

Telsiz vericilerinin çoklu yansımaları ortamlarda sayısının ve yerlerinin tespit edilmesi

Uğur SARAÇ*, Tayfun AKGÜL, F. Kerem HARMANCI

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yön bulma işlemi kısaca DF (Direction Finding, Yön Bulma) veya AOA (Angle of Arrival, Geliş Açısı) olarak ifade edilmektedir. Antenler, alıcı, sayısal kart ve bilgisayardan oluşan sisteme de DF (Direction Finding, Yön Bulma) sistemi denmektedir. DF sistemi tek olarak sadece vericilerin yönünü tespit edebilmektedir. Eğer amaç vericilerinin konumunun belirlenmesi ise ortamda en az iki DF sistemi bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada telsiz vericilerinin sayılarının ve yerlerinin tespiti için yeni bir yöntem önerilmiştir. Telsiz vericilerinin sayısının ve yerinin tespitinde MDL (Minimum Description Length, Minimum Tanımlama Uzunluğu) tabanlı ITC (Information Theoretic Criteria) algoritması ile önce ortamdaki yol sayısının daha sonra MUSIC (Multiple Signal Classification, Çoklu İşaret Sınıflandırma) algoritması ile vericilerin yönlerinin belirlenmesi önemli bir aşamadır. MUSIC spektrumundaki her bir tepe her bir yolun geliş açısına karşılık gelecektir. Fakat çoklu yansımaları ortamlarda bir vericiden birden fazla yoldan işaret yayılacağından DF için ek çalışmalar gerekecektir. MVBF (Minimum Variance Beamforming, Minimum Varyans Huzme Şekillendirme) huzme şekillendirme algoritması kullanılarak her yoldan gelen işaretlerin zaman eksenleri elde edilir ve aralarındaki korelasyon katsayıları hesaplanır. Bu korelasyon katsayıları kullanılarak işaretlerin aynı kaynaktan yayılıp yayılmadıklarına karar verilir. Böylece verici sayısı ve onların yönleri tespit edilmektedir. Performans analizleri gerçek zamanlı deneylerle elde edilerek sunulmaktadır. Önerilen tekniğin etkinlik testi, tam yansımaları oda içerisinde iki kaynaklı denemelerle gerçekleştirilmiştir. Dış ortamda da başarılı denemeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: DF, dizilim anten, huzme şekillendirme, yön tespit.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Uğur SARAÇ. sarac@uekae.tubitak.gov.tr; Tel: (262) 648 12 12.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Telsiz vericilerinin çoklu yansımaları ortamlarda sayısının ve yerlerinin tespit edilmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.06.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.07.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Detection and localization of emitters in the presence of multipath

Extended abstract

Direction Finding (DF), or in other words, estimation of Angle of Arrival (AOA), has been an active research area since the beginning of the 20th century. DF has several application areas such as, military applications, GSM with improved channel capacity, localization of illegal transmitters such as TV and radio stations, or, of a mountaineer losing his/her path, in addition to spectrum monitoring.

When multiple sources are incident on an antenna array simultaneously, classical DF methods, such as interferometry and Doppler cannot resolve these sources. An effective solution to the problem is to use high-resolution subspace-based algorithms. Multiple Signal Identification and Classification (MUSIC) is the most powerful and widely used subspace-based method. MUSIC is known to successfully resolve two or more sources if they are incoherent. However, in practice, signals often propagate in multipath environments. Thus, a source signal is incident on the array from many paths, which implies that coherent signals at different angles will be received by an array.

For source localization with MUSIC in a multipath environment, it is critical to initially detect the number of incident paths. The simplest such algorithms are based on counting the smallest eigenvalues of the array covariance matrix. Information Theoretic Criteria (ITC) is advanced algorithm for path enumeration widely used, such as the Akaike Information Criteria (AIC) and Minimum Description Length (MDL). Just as in MUSIC, these ITC algorithms are also affected in a multipath environment. This is due to the fact that signal coherence in a multipath environment alters the eigenstructure of the sensor array's correlation matrix, which in turn affects the performance of both MUSIC and ITC. MDL was proposed for source enumeration in the presence of multipath and signal coherence.

