

UYDU FAYDALI YÜKLERİNDE KULLANILAN GÜÇ KUVVETLENDİRİCİLERİ

Abdullah Faruk Çınar¹
Türksat A.Ş., Ankara

M.Mehmet Nefes²
Türksat A.Ş., ANKARA

ÖZET

Uydularda yer ile uzay arasındaki yol kaybı nedeniyle yüksek güç sağlayan kuvvetlendiricilerine ihtiyaç bulunmakta olup, bu ekipmanlar uyduların faydalı yük modülleri bünyesinde kullanılmaktadır. Yaygın olan tipleri, yürüyen dalga tüp kuvvetlendiricileri ve katı hal güç kuvvetlendiricileridir. Bu cihazlar, uydu faydalı yükünün içerisinde iletim hattının devamlılığının sağlanması ve sinyallerin güçlü bir şekilde iletilmesi adına kritik ekipmanlar olarak gösterilmektedir. TWTA'ler için geleneksel kullanıma karşılık MPM çözümü ile mevcut performansta ve fiziksel özelliklerde avantajlar sağlanırken, SSPA'lerde kullanılan materyalin değiştirilmesiyle ve geliştirilmesiyle birlikte- GaAs SSPA'dan GaN SSPA'ya- daha iyi RF performansı alınabilmektedir. Bu çalışmada bu kritik ekipmanların kütle, hacim, performans, verimlilik, maliyet ve güvenilirlik açısından tercih edilme sebepleri ele alınmıştır.

KISALTMALAR

TWTA: Yürüyen Dalga Tüp Kuvvetlendirici
SSPA: Katı Hal Güç Kuvvetlendirici
LCAMP: Doğrusal Kanal Kuvvetlendiricisi
RF: Radyo Frekansı
HPA: Yüksek Güç Kuvvetlendiricisi
EPC: Elektrik Güç Regülatörü
MPM: Mikrodalga Güç Modülü
GaAs: Galyum Arsenit
GaN: Galyum Nitrat
BER: Hatalı Bit Oranı- (Bit Error Rate)

GİRİŞ

Uydu faydalı yük zincirinde yer alan yüksek güç kuvvetlendiricileri alt sistemi, RF sinyalin yeryüzüne gönderilmesi için gerekli gücü sağlar. Yerden uyduya -çıkış yolu- ve uydudan yere iletilen sinyaller -iniş yolu- sırasında uydunun bulunduğu mesafeden oluşan kayıp, sinyallerin atmosfer seviyesinde ilerlemesinden oluşan kayıplar, kullanılan ekipmanların kayıplarından, polarizasyon eşleşmemesi gibi sebeplerden kaynaklı olarak büyük miktarda kayıplara maruz kalmaktadır [Maral, Bousquet,2009]. Bu kayıpların karşılanması için yüksek güç kuvvetlendirici alt sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mikrodalga güç kuvvetlendiricileri uydu bara gücünü (%80-90) en fazla tüketen ekipmanlardır ve buna karşılık faydalı yük için RF çıkış gücü sağlamaktadır. Yüksek güç tüketmesinden ve çıkış gücünün yüksek olmasından dolayı termal tasarıma doğrudan etki etmektedir. Aynı zamanda faydalı yükün kapasitesine ve maliyetine, kütle ve hacim olarak etki etmektedir. Fırlatıcı maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda kütle azaltılması ya da aynı kütle ile daha fazla kanala yüksek güç uygulanabilmesi uydu operatörleri için önemli bir kazanım

¹ Teknik Personel, Uydu Programları Direktörlüğü, E-posta: afcinar@turksat.com.tr

