

X Band Radar Sistemleri için Mikroşerit Yürüyen Dalga Anten Tasarımı

Mehmet Ali BELEN¹, Peyman MAHOUTI²

ÖZET: Günümüzde, telekomünikasyon ve askeri uygulamalarda ayarlanabilir anten dizilerinin kullanımı gittikçe artmaktadır. Askeri sistemlerinde, ayarlanabilir antenler değişen sistem ihtiyaçlarına ve çevre koşullarına yüksek uyumlulukları nedeniyle ilgi çekmektedir. Bu antenler uygulama gereksinimlerine göre çalışma frekanslarını, analob yönlendiriciliklerini, huzmelerini, polarizasyonlarını değiştirme özelliğine sahiptirler. Hem insan izleme hem de görüntüleme uygulamalarında, radar sistemi dar bir huzmeye sahip olmalı ve huzme hızla farklı yönleri tarayabilmelidir. Bu nedenle huzme kontrolü, takip, tespit, arama gibi temel radar işlevleri kritik öneme sahiptir. Huzme kontrollü sistemler, karmaşık ve yüksek maliyete yol açan kontrol edilebilir elemanlara sahip büyük anten dizilerinin kullanılmasını gerektirirler. Bu çalışmada karmaşıklığın ve maliyetin giderilmesi için yürüyen dalga anten modeli incelenmiştir. Yürüyen dalga anten modeli standart mikroşerit dizi modeline dayanmaktadır. Yürüyen dalga modeli radar yapılarında, dizi elemanlarına uygulanan frekans artımının kontrolü ile huzme hareketi; aç, menzil ve zaman eksenlerinde kontrol edilebilir ve bu sayede arama, tespit ve takip gibi temel radar fonksiyonları yerine getirilebilir. Yine aynı şekilde frekans artımının kontrolü ile huzme genişliği ve menzil çözünürlüğü gibi radar performans parametreleri optimize edilebilir. Bu çalışma kapsamında 9.4GHz ile 10.8GHz frekansları arasında çalışan frekans değişimine bağlı olarak ana huzme yönlendiriciliğine sahip yürüyen dalga anten modeli tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antenin kazancı 8dB ile 13dB arasında değişmektedir. Anahuzme açısı 0° ile 27° arasında yönlendirilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: X band, dizi anten, mikroşerit anten, yürüyen dalga anten, huzme yönlendirme.

Microstrip Travelling Wave Antenna Design for X Band Applications

ABSTRACT: Reconfigurable antennas have an increasing demand in communication systems due to their compatibility with variable system demands, environment conditions. With respect to their application need due to their ability of changing their, propagation pattern, frequency and polarization characteristics reconfigurable antenna arrays have a high interest in military applications. In human detection and scanning applications, the RADAR system requires a narrow beam pattern with fast steering ability. Thus, basic radar functions such as pattern control, scanning, targeting has a critical importance. Pattern controllable systems commonly requires complex elements with high cost and large array antenna structures. Herein, in order to reduce the complexity and cost Traveling wave antenna designs are studied. Traveling wave antenna design is based on the traditional microstrip array antennas. By using Traveling wave antenna model in RADAR arrays, a small increase in frequency band can be provided by which an effective continues scanning can be achieved. By increasing the frequency of the array element, it is possible to steer the pattern of array for providing a scanning in time, range and direction axis. Similarly, by changing the frequency values it is possible to optimize the range and propagation pattern of the array. Herein, design of a frequency depended pattern steering Traveling wave antenna in operation band of 9.4-10.8 GHz had been presented. The gain of the proposed antenna is around 8-13 dB and the main beam direction is steerable with the range of 0° - 27°.

Keywords: X band, array antenna, microstrip antenna, travelling wave antenna, beam steering.

¹ Mehmet Ali BELEN (0000-0001-5588-9407), Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

² Peyman MAHOUTI (0000-0002-3351-4433), Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Sorumlu yazar/Corresponding Author: Mehmet Ali BELEN, mehmetalibelen@artvin.edu.tr

GİRİŞ

Son yıllarda gerek askeri gerekse ticari uygulamalarda boyutları küçültülmüş ancak aynı zamanda huzme taramasına sahip antenlere olan ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle, kompakt, hafif, düşük profil, düşük maliyet ve geniş bant genişliği gibi kavramlar kablosuz iletişim sistemleri tasarımcıları tarafından gerçekleştirilmesi gereken önemli zorlukların başında gelmektedir. Bu bağlamda mikroşerit antenler, basit yapıları, küçük boyutları, düzgün ve eğimli yüzeylere uygulanabilmeleri ve sert yüzeylere uygulandığında dayanıklı olmaları gibi birçok dikkat çekici özelliği ile öne çıkmaktadır. Ancak, en önemli dezavantajı dar bant genişliğine sahip olmalarıdır.

