

Seyrek Sensör Dizinlerinde İstenmeyen Yükseltelerin Doğrusal Olmayan Bir Yöntemle Yok Edilmesi

Removing Grating Lobes in Sparse Sensor Arrays with a Nonlinear Approach

Erdal Epçacan
Elektrik Elektronik
Mühendisliği Bölümü
ODTÜ
Ankara, Türkiye
epcacan@metu.edu.tr

Tolga Çiloğlu
Elektrik Elektronik
Mühendisliği Bölümü
ODTÜ
Ankara, Türkiye
ciltolga@metu.edu.tr

Çağatay Candan
Elektrik Elektronik
Mühendisliği Bölümü
ODTÜ
Ankara, Türkiye
ccandan@metu.edu.tr

Erdal Mehmetcik
SST
ASELSAN
Ankara, Türkiye
emehmetcik@aselsan.com.tr

Özetçe —Sensör dizin desenlerinde en önemli ölçütlerden ikisi ana lobun genişliği ve yan lobların yüksekliğidir. Dar bir ana lob açıda daha iyi bir çözünürlük ve yakın hedeflerin doğru ayrıştırılması anlamına gelmektedir. Sensör dizinlerinde ana lobun darlığı sensör dizininin açıklığı ile doğrudan orantılıdır, dizinin açıklığı arttıkça ana lob daralmaktadır. Öte yandan açıklık arttıkça, Nyquist uzaysal ölçütünden dolayı kullanılacak olan sensör sayısı artmaktadır, bu da maliyeti ve işlem yükünü arttırmaktadır. Bundan ötürü Nyquist ölçütüne uymayan seyrek yapıda dizinler kullanılıp oluşan istenmeyen yükseklikleri yok etmek için de katsayı optimizasyonu yapılmaktadır. Bu makalede bu istenmeyen yükseklikleri yok etmek için herhangi bir katsayı optimizasyona gerek duymayan bir yöntem sunulacaktır. Bu yöntem doğrusal olmayan pencereleme yönteminden esinlenmiş bir yöntemdir. İstenmeyen yükseklikleri yok etmek için gerekli bilgi seyrek dizinin içinde Nyquist ölçütüne uyan bir alt dizinden elde edilecektir.

Anahtar Kelimeler—seyrek sensör dizin tasarımı, doğrusal olmayan pencereleme yöntemi.

Abstract—Two of the most important criteria for a sensor array beam-pattern are beamwidth and side-lobe level. A narrower beamwidth means a better angular resolution and well separation of close sources. The beamwidth of a sensor array is directly proportional to array aperture, the beamwidth gets narrower as array aperture increases. However, increase in array aperture means increase in number of used sensors due to Nyquist spatial rate and this means increase in cost and computational load. Therefore, sparse arrays which violate Nyquist spatial rate are used. To cancel grating lobes occurred due to violation of Nyquist rate a weight optimization is implemented. In this paper, an approach which does not need weight optimization for grating lobe cancellation is presented. This method is inspired from nonlinear apodization (windowing) method. The necessary information to cancel grating lobes is obtained from a sub-array contained in the sparse array and this sub-array obeys Nyquist spatial rate.

Keywords—sparse array design, nonlinear apodization.

I. GİRİŞ

Sensör dizinlerinde ana lobun dar olması ve yan lobların düşük olması daima aranan bir özelliktir. Dar ana lob daha iyi açısal çözünürlük demektir. Ana lobun darlığı sensör dizininin açıklığıyla doğru orantılıdır. Öte yandan Nyquist uzaysal ölçütünü sağlamak için doğrusal bir sensör dizinindeki iki sensör arasındaki maksimum uzaklık çalışma frekansının dalga boyunun yarısından az olmalıdır. Aksi takdirde sensör dizin deseninin yan lob bölgelerinde istenmeyen yükseklikler olacaktır. Bu istenmeyen yükseklikler belirsizliklere ve yanlış tespit kararlarına sebep verebilir. Dizinin açıklığını arttırmak sensör sayısını ve maliyeti arttırmaya sebep olmasına rağmen Nyquist ölçütüne uymayan seyrek dizinler uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. İstenmeyen yükseklikleri önlemek için her sensör için dizin açıklığında en uygun yerleşim ve katsayı bulma çalışmaları yapılmaktadır. Literatürde bu konu detaylı bir şekilde çalışılmıştır, bazı çalışmalarda sadece sensör yerleşimi bazılarında sadece katsayılar bazılarında her iki değişken birden optimize edilmiştir. [1], [2] ve [3] makalelerinde sensörlerin hem yerleşimi hem katsayıları “Simulated Annealing” optimizasyon algoritması kullanılarak seçilmiştir. Benzer şekilde [4], [5] ve [6] makalelerinde aynı çalışma genetik algoritma kullanılarak yapılmıştır. [7]–[9] makalelerinde problem farklı bir şekilde ele alınmış ve dizinin deseni arzu edilen tanımlanmış bir desene benzetilecek şekilde optimizasyon çalışması yapılmıştır. [10] çalışmasında sabit lokasyonlu sensörler için lineer programlama kullanılarak katsayı optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan bütün bu çalışmalarda istenmeyen yükselteler yok edilmiş fakat bazı noktalarda yan lobların seviyesi yükselmiştir ve düz bir yan lob seviyesi elde edilmiştir.

