

Uydu Haberleşmesi için Yönsüz ve Dairesel Kutuplanmalı Dalga Kılavuzu Çembersel Yarık Anten Dizisi

Omnidirectional and Circularly Polarized Waveguide Circular Slot Antenna Array for Satellite Communication

Ceyhan TÜRKMEN, Mustafa SEÇMEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yaşar Üniversitesi, Bornova, İzmir
ceyhan.turkmen@yasar.edu.tr, mustafa.secmen@yasar.edu.tr

Özet

Bu bildiride uydu haberleşmesinde kullanılacak Ku-Bandında yönsüz ve dairesel kutuplanmalı alıcı ve verici antenlerinin tasarımından bahsedilmektedir. Bu antenler, silindirik bir dalga kılavuzunun üzerine simetrik olarak açılmış çembersel yarık dizisinden oluşmaktadır. Bu silindirik dalga kılavuzunun beslemesi, dikdörtgenel dalga kılavuzundan silindirik kılavuzuna özel bir geçiş tekniği ile sağlanmaktadır. Dairesel kutuplanmanın elde edilmesi için çembersel yarık dizisinin ağız açıklığına paralel metalik plakalar takılmıştır. Elde edilen tasarımlar sonucunda hem verici (11.75 GHz civarı) hem de alıcı (14 GHz civarı) frekans bölgesinde yaklaşık yüzde 3'lük bir frekans bandı içerisinde 10 dB'den iyi geri dönüş kaybı bulunmuştur. Ayrıca azimut düzleminde 1 dB'den düşük, elevasyon düzleminde geniş bir açı hüzmesinde 4 dB'den düşük aksel oran vardır. Azimut düzleminde kazançta yaklaşık 0.7 dBi'lik bir değişim görülmüş olup bu düzlemde yönsüzlük sağlanmıştır.

Abstract

In this paper, the design of omnidirectional and circularly polarized antennas, which can be used in satellite communication, is explained. These antennas consist of circular slotted array placed symmetrically on a cylindrical waveguide. The feeding of this cylindrical waveguide is provided with a special transition from rectangular waveguide to cylindrical waveguide. In order to provide circular polarization parallel metallic plates are attached to the aperture of circular slotted array. As the result of the designs, better than 10 dB return loss is found in the frequency region of both transmitter (around 11.75 GHz) and receiver (around 14 GHz) within approximately 3 percent frequency bandwidth. Besides, there is lower than 1 dB axial ratio in the azimuth plane and lower than 4 dB axial ration in a wide beamwidth of elevation plane. The variation of about 0.7 dBi is observed in the gain at the azimuth plane which provides omnidirectionality at this plane.

1. Giriş

Uyduların fırlatılmasından yörüngelerine uygun açı ile yerleşmeleri arasında geçen süre boyunca yer istasyonuna göre pozisyonları rasgele olabileceği için yer istasyonlarına olan konumları tam olarak kestirilemez. Bu sebeple her açıdan gelen elektromanyetik dalgaları alabilmeleri ve her yönde elektromanyetik dalga yayabilmeleri beklenmektedir. Bu sebeple uydularda kullanılacak uyduya göre alıcı ve verici antenlerinin yönsüz (omni-directional) olarak tasarlanması gerekmektedir. Haberleşme sistemlerinde en büyük güç kaybına sebep olan etkenlerden biri de kutuplanma uyumsuzluğudur. Bu kaybın önüne geçmek için verici antenleri dairesel kutuplu olarak tasarlanmalıdır. Bu durumda yer istasyonundan genellikle doğrusal kutuplanma ile gönderilen elektromanyetik dalga düşük bir kayıpla anten tarafından alınabilir. Antenlerin dairesel kutuplanmaya sahip olmaları için antenlere ait eksensel oran değerlerinin 3-4 dB ya da daha az olması gerekmektedir. Özellikle azimut eksenini boyunca eksensel oranın 3 dB altında olması sağlanmalıdır.

