

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 065202 (1346-1352)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 065202 (1346-1352)

DOI: 10.35414/akufemubid.1145751

Araştırma Makalesi / Research Article

77 GHz Merkez Frekansındaki Otomotiv Radarları için Çift Polarizasyonlu Anten Dizisi Tasarımı

Furkan Muhammed TAYDAŞ^{1*}, Selçuk PAKER¹¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Telekomünikasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul**Sorumlu Yazar e-posta: taydas20@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7758-644X>spaker@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1769-1835>

Geliş Tarihi: 20.07.2022

Kabul Tarihi: 27.10.2022

Öz

Anahtar kelimeler

Otomotiv radarları; Dizi anten; Çift eğik polarizasyon; Düşük yan kulakçık seviyesi

Bu bildiride, orta menzil otomotiv radarlarında kullanılmak üzere $\pm 45^\circ$ eğik polarizasyona, -20 dB yan kulakçık seviyesine sahip ve kazancı 16.3 dB, yarı güç hüzmeye genişliği yarı ekseninde 10° olan bir mikroşerit dizi anten sunulmuştur. Genlik bastırma yöntemleri ile tasarlanan seri besleme devresi dizi antenin beslemesinde kullanılmış ve düşük yan kulakçık seviyesi elde edilmiştir. Böylece yanlış alarm oranı azaltılmıştır. Yama anten dizisinin polarizasyonu $\pm 45^\circ$ eğik olacak şekilde ikinci bir besleme hattı yerleştirilmiş ve böylece çift polarizasyon özelliği elde edilerek toplanan bilginin doğruluğu artırılmıştır. Bilgisayar destekli tasarım programı ile benzetimi yapılan antenin sonuçları ile orta menzil otomotiv radarlarının ihtiyaç duyduğu anten özellikleri karşılanmıştır.

Dual Polarization Antenna Array Design for Automotive Radars at 77 GHz Center Frequency

Abstract

Keywords

Automotive radars; Array antenna; Dual slant polarization; Low side lobe level

In this paper, a microstrip array antenna with $\pm 45^\circ$ slant polarization, -20 dB side lobe level and 16.3 dBi gain, half power beamwidth 10° in the azimuth axis is presented for use in mid-range automotive radars. In the array antenna, low side lobe level is obtained by using the serial feeder circuit designed with amplitude suppression methods. Thus, the false alarm rate is reduced. A second feed line was placed with the polarization of the patch antenna array tilted by $\pm 45^\circ$, thus increasing the accuracy of the collected information by obtaining the double polarization feature. With the results of the antenna simulated with the computer aided design program, the antenna features required by the mid-range automotive radars have been met.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Otomotivlerin kullanımını daha güvenli ve kolay hale getirmek için çeşitli görüntüleme ve algılama teknolojileri geliştirilmektedir. Milimetrik-dalga uygulamalarının popüler ve tüketici odaklı bir uygulaması olan otomotiv radarları güvenlik önlemleri için kullanılan teknolojilere verilecek ilk örneklerdendir (Bamy *et al.* 2021). Yüksek çözünürlük, girişim etkilerinin düşük olması, artan frekansla birlikte anten ve ön RF devrelerinin boyutlarının küçülmesi gibi avantajlarıyla birlikte gelen milimetrik dalga radarları, otomotiv uygulamaları için ilgi odağı olmuştur.

Araçlarda yer alan radarlar ilk kullanımlarında, park etme esnasında uyarı verme gibi basit anlamda çalışırken daha sonraları uyarlamalı hız sabitleyici, şeritte tutma asistanı ve muhtemel kaza anında frenleme gibi araca doğrudan müdahale eden aktif güvenlik sistemlerinde de kullanılmış ve günümüzde popüler olan tam otonom araçlara temel oluşturmuşlardır (Herrero and Schoebel 2008). Tüm bu pasif ve aktif radar uygulamalarının düzgün çalışarak güvenli bir sürüş ortamı sağlaması için yüksek çözünürlük ve doğruluk ihtiyacı bulunmaktadır. Bunun sağlanması amacıyla daha önceleri kullanılan 24 GHz frekans bandından

vazgeçilmiş, 76-77 GHz ve 77-81 GHz frekansları tercih edilmiştir (Hasch *et al.* 2012). Böylece, daha yüksek bant genişliği, ölçümlerdeki yüksek çözünürlük ile doğruluk oranları ve yüksek iletim gücü ihtiyacı karşılanmıştır. Ayrıca sensörlerin araç yapısını bozmadan araç gövdesine yerleştirilebilmesi için gereken küçük boyutlar artan frekans ile sağlanmıştır.