Bu çalışmada yukarıda verilen çalışmaların aksine herhangi bir optimizasyon çalışması yapılmayacak ve dizindeki sensörler özel bir şekilde yerleştirilerek istenmeyen yükselteleri yok eden bir yöntem incelenecektir. Dizinde Nyquist ölçütüne uyan ve dizinin merkezine yerleştirilmiş bir alt dizin kullanılacaktır. Bu alt dizinden elde edilen uzaysal güç çıktıları ve tüm dizinden elde edilen uzaysal güç çıktıları doğrusal olmayan bir işlemden geçirilerek istenmeyen yükselteler yok edilecektir.

Burada kullanılan doğrusal olmayan yöntem [11] çalışmasında detayları verilen doğrusal olmayan pencereleme yönteminden esinlenmiştir.

II. DOĞRUSAL OLMAYAN PENCERELEME METODU

Yan lob problemi dizin işleme konularının dışında diğer birçok sinyal işleme alanında da problem olmaktadır. Temel amaç dizin deseninde olduğu gibi en dar ana lobu ve en düşük yan lob seviyesini elde etmektir. Geleneksel yöntemlerde pencerelenen veriye belli katsayılar uygulanıp yan loblar düşürülmektedir ama bu durumda ana lobun genişliği artmaktadır. Oysaki [11] çalışmasında doğrusal olmayan bir yaklaşımla ana lob genişletilmeden yan lobların düşürüldüğü görülmüştür. [11] çalışmasında 3 farklı yöntem sunulmuştur bunlar ikili pencereleme, çoklu pencereleme ve uzaysal değişken pencereleme. Bu yöntemde temel yaklaşım veriyi pencerelenmek için birden fazla pencere yapısı kullanmak ve bu pencerelenmiş verilerin DFT'sini almaktır. Daha sonra bu DFT setindeki verileri normalize edip her frekans noktasında minimum büyüklüğe sahip olan veriyi almaktır. Dolayısıyla bu pencereler arasında en dar ana loba sahip olan pencerenin çözünürlüğü ve en düşük yan loblara sahip olan pencerenin yan lob bastırım özelliği elde edilmiş olacaktır Bu yöntemlerin en basiti olan ikili pencerelemede adından da anlaşılacağı üzere veri 2 farklı pencereden geçirilmektedir. İkili pencerelemenin uygulanacağı N uzunluğundaki veri vektörü $x[n]$ olsun, Bu veriye aşağıdaki gibi iki farklı pencere uygulanır:

$$\begin{aligned} y_1[n] &= w_1[n]x[n] \\ y_2[n] &= w_2[n]x[n] \end{aligned} \quad (1)$$

Pencerelenmiş verilerin normalize edilmiş DFT verileri şu şekilde elde edilir:

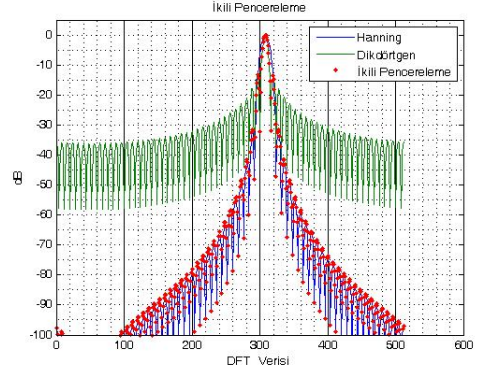
$$\begin{aligned} Y_l[k] &= \left| \sum_{n=0}^{N-1} y_l[n]e^{-j2\pi kn/N} \right|, \quad l = 1, 2, \quad k = 0, \dots, N-1 \\ Y_l^n[k] &= Y_l[k] / \max(Y_l[k]), \quad l = 1, 2 \end{aligned} \quad (2)$$

Bu durumda ikili pencerelemenin çıktısı şu şekilde elde edilir:

$$Y_{\min}[k] = \min(Y_1^n[k], Y_2^n[k]), \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

Bu yöntem için bir örnek Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi ikili pencereleme sonucu oluşan veride *Dikdörtgen* pencerenin dar ana lobu ve *Hanning* pencerenin düşük yan lobları elde ediliyor.

