

HABERLEŞME UYDUSU AKTARICISI ÇOK GİRİŞLİ GÜÇ YÜKSELTEÇ ALT SİSTEMİ

Arif Armağan Gözütok^{1,*} ve Mustafa Mehmet Nefes²
TÜRKSAT A.Ş., Ankara

Selman Demirel³ ve Hasan Hüseyin Ertok⁴
TÜRKSAT A.Ş., Ankara

ÖZET

Haberleşme uydusu teknolojileri günümüzde oldukça hızlı gelişen dinamik bir seyir halindedir. Değişen görev istekleri üzerine geleneksel ve operasyonel olan bent-pipe faydalı yük alt sistemlerinden ziyade daha esnek yapıda, uçuş esnasında değişken görev gereksinimlerini karşılayabilecek faydalı yük sistemlerinin tasarım ve üretimine olan ilgi günden güne artmaktadır. Bununla birlikte uydu haberleşmesi pazarında eğilim uçuş esnasında değiştirilebilen faydalı yük mimarileri yönüne doğru kaymaktadır. Uydu operasyonunda esneklik ve güncellenebilirlik konusu başlıca frekans planı esnekliği, güç yönetimi esnekliği ve kapsama alanı esnekliği gibi kavramlar altında farklı teknolojiler ve yöntemler çerçevesinde incelenmektedir. Uydu sistemlerinde geleneksel ve yenilikçi esnek tasarımlar karşılaştırıldığında güç esnekliği alanında yetersizlikler bulunmaktadır, bunun başlıca sebebi tek kanal yükselteçli aktarıcı mimarisidir. Gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı RF güç iletimi esnekliğinin başlıca çıkış noktası olup esnek haberleşme uydusu aktarıcısı güçlendirme sisteminin temeli olan çok girişli yükselteç alt sisteminin kavramsal tasarımının yapılan modelleme benzetimleri ile irdelenmesidir. Elde edilen sonuçlardan gözlemlendiği üzere bu görüşe göre geliştirilen sinyal güçlendirme aşaması sistemleri tek kanallı aktarıcılara göre daha yüksek kanal çıkış gücü seviyeleri sağlarken aynı zamanda da sistemdeki diğer aktarıcı hatlarındaki kullanılmayan gücün gerekli kanallara ve kapsama alanlarına eniyileşim ile dağıtılması / paylaştırılması konusunda da esneklik fonksiyonunu başarıyla sağladığı gözlemlenmiştir.

SİMGELER

MPA	=	Multi-port Amplifier
HTS	=	High Throughput Satellite
EIRP	=	Effective Isotropic Radiated Power
BFN	=	Beam-forming Network
TOI	=	Third Order Intercept Point
TWTA	=	Travelling wave tube amplifier

GİRİŞ

Haberleşme uyduları genel bağlamda fırlatıldıktan sonra görevlerini gerçekleştirebilecekleri ömür öngörülerek tasarlanmaktadır, bu değer hemen hemen standart olmakla birlikte minimum 15 yıllık bir süredir. Bu süre zarfında telekomünikasyon marketinin gelişiminden doğan gerek alt yapı, gerek servis, gerekse uydu operatörleri tarafından görev fazında uygulanan istekler değişkenlik gösterebilmektedir. Faydalı yük (transponder veya aktarıcı) performans gereksinimleri (Effective

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

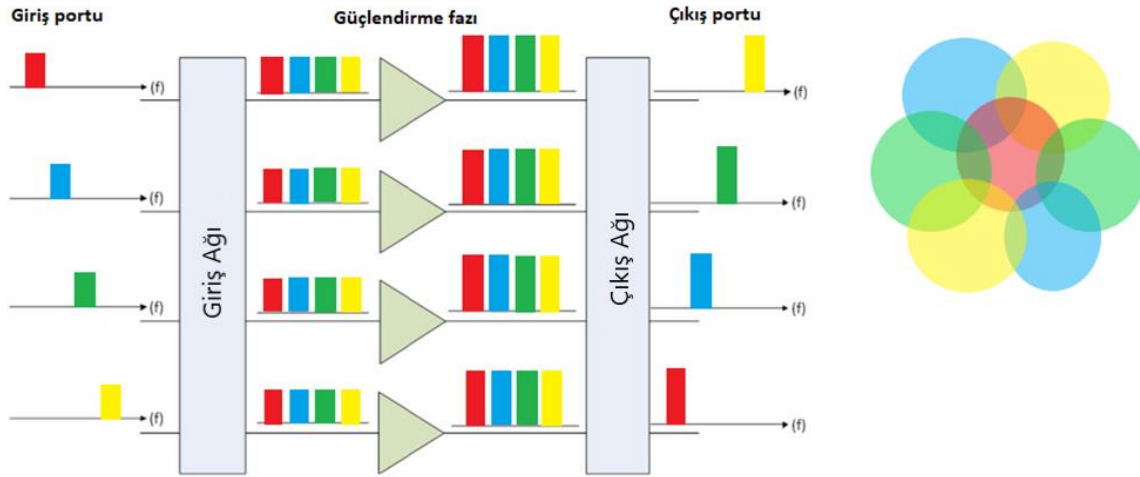
² Teknik Uzman, Uydu Programları Direktörlüğü, E-posta: mnefes@turksat.com.tr