Yapılan literatür araştırmalarında benzer amaçla kullanılmak üzere tasarlanmış bazı antenlere rastlanmıştır. Fakat bu antenlerin 10 dB geri dönüş kaybı yaklaşık yüzde bir gibi düşük seviyelerdedir [1-4]. Bu bildiride tasarımı yapılan antenlerden verici frekansında (11.75 GHz) çalışan antenin yaklaşık yüzde 2.5, alıcı frekansında (14 GHz) çalışan antenin ise yaklaşık olarak yüzde 3'e yakın bir 10 dB geri dönüş kaybı bandı vardır ve bu antenler daha geniş bantlı uydu haberleşmesi uygulamalarına olanak sağlamaktadırlar. Ayrıca azimut düzleminin tamamında ve elevasyon düzleminin geniş bir açı bölgesinde yeterli düzeyde dairesel kutuplanma görülmüş olup azimuth düzleminde düşük bir kazanç değişimi (dalgalanması) vardır.

2. Dikdörtgen Dalga Kılavuzundan Dairesel Dalga kılavuzuna Geçiş ve Mod Dönüştürücü Tasarımı

Antenlerin uydu sistemleri ile uyumlu çalışabilmesi için giriş portu standart bir dikdörtgen dalga kılavuzu olarak

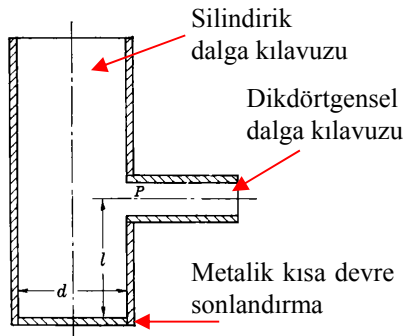
seçilmelidir. Belirtilen dikdörtgen dalga kılavuzunun seçilen tasarım merkez frekans değerleri olan 11.75 GHz (verici) ve 14.00 GHz (alıcı) frekanslarında sadece TE₁₀ dominant modunda çalışması istenmektedir. Bu nedenle WR75 standart dalga kılavuzunun kullanılabilmesi düşünülmüştür. WR75 dalga kılavuzunun standart boyutları $a = 19.05$ mm (uzun kenar) ve $b = 9.525$ mm'dir (kısa kenar). Bu dalga kılavuzunun TE₁₀ modunun tek mod olarak çalışması için verilen pratik frekans aralığı aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [5].

$$\frac{c}{2a} \times 1.25 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 19.05 \text{ mm}} \times 1.25 = 9.84 \text{ GHz} \quad (1)$$

$$\frac{c}{2b} \times 0.95 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 9.525 \text{ mm}} \times 0.95 = 15 \text{ GHz} \quad (2)$$

Verici (11.75 GHz) ve alıcı (14 GHz) frekanslarını da içerisinde barındıran 9.84 GHz ile 15 GHz frekansları arasında WR75 standart dalga kılavuzu TE₁₀ tek dominant modunda çalışmaktadır.

Bir sonraki tasarım adımında dikdörtgen dalga kılavuzundan silindirik bir dalga kılavuzuna geçiş tasarlanmıştır. Silindirik bir dalga kılavuzunda asıl dominant mod TE₁₁'dir. Fakat bu mod, çalışmadaki anten tasarımında belirtilen silindirik dalga kılavuzunun üzerine simetrik olarak açılan çembersel yarık dizisindeki anten elemanlarını simetrik olarak besleyemez. Bu anlamda, bu TE₁₁ modu ile açılacak simetri ve akabinde yönsüzlük sağlanamaz. Bu yüzden elektromanyetik dalganın silindirik dalga kılavuzu içerisinde simetrik beslemeyi sağlayan simetrik mod olan TM₀₁ dominant modunda ilerlemesi istenmektedir. Bu amaç doğrultusunda TE₁₁ modunu sönmülemeye çalışılan Şekil 1'de gösterildiği üzere özel bir geçiş tasarlanmıştır.



Şekil 1: Dikdörtgen dalga kılavuzundan silindirik dalga kılavuzuna geçiş.

