

Ölçeklenebilir Mimarili Fazlı Dizi Antenlerde Huzme Oluşturma Yöntemi

Doğanay Doğan, Gökhan Gültepe
ASELSAN A.Ş.
Ankara
doganay@aselsan.com.tr, ggultepe@aselsan.com.tr

Özet: Günümüz fazlı dizi antenleri, özellikle radarlarda kullanılanlar, çoğunlukla ölçeklenebilir mimariye sahiptir. Bu tür antenlerdeki en yaygın problemlerden birisi farklı alt dizi bloklarının birbiriyle entegrasyonu sırasında yaşanmaktadır. Bunun ana nedeni, mekanik arayüzlere rağmen, alt dizi kenarlarında dizi sürekliliğini sağlamadaki zorluktur. Bu çalışmada, dizi tasarımcısına alt dizi sınırlarındaki süreksizlikleri, dizi performansını etkilemeden kullanmasını sağlayacak yeni bir yöntem verilmektedir. Anlatılan teknik, dizinin görünür huzme uzayında rank yetersizliği yaratmayacak özel eleman aralığı koşullarının sağlanması koşuluyla alt dizi sınırlarında eleman eksiltilmesine dayanmaktadır.

Abstract: Today's large phased arrays -especially the ones used in radars- are most of the time based on scalable architectures which have the so called tile, tray or brick type sub-array structures as their building blocks. A common challenge regarding these types of arrays is the integration of different sub-array blocks with each other. The main reason behind this, is the difficulty in maintaining the uniformity of the array at the sub-array boundaries despite the mechanical interfaces. In this work, a method is proposed which enables the array designer to use non-uniformities at the sub-array boundaries without any impact on the array performance. The technique is based on disabling array elements at the boundaries given that some special element spacing conditions are satisfied creating a rank deficiency in the visible portion of the beam space of the array.

1. Giriş

Fazlı dizilerde kullanılan huzme oluşturma tekniklerinin büyük bir çoğunluğu, dizinin sabit bir eleman aralığına sahip olmasından faydalanmaktadır. Özellikle, tüm tarama açıları için çok düşük yan lob seviyeleri hedefleniyor ise, dizi geometrisindeki düzensizlikler tolere edilememektedir. Açıklıktaki EM alanın düzensiz ve yetersiz örneklenmesi Nyquist Kriteri'ni ihlal etmekte, sinyallerin geliş açılarıyla ilgili belirsizlikler oluşturmaktadır.

Ölçeklenebilir bir fazlı dizi sistem, birbirinin aynısı RF blokların çoklanması ile elde edilmektedir. Çekirdek olarak adlandırılabilir RF blok genel olarak bir anten alt dizisinden, her anten elemanı arkasında bir G/A modülden, RF dağıtım manifoldundan, güç dağıtım ağından, sayısal kontrol devresinden ve soğuk plakadan oluşmaktadır. Eleman pozisyonları üzerindeki düzenlilik kriterinin sağlanabilmesi için, çekirdeğin oldukça sıkışık bir paketleme gereksinimi bulunmaktadır. Temel zorluk, alt dizi geçişlerindeki eleman düzenliliğini sağlarken mekanik olarak da güvenilir bir yapının oluşturulabilmesidir.

Bu çalışmada, çok az oranda inceltilmiş bir dizi topolojisi ve alışılmıştan farklı bir huzme oluşturma tekniği önerilmektedir. Yöntem, dizi tasarımcısının daha az sıkışıklığa sahip bir paketleme yapmasına olanak vermekte ve buna rağmen huzme performansından ödün vermemektedir.