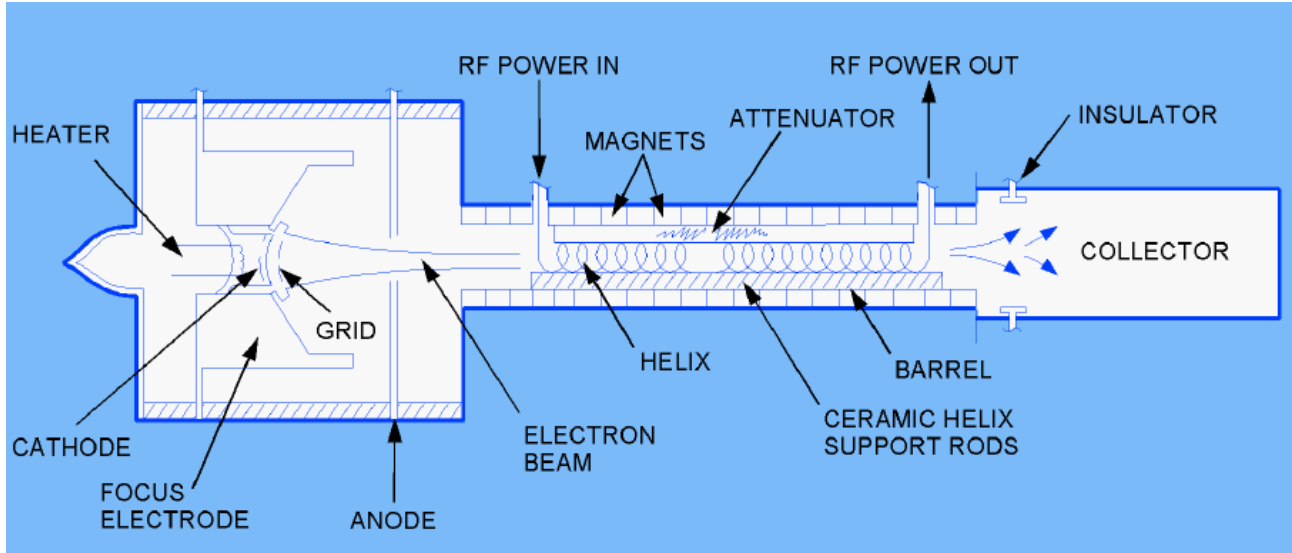
² Teknik Uzman, Uydu Programları Direktörlüğü E-posta: mmnefes@turksat.com.tr

olacaktır. Bu parametrelerin doğru ve etkili bir şekilde kullanılması ile sağlanan faydalı yük ve maliyet açısından kazanımlar elde edilmektedir [Doshi, Ghodagaonka, 2017].

Güç Kuvvetlendiricileri

Uydu faydalı yük zincirinde kullanılan yüksek güç kuvvetlendiricileri yürüyen dalga tüp kuvvetlendiricileri (TWTA) ve katı hal güç kuvvetlendiricileri (SSPA) olarak iki gruba ayrılabilir.

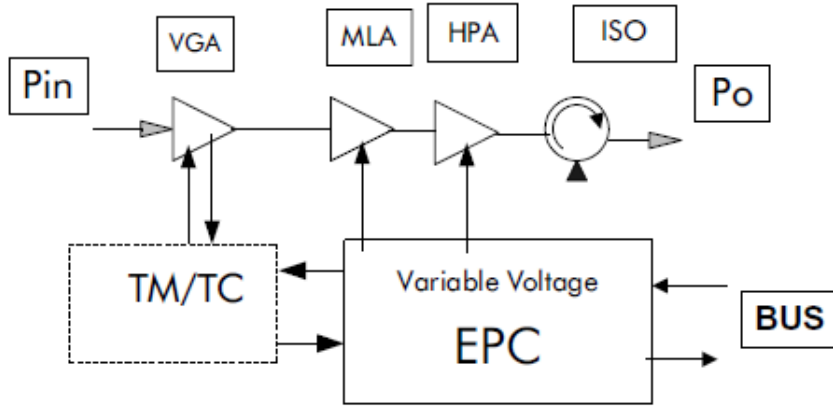
TWTA genel bağlamda 3 ana yapıdan oluşmaktadır. Şekil 1’de görüldüğü üzere soldan sağa doğru elektron tabancası, yavaş dalga devresi ve toplayıcılar olmak üç ana bölümden oluşmaktadır. Elektron tabancası ile iletilen elektronlar yavaş dalga devresi olan gövde kısmında RF sinyal ile senkronize bir şekilde hareket ederek kinetik enerjisini RF sinyaline aktarır ve yavaşlar. Enerji aktarımı ile sinyal güçlendirilir. Son olarak güçlendirme sonrasında dönüştürülemeyen elektronlar genellikle 3 ya da 4 aşamadan oluşan toplayıcıda kademeli olarak toplanarak dönüştürülemeyen enerji olarak atılır ya da geri kazandırılır. Elektron tabancası bölümünde bulunan katot çok yüksek voltaj seviyesine birkaç kV’ye kadar çıkmaktadır ve yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Burada oluşan voltaj ve akım oluşacak huzmenin verimliliğine etki etmektedir. Üretici firmalardan L3 tarafından belirtilen 30 yıl çalışma süresine sahip bir TWTA’nın 1000 dereceden daha düşük seviyede operasyonel çalışma aralığında olması belirtilmektedir. Ortalama sıcaklık aralığı 650-1000°C’dir. Katodun operasyonel sıcaklığa ulaşması için geçen süre operatör firmalar için istenmeyen bir durumdur ancak doğru sıcaklık seviyesine ulaşamaması durumunda hata oluşması muhtemeldir [L3 Communication Electron Tech,2007]. Oldukça kompleks bir yapıya sahip olan elektron tabancası, sıcaklık şok ve titreşim gibi çevresel faktörler de göz önünde tutularak katottan oluşabilecek ısı kayıpları minimum olacak şekilde tasarlanmalıdır [Srivastava,2016]. Yavaş dalga devresi yani gövde bölümünde RF giriş sinyali güçlendirilerek RF çıkış sinyali olarak iletilmektedir. Gövde kısmında kullanılan sarmal eğri haberleşme uydularında genel olarak kullanılmaktadır ve sinyal bu dalga üzerinde ilerlemektedir. Toplayıcı, kalan elektronların kinetik enerjisinin ısıya dönüşmesinden dolayı uydu termal yönetimi açısından en kritik ve önemli derecede kısıtlayıcı bölümü oluşturmaktadır.