Gösterilen bu geçiş için silindirik dalga kılavuzunun çapı olan d değeri yaklaşık olarak simetrik mod TM₀₁ modundaki kılavuz dalga boyunun yarısı olarak ($\lambda_{g, TM01}/2$) alınır [6]. Bu moddaki kılavuz dalga boyunun da hesaplanması formülü ile birleştirildiğinde belirli bir frekans tasarımı için d çap değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [7].

$$\beta = \sqrt{k^2 - \left(\frac{4.81}{d}\right)^2} = \frac{2\pi}{\lambda_{g, TM01}} = \frac{\pi}{d} \quad (3)$$

Bu denklemde $k = 2\pi f / c$ değeri, dalga sayısı olup merkez frekans f için hesaplanabilir. Bu bildiriye göre verici ve alıcı antenlerin merkez frekansları 11.75 GHz ve 14 GHz seçildiği düşünüldüğünde denklem (3) ve dalga sayısı denklemi kullanılarak çap değerleri sırasıyla $d_{verici} = 23.3$ mm ve $d_{alıcı} = 19.6$ mm olarak bulunmuştur. Böylece, TM₀₁ modundaki kılavuz dalgaboyları da sırasıyla $\lambda_{g, TM01, verici} = 46.8$ mm ve $\lambda_{g, TM01, alıcı} = 39.2$ mm olarak bulunur.

Yine Şekil 1'de gösterilen silindirik dalga kılavuzu metalik bir duvar ile kısa devre olarak sonlandırılmıştır. Bu metalik duvar ile dikdörtgen dalga kılavuzunun orta noktası (Şekil 1'deki P noktası) arasındaki l mesafesi, istenmeyen dominant mod olan TE₁₁ modunun bastırılması için bu moddaki kılavuz dalga boyu cinsinden $\lambda_{g, TE11}/4$ ($\lambda_{g, TE11}$ silindirik dalga kılavuzunda TE₁₁ modundaki dalga boyu) ya da $3\lambda_{g, TE11}/4$ olarak belirlenir. Bu değerlerden $3\lambda_{g, TE11}/4$ 'ün daha etkin bastırma yaptığı göz önünde bulundurulduğunda [6], l değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$l = \frac{3\lambda_{g, TE11}}{4} = \frac{6\pi}{4\sqrt{k^2 - \left(\frac{3.68}{d}\right)^2}} \quad (4)$$

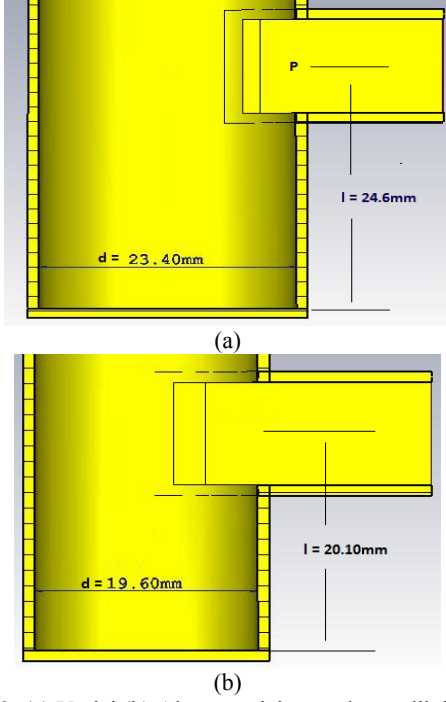
Bu denklem kullanılarak yine hem verici (11.75 GHz) hem de alıcı yapılar için bu mesafeler $l_{verici} = 25$ mm ve $l_{alıcı} = 20.9$ mm olarak bulunmuştur.

Bahsedilen geçişe ait ilgili boyutların belirlenmesinden sonra Şekil 1'de gösterilen yapı CST Microwave Studio 2015 benzetim programı kullanılarak oluşturulmuş ve boyutların ayarlanması ile iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu iyileştirme çalışmalarında dikdörtgen dalga kılavuzundan silindirik dalga kılavuzuna geçişte TM₀₁ modunun iletiminin ve diğer modların (özellikle en yakın modlar olan TE₁₁ ve TE₂₁ modlarının) bastırılmasının mümkün olduğu fazla olması istenmiştir. Bu anlamda benzetim sonuçları yorumlanıp üzerinde gerekli iyileştirmelerin yapılması sonucunda geçiş yapısının nihai boyutları Şekil 2'de verilmiş olup bu boyutların denklem (3) ve (4)'ten elde edilen boyutlar ile oldukça yakın olduğu görülmektedir.