A recent solution proposed for the problem of signal coherence is the Spatial Smoothing (SS) preprocessing algorithm. SS essentially removes the effect of

coherency between incoming signals in the eigenstructure of the correlation matrix. Therefore, source localization process involves the following steps: First, the array antenna output is processed to form a sample covariance matrix, then SS is applied to this matrix, after which the number of signals are estimated and finally, based on these, MUSIC is used to generate an angle spectrum.

It is important to note that in a multipath environment, ITC with spatial smoothing merely detects the number of paths, i.e., the signals originating from sources directly or incident from the reflectors, and then the MUSIC algorithm localizes all these signals in the angle/AOA pseudospectrum. In other words, ITC and/or the MUSIC-AOA pseudospectrum, indicate the number of paths and not the number of independent sources present in a multipath environment. This is a significant problem if the objective is to localize actual independent sources in a multipath environment.

In this study, the minimum description length information-theoretic algorithm is used for the joint detection and localization of multiple RF transmitters in a multipath environment is to enumerate the number of paths and then to measure the angle of arrival of each path using an antenna array with a high resolution direction finding algorithm such as MUSIC. Those possible propagation paths are the angles corresponding to the peaks of the MUSIC pseudospectrum. Since more than one path may correspond to a single emitter source, further processing is required. The time domain signals of these paths are then extracted with minimum variance beamforming in order to estimate their correlation coefficients with each other. These correlation coefficients are used to decide whether or not these paths correspond to the same emitter. Hence, the number of emitters and their angle of arrivals are jointly estimated. Performance analysis of the method is presented via real-time laboratory experimentation and discussed in this paper. To demonstrate the effectiveness of the proposed technique, experiments with two sources are conducted in an anechoic test chamber.

Keywords: *DF, direction finding, array antenna, beamforming, MVBF.*

Giriş

Telsiz vericilerinin yerinin tespiti 20. yüzyılın başından beri üzerinde çok çalışılan ve birçok yöntemin geliştirildiği bir çalışma alanı olmuştur.

Genel kullanım amacı çok yaygın olmakla beraber başlıcaları; askeri uygulamalar, GSM gibi kanal trafiğinin frekansa göre ayrıldığı haberleşme ortamlarında abonenin yerinin tespiti ile yöne bağımlı olarak da bant tahsisi yapmak suretiyle kanal kullanım verimliliğinin artırılması, kaçak yayın yapan radyo ve televizyon istasyonlarının yerinin tespiti, dağcılar gibi kaybolma riski olanların yerinin tespiti olarak sayılabilir. Yön bulma işlemi kısaca DF (Direction Finding, Yön Bulma) veya AOA (Angle Of Arrival, Geliş Açısı) olarak ifade edilmektedir. Antenler, alıcı, sayısal kart ve bilgisayardan oluşan sisteme de DF sistemi denmektedir. DF sistemi tek olarak sadece vericilerin yönünü tespit edebilmektedir. Eğer amaç vericilerinin konumunun belirlenmesi ise ortamda en az iki DF sistemi bulunması gerekmektedir (Yong vd., 2001).

Schmidt (1986) DF konusunda yeni bir çığır açmış ve alt-uzay uygulaması olarak MUSIC'i ilk olarak DF problemine uygulamıştır. Çalışmada dizilim anten sistemi ile alınan işaretlere MUSIC algoritması uygulanmış ve açığa bağlı bir güç spektrumu elde edilmiştir. Fakat bu çalışmalarda bazı kısıtlamalar vardır. Bunların başında işaret kaynaklarının düşük ilintili olması varsayımı gelir. Yapılan bu çalışmada önerilen metot gelen işaretlerin arasında yüksek ilinti olduğu veya işaretlerin eşzamanlı (coherent) olduğu çoklu yansıma ortamlarında çözünürlük performansı önemli ölçüde azalır.

Wax ve Kailath (1985) tarafından önerilen Uzamsal Yumuşatma (SS, Spatial Smoothing) metodu dizilim antenle alınan veriye önışlem olarak uygulanarak çoklu yansımadan doğan gelen işaretler arasındaki yüksek ilinti etkisi ortadan kaldırılmaktadır. Dolayısıyla çoklu yansıma olan ortamlarda uzamsal yumuşatma ile ön işlemden sonra MUSIC uygulaması yapılabilir. Pillai ve Kwon (1989) FBSS (Forward-Backward Spatial Smoothing, İleri-

Geri Uzamsal Yumuşatma) önererek K adet vericinin yönünün tespiti için SS'de 2K olan minimum anten sayısını $3K/2$ 'ye indirmiştir. Wax ve Sheinvald (1994) ULA (Uniform Linear Array, Düzgün Doğrusal Dizilim) için önerilen SS metodunu UCA'ya (Uniform Circular Array, Düzgün Dairesel dizilim) uygulamıştır.

