



A new method on pattern correction in broadside planar frequency diverse arrays

Muhammed Eyyub Günay¹, İhsan Kanbaz*¹, Ertuğrul Aksoy¹

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Planar frequency diverse array antenna systems modelling
- The distorter effect of conformal states on the radiation pattern of the system
- Broadside gain compensation with the method of updating frequency increment

Keywords:

- Pattern correction method
- Conformal FDA
- Gain compensation
- Broadside radiation characteristic
- Frequency increment

Article Info:

Research Article

Received: 01.03.2023

Accepted: 27.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1258419

Correspondence:

Author: İhsan Kanbaz

e-mail:

ihscanbaz@gazi.edu.tr

phone: +90 552 326 0958

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the method of updating frequency increment is proposed for correcting pattern caused by external factors in planar FDA systems. The field distribution related to the radiation value of the system in case of normal, conformal and corrected with the proposed method respectively is given in Figure A. As can be seen from the Figure A, the periodic behavior of the system under the distorter effect is also different. However, it is seen that the periodicity of the system can be preserved with the proposed approach.

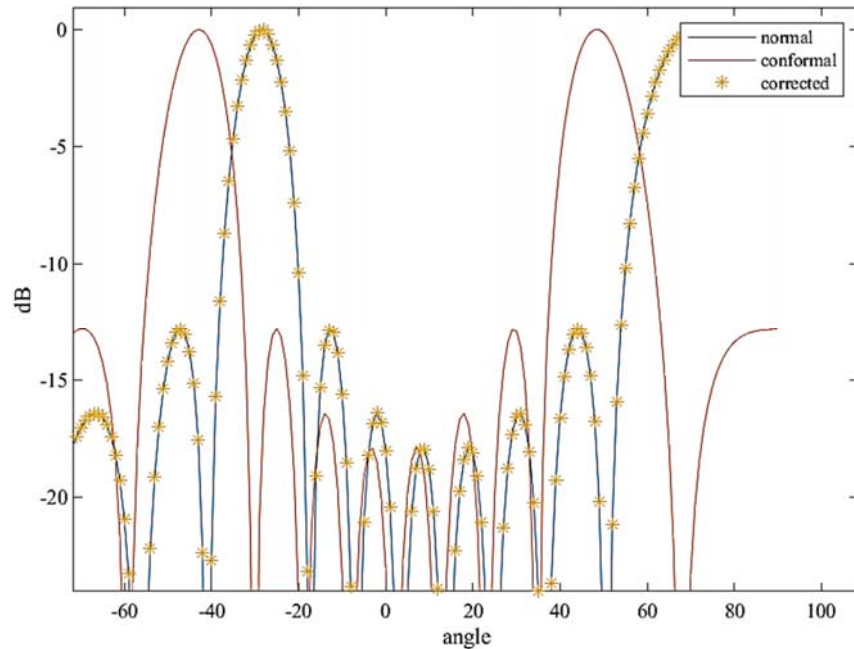


Figure A. Normalized radiation value-angle field distribution

Purpose: Pattern correction and compensate for the broadside gain in conformal planar FDA systems.

Theory and Methods: In this study, a planar FDA system with $N \times M$ elements positioned on the x and y axis with a distance d between them has been considered. A point in the far-field has been supposed and the amplitude value of the electric field (\vec{E}) at this point has been expressed. Thus, the array factor of the system has been expressed as a function of range, angle and time. After that, the model of the FDA when exposed to external factors has been illustrated and the array factor of the conformal system has been expressed again. So, the radiation characteristics and field distributions have been demonstrated for both cases to discuss the behavior of the system under the distorter effect and the method of updating frequency increment has been proposed to preserve the radiation characteristic of the system with a numerical example.

Results: This study determined how to update the frequency increment between the array elements. As can be seen from results of the numerical example using the proposed method, the pattern of the system can be corrected so the radiation characteristic of the system can be preserved.

Conclusion: In this study, it is aimed to correct the changing radiation pattern as a result of distortions of a planar FDA in conformal states. The method of updating frequency increment between array elements is proposed. According to the results of numerical example and discussions, the proposed method is an effective solution in terms of simplicity and controllability since frequency increment is a parameter of the radiation pattern in FDA and there is no need to use a phase shifter circuit or any complex component.



Enine ışık düzlemsel ayırık frekanslı dizi antenlerde örüntü düzeltmede yeni bir yöntem

Muhammed Eyyub Günay^{ID}, İhsan Kanbaz*^{ID}, Ertuğrul Aksoy^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Düzlemsel ayırık frekanslı dizi anten sistemi modelleme
- Konformal durumların sistemin ışık örüntüsündeki bozucu etkisi
- Frekans artırımını güncelleme tekniği ile enine ışık kazancı kompanzasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.03.2023

Kabul: 27.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1258419

Anahtar Kelimeler:

Örüntü düzeltme yöntemi,
konformal FDA,
kazancı kompanzasyonu,
enine ışık karakteristiği,
frekans artırımı

ÖZ

Bu çalışmada, düzlemsel ayırık frekanslı dizi anten sistemlerinde (Frequency Diverse Array-FDA) konformal durumlarda örüntüde meydana gelen bozulmanın düzeltilmesine yönelik yeni bir yaklaşım önerilmiştir. İlk olarak FDA sistemlerinin diğer geleneksel dizi anten sistemlerinden farklılıkları değerlendirilmiş ve literatürdeki örüntü düzeltme yöntemleri üzerinde tartışılmıştır. Ardından, harici etkenlerle uzaysal koordinatlarının değişmesi durumunda sistemin enine ışık karakteristiğini korumak ve oluşan bozulmaları kompanze etmek için FDA sisteminin dizi faktörünün bir parametresi olan elemanlar arası frekans artırımını güncelleme tekniği önerilmiştir. Bu parametre normalde sabittir ve merkezi frekanstan çok küçük olmalıdır. Son olarak önerilen yöntemin kullanılabilirliği nümerik örnekler aracılığıyla analiz edilmiştir.

A new method on pattern correction in broadside planar frequency diverse arrays

HIGHLIGHTS

- Planar frequency diverse array antenna systems modelling
- The distorter effect of conformal states on the radiation pattern of the system
- Broadside gain compensation with the method of updating frequency increment

Article Info

Research Article

Received: 01.03.2023

Accepted: 27.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1258419

Keywords:

Pattern correction method,
conformal FDA,
gain compensation,
broadside radiation
characteristic,
frequency increment

ABSTRACT

In this study, a new approach is suggested about pattern correction due to the distortions by conformal situations in planar frequency diverse arrays (FDA). First, the differences of FDA systems from other conventional antenna array systems are evaluated and the pattern correction methods in the literature are discussed. Then, the technique of updating the inter-element frequency increment, which is a parameter of the array factor of the FDA system, is proposed in order to preserve the broadside radiation characteristic of the system and to compensate for the distortions in case the spatial coordinates change with external factors. Normally, the frequency increment between the array elements is constant and it must be much less than the central frequency of the system. Finally, the usability of the suggested technic is demonstrated with numeric examples.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : eyup.gunay@gazi.edu.tr, *ihsankanbaz@gazi.edu.tr, ertugrulaksoy@gazi.edu.tr /
Tel: +90 552 326 0958