Farklı amaçlarla kullanılan radar sensörleri çalıştıkları mesafe baz alındığında Kısa Menzil Radarı (KMR), Orta Menzil Radarı (OMR) ve Uzun Menzil Radarı (UMR) olarak üç grupta sınıflandırılabilir (Hasch *et al.* 2012). Uyarlamalı hız sabitleyici gibi sürüş destek sistemleri uzun menzil radarlara; kör nokta uyarısı, şerit değiştirme yardımcısı ve çapraz trafik uyarı sistemleri orta menzil radarlara örnek verilebilirken park etme veya yaya algılama sistemleri kısa menzil radar uygulamalarıdır. Bu sensörlerin performansı kullanılan antenin türüne ve özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Sınıflandırmaya ait anten özelliklerini de içeren detaylı bir gösterim Çizelge-1'de verilmiştir.

Otomotiv radarlarında kullanılan antenlerin çalışma frekansı ve yarı güç hüzme genişliğine (YGHG) ek olarak diğer iki önemli özellik polarizasyon ve düşük yan kulakçık seviyesidir. Radar saçılma problemlerinde, menzil farkının kullanılarak hedef ayırımının gerçekleştirilemediği durumlarda farklı hedeflerin veya hedef ile karmaşıklığın ayırt edilmesinde polarizasyon kullanılabilir. Örneğin, 45 derece eğik polarizasyona sahip antenlerin kullanılmasıyla karşı yönden ve aynı yönden gelen araçlardaki polarizasyonlar birbirine dik olacak ve böylece sinyaller arası girişimin azalmasıyla hedef tespiti kolaylaşacaktır. İkili polarizasyonun kullanıldığı durumlarda ise daha yüksek hedef tespit ve kestirim oranları yakalanabilir (Porter *et al.* 1999, Shin *et al.* 2013). Yüksek yan kulakçık seviyesi çarpışma algılayıcı sistemlerde yanlış alarm olasılığını arttırmaktadır. Bu nedenle otomotiv radar sistemlerinde bu seviyelerin düşük olması istenmektedir.

Bu çalışmada, 77 GHz merkez frekansında OMR sistemleri için bir anten dizisi tasarımı gerçekleştirilmiştir. İstenilen yan kulakçık seviyesinin sağlanması amacıyla genlik dağılımı uygulanmış bir seri besleme devresi tasarlanmış ve

dizi antenin besleme ağı olarak kullanılmıştır. Detaylı sunum Bölüm-2'de verilmiştir. Yüksek doğruluk ve sınıflandırma yeteneklerinin sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan 45 derece eğik ikili polarizasyona sahip anten dizisi Bölüm-3'te verilmiştir. CST MWS elektromanyetik benzetim programı kullanılarak modellenen besleme devresi ve anten dizilerine ait sonuçlar Çizelge -1'de verilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1. Otomotiv radarlarının sınıflandırması (Herrero and Schoebel 2008)

Parametre	KMR	OMR	UMR
Maksimum İletim Gücü	55 dBm / MHz	-9 dBm / MHz	-9 dBm / MHz
Çalışma Bandı	76-77 GHz	77-81 GHz	77-81 GHz
Çalışma Bant Genişliği	600 MHz	600 MHz	4 GHz
Menzil	10-250 m	1-100 m	0.15-30 m
Menzil Çözünürlüğü	0,5 m	0,5 m	0,1 m
Yanca Ekseninde Yarı Güç Hüzme Genişliği (YGHG) (maksimum)	±15°	±40°	±80°
Yükseliş Ekseninde Yarı Güç Hüzme Genişliği (maksimum)	±5°	±5°	±10°

2. Materyal ve Metot

Antenlerin düzlemsel yapıda ve küçük boyutlu olması radarların araç yapısını bozmadan uygun bölümlerde kullanımına imkân vermektedir. Mikroşerit yama antenler bu nedenle otomotiv uygulamalarında en sık tercih edilen anten türüdür. Dizi antenlerin kullanımıyla birlikte birim elemana göre daha yüksek kazanç ve düşük yan kulakçık seviyesi sağlanabilirken farklı besleme yöntemleri ile boyutsal ve elektriksel olarak farklı özellikler elde edilebilmektedir (Sürmeli ve Türetken 2011, Elo *et al.* 2017). Bu çalışmada, anten birbirine göre 90° faz farkı oluşacak şekilde bağlanmış ikili bir besleme ağı bulunmaktadır. Ayrıca bu ağ yardımı ile yan kulakçık seviyesi düşürülmüştür.