Rheeden ve Gupta (1999) çoklu yansıma problemini çözecek yeni bir metot ileri sürmüşlerdir. Anten geometrisine bağlı olmayan ve K verici için sadece K+1 anten gereken TS (Temporal Smoothing, Zamansal Yumuşatma) metodunu önermişlerdir. Fakat bu metot hareketli vericiler için bir çözüm olduğundan kullanımı kısıtlıdır.

Telsiz vericiler üzerinde yapılan çalışmalarda DF ile beraber düşünebilecek bir konu da ortamdaki kaynak sayısının tespitidir. Ortamdaki kaynak sayısı üzerine çalışmalar da DF'e paralel olarak 1980'li yıllardan beri geliştirilmektedir. Bu konuda yapılan ilk çalışmalarda anten dizilimiyle elde edilen verilerden kestirilen özilişki matrisinin gürültü ve işaret özdeğerleri bir eşik değerle karşılaştırılmış, eşikten büyük olan özdeğer sayısı kaynak sayısı olarak belirlenmiştir. Fakat eşik değer belirlenmesindeki belirsizlikler bu şekilde sonuca varmayı zorlaştırmaktadır (Wax ve Kailath, 1985).

Wax ve Kailath (1985) MDL (Minimum Description Length, Minimum Tanımlama Uzunluğu) tabanlı ITC (Information Theoretic Criteria, Bilgi Kuramsal Ölçüt) metodunu işaret kestirime uygulayarak verici numaralama konusunda önemli bir çalışma yapmıştır. 1989'da bu çalışmasını eşzamanlı işaretler için genişletmiş ve çoklu yansıma ortamındaki kaynak sayısının tespitini de gerçekleştirmiştir (Wax ve Ziskind, 1989). Valaee ve Kabal (2004) MDL'e göre performansı daha da arttıran PDL (Predictive Description Length, Kestirimci Tanımlama Uzunluğu) tabanlı ITC önermiştir. Bu konudaki en son çalışmayı Zhou (2005) yaparak ITC'nin performansını arttırmış, işlem yükünü azaltmıştır.

DF konusunda gelinen en son nokta, yukarıdaki bütün aşamalar sonucunda elde edilen aç

izgesindeki tepeciklerin hangilerinin hangi kaynaktan yayıldıklarının belirlenmesidir. Bu aşamada her bir tepecik yönünde huzmeleme yapılarak o yönden antenlere ulaşan sinyalin zaman uzayındaki hali elde edilir. Aynı kaynaktan yayılan sinyallerin yüksek ilintiye, farklı kaynaktan yayılan sinyallerin düşük ilintiye sahip oldukları bilgisine dayanarak sinyaller arasındaki ilinti katsayısı değerleri karşılaştırılarak sinyallerin ayrıştırılması işlemi gerçekleştirilir. Benzer bir çalışma bilgisayar benzetimi şeklinde başarımlı analizleri gerçekleştirilmeden yapılmıştır (Yong vd., 2001). Bu çalışmada gerçek bir uygulama ile önerilen yöntemler test edilecek ve başarımlı analizleri verilecektir.

Sinyal modeli

Vericiden yayılan sinyal sıfır ortalamalı, gürültü ile birbirinden bağımsız, ilintisiz ve aynı dağılımlı süreç olarak kabul edilir. Sinyal ve gürültü Gauss olasılık dağılımı ile ifade edilir. Ortamdan kaynaklanacak çoklu yansımalar ihmal edilmeden, bu etkilerden kaynaklanacak konumlandırma hataları dikkate alınır. Bir vericiden çıkıp yansımalara uğrayarak alıcı sisteme farklı yollardan ulaşacak bütün sinyallerin birbirleriyle tam veya kısmi ilintili olacağı varsayılır.