1. Giriş (Introduction)

Günümüz teknolojik gelişmelerine cevap verebilmek için bilginin fiziksel bir bağlantı olmaksızın iletilmesi ve anlamlandırılmasında önemli bir yere sahip olan anten sistemleri sürekli bir gelişim safhasındadır. Bu gelişim sürecinde hüzme yönlendirilebilir anten sistemleri oldukça ilgi çeken bir araştırma konusu olarak yerini almıştır. Özellikle dizi anten uygulamalarının ortaya çıkması ile birlikte söz konusu sistemlere olan ilgi gittikçe artmış ve hüzmenin elektronik olarak yönlendirilmesine olanak sağlayan faz dizili anten sistemleri (Phased Array Antenna-PAA) akademik literatüre kazandırılmıştır. Faz dizili sistemler, dizi elemanları arasında uygun faz farkı vermek amacıyla kullanılan alt birim elektronik üniteleri ile anten ışına hüzmesinin istenilen açıya efektif bir şekilde yönlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır [1]. Sahip olduğu yüksek kazanç ve elektronik olarak hüzme yönlendirme kabiliyeti sayesinde özellikle hedef tespit ve tarama faaliyetlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır [2-4]. Buna rağmen, PAA sistemlerinin yalnızca açı bağımlı hüzme örüntüsü, yani hüzme yönlendirmesinin tüm menziller için tek bir açıda sabitlenmiş olması, daha fazla gelişimini ve uygulanabilirliğini büyük ölçüde sınırlamıştır [5]. Bu problemleri çözebilmek ve menzil bağımlı hüzme örüntüsü elde edebilmek için P. Antonik tarafından dizi elemanları arası frekans arttırımını esas alan, ayrıntılı frekanslı dizi anten (Frequency Diverse Array-FDA) isminde yeni bir sistem tanıtılmıştır [6-8]. Bu dizi konfigürasyonunda, her eleman merkezi frekansa göre çok küçük olan frekans kaymalarına sahip sinyaller ile modüle edilmektedir. Böylece PAA sistemlerinin yalnızca açı bağımlı hüzme örüntüsünden farklı olarak, FDA sistemleri dizi elemanlarının frekansını ayarlayarak menzil-açı bağımlı bir hüzme örüntüsü elde edebilmektedir [9-11]. Sistemin menzil ve açı bağımlı olması uzayda sadece belirli bir bölgeye ışın yapılmasına olanak tanımakta ve böylece odak dışında bulunan harici kaynakların bastırılması sağlanabilmektedir. Bu önemli özelliği FDA sistemlerini özellikle hedef izleme [12], kablosuz güç iletimi [13] ve güvenli iletişim [14] gibi geniş uygulama yelpazesi ile mükemmel bir opsiyon haline getirmektedir. İlerleyen çalışmalar ile FDA sisteminin menzil, açı ve zaman parametrelerince periyodik olduğu da ortaya çıkarılmıştır. Sistemin zaman parametresince periyodikliği ışın hüzmesinin uzayı sürekli taradığı anlamına gelmektedir ki bu da FDA sistemlerini radar uygulamaları için oldukça ilgi çekici kılmaktadır [15].

Bununla beraber literatürdeki çoğu FDA çalışması sistemin bir kaide üzerine kurulmasını gerektirir bu da ışın örüntüsünün rüzgar, sıcaklık ve hava boşluğu gibi bozucu etkenlere maruz bırakarak maksimum ışın azalmasına neden olur. Örneğin, bir dizi anten sisteminin takılı olduğu bir uçağın kanadı, hava akımındaki herhangi bir bozulma ile eğilip bükülebilmektedir. Bunun sonucunda her bir dizi elemanın uzaysal koordinatlarında kaymalar meydana gelir ve bu da özellikle enine ışın da olmak üzere dizinin ışınmasında farklılıklara neden olmaktadır. Uzaktan algılama veya izleme gibi hassas uygulamalarda, bu farklılıkların kompanse edilmesinin önemli bir aşama olduğunu belirtmek gerekir. Bu yüzden, literatürde bu bozulmaların düzeltilmesine yönelik farklı yaklaşımlar bildirilmiştir. Bunlardan biri, bozulmayı düzeltmek için faz farkı kullanarak PAA sistemlerinde önerilmektedir [16]. Böylece enine ışınadaki ışın yoğunluğu faz kaydırma devreleri kullanılarak kompanse edilebilmektedir. Uygulanabilir bir çözüm gibi görünse de pahalı ve kontrol edilmesi zor olan faz kaydırıcılar sistemi karmaşık hale getirmektedir. PAA sistemlerinde, besleme ağı ile hüzme yönlendirme kontrol devreleri ve faz kaydırıcılar, ana donanım maliyetinden sorumludur. Bu noktada literatürde, maliyet ve sistem karmaşıklığı arasındaki denge ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan birinde, düşük maliyetli bir PAA sistemi gerçekleştirebilmek için daha basit besleme, daha basit faz kaydırma ve daha basit hüzme yönlendirme kontrol

devresi kullanan her ikisi de lens konfigürasyonu olan iki anten dizisi konfigürasyonu sunmaktadır [17]. İlkinde, diyotlarla yüklü bir ortam sağlayan ve diyotları açıp kapatılarak gerekli faz kayması sağlayan bir Radant lens değerinde ise dielektrik sabiti uygulanan bir DC ön gerilimi ile değiştirilebilen ferroelektrik dielektrik malzeme kullanılmaktadır. Bir diğer çalışmada da, büyük anten dizileri için dijital hüzme oluşturmak sistemin maliyeti ve güç tüketimi nedeniyle pratik uygulamalar için uygun olmadığından, performans ve maliyet dengesini korumak sebebiyle az sayıda RF zincirinin bir faz kaydırıcı ağı aracılığıyla çok sayıda antene bağlandığı hibrit hüzme oluşturucular önerilmektedir [18]. Bu da sistemin karmaşıklığını arttırmaktadır.

Benzer şekilde bir diğer çalışmada da dizi anten sistemi için gerekli performansı sağlayacak daha basit, düşük maliyetli hüzme oluşturan ağların gerektiğinden ve hüzmeleme ağlarının karmaşıklığını azaltmanın bir yolu olarak, sistemde kullanılan faz kaydırıcıların sayısının azaltılmasından bahsedilmektedir [19]. Yine bir diğer çalışmada da alışlagelmiş elektronik hüzme tarama yöntemi olarak faz kaydırıcıların ve vektör modülatörlerin anahtar bileşenler olduğu PAA sistemleri gösterilmiş ancak faz kaydırıcı ve vektör modülatörlerin kullanımının maliyet ve karmaşıklığı arttırdığından PAA sistemlerinin uygulama alanlarını sınırlandırdığından bahsedilmiştir [20].

Öte yandan PAA sistemlerinin üretim maliyetlerinden bahsedilen bir çalışmada, PAA sistemlerinin konfigürasyonu için faz kaydırıcılar, amplifikatörler ve karmaşık besleme ağlarının bir kombinasyonunu kullanarak istenen herhangi bir modelin üretilmesinde yeterli serbestlik dereceleri sağladığı belirtilmiştir [21]. Bu bileşenler genellikle PAA sistemlerinin maliyetine, boyutuna, ağırlığına ve güç tüketimine (cost, size, weight, and power consumption – C SWaP) katkıda bulunan ana unsurlardır. Bağımsız kontrolün avantajlarına rağmen, PAA sistemlerinin sınırlayıcı nitelikleri, katı C-SWaP kısıtlamaları olan cihazlarda uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu sistemleri uygulamanın pratik zorlukları, çalışma frekansı arttıkça daha da acil hale gelmektedir. Sonuç olarak, istenen kalıpları üretebilen düşük maliyetli bir düzlemsel alternatif yapı, çok sayıda teknoloji için önemli bir konu olmuştur.