Şekil 1: TWTA Genel Yapısı [L3 Communication Electron Tech,2007]

SSPA, genellikle orta ve yüksek kuvvetlendirici olarak 2 aşamalı dizayn edilen transistörlerden oluşan yapıdır. Elektrik güç regülatöründen beslenen bu yapı uyduya gelen RF sinyalin güçlendirilerek iletilmesinde rol almaktadır. Katı hal güç kuvvetlendiricileri de TWTA gibi EPC’den beslenmektedir. Katı hal güçlendiricileri, düşük gürültü kuvvetlendiricilerinde (LNA), aktif faz dizili antenler ile birlikte de kullanılmaktadır. Galyum Nitrat teknolojisiyle birlikte yüksek verimli uydular, navigasyon uyduları ya da yüksek frekans ihtiyacı olan derin uydu araştırmalarında daha çok kullanılması teşvik edilmektedir. [Davies,2017] Aynı zamanda sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu, doğrusalılığı, düşük kütle ve hacime sahip olması, GaN ile birlikte daha yüksek bant

genişliğine ulaşması ve güç açısından verimliliğinin yüksek seviyelere çıkması tercih edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2: Basitleştirilmiş SSPA Yapısı [Darbandi, Zoyo, Touchais, Butel, 2008]

Güç kuvvetlendiricileri, uydu faydalı yükleri için oldukça kritik bir öneme sahiptir. Herhangi bir bozukluk durumunda görevde başarısızlık olması muhtemeldir. Bu doğrultuda seçimler yapılırken, fırlatma aşamasında ve uzay ortamındaki sert koşullara karşı dayanıklı olmalıdır. Farklı frekans seviyelerinde titreşimlere, şok etkilere ve sıcaklık gibi çevresel faktörler kuvvetlendiriciler için önemli bir kısıttır. Bu yüzden kompakt bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Faydalı yüklerden beklenen yüksek talebi karşılamak için yüksek çıkış gücüne sahip olması ve geniş bant aralığında çalışabiliyor olması beklenmektedir.

Tüpler, çalıştığı frekans bant aralığına bağlı olarak yüksek voltaj uygulanarak birkaç yüz watt seviyesinde çıkış gücü sağlarken, katı hal güç kuvvetlendiricileri daha düşük voltaj seviyesinde yüksek güç sağlayabilmektedir. Çalıştığı frekans bandına göre farklı performanslara sahip olan bu ekipmanlarda boyut, kütle ve performans açısından geliştirilmek amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. 2013 Boeing'in TWTA ve SSPA'ler arasında güvenilirlik kıyaslamaları kapsamında yapmış olduğu incelemeler sonucunda TWTA'lerin ağırlıklı olarak C, Ku, Ka bantta, SSPA'lerin L, S, C, Q ve V bantlarında tercih edildiği ortaya çıkmaktadır [Lohmeyer, Anicheto, Cahoy, 2015]. Fırlatıcı maliyetlerine göre uydu seviyesinde 1 kg kütle tasarrufunun 55k € olduğu belirtilirken, sistem maliyet yaklaşımına göre formül 1 ve 2 de kullanılacak ekipmanların çıkış gücü yaklaşımına göre değerlendirme yapılabilir [Bousquet,2019; Gunter,2001].