İsminden de anlaşılacağı gibi çoklu pencerelemede 2'den fazla pencere kullanılmaktadır. Performans kullanılan pencere sayısı arttıkça artmaktadır. Bununla beraber işlem yükü de artmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için [11] çalışmasında uzaysal değişken pencereleme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde yükseltilmiş kosinüs tipindeki pencereler kullanılarak sonsuz bir pencere setinden fazla işlem yükü gerektirmeden faydalanılmış oluyor. Bu yöntemin detayları [11] çalışmasında bulunmaktadır. [12], [13] makalelerinde uzaysal



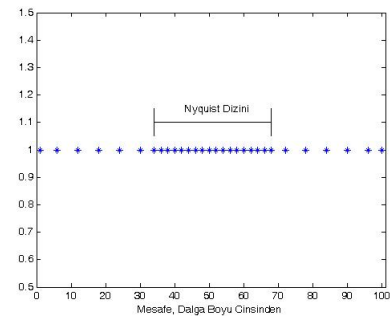
Şekil 1: İkili Pencereleme

değişken pencereleme metodunun Minimum Varyans Spektral Kestirim (Minimum Variance Spectral Estimation (MVSE)) metoduna benzer bir yapıda olduğu fakat MVSE metodunun aksine daha az işlem yükü gerektirdiği gösterilmiştir.

III. DOĞRUSAL OLMAYAN YÖNTEMLE İSTENMEYEN YÜKSELMELERİN YOK EDİLMESİ

II. bölümde anlatılan yöntemden esinlenerek seyrek dizinlerde istenmeyen yüksekliklerin yok edilebileceği bu kısımda gösterilecektir. İstenmeyen yüksekliklerin yan lob bölgelerinde olduğunu düşünürsek, bunların normalden daha yüksek yan lob olduklarını kabul edebiliriz. Dolayısıyla uzaysal güç çıktısında çıkan istenmeyen yükseltileri yok etmeyi dizin desenini iyileştirmek olarak yorumlayabiliriz.

Bu makalede önerilen yöntemde seyrek dizinin 2 alt dizinden oluştuğunu kabul edebiliriz: Nyquist ölçütüne uyan alt dizin ve Nyquist ölçütüne uymayan alt dizin. Nyquist ölçütüne uyan alt dizini Nyquist Dizini (ND) ve Nyquist ölçütüne uymayan alt dizini Diğer Dizini (DD) diye adlandıralım. Nyquist Dizini seyrek dizinin ortasında bulunmaktadır ve Diğer Dizindeki sensörler Nyquist Dizininin iki tarafında rastgele yerleştirilmektedir. Nyquist Dizinin çalışma frekansının 50 dalga boyu bir açıklığı kaplayan 30 sensörlü örnek bir sensör dizini Şekil 2'de verilmektedir, bütün açıklık Nyquist ölçütüne uygun bir şekilde dizilsen 100 sensör gerekecekti.



Şekil 2: Makalede Önerilen Seyrek Sensör Dizini

M sensörlü bir seyrek dizinin çıktıklarına $x_m[n]$, $m = 1, 2, \dots, M$ diyelim bu durumda yatay ϕ açısı için hüzmeye çıktısı $y(n, \phi)$ şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
y(n, \phi) &= \sum_{m=1}^M w_m(\phi) x_m[n] \\
&= \sum_{m \in \text{Nyquist Dizini}} w_m(\phi) x_m(n) \\
&+ \sum_{m \notin \text{Nyquist Dizini}} w_m(\phi) x_m(n) \\
&= y_{ND}(n, \phi) + y_{DD}(n, \phi)
\end{aligned} \quad (4)$$

Denklem (4)'teki w_m hüzme katsayılarını vermektedir. Dolayısıyla seyrek dizinin hüzme çıktısı Nyquist dizininin ve diğer dizinin hüzme çıktılarının toplamı şeklinde yazılabilir. Sensör dizinlerinde yön bulmak için çıktı sinyalinin uzaysal güç spektrumu incelenmektedir. Yukarıda verilen seyrek dizinin uzaysal güç spektrumu N gözlem için şu şekilde elde edilir:

$$P_y(\phi) = E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^H\} \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n, \phi) y(n, \phi)^H \quad (5)$$

Denklem (4)'teki sonuç Denklem (5)'e yerleştirildiğinde aşağıdaki sonuç elde edilir.