Bir diğer yaklaşım olarak da lineer, tek boyutlu FDA sistemlerinde bozulmayı düzeltmek için faz kaydırıcılar yerine ışın örüntüsünün bir parametresi olan frekans farkını güncelleme yönteminden bahsedilmiştir [22]. Bu sayede, gelişmiş faz kaydırıcı devrelere ihtiyaç duyulmadan, enine ışın kazancını kompanse etmek için daha basit ve kontrol edilebilir bir çözüm elde edilebilmektedir. FDA sistemlerinde elemanlar arası frekans artımı, dizi faktörünün bileşenlerinden biri olduğundan istenilen algoritma doğrultusunda optimize edilmesi maliyet ve karmaşıklık açısından çok daha elverişlidir. Literatürdeki FDA radar sistemleri için yapılan bir çalışmada, önce hedeflerin tespit edilip sonra belirli aralıklarla takip edilebilmesi için frekans artımının çalışma sırasında sürekli olarak optimize edilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir [23].

Ayrıca literatürde alternatif bir yöntem olan zaman modüleri frekans kaydırma tekniği ile FDA sistemlerinde geliştirilmiş performans için optimal frekans artımı üzerinde analizlerin yapıldığı bir çalışma bulunmaktadır [24]. Bu çalışmada, sistemin sağladığı menzil-açı bağlantılı ışın örüntüsünü menzil-açı boyutlarında ayırmak için doğrusal olmayan diziler veya frekans kaymaları değerlendirilmiştir. Ancak ortaya çıkan örüntüler zamanda periyodiklik sergilememektedir. Bu örüntülerin üstesinden gelmek için hedef konumunda menzil-açı ayrıştırılmış ve zamanla değişmeyen örüntüleri elde edebilen zaman modüleri frekans kaymaları belirlenmiştir. Bununla beraber bazı yeni çalışmalar göstermektedir ki FDA sistemindeki ışın örüntüleri

daima zamana bağımlıdır [25]. Bu nedenle zamanla değişmeyen tekniklerin kullanıldığı FDA sistemleri için ışına örüntüleri pratik olarak gerçekleştirilememektedir. Bununla beraber, çalışmamızda önerilen frekans artırımını güncelleme tekniği zamandan bağımsız bir yaklaşım olmadığından FDA sistemleri için daha basit ve uygulanabilir bir konfigürasyon sunmaktadır.

Bu çalışmada, doğrusal bir FDA sistemi için önerilen frekans farkını güncelleme yöntemi referans alınarak, önerilen yaklaşımın sadece doğrusal FDA sistemlerinde geçerli olmadığı kanıtlanmaktadır. Doğrusal dizi anten sistemleri, bir eksen boyunca düzenlenmiş N tane elemandan oluşmaktadır. Düzlemsel dizi anten sistemleri ise bir düzlem boyunca NxM tane elemanın birleşiminden oluşmaktadır. Düzlemsel dizi anten sistemleri, daha küçük yan loblar oluşturan simetrik bir ışına sağladıklarından daha fonksiyondur ve antenin ışına demetini bu yapılandırma ile kontrol etmek daha elverişli olmaktadır [26-28]. Öncelikle, düzlemsel bir FDA sisteminin herhangi bir bozulma etkisi altındaki dizi faktörü elde edilmiş ve ışına örüntüsündeki değişim incelenmiştir. Daha sonra, sistemin enine ışına karakteristiğini korumak için, elemanlar arasındaki frekans artırımının güncellenmesi tekniği ile uzaysal konumlardaki değişimler kompanse edilmeye çalışılmıştır.

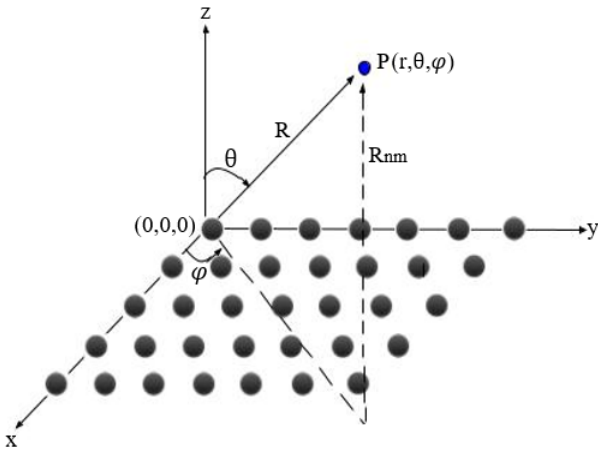
Son olarak, enine ışına karakteristiğindeki bozulmanın etkisi 10x10 elemanlı bir düzlemsel FDA sistemi üzerinde gösterilmiş ve önerilen yaklaşım ile sistemin enine ışına kabiliyetini geri kazandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak frekans artırımını güncelleme ile kompozisyon tekniğinin FDA sistemlerinin ışına karakteristiklerinin bozulmasına karşı etkili bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

Bu çalışmada düzlemsel bir FDA sisteminin konformal durumlarda enine ışına karakteristiğinde meydana gelebilecek bozulmaları ve bu bozulmaların önerilen yöntem ile kompanse edilebildiğini göstermek hedeflenmiştir. Bu doğrultuda öncelikle normal durumda sistem modellenmiş ve dizi faktörü elde edilmiştir. Ardından, aynı işlemler konformal durum için de gerçekleştirilerek önerilen yaklaşım açıklanmıştır.

2.1. Normal Düzlemsel FDA Sistemi (Normal Planar FDA System)

Düzlemsel FDA sisteminin genel yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. PAA sisteminin aksine, her bir elemanın frekansı merkez frekansa göre çok daha küçük adımlarla artırılmaktadır.



Şekil 1. Düzlemsel FDA sisteminin genel yapısı
(The general structure of the planar FDA system)

Şekil 1’den görülebileceği üzere, (n,m)’nci elemana uygulanan frekans Eş. 1’de ifade edilmektedir.

$$f_{nm} = f_0 + (n - 1)\delta_{fx} + (m - 1)\delta_{fy} \quad (1)$$

Burada f_0 , δ_{fx} ve δ_{fy} sırasıyla dizinin merkezi çalışma frekansını, x eksenindeki frekans artırımını ve y eksenindeki frekans artırımını ifade etmektedir. $N \times M$ elemanlı, x ve y eksenlerine konumlandırılan elemanları arasında d kadar mesafe bulunan düzlemsel bir dizi ele alındığında ve uzak-alanda, dizinin ilk elemanından R kadar uzakta olan bir P noktasının olduğu düşünüldüğünde dizinin her bir elemanın P noktasından uzaklığını ifade eden R_{nm} uzak-alanda yaklaşık olarak Eş. 2’deki gibidir.

$$R_{nm} \cong R - (\hat{a}_{nm}) \cdot (\hat{a}_R) \quad (2)$$

R uzaklığından çıkarılan izdüşüm uzaklığı Eş. 3, Eş. 4 ve Eş. 5 ile bulunabilmektedir.

$$\hat{a}_{nm} = \hat{a}_x d_{xnm} + \hat{a}_y d_{ynm} + \hat{a}_z d_{znm} \quad (3)$$

Burada \hat{a}_x , \hat{a}_y ve \hat{a}_z birim vektörleri temsil etmektedir.

$$\hat{a}_{nm} \cdot \hat{a}_R = (\hat{a}_x \cdot \hat{a}_R) d_{xnm} + (\hat{a}_y \cdot \hat{a}_R) d_{ynm} + (\hat{a}_z \cdot \hat{a}_R) d_{znm} \quad (4)$$

$$\hat{a}_{nm} \cdot \hat{a}_R = \sin\theta \cos\varphi d_{xnm} + \sin\theta \sin\varphi d_{ynm} + \cos\theta d_{znm} \quad (5)$$

Burada θ ve φ gözlem açısını temsil etmektedir. İzdüşüm uzaklığı nokta çarpım ile Eş. 5’teki gibi ifade edilebilir ancak dizinin x ve y yönlü olduğu hesaba katılarak Eş. 6’daki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$R_{nm} \cong R - \sin\theta \cos\varphi d_{xnm} - \sin\theta \sin\varphi d_{ynm} \quad (6)$$