³ Direktör, Uydu Programları Direktörlüğü, E-posta: sdemirel@turksat.com.tr

⁴ Genel Müdür Yardımcısı, E-posta: hertok@turksat.com.tr

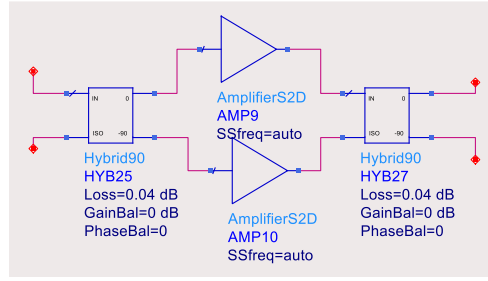
Isotropic Radiated Power, G/T, frekans planı değiştirebilme becerisi, servis kapsama alanı vb.) frekans planında değişiklik, kapsama alanında değiştirilebilirlik ve sinyal güçlendirme aşamasında uyumlu güç dağıtımı çözümlerini beraberinde getirebilmektedir. Frekans planı esnekliği on-board işlemcilerle analog sinyalin dijitalle dönüştürülerek kanalların farklı taşıyıcı frekanslara çevrimi ve farklı kodlama teknikleri ile veri iletim hızının, bant genişliğinin, taşıyıcı frekansın istenilen şekilde elde edilmesine dayanmaktadır, bu kavram servis ağ geçitlerinden (gateway) kullanıcılara ve uyduya aktarılan veri trafiğini oldukça azaltmakla birlikte kapasiteye bağlı olarak ağ geçit sayısını da oldukça düşürmektedir, ek olarak işlem yer istasyonunda değil uyduda gerçekleştirildiğinden servisin gecikme süresi de yarıya inmektedir. Kapsama alanındaki değiştirilebilirlik faz dizilimli (phased array) anten alt sistemi, aktif anten mimarisi ve beam-forming network (BFN) kavramının uydu üzerinde anten sistem seviyesinde gerçekleştirilmesi ile sağlanmaktadır, bu sayede faz kaydırma yöntemi ile istenilen doğrultuda, istenilen kapsama alanı içerisinde sinyal alma-gönderme kabiliyeti elde edilmektedir. Güçlendirme esnekliği fikrinde ise temelde sinyalin sistemde bulunan kanal mimarisine göre uygun güçte dağıtılmasına ortam sağlayan çok girişli yükselteç (Multiport amplifier – MPA) alt sistemi bulunmaktadır. Sistem kendini ilk olarak adaptif çok hüzmeli uydu kavramı için demetler arasındaki trafiğe göre gücün daha paylaşımlı olarak dağıtılması fikri ile ortaya çıkmıştır [Egami, 1989], benzer bir uygulamanın temel kavramsal tasarımı 1974 yılında Butler matris aktarıcısı olarak Butler tarafından sunulmuştur [Butler, 1974]. MPA'nın uydulardaki anahtar işlevi esnek güç havuzu şeklindeki davranışdır.

MPA sistemi yüksek kapasiteli uydulardaki (High Throughput Satellite – HTS) spot demet yapısında istenilen kapsama alanına gerekli görüldüğü takdirde sistemdeki kullanılmayan kanal gücünün aktarılacak uydunun servis performansının artışı sağlamaktadır. Örneğin; bir frekans tekrarlı spot demet kapsamasındaki az sayıda kullanıcı için tam kapasite kullanılmayan kanal bant genişliğine atanan hat gücünün bir kısmı diğer renklere (diğer kapsama alanlarına, farklı frekans ve polarizasyon olasılıkları olabilir) bu sistem sayesinde aktarılabilir, örnek biraz daha servis bazında uyarlanacak olursa uçuş trafiğinin yoğun olduğu hava yolu hatlarına düşen kapsama alanlarındaki güç gereksiniminin demetler arası eniyileşimi ve gücün optimum ölçüde dağıtımı aynı şekilde bu sistem ile sağlanabilir, Şekil 1'de örnek bir MPA sistemi blok diyagramı ve ilişkili spot demetlerinin olası konfigürasyonu gösterilmektedir. HTS uydu sistemleri haberleşme arabirimleri çift yönlü olmakla birlikte genellikle yıldız (star) veya örgü (mesh) ağ topolojisindedirler ve haberleşme hattı ağ geçidinden kullanıcılara (forward link) giden ve kullanıcılardan ağ geçidine (return link) gelen veri iletimi ile tanımlanmaktadır. Bu türde sistemler uzay segmentinde çok hüzmeli sistemler ile veri iletim kapasitesini yükseltme görevini yukarıda değinildiği gibi frekans bandının farklı renk ve polarizasyonlarda yeniden kullanımı ile sağlamaktadır, bunu yaparken aynı zamanda spot genişlikleri oldukça dar olduğundan RF güç daha dar bir alana düşeceğinden sistemin anten kazanç parametresi daha yüksektir. Uydu anteni mertebesinde frekans planında kullanılan renk ifadeleri aynı frekans bandı ve polarizasyonu ortak olarak kullanabilen bitişik olmayan spot kümeleri olarak belirtilmektedir. Tipik olarak yüksek hızlı veri haberleşmesi için kullanılan Ka-band için spot genişlikleri 0.5° ile 1° arasındadır ve MPA kullanımı kapasitenin bölgeler, demetler, kümeler arasında ya da bölge içinde dağıtılmasını sağlamaktadır. Bir diğer MPA uygulamasına örnek olarak GEO yörünge için kuzey kutup dairesi kapsama alanlarında meydana gelen atmosferik bastırımın ve uzay iletim bastırımının kuzey demetlerine daha yüksek güç paylaştırılması ile giderilmesi söz konusudur. Bu konsept sonucunda Yeryüzü üzerinde her demete eşit güç paylaşımı yapılabilmekte ve kuzey enlemlerinde HTS servis kalitesinden ödün verilmesinin önüne geçilebilmektedir. Kavramsal olarak MPA sistemi giren tüm sinyalleri RF hatlar boyunca eşit oranlarda bölerek karıştırmak ve aynı kazançla güçlendirdikten sonra birleştirmekle görevlidir. Tek bir sinyalin bütün yükselteçler tarafından güçlendirilmesi, birkaç sinyalin aynı oranda güçlendirilmesi ya da bu durumlar arasındaki her olasılık da mümkündür. En temel kısıtlayıcı parametre tüm MPA giriş sinyallerinin farklı frekans kanallarında bulunması gereklidir. MPA sistemi kavramsal olarak tek bir reflektör anten besleyicisine güç sağlayabilecekken birkaç faz dizili anten elementinin meydana getirdiği bir spot demeti de besleyebilecek konfigürasyonlarda tasarlanabilmektedir. Teknolojik sınırlar sebebiyle uydunun faydalı yük sistemi ile sinyal güçlendirme fazında yükselteçler tarafından harcanan kısıtlı gücün optimize şekilde iletim kalitesinden ödün vermeden kullanılması için MPA mimarisi uygulanması kaçınılmaz bir sonuçtur. Bu nedenle yükselteçler bazında yürüyen dalga tüplerinin operasyon noktalarının (output back-off – OBO) DC güç tüketimi optimizasyonu ve güç verimi için dikkatlice seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 1: Çok girişli yükselteç blok diyagramı ve örnek 4-renkli spot demet konfigürasyonu.