$$C_{(k\$)} = 10 * \left(\frac{P_{HPA(SSPA)}}{10} \right)^{0.4} \quad (1)$$

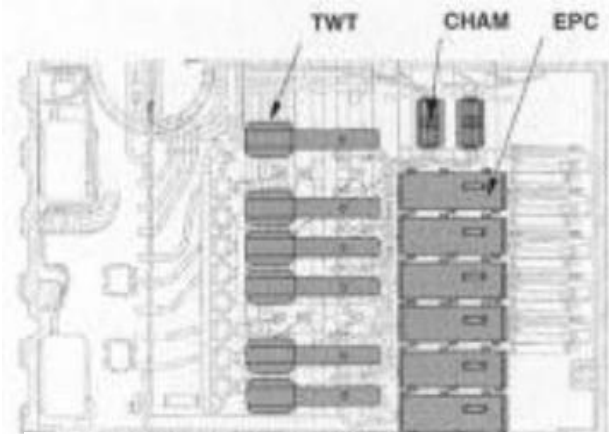
$$C_{(k\$)} = 100 * \left(\frac{P_{HPA(TWT)}}{1000} \right)^{0.4} \quad (2)$$

Fiziksel özellikler bağlamında TWTA ve SSPA için yapılacak kıyaslamada kütle ve hacim özellikleri öne çıkmaktadır. SSPA, TWTA göre daha düşük hacim ve kütleye sahiptir. TWTA kütlesi 700 gram ile 3500 gram arasında değişirken SSPA ortalama 1000-1500 gram civarındadır. Kütle mekanik ve termal tasarım limitlerine göre değişebilmektedir. TWTA alt sistemi, TWTA giren sinyalin seviyesini ayarlayan kanal kuvvetlendiricisi (CAMP) ve tercihen düzeltici devre, TWTA alt sistemine DC güç sağlayan elektrik güç dağıtım ünitesi ve RF çıkış gücü sağlayan TWTA'lerden oluşmaktadır. Kapasite ihtiyacının artması ve daha fazla faydalı yük ihtiyacı, bu sistemlerin daha kompakt bir yapıda ve maksimum verimlilikte kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Mikrodalga güç modülleri (MPM) çözümü ile aynı çıkış gücünü geleneksel kullanım metoduna kıyasla daha küçük hacimle sağlama imkânı sunmaktadır. Bu çözüm için daha düşük kazanca sahip kısa uzunlukta

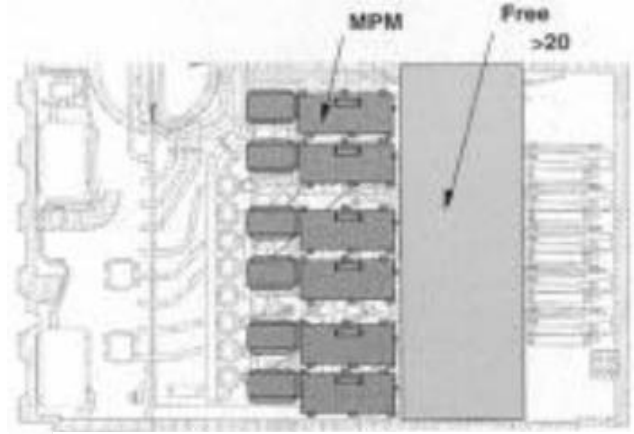
TWTA kullanılmaktadır ancak çıkış gücü açısından değişim olmamaktadır. Geleneksel ve MPM çözümü ile sunulan kazanç ortalama %20 daha fazla kullanılacak alan sağlaması şekil 3 ve 4 de gösterilmektedir. Sistem ve maliyet kazancı için farklı MPM çözümleri de sunulmaktadır. “Single MPM”, LCAMP, EPC ve TWTA'den oluşurken “Dual MPM” 2 adet LCAMP, 1 “Dual EPC” ve 2 TWTA'den oluşmaktadır. “Dual EPC” ile 2 TWTA'ye de DC güç sağlanmaktadır. Dual EPC aynı anda 2 ayrı çıkıştan 2 TWTA'yi beslemesinden dolayı güvenilirlik açısından tek EPC kullanımına göre daha zayıftır ancak “dual EPC” de meydana gelen bozulmalar genellikle tek TWTA'in zarar görmesine sebep olması ile sonuçlanmaktadır [Braun,2012]. Yapılan bir çalışmada 170W Ka bant ve 2x170W Ka bant MPM'lerin karşılaştırılması yapılmıştır ve “Dual MPM” kullanımının yüzde 50-60 oranında kütle ve hacim olarak kazanım sağladığı belirtilmiştir ve karşılaştırılması tablo 1 de belirtilmiştir. MPM'lerin haberleşme duvarına montajı ise dikey pozisyonda yapılması hacim olarak kazanımı arttırmamasından dolayı desteklenmektedir [Will,2016; Bijeev, Ghosh, Motta, 2015].