P noktasındaki elektrik alanının (\vec{E}) genlik değeri, her bir elemanın P noktasına olan R_{nm} uzaklığında elektromanyetik dalganın ışık hızı ile yayıldığı düşünüldüğünde oluşacak zaman gecikmesi de hesaba katılarak her bir elemanın toplam elektrik alanı olarak Eş. 7’deki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}(t, R) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\omega_{nm}(t - \frac{R_{nm}}{c})} \quad (7)$$

Burada c, ω ve t sırasıyla ışık hızını, açısal frekansı ve zamanı ifade etmektedir. Eş. 7, Eş. 6 kullanılarak Eş. 8’deki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$\vec{E}(t, R) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\omega_{nm}(t - \frac{R - \sin\theta \cos\varphi d_{xnm} - \sin\theta \sin\varphi d_{ynm}}{c})} \quad (8)$$

FDA sistemindeki ω_{nm} açısal frekans ifadesi de elemanlara uygulanan frekans aynı olmayacağından, Eş. 9’daki gibidir.

$$\omega_{nm} = 2\pi f_{nm} = 2\pi(f_0 + \delta_{f_{nm}}) \quad (9)$$

Açısal frekans ifadesi Eş.8 de yerine yazıldığında Eş. 10 elde edilir.

$$\vec{E}(t, R) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi(f_0 + \delta_{f_{nm}})(t - \frac{R - \sin\theta \cos\varphi d_{xnm} - \sin\theta \sin\varphi d_{ynm}}{c})} \quad (10)$$

Elemanlar arası frekans artırımının merkez frekansa göre çok küçük olduğu ($\delta_{f_{nm}} \ll f_0$) hesaba katılarak ve Eş. 1’deki $\delta_{f_{nm}}$ ifadesi kullanılarak elektrik alan ifadesi Eş. 11’deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\vec{E}(t, R) = e^{j2\pi f_0(t - \frac{R}{c})} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi f_0(\frac{\sin\theta \cos\varphi d_{xnm} + \sin\theta \sin\varphi d_{ynm}}{c})} e^{j2\pi((n-1)\delta_{fx} + (m-1)\delta_{fy})(t - \frac{R}{c})} \quad (11)$$

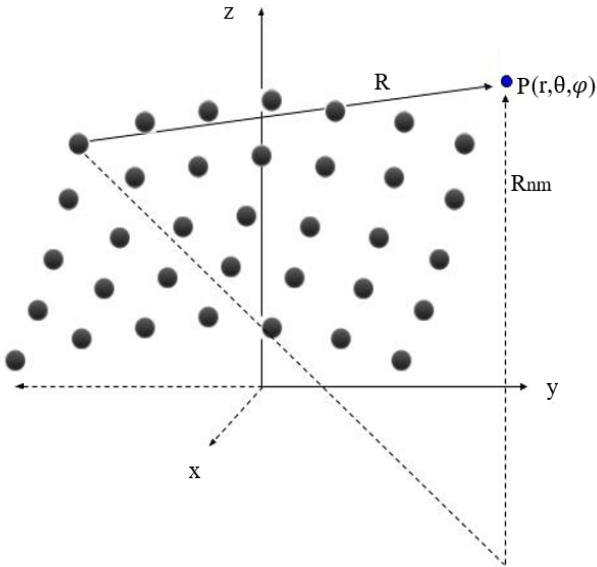
Eş. 11'deki elektrik alan ifadesindeki toplam, dizi faktörüne (Array Factor-AF) eşittir ve Eş. 12'deki gibi ifade edilebilir.

$$AF(R, \theta, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi f_0 \left(\frac{\sin\theta \cos\varphi d_{xn} + \sin\theta \sin\varphi d_{ym}}{c} \right)} e^{j2\pi ((n-1)\delta_{fx} + (m-1)\delta_{fy}) \left(t - \frac{R}{c} \right)} \quad (12)$$

Eş. 12'den anlaşılacağı üzere klasik anten dizilerinden farklı olarak dizi faktörü menzil ve zamanın bir fonksiyonudur. Bu özelliği sayesinde sistemin uzayda bir bölgeye daha güçlü ışınım yapması sağlanabilir. Ayrıca Eş. 12, üstel fonksiyon olması sebebiyle (0-2π) aralığında periyodiktir. Dolayısıyla t ve R 'ye göre periyodik olduğu sonucu çıkmaktadır. Buradan hareketle dizi faktörü her $t = 1/\delta_{f_{nm}}$ örüntüde kendini tekrarlayacaktır. Diğer bir deyişle, uzay periyodik olarak sürekli taranmaktadır [29].

2.2. Konformal Düzlemsel FDA Sistemi (Conformal Planar FDA System)

Düzlemsel FDA sisteminin dış etkenlere maruz kalmasındaki durumu geometrik olarak modellenmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada bozulmanın z ekseninde enine ve simetrik olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Konformal düzlemsel FDA sisteminin genel yapısı (The general structure of the conformal planar FDA system)

Böyle bir geometride dizinin her bir elemanının P noktasından uzaklığını ifade eden R_{nm} değişecektir. Çünkü Eş. 5'teki d_{znm} bileşeni artık 0 alınmaz. Bu sebepten Eş. 6, tekrar türetilerek Eş. 13 elde edilir.

$$R_{nm} \cong R - \sin\theta \cos\varphi d_{xnm} - \sin\theta \sin\varphi d_{ynm} - \cos\theta d_{znm} \quad (13)$$

Dizi faktörü de yeniden türetilerek Eş. 14'teki gibi ifade edilebilir.

$$AF(R, \theta, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi((n-1)\delta_{fx} + (m-1)\delta_{fy}) \left(t - \frac{R}{c} \right)} e^{j2\pi f_0 \left(\frac{\sin\theta \cos\varphi d_{xn} + \sin\theta \sin\varphi d_{ym} + \cos\theta d_{znm}}{c} \right)} \quad (14)$$

Sisteme gelen düzlemsel dalga yönüne göre θ açısı 0° olarak ele alınırsa dizi faktörü ifadesi Eş. 15'teki gibi olacaktır.

$$AF(R, \theta, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi((n-1)\delta_{fx} + (m-1)\delta_{fy}) \left(t - \frac{R}{c} \right)} e^{j2\pi f_0 \left(\frac{d_{znm}}{c} \right)} \quad (15)$$

2.3. Konformal Durumda Önerilen Metot (Proposed Method in Conformal Case)

Sistemin enine ışınım karakteristiğinin korunması amacıyla elemanlar arası frekans arttırımı $\delta_{f_{nm}}$ güncellenerek Eş. 16'daki gibi $\delta'_{f_{nm}}$ elde edilir.

$$\delta'_{f_{nm}} = \delta_{f_{nm}} + \delta''_{f_{nm}} \quad (16)$$

Elemanlar arası frekans arttırımı $\delta_{f_{nm}}$ bileşenleri olan δ_{fx} ve δ_{fy} aynı şekilde güncellenerek δ'_{fx} ve δ'_{fy} şeklinde Eş. 17'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \delta'_{fx} &= \delta_{fx} + \delta''_{fx} \\ \delta'_{fy} &= \delta_{fy} + \delta''_{fy} \end{aligned} \quad (17)$$

Dizi faktörüne güncellenen frekans arttırımı $\delta'_{f_{nm}}$ eklenerek Eş. 18 elde edilir.

$$\begin{aligned} AF(R, \theta, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi((n-1)\delta'_{fx} + (m-1)\delta'_{fy}) \left(t - \frac{R}{c} \right)} e^{j2\pi f_0 \left(\frac{d_{znm}}{c} \right)} \\ AF(R, \theta, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi \left((n-1)(\delta_{fx} + \delta''_{fx}) + (m-1)(\delta_{fy} + \delta''_{fy}) \right) \left(t - \frac{R}{c} \right)} e^{j2\pi f_0 \left(\frac{d_{znm}}{c} \right)} \end{aligned} \quad (18)$$