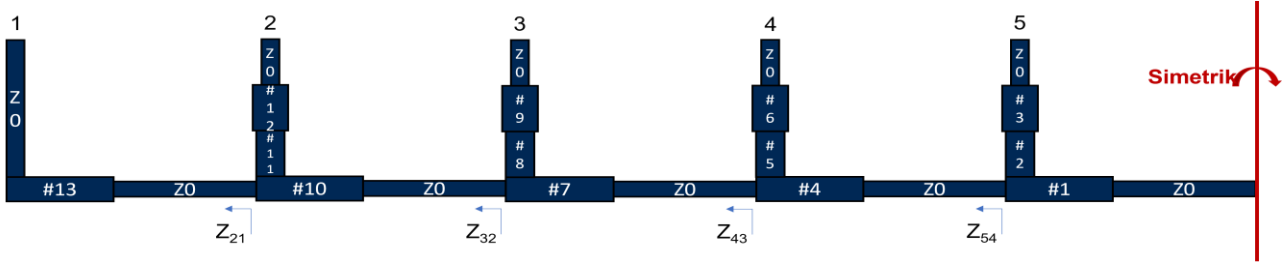
2.1 Seri besleme devresinin tasarımı ve benzetimi

Dizi anten yapıları paralel ve seri besleme ağları kullanılarak tasarlanır. Paralel besleme yapılarının tasarımı kolay olsa da geniş alan ihtiyacı vardır ve

iletim hatlarının uzunluğu nedeniyle kayıp fazladır. Seri besleme ağları ise anten elemanlarını tek bir hat üzerinden besleyerek minimum hat uzunluğunun elde edilmesini sağlarken çalışma bant aralığı paralel beslemeye göre dardır (Aydemir 2017). Otomotiv radar uygulamalarında büyük boyutlu yapılar için gerekli montaj alanı sağlanamayacağından minimum boyutların elde edilmesini sağlayan seri besleme devreleri tercih edilmiştir.

$$YGHG = \frac{\lambda}{(N-1) \times d} \quad (1)$$

λ , merkez frekanstaki dalga boyunu, N , anten eleman sayısını ve d , dalga boyu cinsinden anten elemanları arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. OMR sistemleri için gereken YGHG, Çizelge-1'de yükseliş ekseninde 10° (≈ 0.17 radyan) olarak verilmiştir. Anten elemanları arası mesafenin artmasıyla hüzme genişliğinin daraldığı ancak bununla birlikte yan kulakçık seviyesinin de arttığı Adnan vd. (2013)'te gösterilmiş ve en uygun değer için dalga boyunun yarısı olarak belirtilmiştir.



Şekil 1. 10 elemanlı seri besleme devresinin eş bir yarısı

Ancak bu çalışmada, anten dizisi tasarımında ayrıca bir yan kulakçık bastırma yöntemi uygulanacağından bahsedilen iki özellik için en uygun değer olarak antenler arası mesafe, $d = 0.65\lambda$ alınmıştır. (1)'de ilgili değerler yerine yazılıp anten dizisi için gereken eleman sayısının elde edilmesi amacıyla denklem çözülmüş ve N değerinin 10 olduğu bulunmuştur. Dizi anten yapısı, simetrik olduğundan dolayı besleme ağ devresi de başlangıç noktasına göre simetriktir. Şekil 1'de 10 elemanlı seri beslemesinin bir yarısı verilmiştir.

Sistemlerdeki hata oranını azaltmak ve hedef tespit oranını yükseltmek için yan kulakçık seviyesinin bastırılması gerekmektedir. Anten elemanlarına gelen güç oranları uygun değerler ile değiştirilirse istenilen yan kulakçık seviyeleri elde edilebilir. Anten beslemesinde kullanılan iletim hatlarının

kalınlıkları tekdüze olmayan genlik dağılımı yöntemleri ile hesaplanan bir orana göre belirlenir ve güç oranları ayarlanabilir. Anten yönlülüğü, hüzme genişliği ve yan kulakçık seviyelerinin optimum değerde olacak şekilde tasarlanacağı durumlarda Taylor genlik dağılımı en uygun yöntemlerden biridir. 10 elemanlı bir anten dizisinde -20 dB yan kulakçık seviyesi elde edebilmek için gereken genlik dağılımı katsayıları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 10 Elemanlı -20 dB YKS'ye sahip dizi için Taylor genlik dağılımı