Yürüyen dalga antenin çalışma prensibi yıllardır bilinmektedir (Collins ve Zucker, 1969; Oliner ve Johnson, 1993). İki çeşit yürüyen dalga anteni mevcuttur. Birinci tip değişmeyen kılavuzlanmış dalga yapılarıyla ilgiliyken (Goldstone ve Oliner, 1953; Oliner, 1987), ikincisi bir dizi periyodik kılavuzlanmış dalga yapılarından oluşur (Guglielmi ve Boccalone, 1991; Gomez ve ark., 2005). Birinci tip yürüyen dalga antenler forward quadrantta yayılım sağlar ve 0° - 180° lik aralığı tarar. Baskın modda eski tip hızlı dalgayı temsil ederken, son tip yavaş dalga yapısını temsil eder. Sonuç olarak, periyodik yürüyen dalga antenler radyasyon yaymaz ve radyasyon oyukların harmoniklerinden biri kullanılarak elde edilir. Yürüyen dalga antenlerin analizi ve tasarımı genel olarak iki parametreye bağlı olarak çıkarılır, bunlar faz sabiti (β) ve yürüyen sabitidir (α). Kompleks propagasyon sabitini çıkarmak için kullanılan bazı sayısal yöntemler vardır, örneğin transverse rezonans metodu ve spectral domen metodu kompleks propagasyon sabitini çıkarmak için kullanılırlar. Bu çalışmada, yüzey entegre dalga kılavuzlu anten karakteristiği analizindeki çok yönlülüğünden ötürü sonlu fark frekans domeni (FDFD) yöntemi seçilmiştir (Xu ve ark., 2003; Xu ve ark., 2008). Son yıllarda, bu metod çeşitli tiplerdeki yüzey entegre dalga yapılarının propagasyon karakteristiklerinin çıkarılmasında başarıyla kullanılmıştır. Bu yüzden yüzey entegre dalga yürüyen dalga antenlerin analizinde de direk olarak uygulanabilir.

Anten dizileri, radar ve kablosuz haberleşme sistemlerinde yoğun olarak kullanılmakta olup; demet tarama, demet şekillendirme, yüksek yönlendiricilik ve kazanç gerektiren uygulamalarda

başarı sağlamaktadırlar. Anten dizileri, genellikle özdeş olan belirli sayıda anten elemanının bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Anten dizileri doğrusal, düzlemsel ve hacimsel dizilime göre çeşitlendirilirler. Anten elemanlarının ışınma örüntüsünden farklı olarak anten dizilerinin ışınma örüntüleri, dizi faktörü olarak adlandırılan fonksiyon vasıtasıyla elde edilir. Anten dizisinin parametrelerinin değişimi dizi faktörünü etkiler, bu sayede ışınma örüntüsü şekillendirilir. Genel anten incelemelerinde, seçilen antenin ışınma örüntüsü, empedansı, ana hüzme genişliği ve bant genişliği gibi temel parametreleri literatürde varolan yöntemlerle hesaplanır. Ancak anten dizisi incelemelerinde, istenen ışınma örüntüsünü en iyi yaklaşıklıkla verecek akım genliği, faz uyarımı veya elemanları arasındaki uzaklıkları parametreleri belirlenmeye çalışılır.

Bu çalışmada X bant radar sistemlerinin karmaşıklığının ve maliyetin giderilmesi için yürüyen dalga anten modeli önerilmiştir. Yürüyen dalga antenli radarlarda, ardışık dizi elemanları ile antenin yürüyen modları ile huzme taraması yapılmaktadır. Bu sayede tarama alanının sürekli taranması sağlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında 9.4GHz ile 10.8GHz frekansları arasında çalışan frekans değişimine bağlı olarak ana huzme yönlendiriciliğine sahip dalga yürüyen anten modeli tasarımı yapılmıştır. Yapılan benzetimler sonucunda 9.4GHz ile 10.8 GHz arasında -6dB bant genişliğine sahiptir. Ayrıca 9.4GHz de anahuzme 0° iken 10.8GHz de anahuzme 27° ye yönlendirilmiştir. Anten kazancı 3dB ile 13dB arasında elde edilmiştir. Anten tasarımı ve spesifikasyonları CST-MWS yazılımında yapılan benzetimler ile elde edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

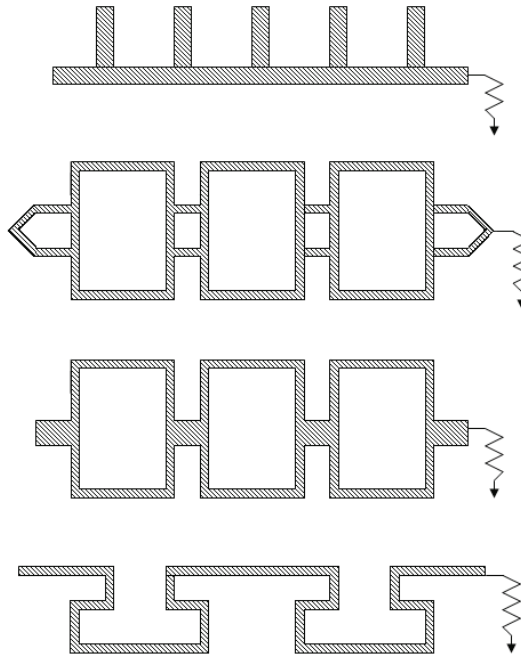
Hızla gelişen teknoloji ile kablosuz haberleşme cihazlarının boyutları küçülmektedir. Bu gelişmeyle birlikte bu cihazlara adapte olacak anten tasarımları konusu önemli bir hale gelmiştir. Üçgen, daire ve dikdörtgen şekilli mikroşerit yama antenler yaygın olarak kullanılmaktadır. Antendeki yama boyutu yarım dalga boyu kadardır. Mikroşerit halka biçimli yama kullanılarak, yama boyutları çeyrek dalga boylarına kadar düşürülebilmektedir (Garg ve Reddy, 1947). Ayrıca halka yapılı yama kullanımı ile elde edilen esnek yapı sayesinde cihazlara entegrasyonu kolaylaşmaktadır. Bun nedenle mikroşerit halka antenler minyatür anten

çalışmalarında avantajlıdır (Chen ve ark., 2005; Kohno ve Yazdanboost, 2005).