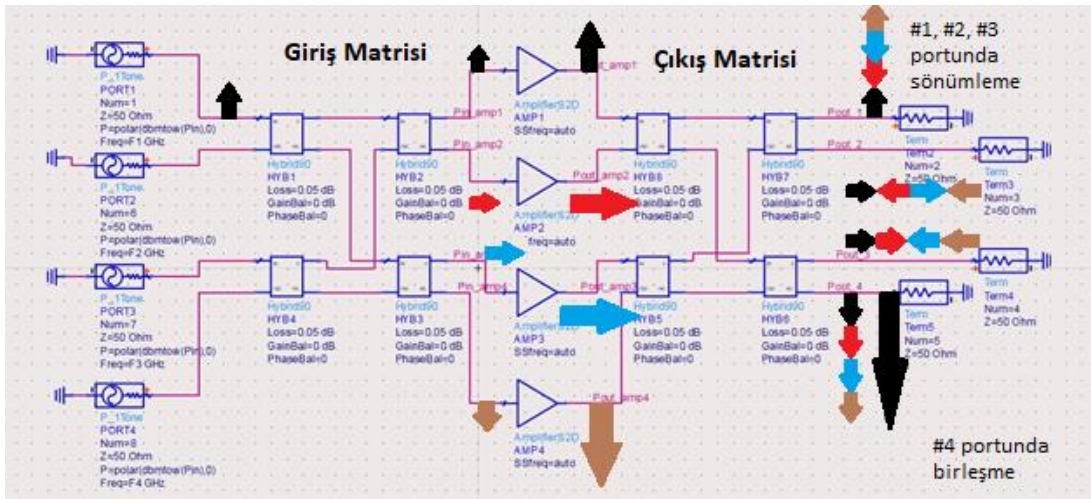
MPA yapısı temelde $N \times N$ adet (N bir tam sayıdır ve 2'nin bir kuvveti olarak ifade edilir, $N = 2^A$) giriş ve çıkışa sahip çok girişli yükselteç mimarisidir, N adet yükseltecin giriş ve çıkış hibrid kuplör ağı ile birleştirilmesinden meydana gelmektedir. En basit 2 girişli aktarıcı mimarisi operasyonel bakımdan dengeli yükselteç mimarisine dayanmaktadır [Engelbrecht, 1965], Şekil 2'de dengeli yükselteç diyagramı görülmektedir. Dengeli yükselteç temel bağlamda iki adet girişe ve iki adet çıkışa sahip iki adet birbirine eşlenik (eşit kazanç ve doğrusallığa sahip) yükseltecin paralel olarak girişte ve çıkışta 90° 3 dB hibrid kuplörler ile bölünerek birleştirilmesinden oluşmaktadır. Bu tasarımın amacı aktarıcı sistemindeki gürültü figürünün düşürülmesi, ek olarak yükselteçlerin sistem bazında daha yüksek giriş gücü seviyesinde saturasyon olayına maruz kalması (daha fazla yükselteç doğrusal işletim alanı) ve her iki yükseltecin çıkış gücünün birleştirilmesi ile yüksek sinyal çıkış seviyesi elde etmektir. Sistem geçmişte televizyon yayını uydularının iniş hattındaki mevcut teknoloji ile karşılanamayan EIRP gücü gereksinimlerinin karşılanabilmesi için uygulanmıştır ve tek hatta çift yükselteç bulundurularak daha yüksek iniş gücü ($75 \text{ W} \rightarrow 150 \text{ W} \Rightarrow +3 \text{ dBW}$) elde edilmesi için kullanılmıştır. Güncel durumda spektrum esnekliği gereği yüksek bant genişliği gerektiren servislerde aynı zamanda iniş hattındaki EIRP gereksiniminin de karşılanması gereken yüksek kapasiteli uydu sistemlerinin teknolojik olarak evrilmesi sonucunda dengeli yükselteç tasarımı tekrar kendini göstermiştir. Sistemde taşıyıcı giriş sinyalinin gücü 90° hibrid kuplör ile iki ayrı port çıkışında yarıya düşürülmektedir, çıkış portlarından giriş portuna göre 3 desibel daha düşük güçle çıkan sinyal güçlendirme aşamasına geldiğinde yükseltecin daha doğrusal operasyon bölgelerinde taşıyıcı sinyalin güçlendirilmesinin ardından sinyal tekrar 90° hibrid kuplör ile birleştirilmektedir. İki sinyal hibridin çıkış portlarından 0° ve 90° faz farkıyla çıkmaktadır. Sonuç olarak sistemde kullanılan fazladan pasif RF ekipmanlar (90° hibrid kuplör ve ek bağlantılar) sebebi ile sistemin gürültü sıcaklığı ve figürü artmaktadır fakat elde edilen üçüncü mertebeden kesme noktası (Third order intercept point - TOI) artmakta, daha geç saturasyona erişilmekte ve giriş sinyalinin yükselteçlerin doğrusal olan operasyon bölgelerinde güçlendirilmeleri sağlanmaktadır, bu sayede de tüplerde çok kanallı güçlendirilme işleminden maruz kalınan intermodülasyon enterferans seviyeleri düşmektedir. N sayısı arttıkça taşıyıcı sinyal yükselteçlere ($A \times 3$) dB daha düşük seviyede iletilmektedir. Teorik olarak sistemin çıkışında elde edilen çıkış gücü ise geleneksel tek yükselteç hattı çıkış gücüne göre ($A \times 3$) dB daha yüksek elde edilmektedir. MPA giriş matris ağı ve çıkış matrisi ağı birbirine eşlenik olmakla birlikte Butler Matrisi'nin faz kaydırmaz şekilde uygulanmasına eşdeğerdir [Butler, 1961]. Butler matris ağının bu sistemdeki fonksiyonu giriş sinyalinin N adet eşit ortogonal (90° faz farkı ile) çıkış sinyaline bölmektir ve bu işlem hibrid kuplör ile analog radix-2 DFT (Discrete Fourier Transform) operasyonu ile gerçekleştirilmektedir [Venkateswaran, 2016]. MPA sistemi aktif emisyon yapan faz dizimli antenler ile kullanıldığında uydunun sinyal zincirinde giriş aşamasına operasyonel esneklik kazandırma işleminin daha az karmaşık yapıda olmasını sağlamaktadır, bu durumu en destekleyici etmen ise kanallaştırma aşamasının daha esnek yapılabilmesinin MPA ile mümkün kılınmasıdır. Aynı zamanda bant genişliğini ve diğer uydu kaynaklarının daha verimli kullanılması kazanımı da elde edilmektedir ve bunun da en büyük getirisi harcanan güç / kullanıcı veriminin artarak servis ücretinin düşmesidir.