Sistemin enine ışınım karakteristiğini korumak için bu metot ile elde edilen dizi faktörünü, gelen düzlemsel dalga yönüne göre θ açısının 0° olarak ele alınacağı göz önünde bulundurularak Eş. 12'de belirtilen bozulmanın olmadığı durumdaki dizi faktörüne eşitlersek güncellenen frekans arttırımı Eş. 19 ile elde edilebilir.

$$\begin{aligned} e^{j2\pi f_0 \left(\frac{d_{znm}}{c} \right)} e^{j2\pi \left((n-1)(\delta_{fx} + \delta''_{fx}) + (m-1)(\delta_{fy} + \delta''_{fy}) \right) \left(t - \frac{R}{c} \right)} \\ = e^{j2\pi \left((n-1)\delta_{fx} + (m-1)\delta_{fy} \right) \left(t - \frac{R}{c} \right)} \\ e^{j2\pi f_0 \left(\frac{d_{znm}}{c} \right)} e^{j2\pi \left((n-1)\delta''_{fx} + (m-1)\delta''_{fy} \right) \left(t - \frac{R}{c} \right)} = 1 \\ f_0 \left(\frac{d_{znm}}{c} \right) + [(n-1)\delta''_{fx} + (m-1)\delta''_{fy}] \left(t - \frac{R}{c} \right) = 0 \\ (n-1)\delta''_{fx} + (m-1)\delta''_{fy} = \frac{-f_0 d_{znm}}{tc-R} \end{aligned} \quad (19)$$

Eş. 19 ile beraber artık Eş. 18'de belirtilen güncellenen frekans arttırımının bileşenleri olan δ'_{fx} ve δ'_{fy} de Eş. 20'de gösterildiği gibi bulunabilir.

$$\begin{aligned} (n-1)(\delta_{fx} + \delta''_{fx}) + (m-1)(\delta_{fy} + \delta''_{fy}) \\ = (n-1)\delta_{fx} + (m-1)\delta_{fy} + \left(\frac{-f_0 d_{znm}}{tc-R} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Böylece elemanlar arası frekans arttırımının nasıl güncelleneceği belirlenmiş olur. Bu metot ile sistemin enine ışınım karakteristiğinin korunması hedeflenmektedir.

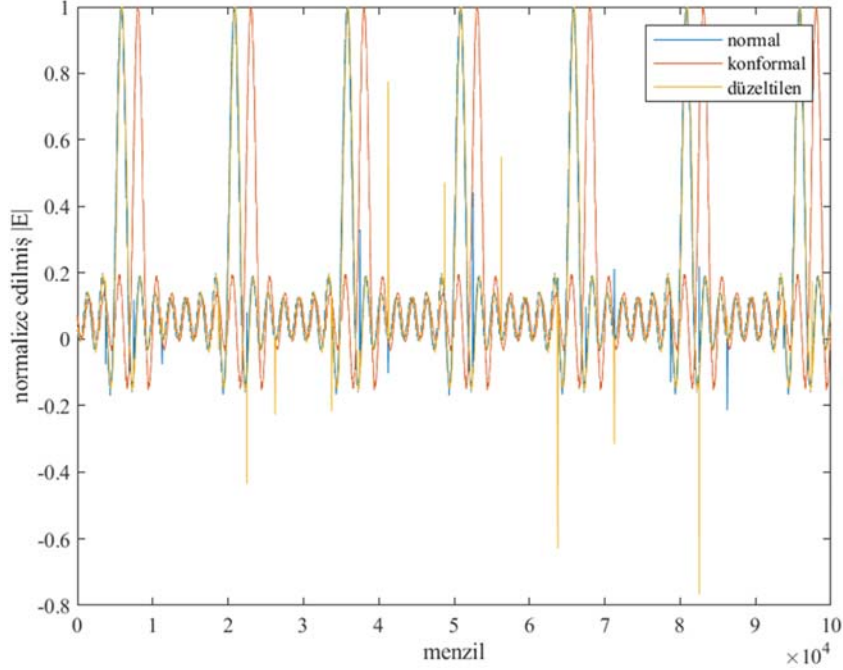
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada önerilen metot ile düzlemsel FDA sisteminin dış etkenlere maruz kalması durumunda enine ışınım karakteristiğinde meydana gelebilecek bozulmaların kompanze edilebileceği gösterilmektedir. Bu amaçla dizi eleman sayısı için $N=10$ ve $M=10$, elemanlar arası frekans arttırımı için $\delta_{fx}=10$ kHz ve $\delta_{fy}=10$ kHz, merkezi çalışma frekansı için $f_0=10$ GHz, elemanlar arası mesafe için

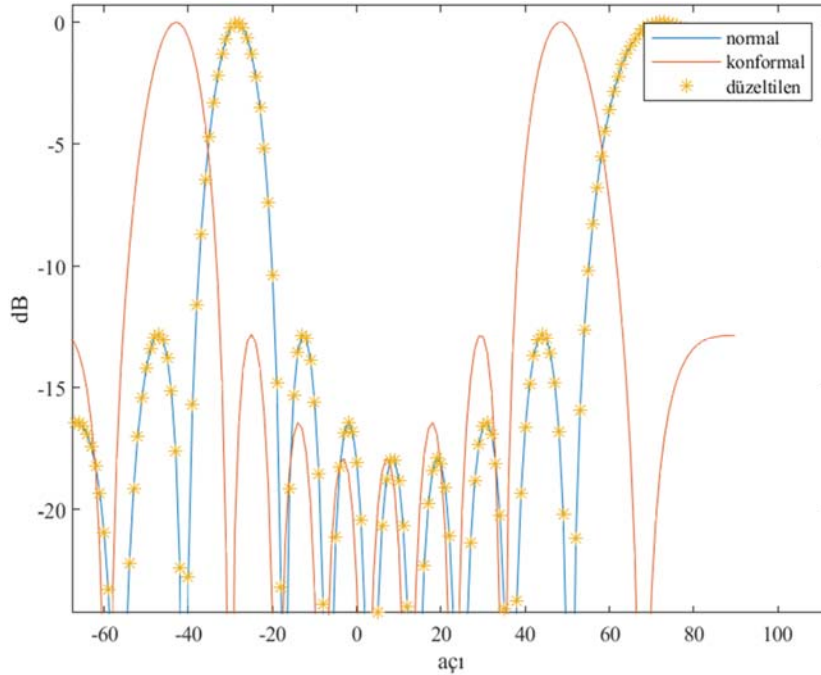
$d_{xn} = \lambda/2$ ve $d_{ym} = \lambda/2$ parametrelerine sahip bir düzlemsel FDA sisteminin enine ışına karakteristiği incelenmiş ve sistemin konformal olması durumundaki değişimler ele alınmıştır. Sistemin ışına karakteristiğinin korunması adına elemanlar arası frekans artırımını güncellenmenin etkisi incelenmiştir. Sistemdeki bozulma, her iki eksende de maksimum λ olacak kadar ve lineer şekilde ele alınmıştır.