K kaynaktan yayılan sinyal çoklu yansımaya uğrayarak farklı yollar izler ve D farklı yoldan alıcı sisteme ulaşır. M adet dizilim anten elemanı ile gözlenen sinyaller, D dar bantlı sinyalin doğrusal bileşimleridir. Bu bilgiler kullanılarak sinyal modellemesinin ilk adımı olarak anten çıkış sinyali elde edilebilir (Schmidt, 1986) :

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(\theta_1) & \dots & a_1(\theta_D) \\ a_2(\theta_1) & \dots & a_2(\theta_D) \\ \dots & \dots & \dots \\ a_M(\theta_1) & \dots & a_M(\theta_D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada \mathbf{y} anten çıkış sinyali, \mathbf{A} kip vektörleri matrisi, \mathbf{g} gürültü vektörü olmak üzere gelen sinyaller anten diziliminde belirlenen bir refe-

rans noktasına göre genlik ve faz bilgisini içerecek şekilde s kompleks vektörü ile ifade edilir. s vektörünün ilk elemanı θ_l yönünden gözlemlenen sinyali ifade eder. $a_m(\theta_d)$ ifadesinde m , dizilimdeki m 'inci antenin referans noktasına göre konumunu, d ise d 'inci kaynaktan gelen sinyale olan anten cevabını gösterir:

$$a_m(\theta_l) = e^{-j2\pi(m-1)d\sin(\theta_l)/\lambda} \quad (3)$$

\mathbf{A} matrisinin kolon vektörleri, "kip vektörü" olarak adlandırılır. Ortamdaki sinyal \mathbf{A} 'nın sütunlarının, yani kip vektörlerinin oluşturduğu alt-uzayda tanımlıdır. Ortamda aynı anda aktif olan farklı vericilerden çıkacak sinyallerin birbirinden bağımsız ve ilintisiz olduğu varsayılmaktadır.

Kullanılan yöntemler

MUSIC

MUSIC, anten dizilimlerine gelen sinyalleri kullanarak sinyale ait parametreleri elde eden bir tekniktir. MUSIC literatürde en yaygın kullanılan yüksek çözünürlüklü kestirim yöntemidir (Schmidt, 1986). \mathbf{v} özvektör olmak üzere,

$$P_{xx}^{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{v}\mathbf{v}^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (4)$$

bağıntısıyla, θ 'nın 0-360 derece arasındaki değerleri taranarak, θ 'ya bağlı güç izgesi elde edilir. MUSIC oldukça gürbüz bir yöntem olmasına rağmen dizilim cevabının karakterize edilmesine ve bütün olası θ değerlerinin taranmasına ihtiyaç duyar. Bunun yanısıra yüksek açısız çözünürlüğü MUSIC kullanımını birçok uygulamada gerekli kılmaktadır.

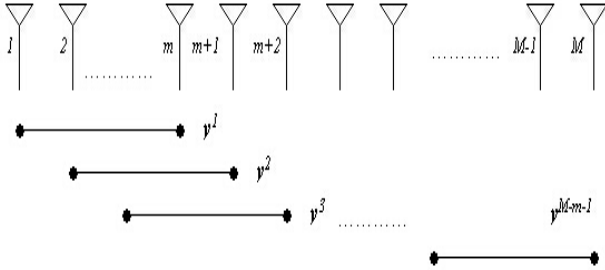
Uzamsal yumuşatma

Uzamsal yumuşatmada Şekil 1'de gösterildiği gibi alt anten dizilimleri oluşturulur. Her bir dizilim m antenden oluşur ve toplam $M-m-1$ adet alt dizilim elde edilir. Her bir dizilimden elde edilen y^i ($i=1, \dots, M-m-1$) vektörü ile $M-m-1$ adet \mathbf{R}_{yy} özilinti matrisi oluşturulur.

(4)'de olduğu gibi de MUSIC algoritmasında kullanılacak \mathbf{R}_{yy} matrisi elde edilir (Shan vd., 1985).

$$\mathbf{R}_{yy} = \frac{1}{M-m-1} \sum_{i=1}^{M-m-1} \mathbf{R}_{yy}^i \quad (5)$$

Bundan sonra kullanılacak \mathbf{R}_{yy} ifadeleri uzamsal yumuşatma uygulanmış ilinti matrisini ifade edecektir.



Şekil 1. Uzamsal yumuşatmada alt anten dizilimlerinin oluşturulması

Huzmeleme

DF uygulamaları bakış açısından huzmeleme yöntemi iki şekilde kullanılabilir. Birincisinde, uygun şekillendirme parametreleri ile antenin yönelimi değiştirilir ve bütün yönler bulunduğu yere yönlendirilir ve vericiden yayılan sinyal elde edilir. Bu işlem için MVBF (Johnson ve Dudgeon, 1993) veya Uyarlanır huzmeleme (Adaptive Beamforming, ABF) (Yong vd., 2001) yöntemi kullanılmaktadır.