2. Yeni Bir Huzme Oluşturma Yöntemi

Lineer veya düzlemsel olan düzenli dizilerde, huzme sentezlenirken Taylor gibi genlik dağılımları kullanılarak düşük yan-lob seviyesi elde etmek mümkündür; fakat, elemanların eksiltilmesi durumunda, yan-lob seviyesi kontrolü zorlaşmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için bir yöntem, lineer enterpolasyon tekniğini kullanmaktır [1]. N elemanlı bir dizi için genel huzme oluşturma şöyle ifade edilebilir:

$$B = W^T S \quad (1)$$

$$P = W^T V \quad (2)$$

Burada, W , $N \times I$ dizi uyarım katsayıları vektörü, S , $N \times I$ alınan sinyal vektörü, ve B oluşturulan huzmeyi temsil etmektedir. Diziye düzlemsel dalga gönderilmesi durumunda, V , M adet yönlendirme vektörlerini tutan $N \times M$ dizi manifoldu, ve P huzme B 'nin ışınma örüntüsüdür. Diziden K adet eleman eksiltildiğinde, V_r 'nin $(N-K) \times M$ eksiltilmiş

dizi manifoldu olduğu düşünülürse düzenli dizi üzerindeki sinyal S , eksiltilmiş dizideki sinyal S_r kullanılarak lineer enterpolasyon matrisi T ile hesaplanabilir:

$$\tilde{S} = TS_r \quad (3)$$

$N \times (N-K)$ enterpolasyon matrisi T 'nin gönderilen düzlemsel dalgaları da içermesi beklenir. Bu yüzden, tam dizi manifoldu V eksiltilmiş dizi manifoldundan T matrisi yardımıyla enterpole edilebilir:

$$V = TV_r \quad (4)$$

V ve V_r matrislerinin, ikisinin de tam rank olması durumunda ($\text{rank}(V)=N > \text{rank}(V_r)=N-K$), denklem (4)'ü sağlayan bir matris T bulunamaz. Fakat, en az kareler çözümü, matrix V_r 'nin Moore-Penrose sözde tersi (pseudo-inverse) kullanılarak bulunabilir [2]:

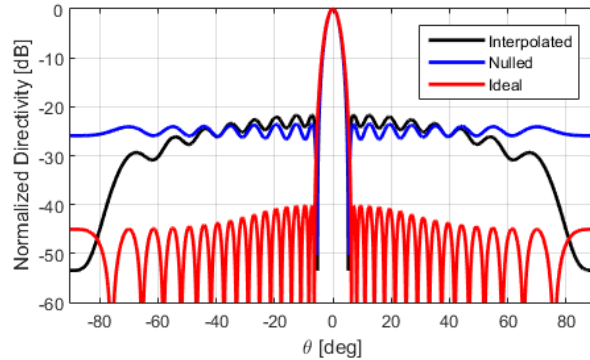
$$V_r^+ = V_r^H (V_r V_r^H)^{-1} \quad (5)$$

$$T = V V_r^+ = V V_r^H (V_r V_r^H)^{-1} \quad (6)$$

Oluşturulan bir huzme için ışınma örüntüsü, denklem (2), (4), ve (6) kullanılarak şu şekilde ifade edilebilir:

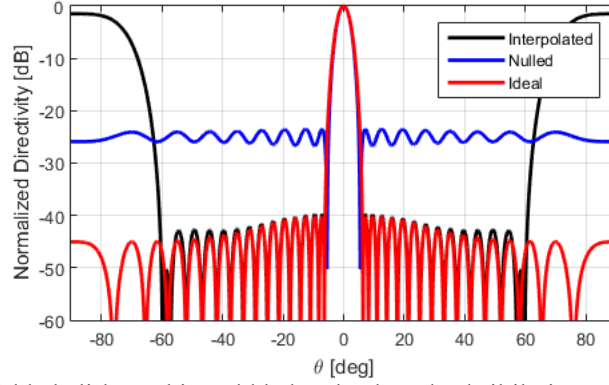
$$P = W^T V V_r^H (V_r V_r^H)^{-1} V_r \quad (7)$$

Yarım dalga boyu eleman aralıklı ve 33 elemanlı lineer bir dizi için, 40 dB yan-loblu ışınma örüntüsü, enterpolasyon yapıp denklem (7) kullanılarak elde edilen ışınma örüntüsü ile birlikte Şekil 1'de gösterilmiştir. Ayrıca, sadece 17. elemanın eksiltildiği diğer tüm dizi uyarım katsayılarının aynen kullanılarak elde edilen ışınma örüntüsü de Şekil 1'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, eksiltilmiş elemanların bulunduğu durumlarda hesaplanan huzmelerin yan-lob seviyeleri, 40 dB yan-lob seviyesinin göre kabul edilebilir değerlerden oldukça uzaktır.