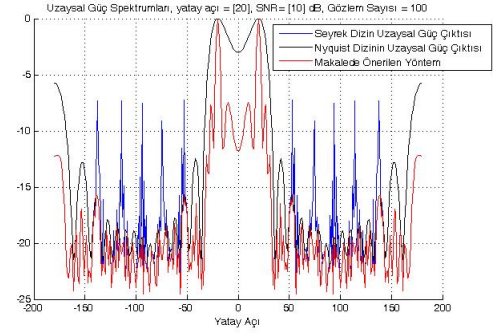
$$P_y(\phi) = P_{ND}(\phi) + P_{DD}(\phi) + 2\text{Re}\{P_{NDxDD}(\phi)\} \quad (6)$$

Denklem (6)'dan anlaşıldığı gibi seyrek dizinin uzaysal güç spektrumu Nyquist dizininin uzaysal güç spektrumu, $P_{ND}(\phi)$, ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. ND dizini Nyquist ölçütüne uydugu için uzaysal güç spektrumunda yanlış tespitler oluşmayacaktır, fakat ana lob geniş olduğu için açı kestirim varyansı büyük olacaktır. Tüm dizin ise daha fazla bir açıklığa sahip olduğundan ana lob daha dar olacak ve açı kestirim varyansı küçük olacaktır, yalnız tüm dizin Nyquist ölçütüne uymadığından yanlış tespitler ve belirsizlikler olacaktır. Tüm dizin kullanıldığında çıkan yanlış tespitlerin Nyquist Dizininin yardımıyla yok edilebileceğini gözlemledik, daha açık bir ifadeyle Nyquist dizini ile tüm dizinin normalize edilmiş uzaysal güç çıktılarının her yatay açıdaki minimumlarını almanın yanlış tespitleri yok edebileceğini gözlemledik. Matematiksel bir ifadeyle:

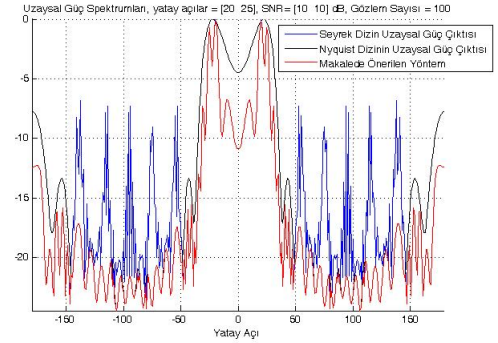
$$P_{\min}(\phi) = \min(P_y^n(\phi), P_{ND}^n(\phi)), \quad \forall \phi \in [0, 2\pi] \quad (7)$$

Denklem (7)'deki $()^n$ operatörü normalizasyonu göstermektedir. Önerilen yöntem için elde edilen sonuçlar Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmektedir.

Şekil 3'te tek bir hedef için uzaysal güç çıktısı verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere verilen yöntem için ana lob darlığı genişletilmeden istenmeyen yükseltmeler yok edilmiş. Şekil 4'te, 20 derece ve 25 derece yatay açıları konumlanmış, birbirine yakın ve bağımsız iki hedef için uzaysal güç çıktısı verilmektedir. Bu şekilden de anlaşıldığı üzere açılal çözünürlük seyrek dizininkiyle aynıken yan lob bölgesindeki istenmeyen yükseltmeler ve tespitler yok edilmiştir, yan lobların seviyesi de alt dizin seviyesine, hatta bazı yerlerde



Şekil 3: Tek hedef için önerilen yöntemin sonuçları



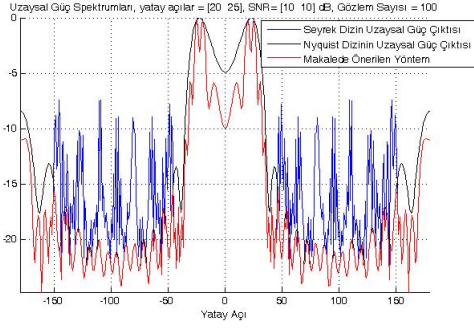
Şekil 4: İki hedef için önerilen yöntemin sonuçları

daha düşük seviyelere, indirilmiştir. Dolayısıyla 100 sensör ile elde edilebilecek açı çözünürlüğü 30 sensör ile elde edilip işlem yükünden önemli ölçüde kazanç sağlanmıştır. Bununla birlikte herhangi bir optimizasyon kullanılmadan verilebilecek tespit kararlarında herhangi bir belirsizlik veya yanlışlık oluşmamıştır. Başka bir ifadeyle seyrek dizin desenini herhangi bir optimizasyon uygulamadan özel bir dizin yerleşimi kullanarak ve bu yerleşimden elde edilen bilgileri doğrusal olmayan bir yöntemden geçirerek iyileştirdiğimizi söyleyebiliriz.