MVBF (CAPON) Huzmeleme- Huzmelemede amaç, ζ açısıyla gelen zaman sinyalini elde ederken diğer yönden gelen sinyalleri ve gürültüleri bastırmaktır. $\mathbf{a}(\zeta)$: ideal, birim genlikli, ζ açısından gelen sinyali, \mathbf{w} : anten çıkış sinyaline uygulanan ağırlık vektörü olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\text{Re}[\mathbf{a}^H(\zeta) \mathbf{w}] = 1 \text{ olduğunda, } \min \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{yy} \mathbf{w} \quad (6)$$

(6)'da verilen denklemler örneğin Langrange çarpanları yöntemi ile en küçüklenirse, \mathbf{w} aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{a}} \quad (7)$$

Görüldüğü gibi \mathbf{w} ağırlık vektörü sadece ilinti matrisi \mathbf{R}_{yy} 'ye değil, ζ tarama yönüne de bağlı-

dır. ζ yönündeki huzmeleyici çıkış gücü (8)'de verilmektedir.

$$P(\zeta) = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{yy} \mathbf{w} \quad (8)$$

(7) nolu denklem (8)'de yerine koyulursa MVBF çıkış gücü \mathbf{a} yönlendirme vektörüne bağlı olarak

$$P^{MU}(\zeta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\zeta) \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{a}(\zeta)} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir. ζ açısından gelen zaman sinyali

$$Y(t) = \sum_{i=1}^M w_i^H y_i(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{y}(t) \quad (10)$$

ile elde edilir.

Uyarlanır huzmeleme- θ_k yönünden gelen sinyali temsil eden $\mathbf{a}(\theta_k)$ kip vektörü \mathbf{A} yönlendirme matrisinden çıkarılarak \mathbf{A}_k matrisi elde edilir. \mathbf{W}_k , \mathbf{A}_k 'nın dik izdüşümü olsun (Yong vd., 2001). Bu durumda

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{I} - \mathbf{A}_k (\mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_k)^{-1} \mathbf{A}_k^H \quad (11)$$

\mathbf{I} : $M \times M$ birim matris olmak üzere; θ_k açısından gelen sinyal

$$Y_k(t) = [\mathbf{W}_k \mathbf{a}(\theta_k)]^H \mathbf{W}_k \mathbf{X}(t) \quad (12)$$

elde edilir. Burada $[\cdot]^H$ Hermityan'dır.

İlinti katsayısı kullanımı- Yukardaki (5) nolu denklem ile elde edilen açı izgesindeki toplam D tane tepenin θ değerleri ayrı ayrı belirlenir. Yönleri için MVBF uygulanarak, yine D adet $Y(t)$ zaman sinyali ($Y_1(t)$, $Y_2(t)$, ..., $Y_D(t)$) elde edilir. $Y_i(t)$ ve $Y_j(t)$ sinyallerinin arasındaki ilinti katsayıları ρ_{ij} belirlenerek ortamdaki kaynak sayısı ve hangi tepenin hangi kaynağa ait olduğu tespit edilir. Bu işlem çapraz ilinti matrisi kullanılarak da yapılabilir. Yaptığımız irdelemelerde ρ_{ij} katsayı değerlerinin olasılık yoğunluk dağı-

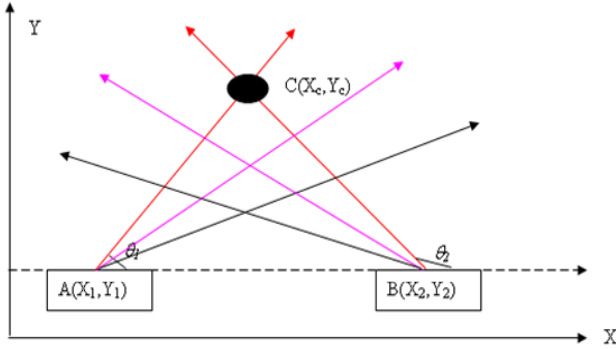
lımları değişimleri görece sabit, ortalama değerleri her SNR değerinde farklı bir değer alan normal dağılıma sahip olduğu gözlenmiştir. Elde edilen ilinti katsayısı eğer tespit edilen eşik değerden küçük ise sinyaller aynı kaynaktan yayılmış, büyük ise farklı kaynaklardan yayılmış kararı verilmektedir. Önceki bir çalışmada (Yong vd., 2001), eşik değeri sabit (0.6-0.7 aralığında) seçilmesi nedeniyle farklı SNR değerlerinde hatalı sonuçlara sebep olmaktadır. Çalışmamız kapsamında eşik değeri uyarlamalı olarak her SNR değeri için ayrı ayrı hesaplanmaktadır:

$$(m_0 + m_1) / 2 \quad (13)$$

Burada m_0 düşük ilintili olma durumundaki ortalama değerini, m_1 ise yüksek ilintili olma durumu ortalama değerini ifade etmektedir.

Çoklu yansımalı ve kaynaklı ortamda yanlış-konum eleme yöntemi

Telsiz vericilerinin konumlarının belirlenmesi için en az iki DF sistemi gerekmektedir, bu sayı arttıkça konumlandırma başarısı da artmaktadır. Konumlandırma işlemi Şekil 2’de genel olarak gösterilmektedir. Burada amaç C noktasındaki vericinin koordinatlarının elde edilmesidir.



Şekil 2. Konumlandırma işleminin genel gösterimi

Çoklu yansıma olan ortamlarda bir vericiden çıkan işaretler farklı sistemlere farklı yönlerden geldiklerinden dolayı konum belirlemede hatalar çıkmaktadır. Bu hataları düzeltmek için işaretler arasındaki ilinti değerleri kullanılmaktadır. İşaret modeli anlatılırken belirtildiği gibi aynı kaynaktan çıkan işaretler birbirleriyle yük-

sek ilintili, farklı kaynaklardan çıkan işaretler ise birbiriyle ilintisizdir.

Şekil 2’de basit haliyle verilen ideal çalışma şartları her zaman sağlanamaz, ortamda çoklu yansıma ve fazla sayıda verici olması durumunda konumlandırma hataları ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için önerilen yanlış konum eleme yöntemi (Yong vd., 2001) aşama aşama anlatılacaktır.

Ortamda D tane işaret, L tane çoklu yansıma işaretleri, $L < D$, $D < M$ şartıyla bulunsun. A ve B merkezlerinde düzgün doğrusal antenlerden oluşan DF sistemleri bulunsun.

Aşama 1: MUSIC ve uzamsal yumuşatma kullanılarak A ve B merkezlerine gelen D tane işaretin geliş açıları tespit edilir.

A merkezinde elde edilen açı değerleri: $\theta_{A1}, \theta_{A2}, \dots, \theta_{AD}$,
 B merkezinde elde edilen açı değerleri: $\theta_{B1}, \theta_{B2}, \dots, \theta_{BD}$,

Aşama 2: huzme şekillendirme kullanılarak aşama 1’de elde edilen açılardan gelen işaretler elde edilir.

A merkezinde elde edilen işaretler: $Y_{A1}(t), Y_{A2}(t), \dots, Y_{AD}(t)$
 B merkezinde elde edilen işaretler: $Y_{B1}(t), Y_{B2}(t), \dots, Y_{BD}(t)$

Aşama 3: A merkezinde $Y_{A1}(t), Y_{A2}(t), \dots, Y_{AD}(t)$ işaretlerinin birbirleriyle olan ilinti katsayıları elde edilir. İlinti katsayıları üst üçgenel matris olarak ifade edilir.

$$C_A = \begin{bmatrix} \rho_{A1A1} & \rho_{A1A2} & \dots & \rho_{A1AD} \\ 0 & \rho_{A2A2} & \dots & \rho_{A2AD} \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \rho_{ADAD} \end{bmatrix} \quad (14)$$

ρ_{AiAj} ifadesinde A_i ve A_j , θ_i ve θ_j yönlerinden gelen işaretlerin ilinti katsayısını göstermektedir. ε

deneysel olarak elde edilen eşik değeri olmak üzere; $\rho_{A_i A_j} > \varepsilon$ olması durumunda, θ_i ve θ_j yönlerinden gelen işaretlerden birisi çoklu yansıma işaretidir. Kaynaktan direkt gelecek işaretin genliği daha büyük olacağından $Y_{A_i}(t)$, $Y_{A_j}(t)$ işaretlerin güç değerleri hesaplanır ve düşük güçlü işaret çoklu yansıma işareti olarak belirlenir ve elenir. Bu işlem sonucunda L tane işaret elenir ve geriye $D-L$ tane işaret kalır. Geriye kalan işaretler ve yönleri şöyle ifade edilir.