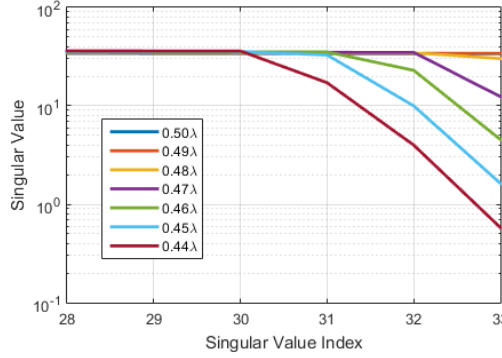
Şekil 1. Eksiltilmiş(nulled,interpolated) ve tam(ideal) dizi ışınma örüntüleri

Denklem (4)'ün sağlanabilmesi amacıyla matris V 'nin rankının azaltılması için yaygın bir yöntem, ilgilenilen sektörün $[-60,60]$ derece gibi bir aralık ile kısıtlanarak dizi manifoldunun daraltılmasıdır. Bu yöntem, tam ve eksiltilmiş dizi manifoldlarının ranklarını eşitlemektedir. Bu yöntem ile oluşturulan ışınma örüntüsü Şekil 2'deki gibidir. Enterpolasyon ile elde edilen örüntü, sinyal vektörünün $[-60,60]$ derece aralığında kısıtlanması sonucu istenilen yan-lob seviyesini karşılamaktadır. Oluşan örüntü problemi çözmüş gibi görünse de, aralık dışında oluşan yüksek yan-loblar, büyük bir probleme yol açmaktadır: yüksek yan-loblar dizinin yönlülüğünü yaklaşık 3 dB düşürmektedir. Bu nedenle, ana huzmedeki SNR, tam dizi durumuna göre çok daha düşük çıkmaktadır. SNR'daki düşüş, eksiltilen elemanın enterpolasyonu ile de analiz edilebilir. Huzme oluşturulurken yapılan enterpolasyon diğer elemanlardan gelen sinyallerin lineer bir kombinasyonudur. Huzmeye eklenen bu lineer kombinasyon, aynı zamanda, SNR'da ciddi bir düşüşe yol açan ek ilintili gürültü (correlated noise) meydana getirmektedir.



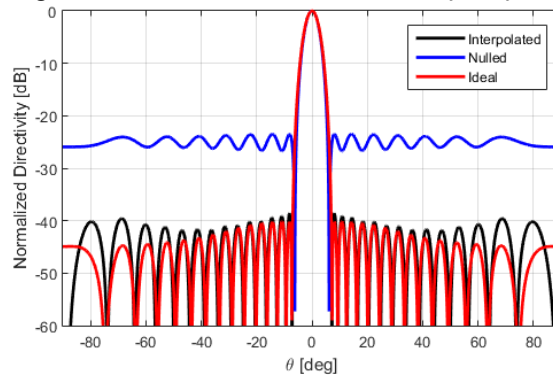
Şekil 2. Dizi manifoldu belirlenen bir aralıkla kısıtlandığında eksiltilmiş ve tam dizi ışına örüntüleri

Matris V 'de rank yetersizliği yaratmak için, ilgilenilen sektörün bir aralıkla kısıtlanması yerine, eleman aralığının azaltılması da sunulacak olan yöntemdir. Mümkün olan tüm yönlendirme vektörlerini içeren genel bir matris V için, matrisin sütunları tüm R^N vektör uzayını kapsamakta olup matrisin rankı N 'dir; ama, eleman aralığının yarım dalga boyundan kısa olduğu durumda, bazı yönlendirme vektörlerinin dizinin görünür uzayında huzme oluşturmadığı gösterilebilir. Bu da, ışına örüntüsü operatörü $P(W)=W^T V$ için rankı sonlu olan sıfır-uzayı (finite rank null-space) oluşturmaktadır. Yani, yönlendirme vektörlerinin sadece görünür uzay ile sınırlanması matris V için rank yetersizliğine veya kötü koşullanmaya yol açmaktadır. Matris V 'nin son 6 tekil değeri (singular value), büyükten küçüğe, farklı eleman aralığı değerleri için Şekil 3'te çizdirilmiştir.