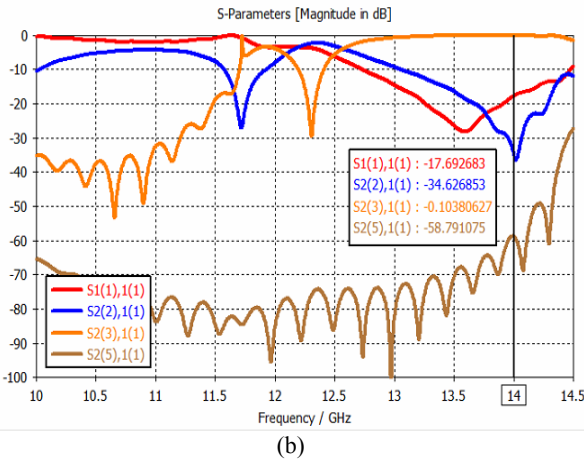
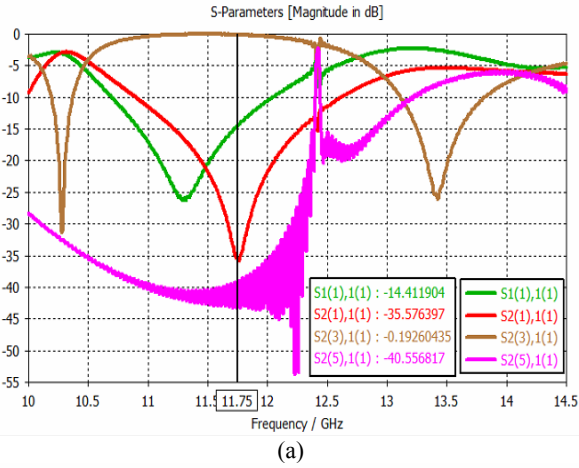
Şekil 2'de verilen yapıların CST ortamındaki benzetimleri sonucu elde edilen yansımaya (S_{11}) ve iletim (S_{21}) grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere istenen mod olan TM₀₁ modunun iletimi (Şekil 3'teki her iki grafikte de $S_{2(3),1(1)}$ olarak gösterilen eğriler) istenilen merkez frekans 11.75 GHz ve 14 GHz civarlarında oldukça iyidir. Ayrıca istenmeyen modlar olan TE₁₁ modu (Şekil 3(a)'da $S_{2(1),1(1)}$ ve Şekil 3(b)'de $S_{2(2),1(1)}$ olarak gösterilen eğriler) ve TE₂₁ modu (Şekil 3'teki her iki grafikte de $S_{2(5),1(1)}$ olarak gösterilen eğriler) istenen frekans bölgelerinde en az 35 dB bastırılmıştır. geri yansımaya katsayısı da her iki yapı için 1.5 GHz'lik bir frekans bandı içerisinde -10 dB'den düşüktür.

3. Yarık Anten Dizisi ve Dairesel Paralel Metalik Plaka Tasarımı

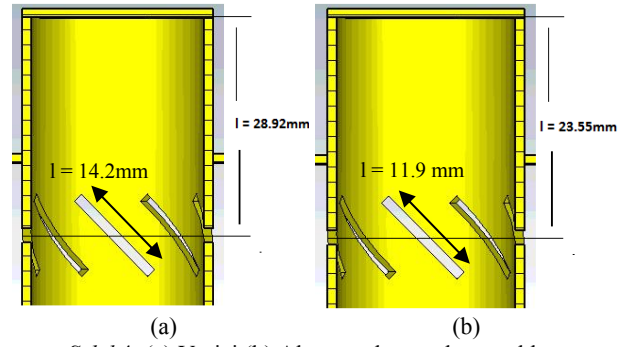
Tasarlanan yapının ortama elektromanyetik dalgaları saçabilmesi ve ortamdaki elektromanyetik dalgaları alabilmesi amacıyla, silindirik dalga kılavuzunu kısa devre ile sonlandırıldıktan sonra silindirik dalga kılavuzunun duvarlarına simetrik yarıklar açılmıştır. Merkez alıcı ve verici frekanslarında ışın yapması istenilen yarıkların merkezleri ile silindirik dalga kılavuzunun sonlandırıldığı kısa devre arasındaki mesafe yarıkların ışın direncini maksimum yapacak şekilde ayarlanır [9]. Yarıkların ışın direncinin maksimum olması için yarıkların merkezi ile kısa devre arasında olması gereken mesafe TM_{01} modundaki kılavuz dalga boyunun yarısının ($\lambda_{g, TM_{01}/2}$) tam katları olmalıdır. CST Microwave Studio 2015 benzetim programında yapılan tasarımda silindirik dalga kılavuzu duvarlarına Şekil 4'te verildiği üzere simetrik 8 adet yarık açılmıştır. Açılan bu yarıkların başlangıç uzunluğu merkez çalışma frekansında, serbest uzaydaki dalga boyunun yarısı olarak belirlenmiştir (Verici için 12.77 mm, alıcı için 10.71 mm) [2]. Yarıkların merkezleri ile silindirik dalga kılavuzunun sonlandırıldığı kısa devre arasındaki uzaklık değerleri ise $\lambda_{g, TM_{01}/2}$ alınarak verici için 23.32 mm, alıcı anten için 19.94 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2: (a) Verici (b) Alıcı yapı için tasarlanan dikdörtgen dalga kılavuzundan silindirik dalga kılavuzuna geçiş.