A merkezine kaynaktan direkt gelen işaretlerin açı değerleri: θ_{AA1} , θ_{AA2} , $\theta_{AA(D-L)}$

A merkezine kaynaktan direkt gelen işaretler: $Y_{AA1}(t)$, $Y_{AA2}(t)$, $Y_{AA(D-L)}(t)$

Aşama 4: B merkezinde $Y_{B1}(t)$, $Y_{B2}(t)$, $Y_{BD}(t)$ işaretlerinin birbirleriyle olan ilinti katsayıları elde edilir. İlinti katsayıları üst üçgenel matris olarak ifade edilir.

$$C_B = \begin{bmatrix} \rho_{B_1 B_1} & \rho_{B_1 B_2} & \dots & \rho_{B_1 B_D} \\ 0 & \rho_{B_2 B_2} & \dots & \rho_{B_2 B_D} \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \rho_{B_D B_D} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\rho_{B_i B_j}$ ifadesinde B_i ve B_j , θ_i ve θ_j yönlerinden gelen işaretlerin ilinti katsayısını göstermektedir. ε deneysel olarak elde edilen eşik değeri olmak üzere; $\rho_{B_i B_j} > \varepsilon$ olması durumunda, θ_i ve θ_j yönlerinden gelen işaretlerden birisi çoklu yansıma işaretidir. Kaynaktan direkt gelecek işaretin genliği daha büyük olacağından $Y_{B_i}(t)$, $Y_{B_j}(t)$ işaretlerin güç değerleri hesaplanır ve düşük güçlü işaret çoklu yansıma işareti olarak belirlenir ve elenir. Bu işlem sonucunda L tane işaret elenir ve geriye $D-L$ tane işaret kalır. Geriye kalan işaretler ve yönleri şöyle ifade edilir.

B merkezine kaynaktan direkt gelen işaretlerin açı değerleri: θ_{BB1} , θ_{BB2} , $\theta_{BB(D-L)}$

B merkezine kaynaktan direkt gelen işaretler: $Y_{BB1}(t)$, $Y_{BB2}(t)$, $Y_{BB(D-L)}(t)$

Aşama 5: A ve B merkezlerinde elde edilen $Y_{AA1}(t)$, $Y_{AA2}(t)$, $Y_{AA(D-L)}(t)$ ve $Y_{BB1}(t)$, $Y_{BB2}(t)$, $Y_{BB(D-L)}(t)$ işaretleri kullanılarak tekrar çapraz ilinti matrisi elde edilir.

$$C_{AB} = \begin{bmatrix} \rho_{AA_1 BB_1} & \rho_{AA_1 BB_2} & \dots & \rho_{AA_1 BB(D-L)} \\ \rho_{AA_2 BB_1} & \rho_{AA_2 BB_2} & \dots & \rho_{AA_2 BB(D-L)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{AA(D-L) BB_1} & \dots & \dots & \rho_{AA(D-L) BB(D-L)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

C_{AB} ilinti katsayısı matrisinde çoklu yansıma işareti bulunmaz, dolayısıyla yüksek olan ilinti katsayısı değeri o katsayıyı oluşturan işaretlerin aynı kaynaktan çıktığını ifade eder. Örneğin; eşik değeri üzerinde olan bir $\rho_{AA_i BB_j}$ katsayısına göre A merkezine θ_i yönünden gelen işaret B merkezine θ_j yönünden gitmektedir. Bu bilginin sonucunda da, A merkezine θ_i yönünden gelen işarete, B merkezinden karşılık gelecek θ_j haricindeki $D-L-1$ yön elenmiş olacaktır.