Eleman	Genlik Katsayısı	Eleman	Genlik Katsayısı
1	0.152	6	0.422
2	0.235	7	0.379
3	0.314	8	0.314
4	0.379	9	0.235
5	0.422	10	0.152

Şekil 1'de verilen $Z_{21} - Z_{54}$ empedansları (2)'den hesaplanır. Z_0 iletim hattının empedansı 100Ω olarak seçilmiştir. Daha düşük değerlerde hat kalınlığının artması nedeniyle kayıp yükselecektir.

100Ω 'dan daha büyük değerlerde ise hat kalınlıkları azalacak ve üretim zorlukları oluşacaktır (Aydemir 2017).

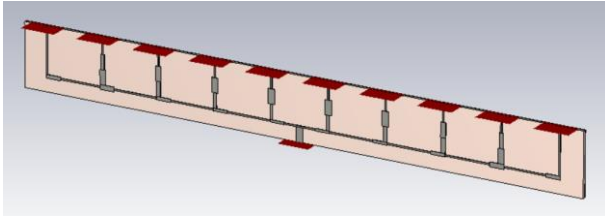
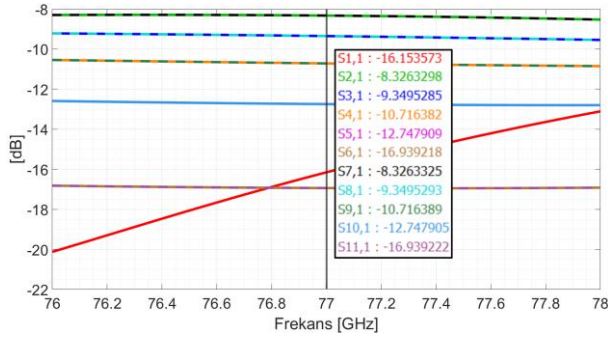
$$Z_{n+1,n} = \frac{P_{n+1}}{P_1 + \dots + P_n} \times Z_0, \quad n \geq 1 \quad (2)$$

1-13 numaralı hatların empedans değerleri ise $Z_{21} - Z_{54}$ empedansları ile Z_0 arasında paralellik formülleri ve çift hatlı çeyrek dalga empedans dönüştürücü formülleri kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 3'te verilmiştir. Taban malzemesi olarak Rogers firması tarafından 77 GHz frekansında çalışan otomobil radarlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve dielektrik sabiti (ϵ_r) 3, kalınlığı (h) 0.127 mm olan Rogers RO3003™ kullanılmıştır. (Int Kyn. 1).

Çizelge 3. Seri besleme devresi iletim hattı empedans değerleri

İletim Hattı	Empedans [Ω]	İletim Hattı	Empedans [Ω]
Z ₀	100	Z ₅	69.75
Z ₂₁	32.6	Z ₆	65
Z ₃₂	70.2	Z ₇	64.2
Z ₄₃	115.1	Z ₈	75
Z ₅₄	173.15	Z ₉	62.8
Z ₁	79.6	Z ₁₀	49.6
Z ₂	78.95	Z ₁₁	100
Z ₃	60	Z ₁₂	57.15
Z ₄	73.15	Z ₁₃	70.71

İletim hatları bu yapıtaşın üzerine yerleştirilerek CST MWS elektromanyetik benzetim programında analizi gerçekleştirilmek üzere 10 elemanlı bir seri besleme devresinin üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Benzetim ortamındaki devre Şekil 2'de, analiz sonuçları ise Şekil 3'te verilmiştir.