Tablo 1 : Single MPM ve Dual MPM Kütle ve Hacim Karşılaştırılması

Single MPM	Dual MPM
<1900 gram	2800 gram
205x85x110 mm	295x95x110 mm



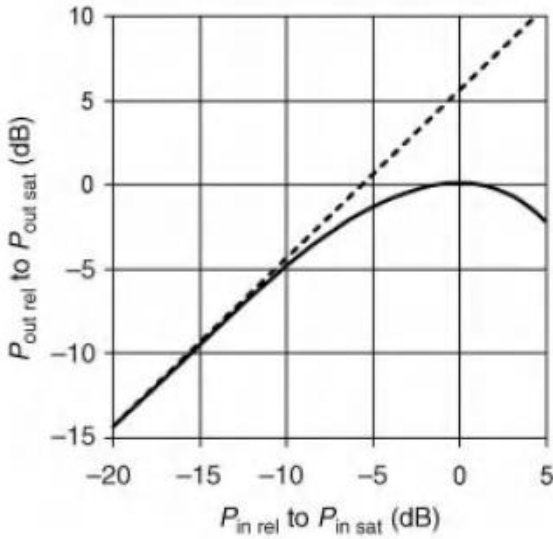
Şekil 3: Geleneksel TWTA Kullanımı [Bijeev, Ghosh, Motta,2015]



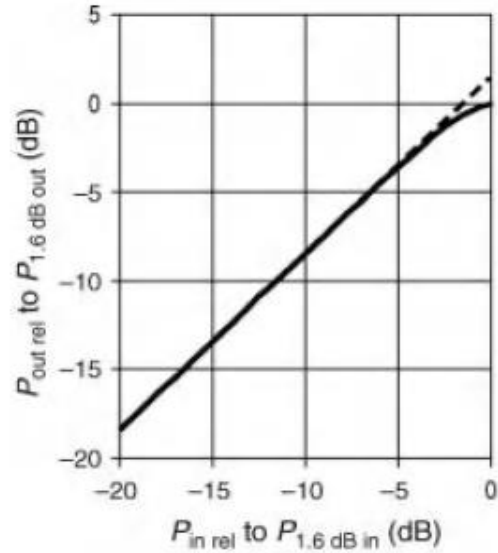
Şekil 4: MPM Çözümü [Bijeev, Ghosh, Motta,2015]

Uzay ortamındaki aşırı sıcaklık değişimlerine (2,76K, 5600K) karşı uydu faydalı yük ekipmanlarının güvenli bir şekilde çalışması için optimum sıcaklıkta (-10°C, +55°C) tutulmaları için aktif ve pasif sıcaklık koruma metotları kullanılmaktadır. SSPA performansını ve verimliliğini düşüren en temel sınırlamalardan birisi transistör kanal sıcaklığıdır. 15 yıl kullanım süresi için GaAs SSPA'ler için 110°C ve GaN SSPA'ler için 160°C'dir. Ancak en kötü senaryoya göre tasarlanan termal sistemlerde, ekipmanın yerleştirildiği alt levhanın sıcaklığı bozunum ve ömrünü tüketmesinden dolayı her bir sene için 2-3 derece artmaktadır. Bu sebeple kanal sıcaklığının sabit kalması için güç kaybının azaltılması gerekmektedir ve dolayısı ile performans azaltmamız gerekmektedir. Bu durumda tek bir SSPA olarak kullanılmasından ziyade 2 SSPA'in bölüştürücü ve birleştirici konfigürasyon ile kullanılması güç kaybının azaltılmasını sağlamaktadır [Doshi, Ghodgaonker,2018]. Bir diğer kuvvetlendirici olan TWTA için ise toplayıcı tasarımı ve termal yönetim çok önemlidir. Başarısız bir termal tasarım sonucunda sistemin S- parametrelerinde bozulma gerçekleşmesine sebebiyet verebilir. Toplayıcı yapısından bozunumlar oluşması durumunda ise TWT performansını bozulmalar gerçekleşmesine sebep olur. Yapılan bir çalışmada 140W çıkış gücüne sahip bir TWT'nin toplayıcı kısmında 207 °C'lik maksimum sıcaklığa ulaşabildiği simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarının sonucunda yaklaşık 207 dereceye ulaştığını ancak toplayıcı üzerinden ölçülen maksimum sıcaklığı 62 derece olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Bu ortam sıcaklığına ancak 60 derecelik bir etki oluşturacağını göstermektedir. [Mistry, Chakraborty, Arya, Latha, Choudry, Gosh, 2018]