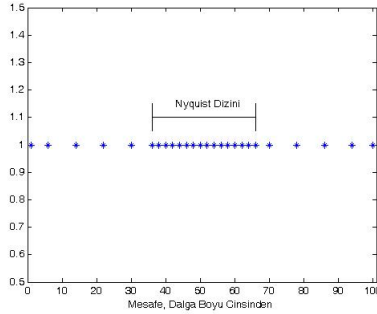
Sensör sayısı 26'ya düşürülmüş iki hedefli başka bir senaryo için uzaysal güç çıktıları Şekil 5'te verilmektedir. Bu örnek için kullanılan dizin Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5 karşılıklı olarak incelendiğinde makalede önerilen algoritmanın performansının sensör sayısının azalmasından pek etkilenmediği gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, ileride performans düşürülmeden Nyquist dizininde ve tüm dizinde kullanılacak minimum sensör sayısının bulunmasına yönelik bir çalışma yapılabilir.

IV. SONUÇ

Bu makalede seyrek sensör dizin tasarımı için doğrusal olmayan bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde dizin özel bir yapıda yerleştirilmiş ve yan lob bölgelerinde oluşan istenmeyen yükseltmeler doğrusal olmayan bir yöntemle yok edilmiştir. Bu sayede az sensör kullanılarak daha fazla bir dizin açıklığına kavuşulmuş ve açı çözünürlüğünde ciddi bir kazanç sağlanmıştır. Bununla birlikte maliyet ve işlem yükünden kazanç sağlanmıştır.



Şekil 5: İki hedef için önerilen yöntemin sonuçları, sensör sayısı 26'ya düşürüldü



Şekil 6: 26 Sensörlü Seyrek Dizin

KAYNAKÇA

- [1] A. Trucco V. Murino and C. S. Regazzoni. Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing. *IEEE Trans. Signal Processing*, 44:119–123, Jan. 1996.
- [2] A. Trucco. Synthesizing wide-band sparse arrays by simulated annealing. *Proc. Oceans 2001, MTS/IEEE Conference and Exhibitions*, 2:989–994, Nov. 2001.
- [3] A. Trucco. Thinning and weighting of large planar arrays by simulated annealing. *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 46:347–355, Mar. 1999.
- [4] R. L. Haupt. Thinned array using genetic algorithms. *IEEE Trans. Antennas Propagat*, 42:993–999, July 1994.
- [5] D. J. O'Neill. Element placement in thinned arrays using genetic algorithms. in *Proc. IEEE Int. Conf. Oceans'94 Oates, Brest, France*, II:301–306, Sept 1994.
- [6] E. Storti A. Lommi, A. Massa and A. Trucco. Sidelobe reduction in sparse linear arrays by genetic algorithms. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 32(3):194–196, Feb. 2002.
- [7] R. M. Leahy and B. D. Jeffs. On the design of maximally sparse beamforming arrays. *IEEE Trans. Antennas Propagat*, 39:1178–1187, Aug. 1991.
- [8] A. Trucco and V. Murino. Stochastic optimization of linear sparse arrays. *IEEE J. Ocean. Engrg.*, 24(3):291–299, Sept. 1999.
- [9] A. Trucco and F. Repetto. A stochastic approach to optimizing the aperture and the number of elements of an aperiodic array. in *Proc. Int. Conf. Oceans'96 MTS/IEEE, Fort Lauderdale, FL*, pages 1510–1516, Sept. 1996.
- [10] B. Elgetun S. Holm and G. Dahl. Properties of the beampattern of weight- and layout-optimized sparse arrays. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 44:983–991, Sept. 1997.
- [11] R.J. Dallaire H. C. Stankwitz and J.R. Fienup. Nonlinear apodization for sidelobe control in sar imagery. *IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst.*, 31:23–52, Jan 1995.

- [12] Jung Ah C. Lee and David C. Munson Jr. Effectiveness of spatially-variant apodization. *Image Processing, 1995. Proceedings, International Conference*, 1:147–150, Oct 1995.
- [13] Jung Ah C. Lee and David C. Munson Jr. Spatially variant apodization for image reconstruction from partial fourier data. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 9:1914–1925, Nov 2000.