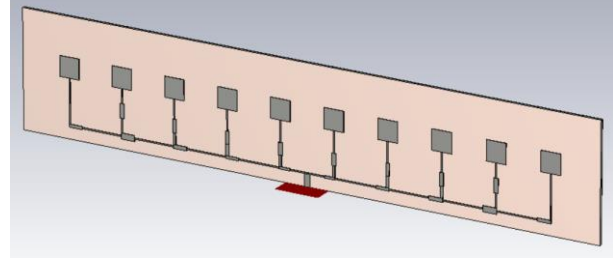
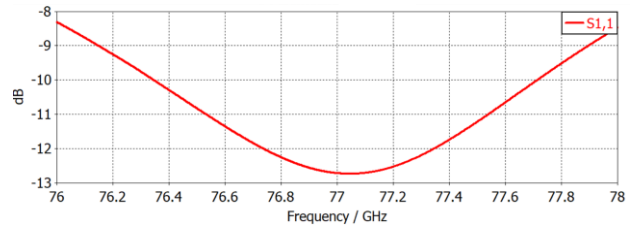
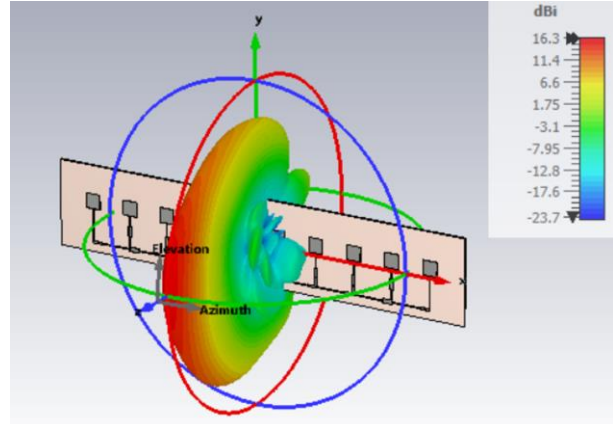
**Şekil 2.** Genlik dağılımı uygulanmış 10 elemanlı seri besleme devresi**Şekil 3.** Seri besleme devresi saçılma parametreleri benzetim sonucu

Besleme devresinin saçılma parametreleri incelendiğinde birbirlerinin simetriği olan hatların sonuçlarının da benzer olduğu görülmektedir. Genlik katsayısıyla doğru orantılı olarak ortadaki hatlardan uçtaki hatlara doğru ışımaya olan etkinin azalacağı Şekil 3'ten görülmektedir.

2.2 Tek polarizasyonlu yama anten dizisi

Yama anten dizisinde kullanılacak anten elemanının boyutları, Balanis (2016)'da yer alan denklemlerden genişlik ve yükseklik için sırasıyla 1.377 mm ve 1.064 mm olarak hesaplanmıştır. Rogers RO3003™ yapıtaş

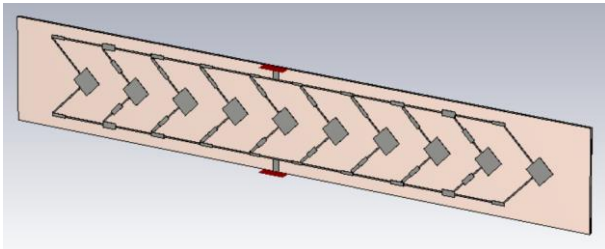
üzerine yerleştirilen yama anten dizisi Şekil 4'te verilmiştir. Boyutlar, geri yansıma katsayısının merkez frekansta rezonansa gelmesi için optimize edilmiş ve her iki değer 1,0225 mm olarak seçilmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

**Şekil 4.** Tek polarizasyonlu -20 dB YKS'ye sahip anten dizisi**Şekil 5.** Tek polarizasyonlu anten dizisi geri yansıma grafiği**Şekil 6.** Tek polarizasyonlu anten dizisinin 77 GHz frekans noktasındaki 3B ışımaya örüntüsü

2.3 Çift polarizasyonlu yama anten dizisi

10 elemanlı seri besleme devresi ve tek polarizasyonlu yama anten dizisinin tasarım aşamaları bölüm 2.2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda orta menzil otomotiv radarlara için istenilen özellikler sağlanmaktadır. Ancak radarlarda önemli parametrelerden biri de polarizasyondur. İkili polarizasyona sahip antenler ile ortamdaki yansımalar tüm özellikleri ile toplanarak işlenebilir ve elde edilen bilginin doğruluğu arttırılır. Örneğin,

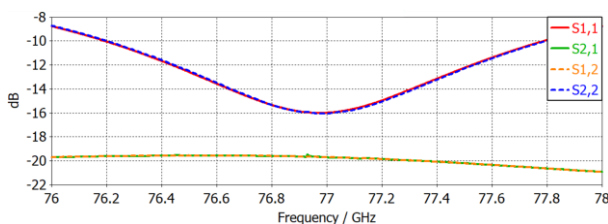
ikili polarizasyon özelliği kullanılarak yolun ıslak zemin veya gizli buzlanma olduğu anlaşılabilir. Bu nedenle, Toit ve Cloete (1987)'de verilen paralel beslemeye ve ikili polarizasyona sahip anten dizisi temel alınarak seri beslemeli anten dizileri için yeni bir geometri oluşturulmuştur. Anten dizisi üzerinde simetrisinin sağlanabilmesi için besleme hatları ve yama anten 45 derece döndürülmüş ardından yeni bir besleme ağı eklenmiştir. Sonuçta, ± 45 derece eğik ikili polarizasyona, -20 dB yan kulakçık seviyesine sahip bir dizi anten elde edilmiştir. Modelin gösterimi Şekil 7'de verilmiştir.