Şekil 3. Farklı eleman aralığı değerleri için matris V 'nin son 6 tekil değeri(büyükten küçüğe)

Şekil 3'teki verilere göre, 0.44 dalga boyu eleman aralığı, matris V 'de rank yetersizliği olması için, yeterli kötü koşullanmayı oluşturmaktadır ($\text{rank}(V)=N-I$). Bu koşulda, 17. eleman tekrar eksiltilip yeni dizi manifoldu denklem (7) kullanılarak elde edildiğinde ışına örüntüsü Şekil 4'teki gibi oluşmaktadır. Görüldüğü üzere, yan-lob seviyesi, orta elemanın eksik olmasına rağmen, önceki örüntülerin aksine oldukça düşüktür.



Şekil 4. Eleman aralığı azaltıldığında eksiltilmiş ve tam dizi ışına örüntüleri

Bu çalışma, kolaylıkla her 16 elemandan sonra 1 elemanın eksik olduğu herhangi uzunluktaki lineer bir diziyeye uygulanabilir. Hatta, 16x16 elemanlı alt dizi blokları arasında 1x16 elemanın eksik olduğu düzlemsel diziler için de kullanılabilir. Sonuç olarak, eleman aralığının yarım dalga boyundan 0.44 dalga boyuna kısaltılmasıyla alt dizi

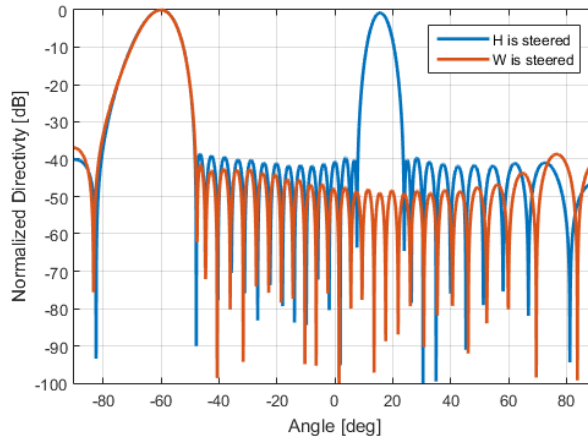
blokları arasındaki mesafe yan-lob seviyelerinde kayda değer bir bozulma yaratmadan yarım dalga boyundan 0.88 dalga boyuna çıkartılabilir.

3. Elektronik Tarama

Elde edilen örüntüler halen (7)'de verildiği gibi basit bir huzme oluşturma olarak ifade edilebilmektedir:

$$H = W^T V V_r^H (V_r V_r^H)^{-1} \quad (8)$$

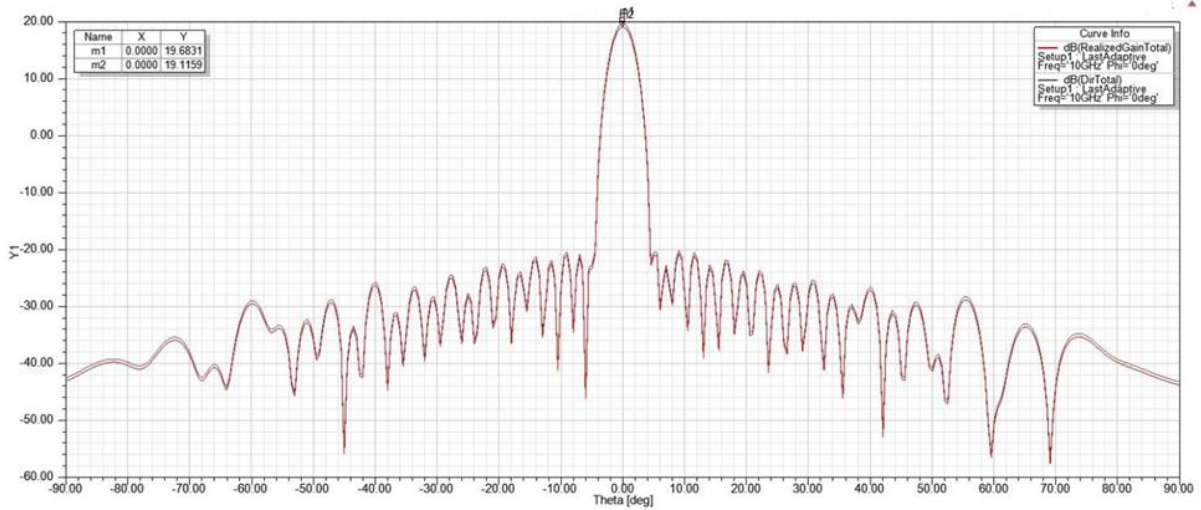
Taranmış huzmeler elde etmek için, (8)'deki H katsayılarına doğrudan progresif faz vermek iyi bir çözüm olmamaktadır. Bunun nedeni, oluşturulan dizi faktörlerinin görünmez uzaylarının olmasıdır. Elektronik tarama sonucunda, taranmamış durumdaki görünmez uzay tamamen ya da kısmen görünür hale gelmektedir. Görünmez uzay üzerinde bir kontrol olmadığı için, buradaki lobların görünür uzaya girmesi çoğu durumda örüntü kalitesini bozmaktadır. Bu durumu engellemek için, progresif faz W katsayılarına uygulanır ve H vektörü taranmış W vektörü kullanılarak elde edilir. Şekil 5'te her iki metotla elde edilmiş -60 derece taramalarına ait örüntüler görülmektedir. Doğrudan H ile taramanın 15.7 derecede bir ikincil lob çıkardığı görülmektedir. W ile tarama yapmanın fazlı dizi üzerindeki maliyeti, sahada gerçek zamanlı depolama ve işlem isterlerinin artmasıdır. Bu artışın nedeni, farklı taramalara ait karmaşık katsayıların gerçek zamanlı hesaplanması ve depo edilmesidir.



Şekil 5. Ham katsayıların ve nihai katsayıların progresif faz ile taranması sonucu elde edilen huzmeler

4. Benzetim Sonuçları

Elde edilen tüm sonuçlar, tam dalga analizleri ile doğrulanmış ve teoriye benzer sonuçlar elde edilmiştir. Böylece yöntemin elemanlar arası kuplaj varlığında çalıştığı ve pratikte kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Şekil 6'da, orta elemanı eksiltilmiş ve eksik elemanı uygun şekilde entepole edilmiş bir dizinin benzetim sonucu görülmektedir.



Şekil 6. Orta elemanı eksiltilmiş ve yöntemin uygulandığı dizinin benzetim sonucu

5. Sonuç

Özel bir dizi topolojisi ile birlikte yeni bir huzme oluşturma yöntemi önerilmiştir. Yöntem, eleman aralığını azaltarak dizi sinyal uzayında görünmez bir uzay yaratmakta ve diziden bazı elemanları kaldırmaktadır. Kaldırılan elemanların sinyalleri, görünmez uzay tarafından sağlanan sonlu boyuttaki sıfır-uzayı sayesinde oluşan ek bilgi sayesinde etkin bir şekilde herhangi bir kısıt olmadan tahmin edilebilmektedir. Dizinin performansı görünmez uzayın fiziksel önemsizliği sayesinde, tüm elemanların olduğu dizinin performansına denk olabilmektedir. Yöntem, teorik analizlerle ve benzetim yöntemleri ile doğrulanmıştır. Tam dalga benzetim sonuçları, yöntemin elemanlar arası kuplaj varlığında kullanılabilceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1]. B. Friedlander, "Direction finding using an interpolated array," Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process., Nisan 1990, vol. 5, ss. 2951–2954.
- [2]. Nashed, M. Zuhair (ed.), Generalized Inverses and Applications: Proceedings of an Advanced Seminar Sponsored by the Mathematics Research Center, the University of Wisconsin—Madison, 8-10 Ekim, 1973. No. 32. Elsevier, 2014.