Antenlerin birçok türü mevcuttur. Her anten türünün kendine has özellikleri olmasına karşın, bazı durumlarda tek başına bir anten istenilen gereksinimleri karşılayamamaktadır. Tek bir anten genelde düşük kazanç sağlar ve huzme genişliği tek bir yöne doğru yoğunlaşır. Bazı uygulamalarda, kazancın artırılması ve huzme genişliğinin istenilen yöne doğru yoğunlaştırılması istenir. Bu durumda birden fazla antenin geometrik olarak yerleştirilmesiyle oluşturulan anten dizileri kullanılır. Anten dizileri herhangi bir anten türü seçilerek oluşturulabilir. Anten dizisindeki her bir eleman farklı yapıda seçilebilir, ancak dizinin toplam alanını ve örüntüsünü hesap etmek için özdeş elemanlar tercih edilir. Birden fazla antenin geometrik

olarak üretimini ve tasarımını kolaylaştırması nedeniyle mikroşerit antenler, en çok kullanılan anten türlerinden biridir (Pozar ve Schaubert, 1995).

Mikroşerit yürüyen dalga antenler genel olarak periyodik yapıdadırlar. İki grupta incelenirler; yürüyen dalga anten ve duran dalga anten olarak. Yürüyen dalga antenler rezistif bir yükü sonlandırılırlar. Işıma yönü istenilen şekilde ayarlanabilir. Duran dalga antenlerde ise sonlandırma açık devre veya kısa devre olarak yapılır. Anten ışınması geniş kısım tarafından yaparlar. Antenin ana huzmesi yatay ya da düşey olarak anten geometrisine bağlı olarak yönlendirilebilirler. Mikroşerit parça dizi anten en yaygın kullanılan mikroşerit yürüyen dalga anten türleri ; zincir-hatlı, trapezoidal-hatlı, tarak-hatlı, rampa-hatlıdır. Yürüyen dalga mikroşerit anten tipleri şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Mikroşerit yürüyen dalga anten modelleri (Garg ve Bhartia, 2001)

Yürüyen dalga antenler baskı devre kart teknolojisi, düşük maliyet ve üretiminin kolaylığı dolayısıyla ayrıca diğer yüzeysel bileşenlerle uyumlu çalışması sayesinde günümüzde oldukça ilgi görmektedir. Yürüyen dalga antenler hareketli dalga antenler sınıfına aittir. Hareketli dalgalarsa temel olarak bir

veya daha fazla modda kılavuzlanmış dalgalardır. Kılavuzlanan dalganın moduna göre, dalganın hızının serbest uzaydaki hızına göre bu dalgalar “hızlı” ya da “yavaş” olarak nitelendirilir. Yüzey dalgaları yavaş dalgalara örnekken, yürüyen dalgalarsa hızlı dalgalara örnektirler. Genellikle yürüyen dalga antenler;