Şekil 3: (a) Verici (b) Alıcı yapı için tasarlanan geçişe ait yansıma ile iletim katsayıları.



Şekil 4: (a) Verici (b) Alıcı yapıya açılan yarıklar.

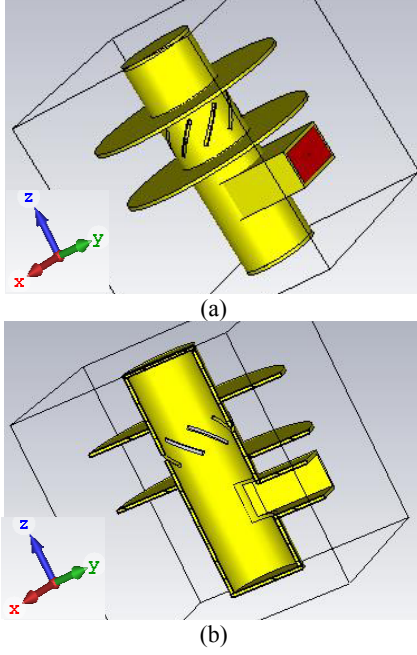
Şekil 4'te CST MW Studio benzetim programında yapılan koşutmalar ve iyileştirmeler sonucunda elde edilen nihai uzunluklar görülmekte olup bu boyutlar hesaplanan başlangıç uzunlukları ile birbirlerine oldukça yakındır.

Yarıklardan çıkan elektromanyetik dalgalar, paralel iki metalik disk şeklindeki plakanın arasında kalan bölgeden ortama doğru yayılmaktadır. Bu bölgede, dikey kutuplanmalı bileşen TM_0 (TM₀) modu ile serbest uzaydaki dalga boyları ile yayılırken, yatay kutuplanmalı bileşen TE_1 (TE₁) modu ile yayılmakta olup bu mod için verilen dalgaboyu şu şekilde ifade edilir.

$$\lambda_{TE1} = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (5)$$

Burada a iki paralel plaka arası mesafeyi gösteriyorken yukarıdaki denklem ile bulunabilir [4]. Paralel plakaların genişliği ile aralarındaki mesafe ile oynanarak dikey kutuplanmalı bileşen ile yatay kutuplanmalı bileşen arasında 90° faz farkı yaratılmaya çalışıldı. Yarıkların açıları ile oynanarak yatay ve dikey kutuplanmalı bileşenlerin