Kuvvetlendiricilerin sağlayabildiği maksimum çıkış gücü çoğunlukla doyum noktası olarak adlandırılmaktadır. Kuvvetlendiriciler doyum noktasına kadar genel olarak lineer davranış göstermekte, doyum noktası sonrasında ise giriş gücü artışı olmasına karşılık, çıkış gücünde bir değişiklik olmamakta hatta daha da yüksek giriş gücü seviyelerinde bozulmalar ve çıkış gücünde azalmalar meydana gelmektedir. Bir başka deyişle; doyum noktasının ötesindeki giriş ve çıkış gücü aralığı lineer olmayan davranışa sahiptir. Güç kuvvetlendiricilerinde verimlilik, sağlanan DC güce karşılık RF giriş sinyalinin ne kadar kuvvetlendirebildiğini gösteren önemli bir parametredir. Şekil 5 ve 6'da çalışma karakteristiği verilen TWTA ve SSPA'ler doyum noktasına ulaşana kadar genel olarak lineer bir yapıda çalışırken, lineer olmayan davranışa geçmesiyle yüksek güç kuvvetlendiricilerinde, bağlantının kalitesini düşürürken modülasyonlar arası bozulmaya sebebiyet vererek sinyallerin girişim seviyesini artırmaktadır. Lineer olmama durumu, farklı düzeltici devre metotları kullanarak lineer davranışın seviyesini doyum noktasına daha yakın bölgeye çekerek performansın artması sağlanabilmektedir. SSPA'lerin lineer bölgede çalışması doyum noktasına daha yakın bölgeye kadar sürmesi daha doğrusal bir karakteristiğe sahip olduğunu göstermektedir [Braun 2012; Ayala, Gonzalez, 2015; Bousquet, 2019].