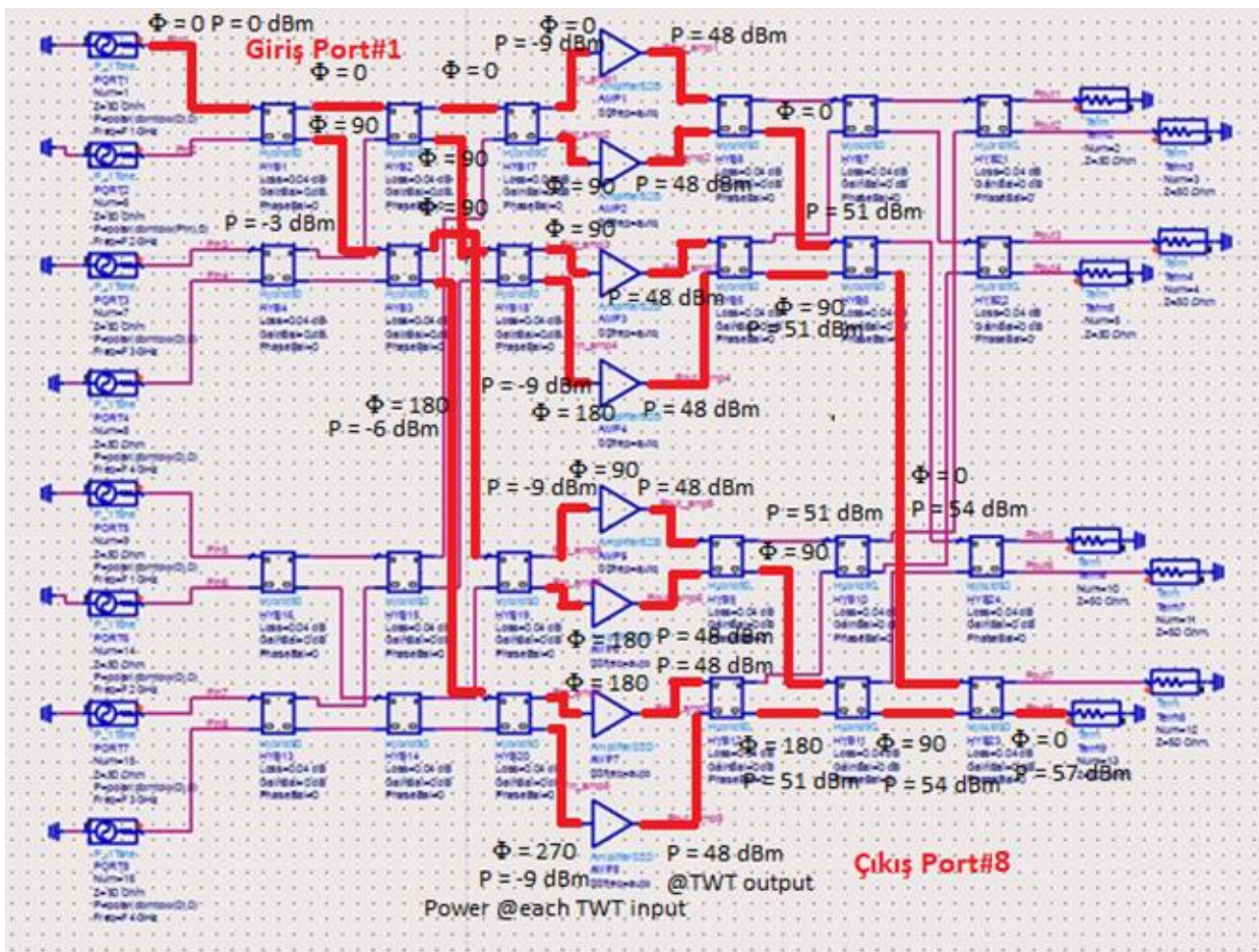
Şekil 2: 2x2 Dengeli yükselteç diyagramı.