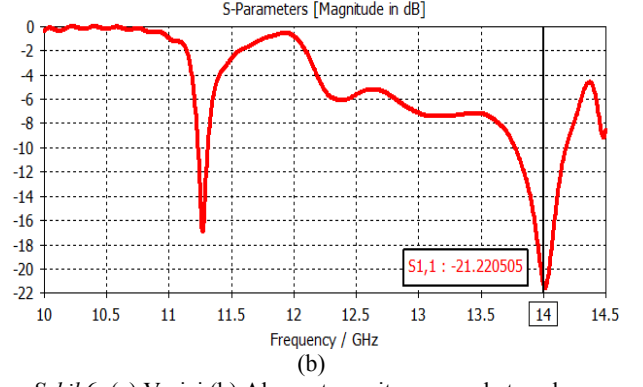
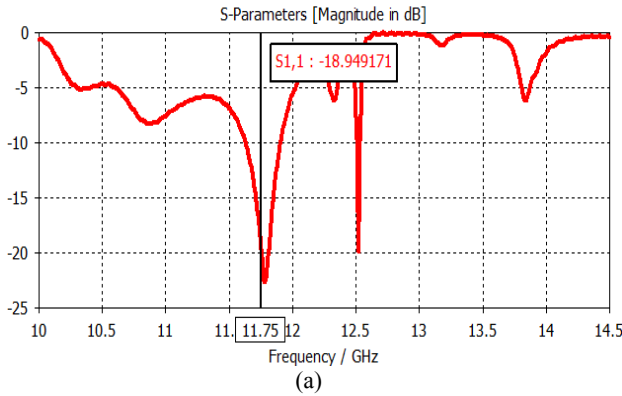
genliklerinin birbirine yakın olması sağlanmıştır. Ayrıca yarıkların eğim yönü istenilen polarizasyon yönü olan sol el dairesel kutuplanmalı (LHCP) olacak şekilde seçilmiştir. Tasarımın son hali Şekil 5’te görülmektedir.



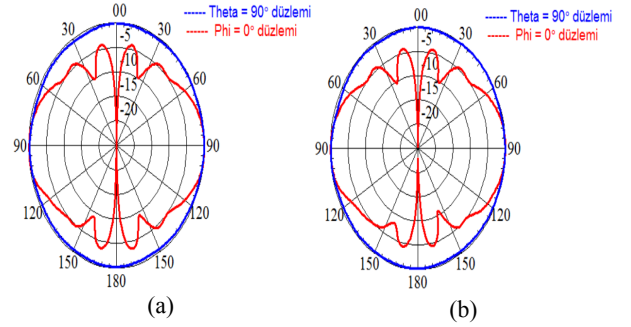
Şekil 5: Alıcı ve verici antenlerin (a) dıştan ve (b) içten nihai kesit görünümü.

CST MW Studio 2015 benzetim programının iyileştirme araçları kullanılarak hem 11.75 GHz merkezli verici antenin hem de 14 GHz merkezli alıcı antenin tasarımlarındaki nihai boyutlar elde edilmiştir. Tasarımlara ait geri yansımaya katsayıları Şekil 6’da verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü üzere verici anten için 275MHz (yaklaşık yüzde 2.5’luk) -10 dB bant genişliğinden bahsedilebilirken alıcı anten için 400 MHz (yaklaşık yüzde 3’lük bir) -10 dB bant genişliği vardır.

Şekil 7’de tasarlanan antenlere ait normalize edilmiş polar ışınım diyagramları bulunmaktadır. Bu şekillerden de görüldüğü üzere azimut ($\theta = 90^\circ$) ekseninde yönsüz (düzgün dağılımlı) bir ışınım diyagramı var iken elevasyon ($\phi = 0^\circ$) ekseninde az da olsa yönlülüğü olan bir ışınım diyagramı vardır. Böylece tasarlanan antenlerin yönsüz ya da tek yönlü (omnidirectional) ışınım karakteristiği olduğu söylenebilir.

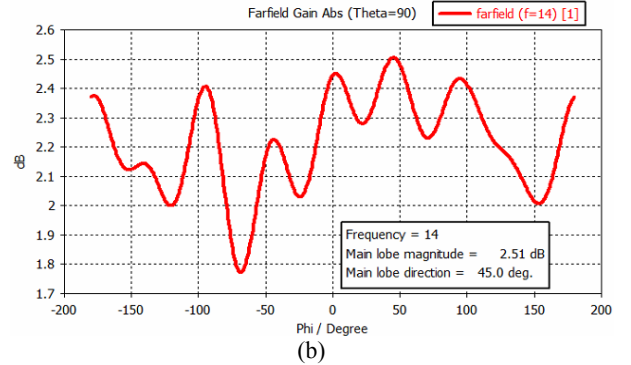
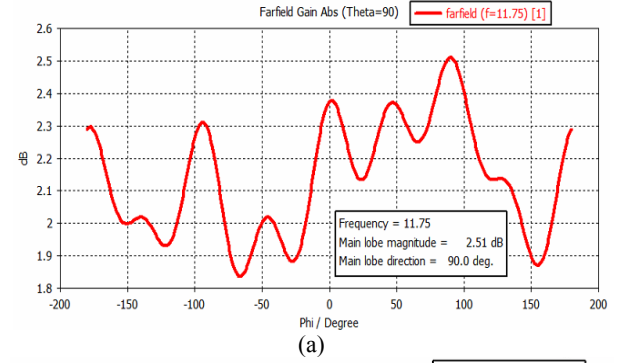