Şekil 3 ve Şekil 4'te konformal yapının sistemin periyodikliğine olan etkisi gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 3'te antenlere enine açıldaki bir hedef noktası için menzil - normalize edilmiş elektrik alan genlik

değeri alan dağılımı, Şekil 4'te ise antenlere 3 km uzaklıkta bulunan bir hedef noktası için açı - normalize edilmiş ışına değeri alan dağılımı verilmiştir. Bu iki şekilden de anlaşılacağı gibi sistemin bozucu etki altındaki periyodik davranışı da farklıdır. Ancak önerilen yaklaşım ile sistemin periyodikliğinin de korunabileceği görülmektedir. Tablo 1'de normal, konformal ve önerilen yöntemle düzeltilmiş düzlemsel FDA sistemlerinin normalize edilmiş dizi faktörlerinin değerleri bulunmaktadır. Bu nümerik değerler sistemin ışına karakteristiğinin verildiği diğer şekillerde olduğu gibi benzetim sonucu elde edilmektedir. Sonuçlardan görülmektedir ki, önerilen yöntem ile düzeltilen sistemin normalize edilmiş dizi faktörü değeri



Şekil 3. Normalize edilmiş elektrik alan genlik değeri - menzil alan dağılımı (Normalized radiation value-range field distribution)

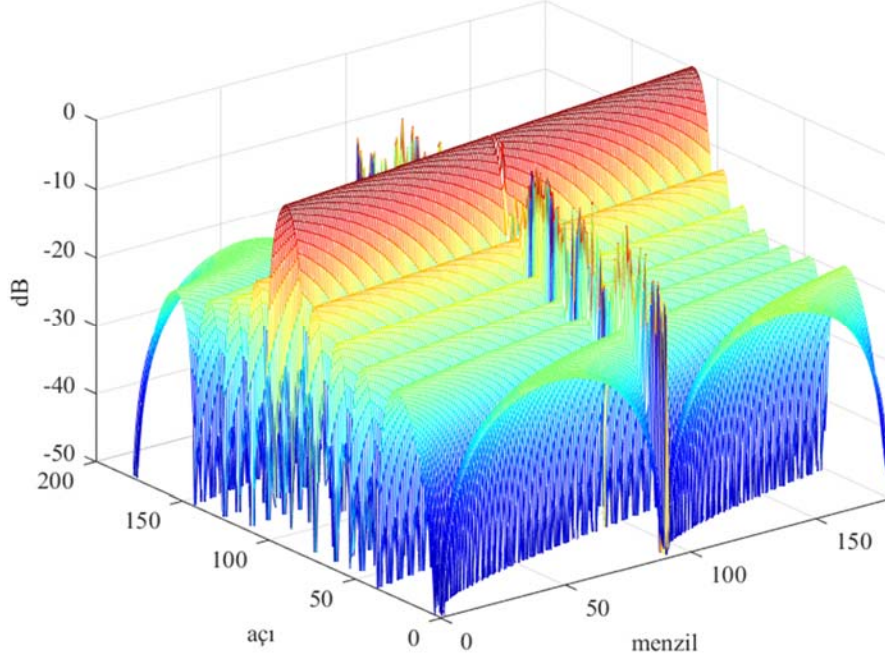


Şekil 4. Normalize edilmiş ışına değeri - açı alan dağılımı (Normalized radiation value - angle field distribution)

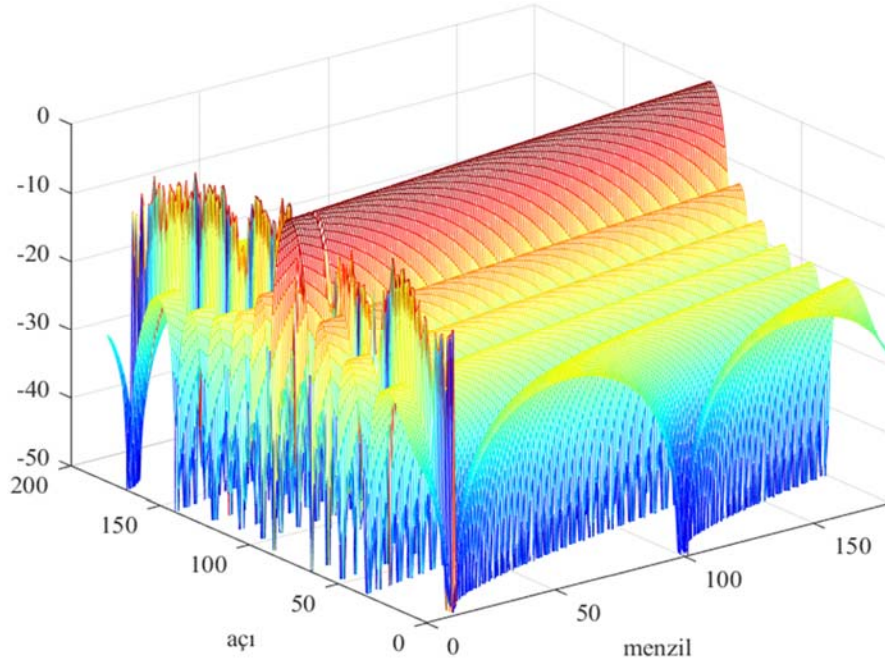
sistemin normal durumdaki normalize edilmiş dizi faktörü değerine eşit olmaktadır. Ayrıca Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de sırasıyla düzlemsel FDA sisteminin normal durumdaki, bozucu etki altındaki ve önerilen yaklaşım ile düzeltilen 3 boyutlu alan dağılımları verilmiştir. Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10’da ise benzer şekilde 2 boyutlu alan dağılımları verilmiştir. Buradan da sistemin bozucu etki altında ışınma örüntüsünün değişeceği ancak önerilen yaklaşım sonrası düzeleceği görülmektedir. Sonuç olarak sistemin enine ışınma karakteristiğinin korunduğu görülebilmektedir.

Buna ilaveten, önerilen yaklaşımı kontrol etmek için dizi elemanları arası uzaklık olarak yalnızca $\lambda/2$ değil, $0,7 \lambda$ ve $0,4 \lambda$ vb. değerler de kullanılmıştır ve farklı uzaklıklar için de metodun geçerli olduğu görülmüştür.

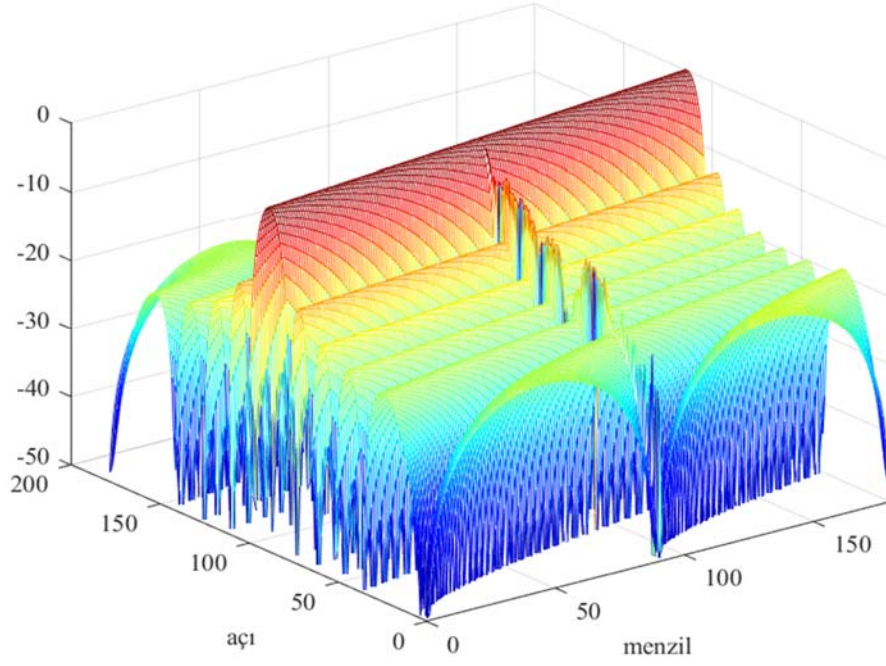
Diğer yandan, hesaplamaların deneysel doğrulaması ile ilgili olarak bozulmanın fiziksel olarak ölçülebileceği sistemlere ihtiyaç vardır. Bununla ilgili bir referans çalışmada, PAA sistemlerinde bozulmayı ölçmek için bir sensör devresi önerilmiştir [30].