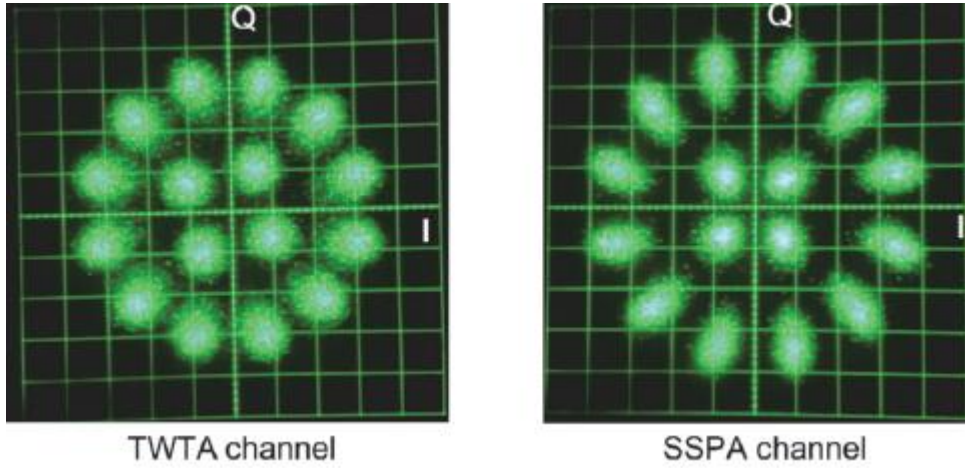


Şekil 5: TWTA Çalışma Karakteristiği



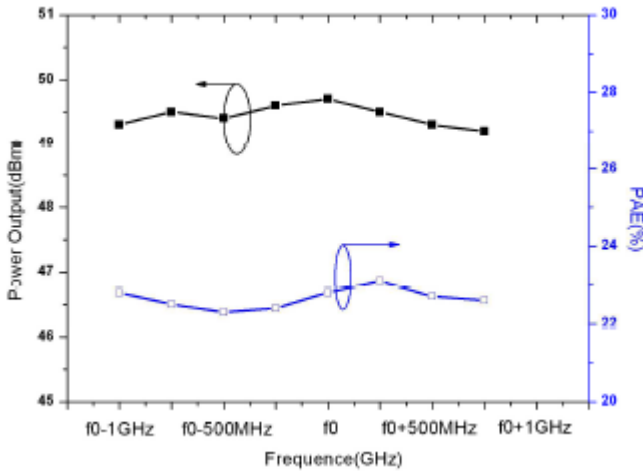
Şekil 6: SSPA Çalışma Karakteristiği

Bir diğer önemli performans parametresi SSPA ve TWTA arasındaki sebep olduğu faz kaymasıdır. TWTA'lerde SSPA'lere göre nispeten daha yüksek faz kayması olurken operasyonel bölgede SSPA'de daha düşük seviyelerdedir. TWTA doyum noktasında yaklaşık 30-40 derece arasında bir kaymaya sebep olurken bu değer SSPA'de 10-15 derece arasında değişmektedir. Faz kaymasının yüksek olması hata bulma performansını (BER) artırmaktadır. GaN SSPA'lerin dijital haberleşme uydularında kullanılmasına yönelik yapılan bir çalışmada, 16APSK modülasyon takımıyıldızı grafiğindeki faz kaymasının sonuçlarına göre SSPA kullanımında kaymanın daha düşük olduğu da gözlemlenebilmektedir. [Kojima, Nagasaka, Shinjo, Shimosawa, Shinjo, Sujikai, Torii, Utsumi, Yamanaka, 2019]

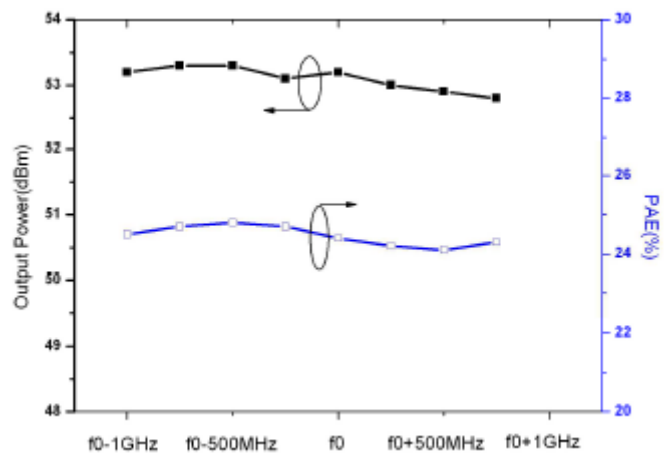


Şekil 7: 16 APSK Takım Yıldızı Gösterimi

SSPA, GaAs ve GaN yarıiletken HEMPT (High Electron Mobility Transistor)'lerden oluşan katı hal güç kuvvetlendiricileridir. TWTA'lere göre düşük besleme 5-10 V ile yüksek güç ihtiyacını karşılamaktadır ancak çıkış gücü TWTA kadar yüksek değildir. Yüksek doğrusallık sağlaması, kütlelerinin az olması, kompakt yapısıyla daha az hacim kaplaması ve maliyet olarak daha ucuz olması sebebiyle gelecekte TWTA'lerin yerini SSPA'lerin alması beklenmektedir.



Şekil 8: Ku Bant GaAs SSPA Ölçümleri



Şekil 9: GaN SSPA Ölçümleri

GaN yarı iletken kullanılan SSPA'lerin, GaAs SSPA'lere göre yarı iletken materyalin bant genişliğinin daha büyük olmasından dolayı yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, termal açıdan daha dayanıklı olması, GaN SSPA'lerin tercih edilmesini sağlamıştır. Yayınlanan bir çalışmaya göre, Ku bantta aynı mimariye sahip GaAs ve GaN SSPA'lerin çıkış gücü ve verimlilik seviyelerinin karşılaştırılmasıyla grafik 8 ve 9'te belirtildiği üzere GaN SSPA 3 dB daha yüksek çıkış gücüne ve daha yüksek verimliliğe sahip olduğu test edilmiştir [Haifeng,2013].

GaN, GaAs karakteristikleri incelendiğinde GaN daha doğrusal yapıya sahiptir. Lineer bir yapıya sahip olmaması, düzeltici devre kullanarak elde edeceğimiz verimin artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple GaAs transistörlerden düzeltici devre ile kullanımı mevcutken GaN SSPA'lerde düzeltici kullanımının mevcut verimliliğine yüksek bir katkı sağlayacağı söylenemez. RF yarı iletken materyallerinin seçiminde GaN'in, GaAs'e ya da Silisyuma göre geniş bant aralığına sahip olmasının sonucunda 10 kat daha yüksek dayanma gerilimine sahiptir. Bunun sonucunda daha yüksek voltaj aralığında çalışabilmesi voltaj dönüştürme oranını düşürmesine olanak

sağlamıştır. Aynı zamanda yüksek bant aralığına sahip materyaller daha yüksek seviyelerdeki sıcaklıklarda çalışabilmektedir. [Kühn, 2010]