$$k_t = \beta t + j\alpha t \text{ ve } |\beta t| < k_0 - k_0 \quad (1)$$

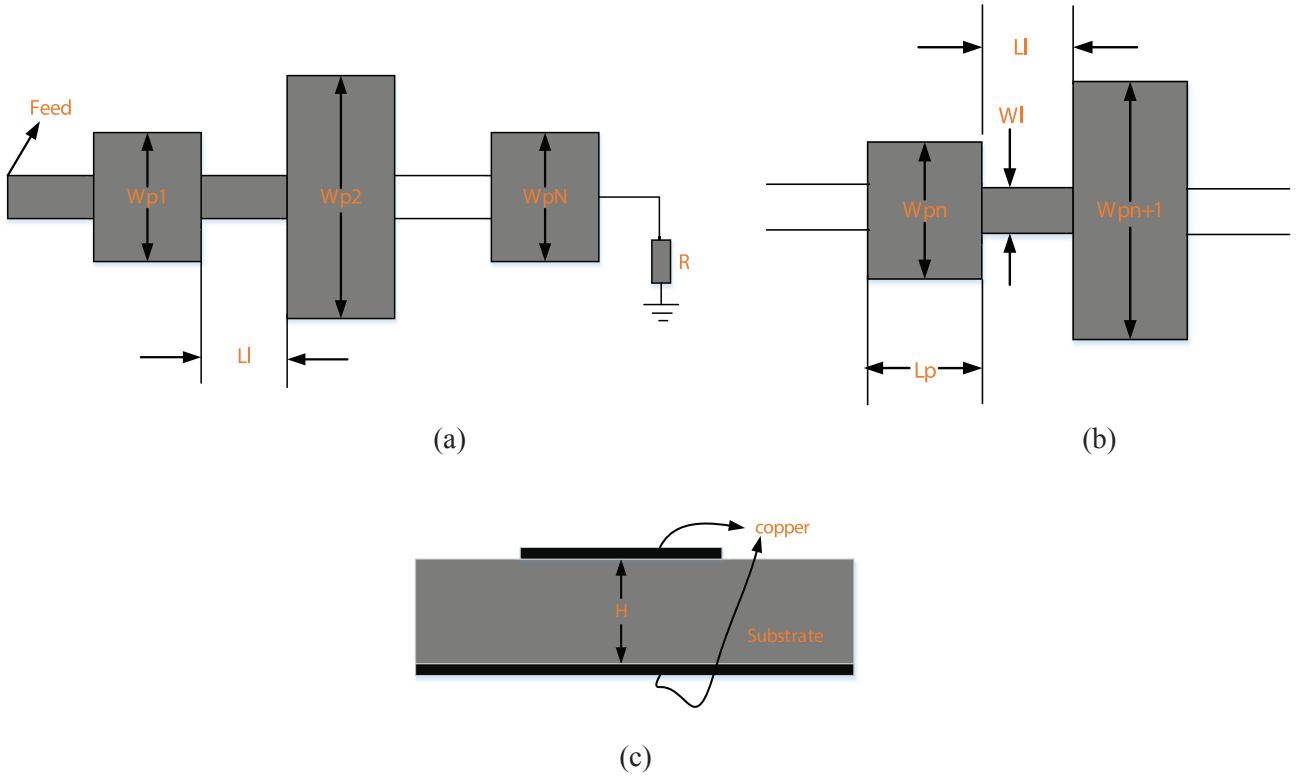
Eşitlik 1'deki serbest uzaydaki propagasyon sabiti biçimindeki kompleks propagasyon sabitleriyle karakterize edilir. Yürüyen dalga modunda kılavuzlanan yapı ışık hızından daha hızlı hareket eder ve aynı zamanda αt küçülme sabiti kadar enerji kaybeder. Kayıpsız durumdaysa enerji tamamiyle serbest uzaya yayılır. Diğer yandan, yüzey dalgaları anteni gibi yüzey dalgalarını destekleyen yürüyen dalga antenleri güç akısını, anten yüzeyindeki bağlı dalgayı engelleyen yapısal süreksizlikler aracılığıyla sağlar. Farklı radyasyon mekanizmaları iki yapının hatalı eşleşmesine sebep olabilir. Hatalı uyumlama sorunları normalde ya girişten ya da çıkıştan kaynaklıdır. Yürüyen dalga antenlerde, yürüyen modu besleme modundaki beslemeden gelen küçük bir hata kaynaklıdır ve bu noktadan sonra herhangi bir hatalı eşleşme problemi olmamaktadır. Sonuç olarak yürüyen dalga antenler yeterli miktarda beslendiğinde

yüzey dalga antenlere göre –hem besleme hem de yapı sonunda- tasarımında herhangi bir uyumsuzluk probleminde yol açmaz.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 2'de tasarlanan anten geometrisi verilmiştir. Dalga yürüyen anten tasarımında;

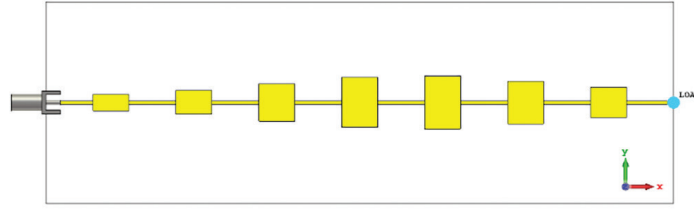
- Kazancı artırmak / azaltmak için elemanların sayısı artırılmalı / azaltılmalıdır.
- Eleman sayısı arttıkça anten empedansı azalır.
- Bant genişliğini arttırmak için alt tabaka yüksekliğini artırılabilir, yama genişliklerini artırılabilir veya alttaş malzemenin permitivitesi azaltılabilir.
- Hüzme tarama açısını arttırmak/azaltmak için mikroşerit hat uzunluğu artırılır/azaltılır.



Şekil 2. (a)Tasarlanan anten geometrisi, (b) yamalar arası genişlik ve uzunluk (c) dielektrik özellikleri.

Şekil 3'de CST-MWS benzetimleri yapılan dalga yürüyen anten modeli verilmiştir. Anten

tasarımı 171mmx78mm yer kaplamaktadır.



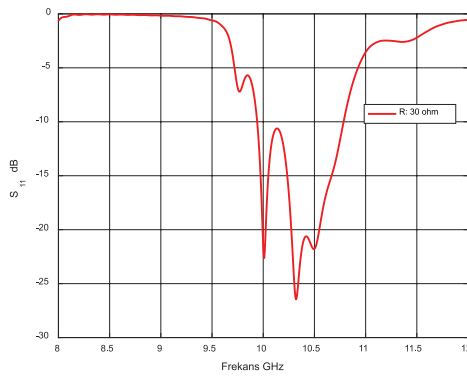
Şekil 3. Yürüyen dalga anten modeli

Çizelge 1. Anten parametreleri

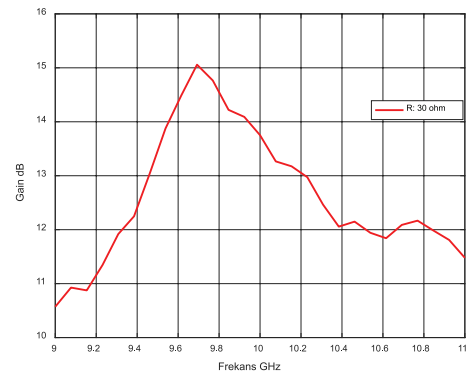
Yük Direnci	30 ohm	WP1	4.4mm
Eleman Sayısı	7	WP2	6.45mm
Hat Uzunluğu LI	12.85mm	WP3	10.1mm
Hat Genişliği WI	0.94mm	WP4	13.6mm
Dielektrik sabiti	3.66	WP5	14.37mm
H	0.76mm	WP6	11.5mm
LP	9.75mm	WP7	8.25mm