Çok Girişli Yükselteç Sisteminin Dezavantajları

Çalışma prensibi her ne kadar yenilikçi ve kusursuz gözükse de operasyonel olarak bu sistemin dezavantajları da bulunmaktadır. Sistem farklı koşullarda her ne kadar ideal gözükse de aslen sinyal hatlarının birbirinden mükemmel şekilde yalıtılamaması durumu söz konusudur. Bu durum sistemin çok taşıyıcılı operasyon koşullarında çalışmasını olumsuz etkileyebilmektedir ve diğer sinyal hatlarında güçlendirilen taşıyıcıların imajları istenilen sinyal hattındaki çıkış spektrumunda gözlemlenebilmektedir. Bu durumda güçlendirme fazında üretilen intermodülasyon ürünlerinin (diğer hatlardaki taşıyıcıların) MPA çıkış portlarında nominal koşullarda 25 dBc (dB less than carrier power level) seviyesinin üzerinde olması beklenmektedir. Yükselteçlerin güç kapasiteleri giriş kanallarının bölünen taşıyıcılarına paylaştırılmaktadır, bu paylaşım sürecinde ve başlıca saturasyona yakın operasyon noktalarında taşıyıcılar arasında performansı ciddi oranda etkileyebilecek doğrusal olmayan taşıyıcı, komşu kanal ya da gürültü kaynaklı intermodülasyon ürünleri meydana gelebilmektedir, bu olay yürüyen dalga tüplerinin doğrusallık karakteristikleri ile ilişkilidir. Aktif intermodülasyon ürünlerinin geneli aktif ekipmanlar (RF güç yükselteci, frekans dönüştürücü, FPGA / ASIC işlemciler vb.) tarafından üretilmekte iken pasif intermodülasyon ürünlerinin geneli sinyal yüksek güç aşamasında (yükselteç ve sonrası) ekipman üretim sürecinde meydana gelen bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Bu duruma sebep olan sinyallerin önlenmesi için kanal ön-bozulum (pre-distortion) yöntemleri yürüyen dalga tüpü öncesinde kanal yükselteci (channel amplifier ya da driver – CAMP) mertebesinde geri besleme yöntemleri uygulanarak istenmeyen sinyallerin negatif fazında sentezör çıktıları üretilmesi ile çıkış spektrumunda intermodülasyon ürünlerinin güçlerinin gereken operasyonel seviyelere indirilmesi sağlanabilmektedir. Bu sayede hem çıkış sinyallerinin giriş matrisi sonrası hibrid güç kuplörü kaynaklı mükemmel olmayan faz kaymasının faz düzeltmeleri hem de dalga tüplerinin genlik (ve kazanç – ALC / FGM yöntemleri ile) düzeltme operasyonları yapılır. Kanal yükselteci ekipmanında TWTA'lerin kazanç düzeltmeleri için iki adet mod bulunmakla birlikte istenildiği takdirde giriş ve çıkış arasında sabit kazanç düzeyi (fixed gain mode – FGM) veya otomatik çıkış gücü (automatic level control – ALC) sinyal seviyesi prensipleri ile TWT giriş sinyali düzeltmeleri yapılarak TWT operasyonu daha doğrusal koşullarda gerçekleştirilmekte ve sistem performansı iyileştirilmektedir.



Şekil 3: 4x4 MPA mimarisi şematığı benzetimi ve tek kanal için giriş ve çıkış matrislerinde ayrılan farklı fazdaki sinyallerin çıkış portlarında birbirini sönmülmesi olayı.



Şekil 4: 8x8 MPA mimarisi diyagramı benzetimi ve sinyal güçlendirme fazları.

HTS spot demet sistemler için genellikle demet sayısı MPA giriş portu sayısından az olmakla birlikte kullanılmayan giriş ve çıkışlar uyumlu (matching) empedans sonlandırıcısı ile sonlandırılmaktadır. Aynı zamanda sistemdeki giriş ya da çıkış port sayısı modifikasyonu gerekli görülmeyen hibrid elementlerin sinyal hattından kaldırılması ile de sağlanabilmektedir. Sistemdeki tüm yükselteçlerin birbirinin eşleniği olduğu ideal kabulü yapılırsa sistemin güç birleştirme verimi ve girişlerin izolasyonu hibrid kuplörün kazanç/kayıp ve faz karakteristikleri ile ilişkilidir. 90° hibrid kuplör oldukça iyi ve yeterli birleştirme, izolasyon ve faz kaydırma karakteristiğine sahip olduğundan yükselteçlerin kazanç ve faz değişimi düzgünlüğü en önemli performans parametresi konumunda yer almaktadır. Yükselteçlerin kazanç ve faz karakteristiklerinin eşlenik olma durumunda olabilmeleri adına çalışılan ısı ortamının (thermal drift), güç giriş-çıkış (çalışma modu, operasyon noktası ve attenuator setting) ve operasyonel parametrelerinin, ekipman ömürlerinin ya da giriş-çıkış matris konfigürasyonlarının birbiri ile uyumluluk göstermeleri gerekmektedir.