Şekil 6: (a) Verici (b) Alıcı antene ait yansımaya katsayıları.

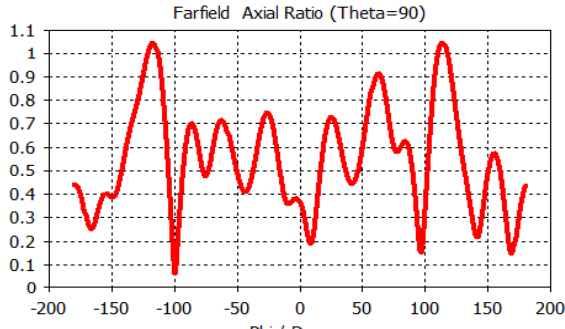
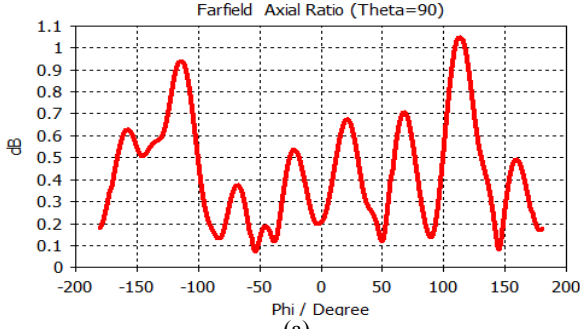


Şekil 7: (a) Verici antenin 11.75 GHz’deki ışınım diyagramları (b) alıcı antenin 14 GHz’deki polar ışınım diyagramları.

Özellikle antenlerin azimut eksenindeki yönsüzlüğünü göstermek amacıyla Şekil 8’de azimut ekseninde anten kazanç paternleri verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi anten kazançları, 1.7 dBi ile 2.6 dBi arasında 0.9 dBi gibi oldukça düşük sayılabilecek bir değişiklik göstermektedir.

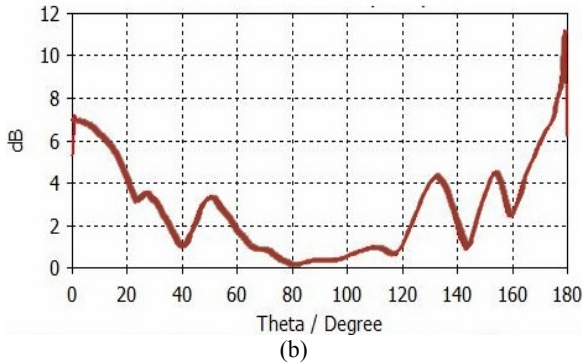
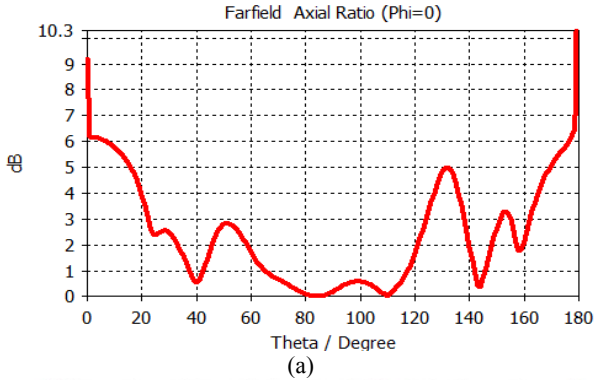


Şekil 8: (a) Verici (b) Alıcı antene ait azimut ($\theta = 90^\circ$) eksenindeki kazanç grafiği.



Şekil 9: (a) Verici-11.75 GHz (b) Alıcı-14 GHz antene ait azimut (yanca) eksenini boyunca eksensel oran grafiği.