Şekil 5. Normal düzlemsel FDA sisteminin normalize edilmiş ışınma değeri-menzip-açı alan dağılımı
(Normalized radiation value-range-angle field distribution of normal planar FDA system)



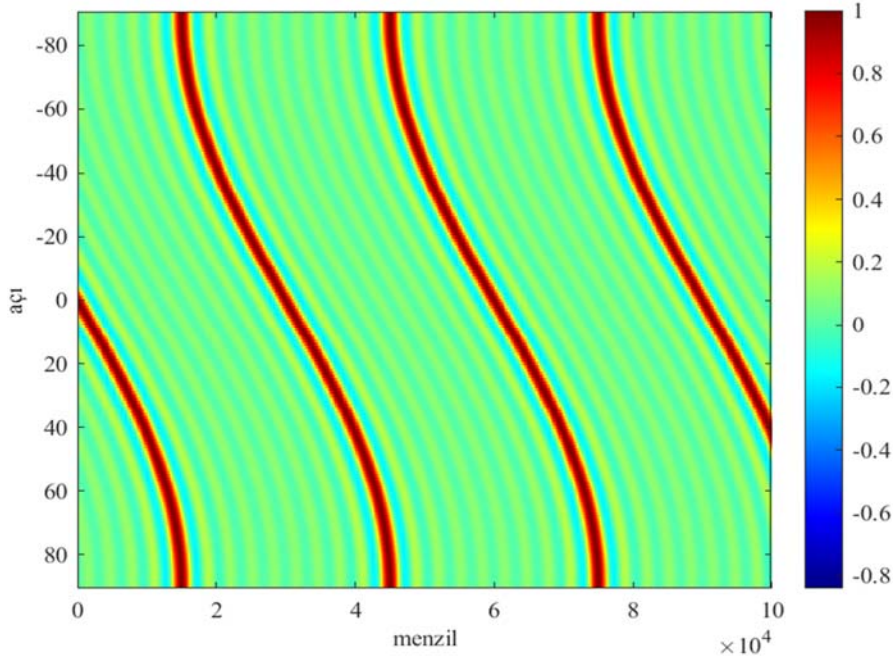
Şekil 6. Konformal düzlemsel FDA sisteminin normalize edilmiş ışınma değeri-menzip-açı alan dağılımı
(Normalized radiation value-range-angle field distribution of conformal planar FDA system)



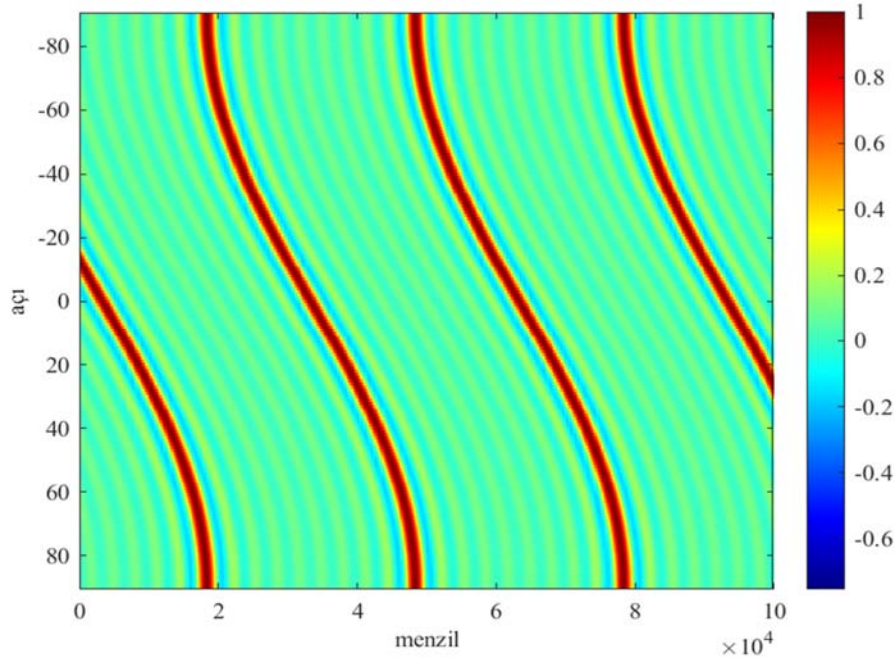
Şekil 7. Önerilen yaklaşım ile düzeltilen düzlemsel FDA sisteminin normalize edilmiş ışıma değeri-menzip-açı alan dağılımı
(Corrected normalized radiation value-range-angle field distribution of planar FDA system with proposed method)

Tablo 1. Normal, konformal ve düzeltilen düzlemsel FDA sistemlerinin normalize edilmiş dizi faktörü değerleri
(Normalized array factor values of normal, conformal and corrected planar FDA systems)

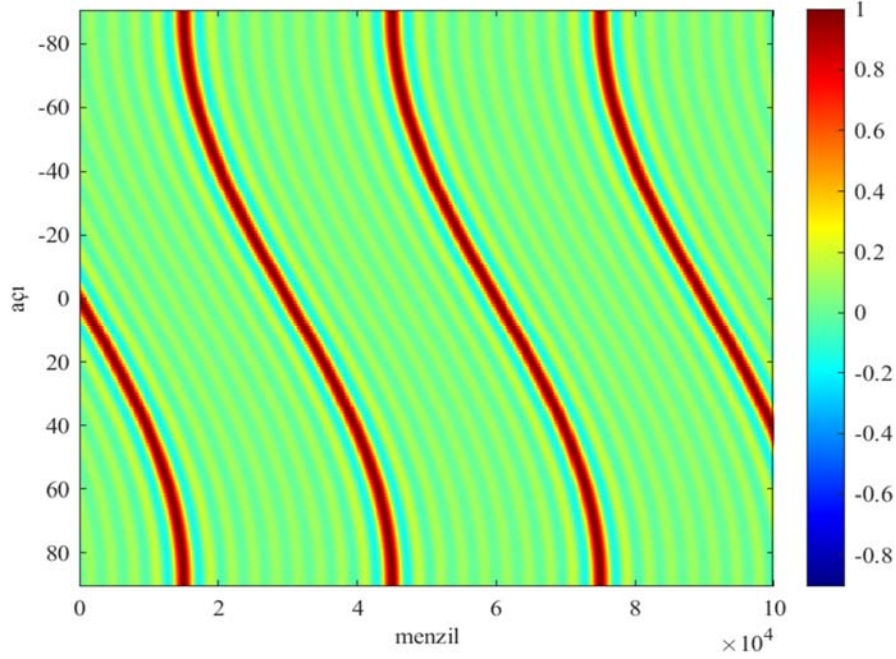
	dizi faktörü değeri	θ	R	Eleman Sayısı (N x M)	δf_x	δf_y	f 0	d xn	d ym
Normal	$0.0060 + 0.1731i$	0	3 km	10x10	10 kHz	10 kHz	10 GHz	$\lambda/2$	$\lambda/2$
Konformal	$-0.0072 + 0.0837i$	0	3 km	10x10	10 kHz	10 kHz	10 GHz	$\lambda/2$	$\lambda/2$
Düzeltilen	$0.0060 + 0.1731i$	0	3 km	10x10	10 kHz	10 kHz	10 GHz	$\lambda/2$	$\lambda/2$



Şekil 8. Normal düzlemsel FDA sisteminin normalize edilmiş ışıma değeri için menzip-açı alan dağılımı
(The range-angle field distribution for normalized radiation value of normal planar FDA system)