Çizelge 1’de anten parametreleri verilmiştir. Tasarımda yük direnci olarak 30 ohmluk sonlandırma kullanılmıştır. Yapılan benzetimlerde yük direncinin 30 ohm ile 90 ohm arasında değiştirilerek anten

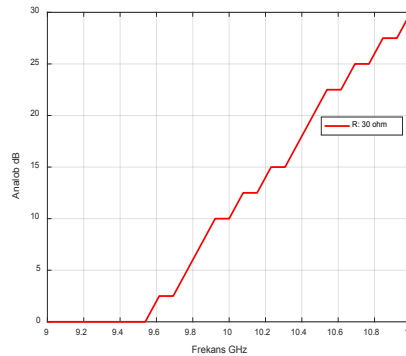
performansına etkisi incelenmiştir. Anten tasarımında yüksekliği 0.76mm ve dielektrik sabiti 3.66 olan RT5880 alttaş malzemesi kullanılmıştır.



(a)



(b)

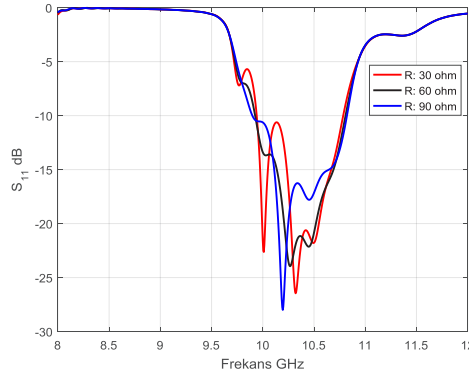


(c)

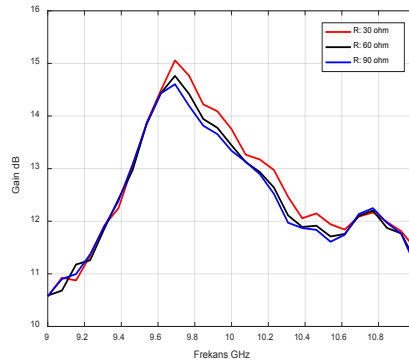
Şekil 4. (a) Geri dönüş kaybı (b) Anten kazancı (c) Analob yönlendiriciliği

Anten geri dönüş kaybı, kazancı ve analob yönlendiriciliği şekil 4’te incelenmiştir. Antenin -6dB bantgenişliği 1GHz e yakındır. Anten kazancı 9.6GHz de 14.7dB elde edilmiştir. Analob yönlendiriciliği incelendiğinde 9GHz ile 9.4GHz arasında 0° yönünde analob elde edilmiştir. 10GHz de analob 11° ’ye geçmiştir.

Frekans arttıkça antenin analobu yönlendirilmiştir. Anten tasarımında yük direnci 30 ohm ile 90 ohm arasında değiştirildiğinde Şekil 5’te görüldüğü üzere bant genişliğinin değişmediği ancak S_{11} değerinin değiştiği gözlenmektedir. Empedans değeri 60 ohmluk sonlandırmada S_{11} en iyi değere ulaşmaktadır.



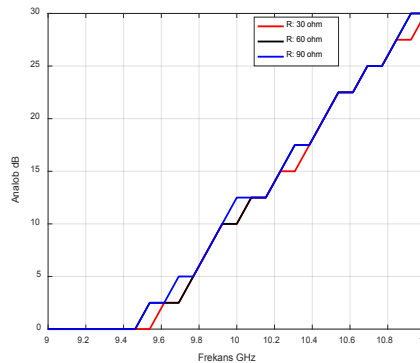
Şekil 5. Geri dönüş kaybı farklı sonlandırma değerlerinde (30 ohm, 60 ohm, 90 ohm)



Şekil 6. Anten Kazancı farklı sonlandırma değerlerinde (30 ohm, 60 ohm, 90 ohm)

Şekil 6’da yük direncinin değişimi ile anten kazancı değişimi incelenmiştir. Yük direnci azaldıkça