GaN SSPA'lerin yeni bir teknoloji olması güvenilirliğin zayıf olmasına sebep olmaktadır. GaN güvenilirliğinin artırılması için düşük, orta ve yüksek güç bölümlerinden düşük ve orta güç bölümlerinin GaAs transistörlerden tasarlanması ve yüksek güç bölümünde ise GaN transistörlerinin yedeklilik esas alınarak tasarlanması önerilmektedir. [Lohmeyer, Aniceto, Cahoy, 2015]

SONUÇ

Yapılan bu çalışmada uydu güç kuvvetlendirici ekipmanları için kütle, hacim, performans, güvenilirlik ve maliyet açısından literatür derlemesi yapılmıştır. Yeni nesil çözüm metotlarının ve ekipmanların tercih gerekçelerine dair değerlendirmelere de yer verilmiştir. Güç kuvvetlendirici ekipmanın geliştirilmesi, tasarımı ve kullanımı sistem ihtiyaçları ve performans gereksinimlerine göre farklılık gösterebilmektedir.

Kaynaklar

- A.Darbandi, M.Zoyo, J.Y Touchais, Y.Butel, 2008, *Flexible S-band SSPA for Space Application*, Toulouse France
- Bijeev NV, S.Ghosh, R.N. Motta, 2015, *Design & Development of Spaceborne Ku-Band MPM*, IEEE Explore Conference on Vacuum Electronics Devices and Applications VEDAS
- Cheng Haifeng, 2013, *Comparison Between Ku-Band GaAs SSPA and GaN SSPA with a Same Architecture*, Nanjing Electronic Device Inst., Chine
- Chirag Mistry, Subhradeep Chakraborty, Suneete Arya, Mercy Latha, Amitova Roy Choudry, Sanjay Kumar Ghosh, 2018, *A Study of Thermal Behaviour of Travelling Wave Tube*, India, 2018
- Dr. Allen Kartz, 2002, *TWTA Linearization*, Linearizer Technology Inc.
- Dr. Günter Kornfeld, 2002 *From History to Future of Satellite TWT Amplifiers*, Thales Electron Devices GmbH
- H. Sumi, H. Takahashi, T. Soejima, R. Mochizuki, 2009, *Ku-Band, 120-W Power Amplifier Using Gallium Nitride FETs*, Microwave Symposium Digest (MTT), Japan
- <https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/d7/asset/document/SSPA-2012.pdf>,
- Iain Davies, 2017, *Technology Challenges in the Development of Microwave Equipment for Future Space Systems*, RF Equipment & Technology Section, ESA
- Jutta kühn, 2010, *AlGaIn/GaN-HEMPT Power Amplifiers with Optimized Power Added Efficiency for X Band Applications*, Freiburg Deutschland
- Karl Will, 2016, *High-Power Ku- and Ka-Band MPMs for Satellite Communications*, Tesat Spacecom, Germany
- Kojima, Nagasaka, Shinjo, Shimozawa, Shinjo, Sujikai, Torii, Utsumi, Yamanaka, 2019, *120-W Ku-GaN SSPA with Diode Linearizer for Future Broadcasting Satellites*, IEICE Trans. Electron- 10 October 2019
- M. R. Ayala, E.Alejandro, A. Gonzalez, 2005, *N-Carrier Frequency Domain Calculation of Intermodulation in Satellite HPA*, 5th WSEAS Int. Conf. On Simulation, Modelling and Optimization, Greece, 17-19 August
- Maral G., Bousquet M. 2009, *Satellite Communications Systems*, 5th Edition
- Michel Bousquet, 2019 *INP -Enseith SATCOM Systems Advanced Master Ders Notları*
- R. J. Doshi, Deepak Ghodgaonkar, 2018, *Adaptive Thermal Management Technique to Improve the Efficiency of SSPA for Geo-Synchronous Satellite*, India, 2018
- R.J Doshi, Deepak Ghodagaonka, 2017,, *Reliability Improvement Technique of GaN SSPA For GEO Synchronous Satellites*, International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)
- T.M. Braun, 2012, *Satellite Communications Payload and System*
- Vishnu Srivastava, 2016, *Minimization of Micro Discharge in Space TWT for Long Life Satellite Communication*, International Journal of Electrical and Electronic Science

W.Q Lohmeyer, R.J. Aniceto, K.L. Cahoy, 2015, *Communication Satellite Power Amplifiers, Current and Future SSPA and TWTA Technologies*, International Journal of Satellite Communications and Networking