MPA MODELLEME YÖNTEMLERİ

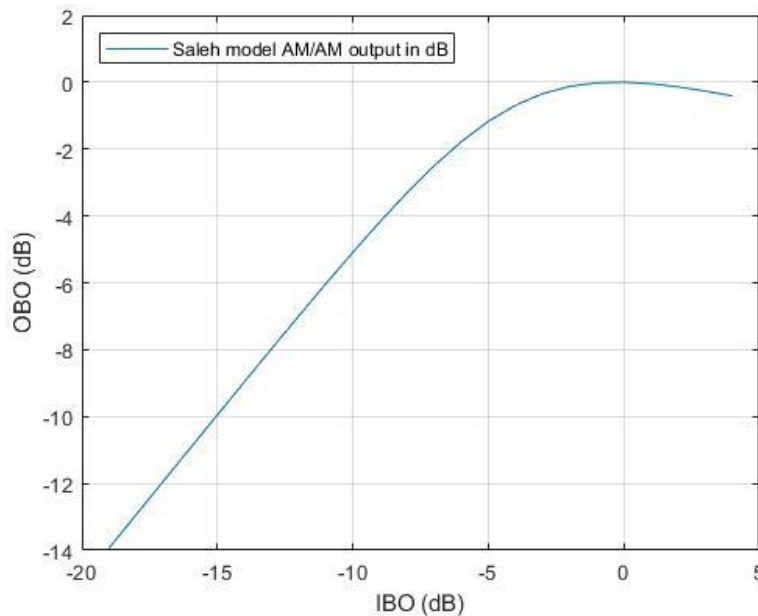
Haberleşme uydusu aktarıcı sisteminde alınan sinyalin frekansı düşürüldükten sonra uygun iniş hattı boyunca gücünün yere iletilmeden önce tekrar yükseltilmesi gereklidir. Bu görevi üstlenen uydu ekipmanları olarak yürüyen dalga tüpü yükselteç (Travelling wave tube amplifier) tipinde ya da katı hal güç yükselteç (solid state power amplifier - SSPA) tipinde yükselteçler bulunmaktadır. Bu çalışmada güvenilirlik bakımından yüksek değerlerine sahip TWTA ekipmanları tercih edilerek MPA güç transferi karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Literatürde TWTA'lerin modellenmesinde Rapp ve Ghorbani yöntemlerine göre daha yüksek transfer eğrisi doğruluk sonuçları veren Saleh Model [Saleh, 1981] ile modellenen TWTA'lerin (Bkz. Şekil 5) MPA sistem seviyesindeki benzetimleri gerçekleştirilerek sonuçlar görseller halinde yorumlanmıştır (Bkz. Şekil 6). Doğrusal olmayan Saleh modeline göre TWT genlik ve faz transfer fonksiyonları için (AM/AM & AM/PM):

$$\frac{AM}{AM} \text{ transfer fonksiyonu: } A(r) = \frac{\alpha_1 r}{(1 + \beta_1 r^2)} \text{ (skaler)} \quad (1)$$

$$\frac{AM}{PM} \text{ transfer fonksiyonu: } \phi(r) = \frac{(\alpha_2 r^2)}{1 + \beta_2 r^2} \text{ (radyan)} \quad (2)$$

α_1 , α_2 & β_1 , β_2 katsayıları en küçük kareler sayısal yöntemi ile hesaplanan katsayılardır, güç ve faz transfer tepkilerini karakterize eden TWT parametreleridir. “r” parametresi TWT girişindeki taşıyıcı sinyalin zamana bağlı fonksiyonudur, A genlik doğrusallığına dair transfer fonksiyonu iken ϕ faz doğrusallığına dair transfer fonksiyonudur. Elde edilen sayısal yöntem sonuçları aracılığıyla karakterize edilen çıkış gücü parametresi için AM/AM transfer doğrusallık fonksiyonundan normalize edilen eğri Şekil 5’te gösterildiği gibidir. Bu eğri için yatay eksen giriş saturasyon değerine göre normalize edilmiştir (giriş güç seviyesi IBO’ya dönüştürülmüştür), dikey eksen ise çıkış gücü saturasyon değerine göre normalize edilmiştir (çıkış güç seviyesi OBO’ya çevrilmiştir).

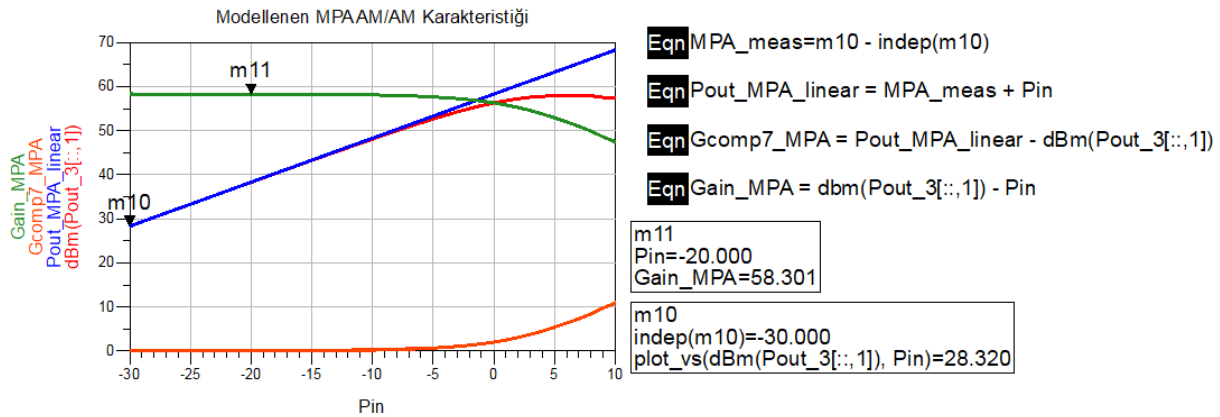
GNU OCTAVE ortamında yazılan betikler ile genlik transfer fonksiyonu AM/AM eğrisi modellenen TWTA ekipmanı RF simülasyonlar için modelleme ortamına aktarılırken giriş gücüne göre modellenen kazanç bastırımı verisi türetilmiş ve “.s2d” formatında “GCOMP7” etiket formunda dalga tüpü S_{21} parametreleri yazılarak SPICE ortamında güç yükselteç (AmplifierS2D bloğu) olarak tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış ağı hibrid matris tasarımları Şekil 3’te belirtildiği gibi uygulanarak MPA benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’te gösterilen 8x8 MPA tasarımı güç dağıtımı konseptini simgelemek için gösterilmiştir. Simülasyonlarda tek sinyal kaynağı kullanılmıştır, bu nedenle çok taşıyıcılı sistem simülasyonu ve bununla birlikte gelen intermodülasyon analizi gerçekleştirilmemiştir ancak sistem daha karmaşık sinyal konfigürasyonlarına ve farklı taşıyıcı senaryolarına elverişlidir. Haberleşme uydusu kanal mimarisi göz önünde bulundurulduğunda TWTA ekipmanlarına giriş sinyali SMA koaksiyel kablo ile sağlanırken TWTA’dan çıkış sinyali yüksek güçte alındığından hat kayıplarının azaltılması adına vakum ortamında çalışabilen dalga kılavuzu ile sağlanmaktadır. Analiz sonuçlarında ideal koşullar göz önünde bulundurularak dalga kılavuzu ve koaksiyel SMA tipi kablo kayıpları ihmal edilmiştir, bunun yanı sıra giriş ve çıkış matrislerinde pasif ekipmanlardan meydana gelecek kayıplar göz önünde bulundurulmuştur zira bu kayıplar uçtan uca sistemin güç verimini ve gürültü figürünü etkilemektedir. Böylelikle MPA senaryosunda sistemde sadece tek bir adet taşıyıcının mevcut olduğu konfigürasyon benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu konfigürasyonda sistemde elde edilebilecek en yüksek çıkış gücü elde edilmektedir ve tek kanal aktarıcı mimarisine göre daha yüksek çıkış gücüne erişilmektedir.