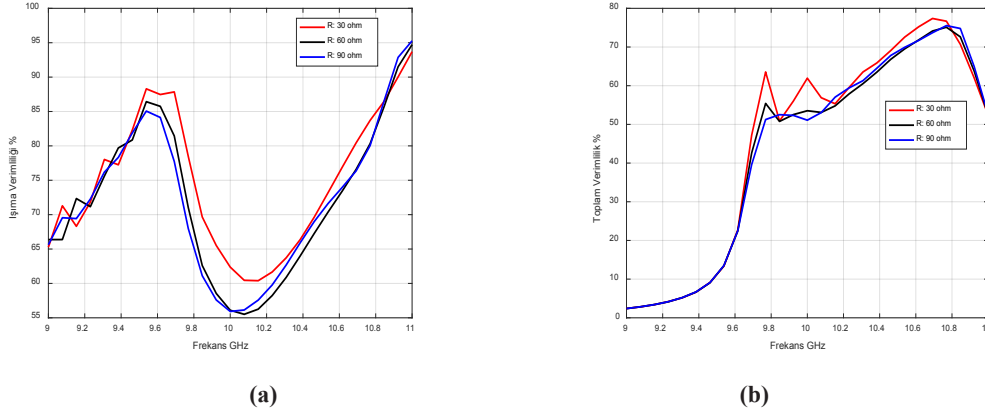
anten kazancında 0.5dB’lik bir artış gözlenmiştir.



Şekil 7. Analob açısı farklı sonlandırma değerlerinde (30 ohm, 60 ohm, 90 ohm)

Şekil 7’de yük direncinin değişimi ile antenin analob yönünün değişimi incelenmiştir. Yük direnci arttıkça analob yönü başlangıç frekanslarına doğru

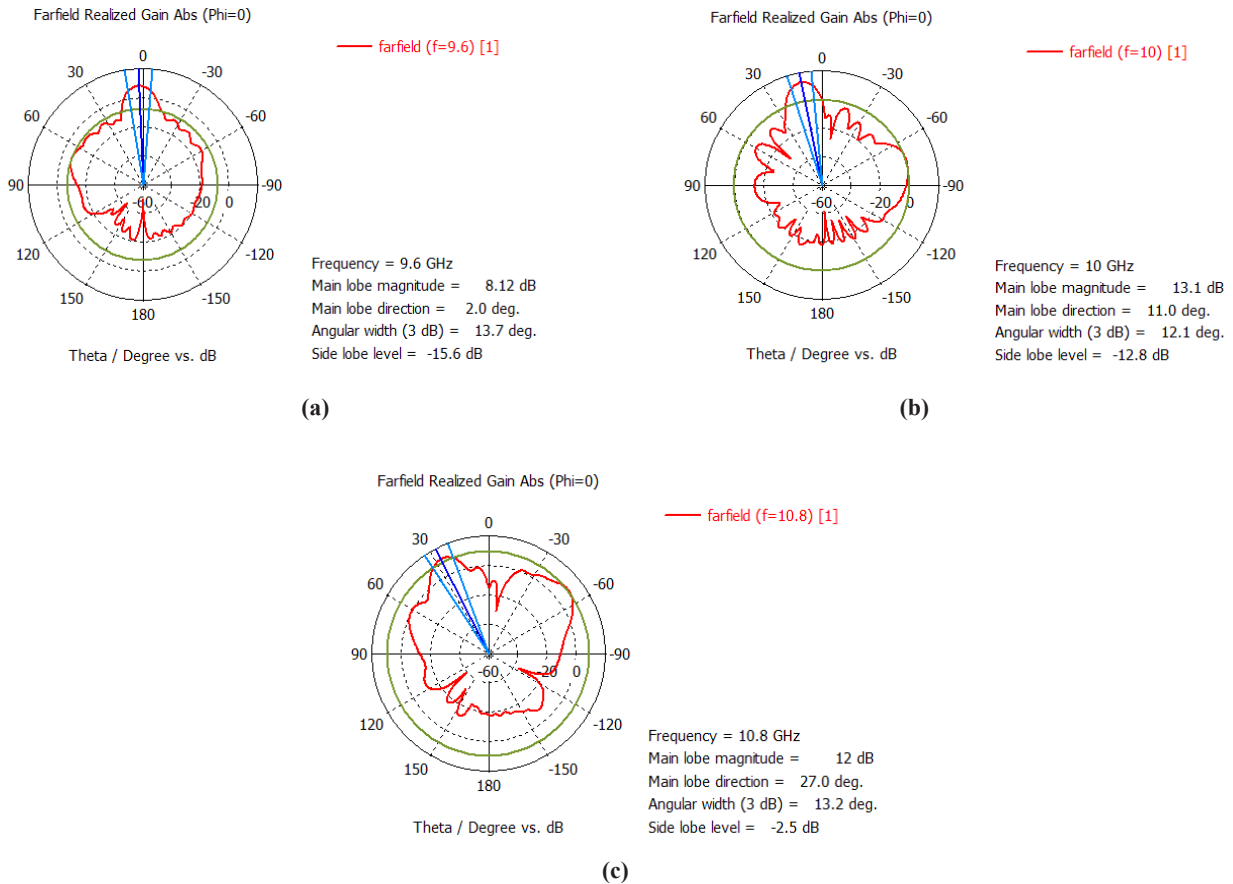
gitmektedir. 30 ohmda ana lob 9.5GHz de iken 90 ohmda 9.45 GHz’de dir.