Şekil 9'da alıcı ve verici frekansındaki antenlerin eksensel oran grafikleri verilmiştir. Azimut ekseninde antenlerin eksensel oranların dairesel kutuplanma standardı olarak kabul edilen 3 dB nin çok altında olduğu görülmektedir. Bu eksen boyunca antenlerin mükemmel yakında sol el dairesel polarizasyona (LHCP) sahip oldukları söylenebilir.



Şekil 10: (a) Verici-11.75 GHz (b) Alıcı-14 GHz antene ait elevasyon (yükseklik) eksenini boyunca eksensel oran grafiği.

Şekil 10'da görüldüğü üzere elevasyon ekseninde de geniş bir açı hüzmesinde arası dairesel polarizasyon sağlanmaktadır. Tasarlanan antenlerin özellikle [4]'teki çalışma ile karşılaştırıldığında daha geniş bant, daha düşük eksensel oran ve daha düşük kazanç değişimine (varyasyonuna) sahip olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabilecek Ku-bandında çalışan yönsüz sol el dairesel kutuplanmaya sahip alıcı ve verici anten yapıları geliştirilmiştir. Anten yapısı dairesel daga kılavuzu üzerinde bulunan, dairesel kutuplanmayı sağlayan iki paralel dairesel disk arasında simetrik olarak açılmış 8 adet yarıktan oluşmaktadır. Bu antenler simetrik TM_{01} modu ile beslenmiştir. Antenlerin uydu sistemlerine uyumlu çalışabilmesi için giriş portları standart bir dikdörtgen dalga kılavuzu olan ve pek çok uydu sisteminde de yaygın olarak kullanılan WR75 olarak seçilmiştir. Çalışma frekansından antenlerin TM_{01} dominant modu ile beslenip diğer modların elimine edilebilmesi için dikdörtgen dalga kılavuzundan dairesel dalga kılavuzuna özel bir geçiş tekniği uygulanmıştır. Yarıkların etrafına konumlandırılmış birbirine paralel iki dairesel metal disklerin boyutları ayarlanarak antenlerin dairesel kutuplanma elde edilmiştir. Ayrıca yarıkların eğim yönleri ile de dairesel kutuplanmanın yönü belirlenmiştir. CST MW benzetim programındaki benzetimler ve bu sonuçlar ışığında yapılan iyileştirmelerin sonucunda verici frekansına olan 11.75 GHz etrafında 275 MHz bant genişliği olan bir telemetri anteni, alıcı frekansına olan 14.00 GHz etrafında ise 400 MHz bant genişliği olan bir telekomut anteni tasarımı elde edilmiştir. Bu antenler azimut ekseninde yönsüz ve dairesel kutuplanmış olup uydu haberleşmesi uygulamalarında kullanılabılırler.

5. Kaynaklar

- [1] K. Sakaguchi and N. Hasebe, "A circularly polarized omnidirectional antenna," Eighth Int. Conf. Antennas and Propag., pp.477-480, vol.1, 1993.
- [2] J. L. Masa-Campos, J. M. Fernandez, M. Sierra-Perez and J. L. Fernandez-Jambrina, "Omnidirectional circularly polarized slot antenna fed by a cylindrical waveguide in millimeter band," Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 49, no. 3, pp. 638-642, 2007.
- [3] Galindo, V.; Green, K.; , "A near-isotropic circularly polarized antenna for space vehicles," IEEE Trans. Antennas&Propag., vol.13, no.6, pp. 872-877, Nov 1965.
- [4] C. B. Top, D. Doğan, "A circularly polarized omnidirectional low loss Ka-band slot antenna," IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society, pp. 1-2, July 2012.
- [5] Cheng, D. K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley Publishing Company, New Jersey, ABD, 1993.
- [6] Silver, S., *Microwave Antenna Theory and Design*, McGraw Hill, New York, ABD, 1949.
- [7] Pozar, D. M., *Microwave Engineering*, 4. Baskı, John Wiley & Sons Inc., New York, ABD, 2012.
- [8] Milligan, T., *Modern Antenna Design*, 2. Baskı, John Wiley & Sons Inc., New York, ABD, 2005.
- [9] G. L. Ragan, *Microwave Transmission Circuits*, First Ed., McGraw-Hill Book Company, 1948.