Şekil 9. Konformal düzlemsel FDA sisteminin normalize edilmiş ışınma değeri için menzil-açı alan dağılımı
(The range-angle field distribution for normalized radiation value of conformal planar FDA system)



Şekil 10. Önerilen yaklaşım ile düzeltilen düzlemsel FDA sisteminin normalize edilmiş ışınma değeri için menzil-açı alan dağılımı
(The range-angle field distribution for normalized radiation value of corrected planar FDA system with proposed method)

Benzer şekilde, bu çalışmada da bozulmayı ölçmek için bir sensör devresi gereklidir. Böylece, bozulma matematiksel olarak ölçülebilecek ve önerilen sistem de kendini optimize edebilecektir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada FDA sistemlerini diğer dizi anten sistemlerinden ayıran özelliği olan elemanlar arası frekans artırımının güncellenmesi yöntemi önerilmiştir. Yapılan çalışmadaki nümerik örnek ve tartışmaların sonucuna göre ele alınan düzlemsel FDA sisteminin

harici etkenler ile oluşacak bozulmalar sonrasında değişen enine ışınma örüntüsü, önerilen yaklaşım ile düzeltilebilmiş ve sistemin ışınma karakteristiği korunabilmiştir. Ayrıca önerilen yaklaşımın kolaylık ve kontrol edilebilirlik açısından daha efektif bir çözüm olduğu görülmektedir. Çünkü frekans artırımını, ışınma örüntüsünün bir parametresi olduğundan belirli bir algoritma doğrultusunda istenen şekilde optimize edilebilmektedir ve faz kaydırıcı devreler gibi harici donanımlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Öte yandan, PAA sistemlerinde daha yüksek performans gerektiren ışınma örüntüleri elde edebilmek için oldukça pahalı olan daha fazla anten elemanı

dolayısıyla daha fazla elektronik faz kaydırıcı gerekmektedir. Bu da sistemin karmaşıklığını ve maliyetini artırmaktadır. Ancak, FDA sistemlerinde önerilen yaklaşım kullanıldığı takdirde ışınma örüntülerinde performans iyileştirilmesi için algoritma optimizasyonuna gitmek yeterli olacaktır. Bu sebeplerden, yapılan çalışma bir dizi antenin dış etkenler nedeniyle bozulan ışınma örüntüsünün düzeltilmesi noktasında literature büyük katkı sağlamaktadır.

Kaynaklar (References)

- Borenstein J., Everett H. R., and Feng L., Navigating Mobile Robots, A K Peters Ltd., Massachusetts, A.B.D., 40-41, 1996.
- Yang P., Yan F., Yang F., and Dong T., Microstrip phased array in-band RCS reduction with a random element rotation technique, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64 (6), 2513–2518, 2016.
- Dreher A., Niklasch N., Klefenz F., and Schroth A., Antenna and receiver system with digital beamforming for satellite navigation and communications, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 51 (7), 1815–1821, 2003.
- Yu B., Yang K., Sim C.-Y.-D., and Yang G., A novel 28 GHz beam steering array for 5G mobile device with metallic casing application, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (1), 462–466, 2018.
- Li W. T., Cui C., Ye X. T., Shi X. W., and So H. C., Quasi-time-invariant 3-D focusing beam pattern synthesis for conformal frequency diverse array, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68 (4), 2684–2697, 2020.
- Antonik P., Wicks M. C., Griffiths H. D., and Baker C. J., Frequency diverse array radars, *Proc. of the IEEE Radar Conference*, Verona, NY, USA, 215-217, 2006.
- Antonik P., Wicks M. C., Griffiths H. D., and Baker C. J., Range dependent beamforming using element level waveform diversity, *Waveform Diversity and Design Conference*, Las Vegas, NV, USA, 1–6, 2006.
- Antonik P., Wicks M. C., Griffiths H. D., and Baker C. J., Multi-mission multi-mode waveform diversity, *Proc. of the IEEE Radar Conference*, Verona, NY, USA, 3-7, May 2006.
- Shao H., Li J., Chen H., and Wang W.-Q., Adaptive frequency offset selection in frequency diverse array radar, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 1045–1048, 2014.
- Wang W.-Q., Range-angle dependent transmit beam pattern synthesis for linear frequency diverse arrays, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61 (8), 4073–4081, 2013.
- Wang W.-Q., Frequency diverse array antenna: New opportunities, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 57 (2), 145–152, 2015.
- Gui R., Wang W.-Q., Pan Y., and Xu J., Cognitive target tracking via angle-range-Doppler estimation with transmit subaperturing FDA radar, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 12 (1), 76–89, 2018.
- Wang W.-Q., Retrodirective frequency diverse array focusing for wireless information and power transfer, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 37 (1), 61–73, 2019.
- Hu J., Yan S., Shu F., Wang J., Li J., and Zhang Y. Artificial noise aided secure transmission with directional modulation based on random frequency diverse arrays, *IEEE Access*, 5 (2), 1658–1667, 2017.
- Leonard J. J., Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation, Doctoral thesis, University of Oxford, Department of Engineering Science, Oxford, UK, 1990.
- Ullah I., Khattak S., and Braaten B. D., *Advances in Array Optimization*, IntechOpen, London, UK, 115-138, 2020.
- Rao J.B.L., Trunk G.V., Patel D.P., Two low-cost phased arrays, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 12 (6), 1997.
- Payami S., Ghorraishi M., and Dianati M., Hybrid Beamforming for Large Antenna Arrays with Phase Shifter Selection, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15 (11), 2016.
- Avser B., Frazita R. F., and Rebeiz G. M., Interwoven feeding networks with aperture sinc-distribution for limited-scan phased arrays and reduced number of phase shifters, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (1), 2401–2413, 2018.
- Eker T., Demir S., and Hizal A., Exploitation of Linear Frequency Modulated Continuous Waveform (LFMCW) for Frequency Diverse Arrays, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61 (7), 2013.
- Yoo I., Imani M. F., Mancera L. P., Sleasman T. and Smith D. R., Analytic Model of a Coax-Fed Planar Cavity-Backed Metasurface Antenna for Pattern Synthesis, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (9), 2019.
- Gunay M. E., Kanbaz I., Aksoy E., An Effective Pattern Correction Method for Conformal Frequency Diverse Arrays, *IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW) Conference*, 134-137, Riga, Latvia, 2022.
- Altunok M., Ayrik Frekanslı Dizi Antenli Radar Sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- Ahmad Z., Chen M., and Bao S. D., Beam pattern analysis of frequency diverse array radar: a review, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 189, 2021.
- Chen B., Chen X., Huang Y., Guan J., Transmit beam pattern synthesis for the FDA radar, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 17 (1), 98–101, 2018.
- Ataş İ., Abbasov T., ve Kurt M. B., Doğrusal ve düzlemsel mikroşerit dizi antenlerin tasarımı ve kazanç yönünden karşılaştırılması, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9 (2), 617-624, 2018.
- Uçar M. H. B., ve Uras E., Numerical analysis, prototype implementation and in-vitro measurement of MICS/ISM band microstrip implant antennas for medical implant communication systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (4), 2177-2192, 2022.
- Erbas C.D., Dual-band and dual-mode annular ring microstrip patch antenna with slots for GSM-1800 and GPS operations, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 547-556, 2023.
- Secmen, M., Demir, S., Hizal A. and Eker T., Frequency Diverse Array Antenna with Periodic Time Modulated Pattern in Range and Angle, *IEEE Radar Conf.*, 6 (1), Massachusetts, USA, 2007.
- Braaten B. D., Roy S., Ullah I., Nariyal S. and Anagnostou D.E., Phase-Compensated Conformal Antennas for Changing Spherical Surfaces, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62 (4), 2014.