici ile kazandırılmıştır. Mikrodenetleyicili V_{DC} kontrol bloğu için de kendi içerisinde çeşitli elektronik devreler tasarlanmıştır. R/2R sayısal analog dönüştürücü, gerilim izleyici devresi, GY ile birlikte mikrodenetleyiciye entegre edilerek, istenilen V_{DC} gerilimleri elde edilmiştir. GY verimi ve güç tüketiminin hesaplanması amacıyla sistemde bir adet akım sensörü de kullanılmıştır. Mikrodenetleyici yazılımı ile sisteme adaptiflik özelliği kazandırılmıştır.

Çalışmada tasarlanan adaptif sistem ile GY doğrusallık performansı, GY kazancı kontrol edilerek artırılmıştır. Adaptif sistem tasarımındaki ana amaç GY doğrusallık

performansının artırılmasıdır. GY doğrusallık performansının artırılması amacıyla P_{1dB} noktasından düşük değerli, birisi 5 dB diğeri 10 dB olmak üzere iki kazanç seçilmiştir. Sistem ile GY girişine gelmesi muhtemel RF giriş gücü değerlerinde, GY kazancını, 5 dB ve 10 dB değerlerinde sabit tutacak V_{DC} gerilimleri adaptif olarak üretilmiştir. Bu sayede, GY kazancının P_{1dB} noktasına ulaşmasının önüne geçilmiş, GY kazanç sıkışması kompanze edilmiştir.

Ayrıca, çalışmada tasarlanan adaptif sistem ile GY kazancı haricinde verimi de kontrol edilerek GY veriminin belirli bir değerde tutulması sağlanmıştır.

Çalışmada tasarlanan adaptif beslemeli sistem sayesinde GY kazanç sıkışma davranışı %95 oranında iyileştirilmiştir. GY güç tüketimi ise % 85 oranında azaltılmıştır. Ayrıca 5V sabit beslemeye göre adaptif besleme yapısı ile GY GEV davranışı %50 oranında artırılmıştır.

Sonuç olarak, 5.8 GHz frekans uygulamalarında kullanılacak olan GY'nin, verim ve doğrusallık performansı adaptif besleme yöntemi ile iyileştirilmiştir. Adaptif besleme yapısı ile doğrusallığı artırılmış, geniş dinamik aralıklı, düşük P_{DC}'ye sahip GY elde edilmiştir.

Teşekkür

Çalışmanın tamamlanmasında, lojistik destek sağlayan Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM)'a (Proje No: DPT-2007K120530) teşekkür ederim.

Kaynaklar

Ashraf, A., Ashraf, S., Rizvi, N. Z., Singh, M. ve Srivastava, P., (2016). Class E power amplifier: Implementation and comparative analysis at 1.7 GHz and 2.4 GHz. Electrical, Electronics, and Optimization Techniques *(ICEEOT), International Conference on, IEEE*.

Cao, T., Huang, F., Zhang, Q. ve Liu, Y., (2018). High efficiency and wideband hybrid envelope amplifier for envelope tracking operation of wireless transmitter. *2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*.

Chen, C.-Q., Hao, M.-L., Li, Z.-Q., Du, Z. ve Yang, H., (2016). A 1.8-2.8 GHz highly linear broadband power amplifier for LTE-A application. *Progress In Electromagnetics Research C* **66**: 47-54.

Chen, P.-H. ve P. M.-Y. Fan, (2015). An 83.4% Peak Efficiency Single-Inductor Multiple-Output Based Adaptive Gate Biasing DC-DC Converter for Thermoelectric Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* **62**(2): 405-412.

Chen, S., Wang, G., Cheng, Z., Qin, P. ve Xue, Q., (2017). Adaptively Biased 60-GHz Doherty Power Amplifier in 65-nm CMOS. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **27**(3): 296-298.