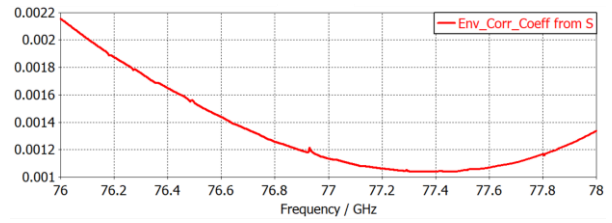
Şekil 7. Çift polarizasyonlu -20 dB YKS'ye sahip dizi anten tasarımı

3. Bulgular

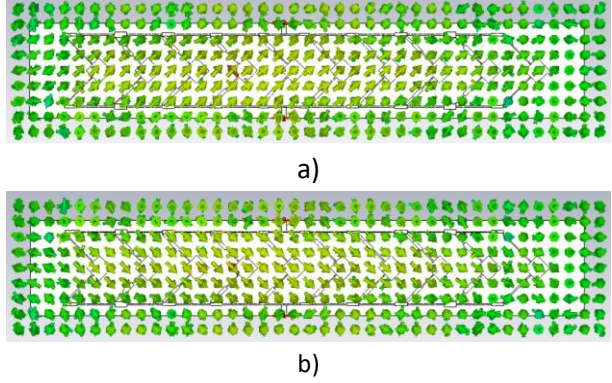
Antenlerin besleme noktalarından verilen gücün geri yansıma oranı ve birden fazla porta sahip antenlerin portları arasındaki izolasyon saçılma matrisi ile verilir. Şekil 7'de verilen nihai anten tasarımının benzetim sonucu elde edilen saçılma matrisi Şekil 8'de verilmiştir. Portlardan gerçekleşen ışımının birbirlerine olan etkisini gösteren korelasyon katsayısının grafiği ise Şekil 9'da yer almaktadır. Bu değer, 0'a yaklaştıkça portların birbirlerine olan etkisi ortadan kalkmaktadır. Şekil 7'de verilen $\pm 45^\circ$ eğik polarizasyona sahip anten dizisinin her iki portu için elektrik alan vektörleri Şekil 10'da yer almaktadır. Bu vektörlerin doğrultusu antenin polarizasyonunu göstermektedir. Anten port 1'den beslendiğinde $+45^\circ$ eğik polarizasyona, port 2'den beslendiğinde ise -45° eğik polarizasyona sahip olmaktadır.



Şekil 8. Çift polarizasyonlu anten dizisine ait saçılma parametreleri

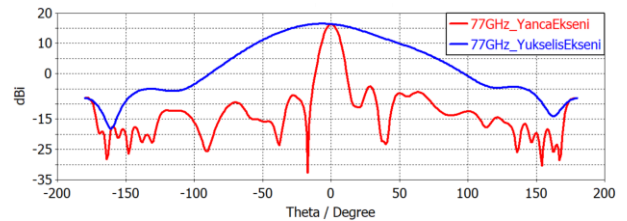


Şekil 9. Çift polarizasyonlu anten dizisine ait korelasyon katsayısı grafiği

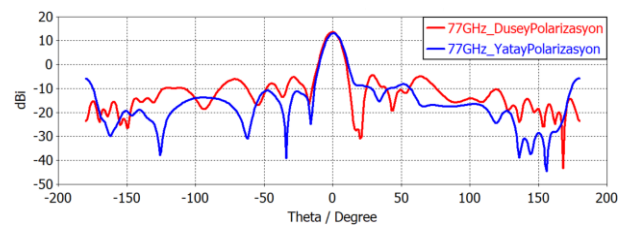


Şekil 10. Çift polarizasyonlu anten dizisinin elektrik alan vektörleri a) Port 1 b) Port 2

Anten dizisinin merkez frekans noktası olan 77 GHz'deki ışım örüntüsü Şekil 11'de verilmiştir. Antenin kazancı 16,3 dBi'dir. Yanca ekseninde 10° yarı güç hüzm genişliğine ve -20,5 dB yan kulakçık seviyesine sahip olan dizi antenin yükseliş ekseninde ise bu değerler sırasıyla $66,2^\circ$ ve -20,8 dB'dir. Antenin yatay ve düşey polarizasyondaki ışım örüntüleri ise Şekil 12'de yer almaktadır.