Şekil 8. (a) Işıma verimliliği (b) Toplam verimlilik

Şekil 8’de antenin, ışıma ve toplam verimliliği verilmiştir. Yük direnci değişiminin verimliliğe etkisi gözlenmiştir. 30ohmluk yük direnci ile antenin daha

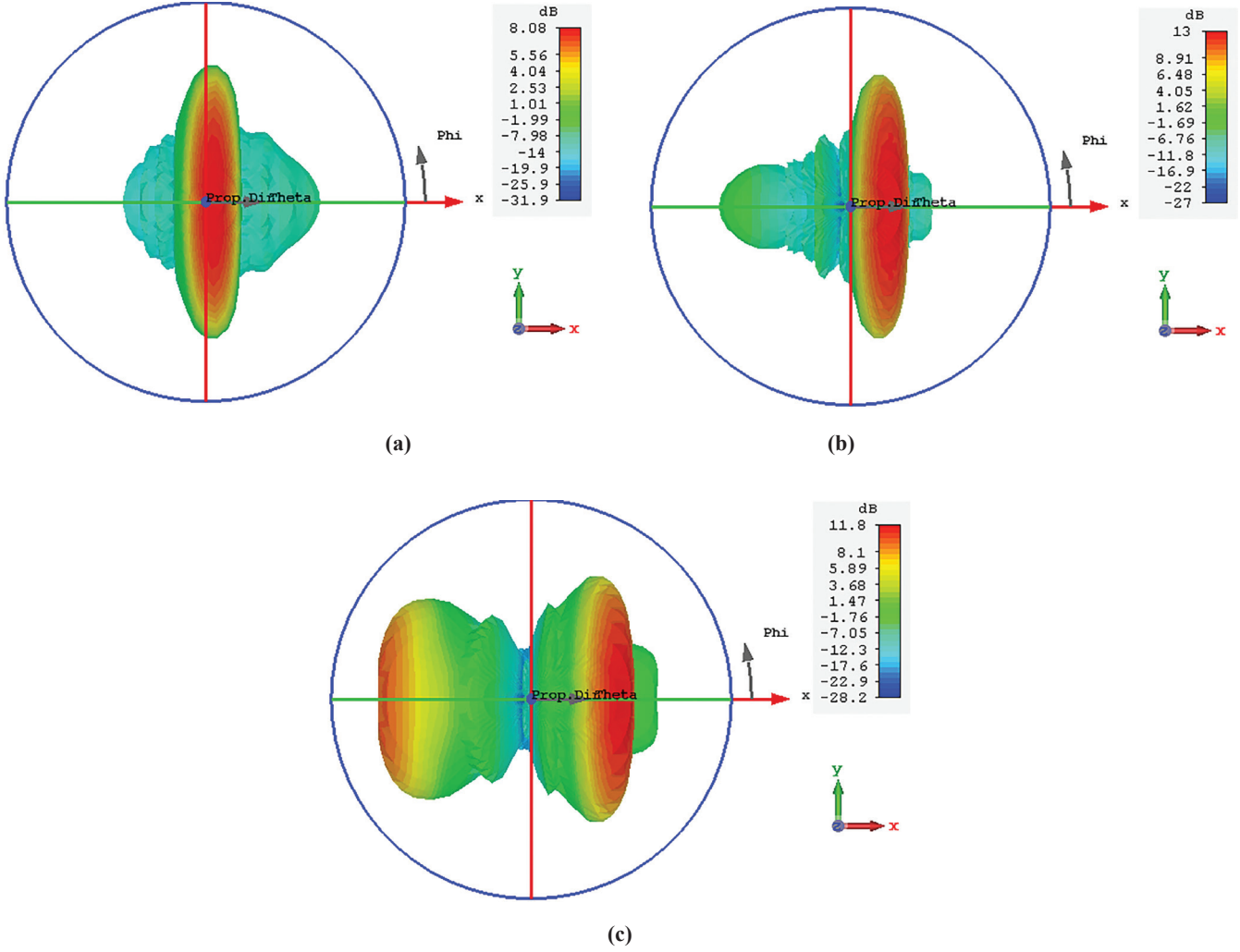
verimli olduğu gözlenmiştir. Antenin toplam verimliliği 9.6 GHz’de %30 iken 10.8 GHz’de %78dir.



Şekil 9. Işıma Paterni (a) 9.6 GHz (b) 10 GHz (c) 10.8 GHz.

Şekil 9'da tasarlanan antenin ışınma paterni verilmiştir. 9.6 GHz'de anahız açısı 2° ve kazancı 8.12dB iken 10.8 GHz'de anahızme yönü 27° ve

kazancı 12dB elde edilmiştir. Görüldüğü üzere frekans değişimi ile antenin analobu 25° kaydırılmıştır.



Şekil 10. Işınma Paterni (a) 9.6 GHz (b) 10 GHz (c) 10.8 GHz.

Şekil 10'da ışınma paterni 3 boyutlu olarak incelenmiştir. Frekans arttıkça antenin analob huzmesi yönlendirilmiştir.

Çizelge 2'de anten performans analizi özetlenmiştir. 9.6 GHz ile 10.8 GHz arasında anahızmesi 0° ile 27° arasında yönlendirilmiştir. Anten kazancı 8dB ile 13dB

arasında değişmiştir. 3dB açılal bant genişliğinin ise 12° ile 14° arasında değiştiği gözlenmiştir. Tasarlanan anten modeli ile huzme kontrolü kritik öneme sahip radar sistemlerinin karmaşıklığı ve maliyeti azaltılacaktır. Ayrıca dar huzmeli ve farklı yönleri frekans bazlı tarayabilecektir. Bu sayede tarama alanı sürekli taranacaktır.