Şekil 5: GNU Octave’da yazılan Saleh model betiği ile üretilen haberleşme uydusu yürüyen dalga tüpü AM/AM genlik karakteristiği transfer eğrisi, egride x eksenini giriş saturasyon gücüne göre normalize edilirken y eksenini çıkış saturasyon gücüne göre normalize edilmiştir.

UYGULAMALAR VE MODEL ÇIKTILARININ YORUMLANMASI

Bu bölümde gerçekleştirilen modelleme sonucunda elde edilen çıktılar yorumlanmıştır. Şekil 3'teki 4x4 MPA modelinin RF harmonik denge analiz sonuçlarının Şekil 6'daki elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi sistemin doğrusallığı doğrudan TWTA'lerin doğrusallık özellikleri (IP3, kazanç bastırımı, karakteristik genlik transfer eğrisi) ile ilişkilidir. Kırmızı eğride MPA üçüncü portundaki çıkış gücünün ikinci porttan verilen giriş gücüne göre değişimi görülmektedir, bu değişim -30 ve +10 dBm arasında görselleştirilmiştir. Giriş gücü yatay eksene oturtularak birimi dBm olarak belirlenmiştir. MPA giriş gücü için 7 dBm ve sonrasında elde edilen MPA çıkış gücü düşmektedir. Mavi eğride çıkış gücünden türetilen MPA doğrusal bölge davranışı eğrisi, yeşil eğride MPA kazanç değişimi, turuncu eğride ise MPA kazanç bastırımı değerlerinin giriş gücüne göre değişimleri görülmektedir. Giriş gücü arttıkça kazanç bastırımı doğrusal olmayan bir davranış göstererek artmaktadır ve çıkış / giriş gücüne dayalı alınan verim düşmektedir. 4x4 MPA model simülasyonu sonucunda sistemin saturasyona uğrama (maksimum çıkış gücünün erişilebildiği nokta) noktası tek TWTA konfigürasyonuna göre yaklaşık 6 dB daha ötede gözlemlenmektedir. Sistemin küçük sinyal doğrusal kazanç değeri 58.30 dB olup sistemin uçtan uca 1 dB çıkış gücü bastırma noktası (1 dB compression point) tek TWTA konfigürasyonuna göre 6 desibel daha geç (6 dB daha yüksek giriş gücünde) görülmektedir. Sistemin tek taşıyıcı modellemesinde saturasyon noktasında (+7 dBm giriş – 58 dBm çıkış sinyal seviyesinde ve MPA kazancının 51 dB olduğu noktada) elde edilen çıkış gücü 28 dBW olarak ölçülmüş olup bu değer 630 W (en yüksek güç) olarak çevrilmektedir, bu güç dört adet kanala eşit ya da paylaşımlı olarak dağıtılabilmektedir. Bir adet yürüyen dalga tüpünün çıkış gücü değerinin tedarik edilen ekipmana göre 100 – 200 W arasında olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu değer ideal olduğu kabul edilebilir. 7 dBm giriş sinyal seviyesi sonrasında sistem doğrusallığını büyük ölçüde kaybetmektedir ve daha yüksek giriş gücü değerleri için daha düşük çıkış gücü sağlamaktadır. Ekipmanlar arası dalga kılavuzu ve koaksiyel SMA kayıplarının hat bütçesine eklenmesi ile daha gerçekçi benzetim çıktıları elde edilebilmektedir.



Şekil 6: Modellenen 4x4 MPA AM/AM giriş/çıkış karakteristiği güç transfer eğrisi (kırmızı), MPA kazanç eğrisi (yeşil), MPA kazanç bastırımı (gain compression – turuncu) eğrisi, MPA doğrusal bölge kazanç modeli (mavi).