Şekil 11. Çift polarizasyonlu anten dizisi genlik ışım örüntüleri



Şekil 12. Çift polarizasyonlu anten dizisi yatay ve düşey polarizasyondaki ışım örüntüleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Çizelge-1'de özellikleri verilen orta menzil otomotiv radarları için $\pm 45^\circ$ eğik polarizasyona sahip bir dizi anten yapısı tasarlanmıştır. Analiz sonuçlarında, 77 GHz merkez frekans noktasında 16.3 dBi kazanca, yanca ekseninde 10° yarı güç hüzmeye genişliğine ve besleme devresinde genlik bastırma yöntemlerinin kullanılmasıyla -20.5 dB yan kulakçık seviyesine sahip bir dizi anten elde edilmiştir. Böylece OMR sistemleri için gereken anten özellikleri başarıyla karşılanmıştır.

Elde edilen sonuçların karşılaştırılması için ayrıca mikroşerit anten dizisinin ışına örüntüsü değeri anten dizisi için matematiksel eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

Mikroşerit yama anten elemanına ait ışına örüntüsünü elde etmek için kullanılan elektrik ve manyetik alan denklemleri Dawoud ve Amjad (2005)'de hesaplanmış ve (3)-(8)'de verilmiştir. Işıma örüntüsü tek bir eleman için hesaplandıktan sonra dizi faktörü eşitliği ile çarpılarak dizi antene ait ışına örüntüsü elde edilir. Eşit aralıklı dizilmiş tek düze olmayan besleme genlikleri kullanılarak tasarlanan ve çift sayıda eleman içeren anten dizisine ait dizi faktörüne ait eşitlik (9)'da verilmiştir.

$$E_\theta = -j\eta I_0 \frac{\exp(-jkr)}{\pi r} \frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin\theta \sin\phi\right)}{kW \tan\theta \tan\phi} \quad (3)$$

$$\times \frac{\left[\cos\left(\frac{kL}{2} \sin\theta \cos\phi\right) - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)\right]}{\left(1 - (\sin\theta)^2 (\cos\phi)^2\right)}$$

$$E_\phi = j\eta I_0 \frac{\exp(-jkr)}{\pi r} \frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin\theta \sin\phi\right)}{kW \sin\theta} \quad (4)$$

$$\times \frac{\left[\cos\left(\frac{kL}{2} \sin\theta \cos\phi\right) - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)\right]}{\left(1 - (\sin\theta)^2 (\cos\phi)^2\right)}$$

$$H_\theta = -jI_0 \frac{\exp(-jkr)}{\pi r} \frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin\theta \sin\phi\right)}{kW \sin\theta} \quad (5)$$

$$\times \frac{\left[\cos\left(\frac{kL}{2} \sin\theta \cos\phi\right) - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)\right]}{\left(1 - (\sin\theta)^2 (\cos\phi)^2\right)}$$

$$H_\phi = -jI_0 \frac{\exp(-jkr)}{\pi r} \frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin\theta \sin\phi\right)}{kW \tan\theta \tan\phi} \quad (6)$$

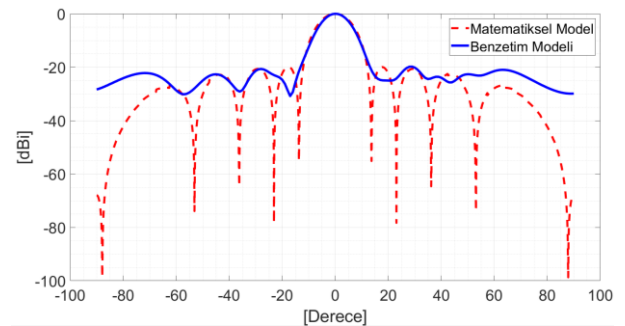
$$\times \frac{\left[\cos\left(\frac{kL}{2} \sin\theta \cos\phi\right) - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)\right]}{\left(1 - (\sin\theta)^2 (\cos\phi)^2\right)}$$

$$E = \sqrt{(E_\theta)^2 + (E_\phi)^2} \quad (7)$$

$$H = \sqrt{(H_\theta)^2 + (H_\phi)^2} \quad (8)$$

$$DF = \sum_{n=1}^M a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2} kd \cos\theta\right] \quad (9)$$