Çizelge 2. Performans analizi($\phi=0$)

F (GHz)	Anahüzme (Derece)	Kazanç (dB)	3dB Açısal Genişlik (Derece)	Yan Lob Seviyesi (dB)
9.6	2	8.12	13.7	-15.6
9.7	4	11.9	12.9	-19.4
9.8	7	13.2	12.6	-20.2
9.9	9	13.2	12.3	-16.9
10	11	13.1	12.1	-12.8
10.1	13	13	12.2	-9.2
10.2	15	12.7	12.9	-6.2
10.3	17	12.1	13.8	-4
10.4	19	11.9	14	-2.8
10.5	21	11.7	14	-2.1
10.6	23	11.8	13.5	-2
10.7	25	12	12.9	-2.3
10.8	27	12	13.2	-2.5

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında 9.4 GHz ile 10.8 GHz frekansları arasında çalışan frekans değişimine bağlı olarak ana hüzme yönlendiriciliğine sahip dalga yürüyen anten modeli tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antenin kazancı 3dB ile 13dB arasında değişmektedir. Anahüzme açısı 0° ile 27° arasında tarama gerçekleştirilmektedir. Yürüyen dalga antenler, düşük maliyet ve üretiminin kolaylığı dolayısıyla ayrıca diğer yüzeysel bileşenlerle uyumlu çalışması sayesinde günümüzde oldukça ilgi görmektedirler.

Yapılan simülasyonlarda anten sonlandırmasında yer alan direnç değerinin değişimi ile geridönüş kaybı, kazanç ve ana hüzme açısına etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemelerde; anten kazancını arttırmak için mikroşerit eleman sayısı artırılmalıdır ancak eleman sayısı arttıkça empedans azalmaktadır, bu nedenle sonlandırma direncinin seçiminin önem arz ettiği görülmüştür. Anten bant genişliğini arttırmak için dielektrik malzeme yüksekliği artırılmalı ya da malzeme permitivitesi azaltılmalıdır.

Önerilen yapı ile radar sisteminin boyutu ve maliyeti düşürülebilecektir. Yürüyen dalga antenli radarlar ile ardışık dizi anten elemanları, merkez frekansa nazaran daha küçük bir frekans artımı eklenmiş sinyallerle sürülürler ve bu sayede uzayın; menzilin, zamanın ve açının bir fonksiyonu olarak sürekli taranması sağlanmaktadır.

Dizi elemanlarına uygulanan frekans artımının kontrolü ile hüzme hareketi; açı, menzil ve zaman eksenlerinde kontrol edilebilir ve bu sayede temel radar fonksiyonları yerine getirilebilir. Yine aynı şekilde frekans artımının kontrolü ile hüzme genişliği ve menzil çözünürlüğü gibi radar performans parametreleri optimize edilebilir. Ayrıca kolay imalatı ve yüksek performansı ile X bant radar sistemlerinde kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

“2017.F14.02.01” no’ lu proje Artvin Çoruh Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Chen AC, Lu ZH, Tang CL, 2005. A Loop Antenna for WLAN Application. IEEE Asia-Pacific Conf. Proc., 2s, Taipei, Taiwan.
- Collins RE, Zucker FJ, 1969. Antenna Theory, New York: McGraw-Hill, ch. 19–20, pt. Part 2.
- Garg R., Bhartia P, Bahl I, Ittipiboon A, 2001. Microstrip antenna design handbook. Artech House Antennas and Propagation Library, 1-2.
- Garg R, Reddy VS, 2003. Edge Feeding of Microstrip Ring Antennas, IEEE Trans. Antennas Propag., 51(8): 1941-1947.
- Goldstone L, Oliner AA, 1959. Leaky-wave antennas I: Rectangular waveguides. IRE Trans. Antennas Propag., 7(4): 307–319.
- Gomez JL, Quesada FD, Melcón AA, 2005. Analysis and design of periodic leaky-wave antennas for millimeter wave band in hybrid waveguide-planar technology. IEEE Trans. Antennas Propag., 53(9): 2834–2842.
- Guglielmi M, Boccalone G, 1991. A novel theory for dielectric-inset waveguide leaky-wave antennas. IEEE Trans. Antennas Propag., 39(4): 497–504.
- Kohn R, Yazdanboost KY, 2005. Ultra Wideband L-Loop Antenna, IEEE Int. Conf., 201-205.
- Oliner AA, 1987. Leakage from higher modes on microstrip line with application to antennas. RadioSci., 22(6): 907–912.
- Oliner AA, Johnson RC, 1993. Leaky-Wave Antennas. Antenna Engineering Handbook, 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Pozar DM., Schaubert DH, 1995. Microstrip antennas. IEEE Press, New York.
- Xu F, Li L, Wu K, Delprat S, Chaker M, 2008. Parameter extraction of interdigitals low-wave coplanar waveguide circuits using finite Difference frequency domain algorithm. Int. J. RF Microw. Comput.- Aided Eng. 18(3): 250–259.
- Xu F, Zhang Y, Hong W, Wu K, Cui TJ, 2003. Finite-difference frequency -domain algorithm for modeling guided-wave properties of substrate integrated waveguide. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 51: 2221–2227.