Şekil 4'te 8x8 konfigürasyonunda 8 port girişli MPA'nın birinci giriş portundan verilen taşıyıcı sinyalin çıkış portuna gelene kadar geçirdiği güç bölünmeleri ve faz değişiklikleri gösterilmiştir. Bu diyagramda tüm tüplere sinyalin eşit güçte bölündüğü görülmektedir, 0 dBm seviyesindeki MPA giriş sinyali TWT'lere hibrid ağ sürecinde 3 aşamalı olarak (her aşamada gücün yarıya indirilmesi ile) -9 dBm seviyesinde yürüyen dalga tüplerinin kısmi olarak doğrusal karakterde davrandığı bölgede girmektedir. Bu nokta tüpler için 1 desibel bastırma noktası olup lineer kazancın bir desibel kadar sıkışmaya maruz kaldığı noktadır ve bunun sonucunda kazanç 1 desibel kadar düşerek 57 dB olmaktadır. Sistemin bu noktasında -9 dBm'lik giriş sinyali TWT çıkışında 48 dBm'e yükseltilmektedir. Çıkış için hibrid kuplör matris ağında sinyal her adımda diğer tüplerde güçlendirilen sinyallerle birleştirilerek her kademedede üçer dB güç artırımı elde edilir. MPA'nın çıkış portunda elde edilen güç ise toplam 57 dBm (27 dBW) olarak gözlemlenmektedir. Bu değer tüpler 3.6 dB OBO (output back-off @Şekil 5) noktasında çalıştırıldığında elde edilen çıkış gücü değeridir ve ~500 W çıkış gücüyle eşdeğerdir. Elde edilen bu değer link bütçesi kapsamında iniş gücü

açısından (EIRP_{downlink}) ciddi bir aktarıcı çıkış gücü değeri olarak görülebilir. Görüldüğü üzere MPA sistem seviyesinden bakıldığında lineer bir yükselteç gibi görülebilir zira operasyon oldukça yüksek doğrusalılıkta gerçekleştirilmektedir. Ek olarak tüplerde 0 dBm'den 48 dBm'e (yaklaşık ~63 W) yükseltilecek taşıyıcı sinyale ek olarak TWT bant genişliğinde bulunan diğer kullanıcılar ile birlikte çok taşıyıcılı operasyonda tüplerde (güç havuzunda) kullanılmayan güç diğer giriş-çıkışlar doğrultusunda paylaştırılabilir / dağıtılabilir (yaklaşık 8 x ~95 W). Bu değer tek kanal bir aktarıcının girişinde 0 dBm'lik sinyal verildiği takdirde yaklaşık olarak 52 dBm (157 W, saturasyon çıkış gücü) olarak gözlemlenmektedir.

SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA

Haberleşme uydusu MPA alt sisteminin GNU OCTAVE ve SPICE ortamında sistem seviyesinde giriş sinyali gücüne göre elde edilen çıkış gücü değerleri modellenerek sunulmuştur. Sistemin dezavantajları kabul edilebilir düzeyde uygulandığı takdirde geleneksel aktarıcı mimarisine göre güç dağıtımı bakımından daha geniş operasyon alanı sunmaktadır. Yapılan benzetim sonuçlarından elde edilen güç seviyesi çıktıları gerçekçi ve beklenen düzeydedir. Bu sonucun elde edilmesi yüksek çıkış güçlü yürüyen dalga tüplerinin modellenmesinde kullanılan 9. mertebeden aradeğer bulma yöntemi olan GCOMP7 yükselteç benzetimi modelinin analiz doğruluğunu önemli ölçüde artırması ile mümkün kılınmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen uydu aktarıcısı çok girişli güç yükseltici alt sistemi uydu üzerinde güç dağıtımı kavramının esneklik boyutunu artırarak yeni uydu servislerinin önünü açacağı gibi mevcut olanların kalitesinin artmasına da imkân sağlayacaktır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre MPA geleneksel bent-pipe aktarıcı mimarilerindeki tek kanal yükselteçlerine göre teorik ve potansiyel olarak sinyalin 2 (N = 2), 4 (N = 4), 8 (N = 8), 16 (N = 16 vb.) kat güçlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Sistemin güvenilirlik performansı N+1 ve N+2 konfigürasyonlarında yedek yürüyen dalga tüpü ve anahtarların entegrasyonu ile artırılabilir ve ekipman kusurları nedeniyle meydana gelebilecek kanal yalıtımı seviyesi daha iyileştirilebilir. Gelecekte bu konuda yapılacak olan çalışmalarda sistemin intermodülasyon açısından çok tonlu, çok taşıyıcılı sinyal performansı ve MPA güç paylaşımı senaryoları analizlerle çıkartılacak olup, farklı temel bant modülasyon tekniklerine karşı sistemin tepkileri ve performansı irdelenecektir.

Kaynaklar

- Butler, J. (1961). *Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antenna*. Electron. Design, 9, 170-173.
- Egami, S. & Kawai, M. (1987)., *An Adaptive Multiple Beam System Concept*, in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 5, no. 4, pp. 630-636, May 1987, doi: 10.1109/JSAC.1987.1146577.
- Engelbrecht, R. S. & Kurokawa, K. (1965)., *A wide-band low noise L-band balanced transistor amplifier*, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 3, pp. 237-247, March 1965, doi: 10.1109/PROC.1965.3681.
- Saleh, A. A. M., (1981). *Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers*, IEEE Transactions on Communications, vol. 29, no. 11, pp. 1715-1720, Kasım.
- Sandrin, W. A., (1974)., *The Butler matrix transponder*, COMSAT Tech., Rev., vol. 4, no. 2, pp. 319-345, Fall 1974.
- Venkateswaran, V., Pivit, F., & Guan, L. (2016). *Hybrid RF and digital beamformer for cellular networks: Algorithms, microwave architectures, and measurements*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 64(7), 2226-2243.