Cho, Y., Moon, K., Kim, J., Park, B. ve Kim, B., (2016). Linear Doherty power amplifier with adaptive bias circuit for average power-tracking. *Microwave Symposium (IMS), 2016 IEEE MTT-S International, IEEE*.

Couturier, A. M., Byk, E., Auvinet, C., Tranchant, S., Auxemery, P., Camiade, M., ... Stieglauer, H., (2013). E-band medium power amplifiers with gain control and output power detector. *2013 European Microwave Integrated Circuit Conference*.

Cripps, S. C. (2002). *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*. Artech House.

Gecan, D., Olavsbråten, M. ve Gjertsen, K. M. (2016). Measured linearity improvement of 10 W GaN HEMT PA with dynamic gate biasing technique for flat transfer phase. *Microwave Symposium (IMS), 2016 IEEE MTT-S International, IEEE*.

Giofrè, R., Colantonio, P. ve Giannini, F., (2018). A Design Approach to Maximize the Efficiency vs. Linearity Trade-Off in Fixed and Modulated Load GaN Power Amplifiers. *IEEE Access* **6**: 9247-9255.

Hwang, H., Yang, S. ve Seo, C., (2012). High gain and high PAE power amplifier by employing adaptive bias control circuit for resonant WPT. 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings.

Jaiswal, S., Singh, P. P., Srivastava, S., Arora, R., ve Bharadhwaj, P. S., (2015). An algorithm implementation for gain control and power compensation in power amplifiers. 2015 *International Conference on Microwave, Optical and Communication Engineering (ICMOCE)*.

Jędrzejewski, K., Rosolowski, D. W. ve Wojtasiak, W., (2018). Impact of transistor DC operating condition on effectiveness of PA digital predistortion. *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*.

Jin, S., Park, B., Moon, K., Kwon, M. ve Kim, B., (2013). Linearization of CMOS cascode power amplifiers through adaptive bias control. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **61**(12): 4534-4543.

Karadede, Y., (2014). Eğri Uydurma Problemlerine Melez Algoritma Yaklaşımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kim, H., Cho, H., Kim, M., Seo, M., Ham, J., Park, C.-S.,...,Jung, S., (2013). "Efficiency enhanced amplifier using a digitally-controlled dynamic bias switching circuit." *Microwave Journal* **56**(5): 106-120.

Lee, S., Lee, S., Kang, S. ve Hong, S., (2017). "A 1.7-GHz GaN MMIC Doherty power amplifier using an adaptive bias circuit with a quadrature coupler." *Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), 2017 IEEE International Symposium*, 90-92.

Li, P., Xia, Q., Chen, Z. ve Geng, L., (2018). High efficiency triple-stacked class-E power amplifier with novel dynamic biasing network. *2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*.

Seth, S., Kwon, D. H., Venugopalan, S., Son, S. W., Zuo, Y., Bhagavatula, V.,...,Cho, T. B., (2016). "A Dynamically Biased Multiband 2G/3G/4G Cellular Transmitter in 28 nm CMOS." *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **51**(5): 1096-1108.

Tsai, M.-D., Lin, C.-C., Chen, P.-Y., Chang, T.-Y., Tseng, C.-W., Lin, L.-C.,...,Chiu, C.-S., (2017). 13.1 A fully integrated multimode front-end module for GSM/EDGE/TD-SCDMA/TD-LTE applications using a Class-F CMOS power amplifier. *2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*.

Yusoff, Z., Annuar, F. M., Kung, F., Hashim, S. J., Lees, J. ve Cripps, S. C., (2016). The effect of tracking generator efficiency to overall RF power amplifier system efficiency. *IEEE 2016 International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*.