(3)-(8)'de verilen eşitliklerde η ortamın öz empedansı olarak tanımlanır ve manyetik (μ) ile elektriksel (ϵ) geçirgenlik katsayılarının kök içerisinde birbirlerine oranından hesaplanır. k , dalga sayısını ve ϕ ile θ ise sırasıyla yanca ve yükseliş eksenlerindeki açıları temsil etmektedir. Yama antenin genişliği W , uzunluğu ise L olarak verilmiştir. Farklı besleme katsayılarına sahip bir dizi anten için kullanılan dizi faktörü eşitliği olan (9)'da M , dizi içerisindeki birim eleman sayısını; a_n ise bu elemanların uyarılma katsayısını belirtirken d , anten elemanları arasındaki mesafedir. Matematiksel eşitlikler kullanılarak elde edilen ışına örüntüsü ile CST MWS benzetim programı kullanılarak elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Dizi anten benzetim modeli ve matematiksel model karşılaştırması

Şekil 13'te verilen grafik incelendiğinde, ana hüzmeler beklenildiği gibi birbirleri ile tutarlıdır. CST MWS programının tam dalga çözüm yöntemlerini kullandığından benzetim sonuçları, kuplaj etkileri ile

iletim hattı kayıplarını içermekte iken matematiksel modelde ise bu etkiler sonuçlara dahil edilememektedir. Grafikte uzak açılarda görülen fark bu etkilerden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca antenin besleme portları, elektrik alanın iki bileşeni arasındaki faz farkı $+90^\circ$ veya -90° olacak şekilde toplanarak ışına sağlanırsa sırasıyla sol el ve sağ el dairesel polarizasyona sahip de bir ışımada elde edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmaya katkılarından dolayı Dr. Koray SÜRMEİ ve Dr. Türker İSENİK'e teşekkürlerimizi sunarız.

5. Kaynaklar

Adnan, N.H.M., Rafiqul, I., Alam, Z., 2017. Effects of inter element spacing on large antenna array characteristics. *IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*, 2017, 1-5.

Aydemir, A.E., 2017. Development of K band microstrip patch antenna array for traffic radars. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 74.

Balanis, C. A., 2016. *Antenna Theory: Analysis and Design* 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc. 719-875.

Bamy, C.L., Mbango, F.M., Konditi, D.B.O., Mpele, P.M., 2021. A compact dual-band Dolly-shaped antenna with parasitic elements for automotive radar and 5G applications. *Heliyon*, **7**, 1-7.

Dawoud, M.M., Amjad, M.K., 2005. Analytical solution for mutual coupling in microstrip patch antenna arrays. *The Arabian Journal for Science and Engineering*. **31**, 47-60.

Elo, Y.L., Zulkifli, F.Y., Rahardjo, E.T., 2017. Design of wideband microstrip antenna with parasitic element for 4G/LTE application. *15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*. 2017, 110-113.

Hasch, J., Topak, E., Schnabel, R., Zwick, T., Weigel, R., Waldschmidt, C., 2012. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. **60**, 845-860.

Herrero P., Schoebel, J., 2018. Planar antenna array at D-band fed by rectangular waveguide for future

automotive radar systems. *38th European Microwave Conference*. 2008, 1030-1033.

Porter, B.G., Rauth, L.L., Mura, J.R., Gearhart, S.S., 1999. Dual-polarized slot-coupled patch antennas on Duroid with teflon lenses for 76.5-GHz automotive radar systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. **47**, 1836-1842.

Shin, D., Kim, K., Kim, J., Park, S., 2013. Design of low side lobe level millimeter-wave microstrip array antenna for automotive radar, *Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*. 2013, 677-680.

Sürmeli, K., Türetken, B., 2011. U-slot stacked patch antenna using high and low dielectric constant material combinations in S-band, *XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*. 2011, 1-4.

Toit, L., Cloete, J., 1987. Dual polarized linear microstrip patch array, *Antennas and Propagation Society International Symposium*. 1987, 810-813.

İnternet kaynakları

1-<https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates>, (25.06.2022)