5.8 GHz Adaptive Power Amplifier Design

Extended abstract

Power Amplifiers (PAs) are used in transmitting units of wireless communication systems. They are critical and important elements that are expected to produce a suitable output power at a good linearity, efficiency and gain. In general, PA performance is divided into two categories as linearity and efficiency performance. PA linearity performance is important, because linearity is indicative, in terms of how much of the RF input signal applied to the PA delivered to the output of PA. PA operation regions are divided into two regions as linear and nonlinear. In the linear region, RF signal applied to the PA is converted to RF output signal with minimum distortion and maximum gain. In nonlinear region, a large part of the input signal applied to the PA transforms into heat and IMD products. It is expected that the gain of PA will be constant for all possible Input Power (P_{input}) values at PA. However, after a certain P_{input} value, linear behavior of PA deteriorates and the gain starts to decrease. The point where gain decrease is 1 dB is called 1 dB gain compression point (P_{1DB}). This point is called the upper bound of the PA linear operation region. From this point, the PA linear operation is distorted and the PA gain falls increasingly. It is desirable that the P_{input} and Output Power (P_{output}) values at the P_{1dB} point be as high as possible. Another important parameter, except linearity yielding information about PA performance is efficiency. The efficiency is a measurement that RF P_{input} is converted to RF P_{output} with how much Power Dissipation (P_{DC}). For PAs, the efficiency is expressed as the ratio of P_{output} to P_{DC}. Power Added Efficiency (PAE) is another efficiency criteria that is ratio of difference of P_{output} and P_{input} to P_{DC}. A high PAE value indicates that high PA gain can be achieved with low P_{DC} values. Therefore for this reason it is desirable to be high as possible. Generally, linearity and the efficiency performance of PA exhibit a inversely proportional change. There is a tradeoff between these two parameters. Namely, for PAs, if linearity performance of PA is to be improved, this leads to a decrease in efficiency. Similarly, if efficiency is to be improved, this reduces linearity performance of PA. İt is known that the linearity and efficiency behavior of PA change according to the RF input signal and DC biasing conditions of PA. There are a lot of studies in literature about this tradeoff. RF input signals or DC biasing conditions of PA are changed to improve linearity or efficiency or both in literature. Usually, RF input signal is changed to improve linearity; DC biasing conditions are changed to improve linearity and/or efficiency. In this work, with this knowledge, we changed DC biasing conditions (V_{DC}) of PA adaptively to improve linearity performance of PA without compromising efficiency.

In this study, two constant gain values were chosen to compensate distorted linear behavior of PA from the P_{1dB} point relative to the increasing P_{input}. In the P_{input} scale, which is likely to come to input of PA, an adaptive system is designed which produce V_{DC} that keeps the GY gain constant at the selected gain values. With the designed adaptive system, only gain control is not performed to increase linearity behavior of PA, PAE control of PA has performed also to keep PAE of PA at a certain value range.

Adaptive PA system is designed for 5.8 GHz in this study. Adaptive PA system consist of a PA-SBB5089Z PA module-, an adaptive V_{DC} control block with microcontroller, directional couplers, LTC 5508 RF power detectors and connections cables. Adaptive V_{DC} control block is formed from a microcontroller, an R/2R digital analogue convertor, a voltage follower circuit with LM324, ACS712 current sensor and a 16 bit ADSA 1115 analogue digital convertor. Adaptivity has gained to system with microcontroller software. A 16x2 LCD display is used to print the P_{input}, P_{output}, PAE (%) and V_{DC} values generated by microcontroller. RF P_{input} and P_{output} of PA is read instantaneously with designed adaptive system. Also, V_{DC} is produced that will keep the difference of P_{output} and P_{input} at any constant gain values of the 5 dB and 10 dB. In addition to the gain control with the adaptive system, efficiency control is also performed to keep PAE a certain value.

Gain reduction behavior of PA was improved by 95% and P_{DC} was improved by 85% with designed adaptive system. Also PAE behavior of PA was increased by 50% with adaptive biasing with respect to fixed biasing. As a result, with the adaptive system, linear, wide dynamic range, low P_{DC} PA is obtained at 5.8 GHz.

***Keywords**: adaptive power amplifier, 5.8 GHz, DC conditions, gain control with microcontroller, P_{1dB}.*