Uygulama

Yapılan uygulama TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü'ndeki (UEKAE) Tam Yansısız Oda (TYO) içerisinde gerçekleştirilmiştir. TYO içerisindeki bir işaret TYO duvarlarına çarptığında soğurulur ve yansımaya uğramaz. TYO kullanılarak ortamdaki çoklu yansıma etkileri kontrol altına alınarak kontrollü testler yapılmış olur. Ortamdaki verici ve alıcıların durumları Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 3'te iki verici kaynak ve bir girişim kaynağı gösterilmektedir. Şekil 4'te ise ortamda bir kaynak ve çoklu yansıma yolunu üretecek bir reflektör gösterilmektedir. Verici antenler sabit dururken alıcı dizilim antenin bulunduğu döner tablo farklı açılarda çevrilerek kaynakların geliş açıları istenen değerlerde elde edilmiştir.

Bu uygulamada antenler arası 15 cm olan 8 adet "patch" anten kullanılarak dizilim anten oluşturulmuştur. Kaynaklar ile dizilim anten arası yaklaşık 5.5 m alınarak uzak alan şartları sağlan-

mıştır (Johnson ve Dudgeon, 1993). Uzamsal yumuşatma anten sayısı 5 olarak kullanılmıştır. Taşıyıcı frekansı 500 MHz, işaret band genişliği 20 kHz ve modülasyon FM olarak ayarlanmıştır. İnterferans kaynağı olarak ticari bir beyaz gürültü kaynağı kullanılmıştır. Dizilim antenlerden alınan her bir işaret temel banda indirilerek 100 kHz örnekleme oranı ile sayısal ortama aktarılmaktadır.

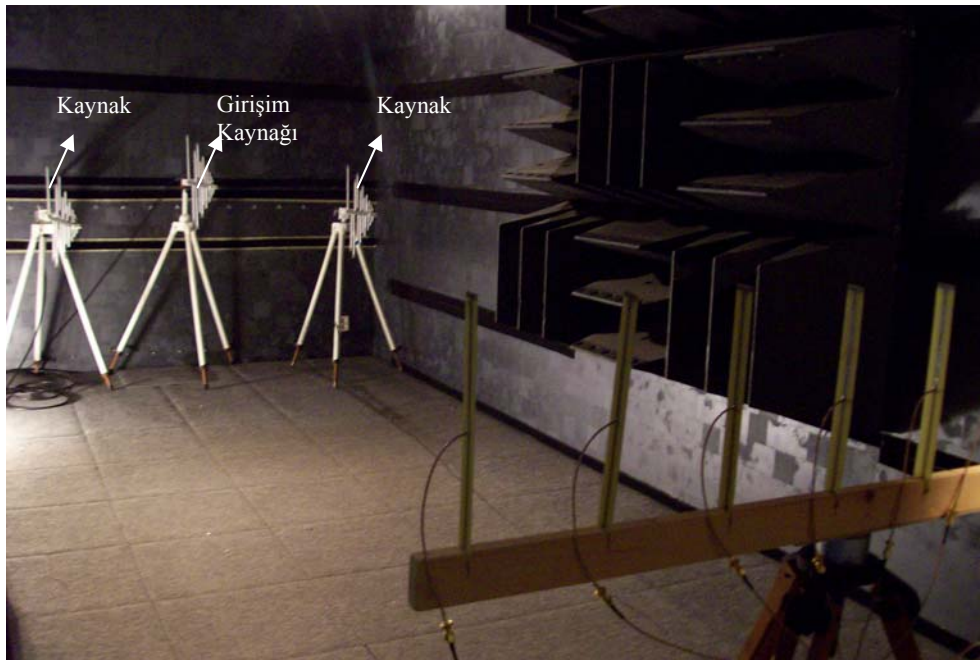
TYO içerisinde yapılan bu uygulamada kaynakların sadece yönleri tespit edilecektir, konumlarının tespiti için ortamda aynı DF sisteminden en az iki tane bulunmalıdır. TYO odanın boyutları böyle bir uygulamaya uygun olmadığından dolayı bu durum kapsam dışında tutulmaktadır. Ancak şu bir gerçektir ki, tek DF ile yapılacak bu çalışmanın iki veya daha fazla DF sistemiyle gerçekleştirilip kaynakların konumlarının tespit edilmesinde hiçbir zorluk yoktur.

TYO boyutlarından kaynaklanan bir zorluk da ortamda bulunacak kaynak sayısının iki ile sınırlanmasıdır. Yukarıda yapılan simülasyon çalışmalarında beş kaynaklı sonuçlar verilmiştir. Ancak TYO içerisinde yapılan bu uygulamada iki kaynak-iki yol ve tek kaynak-iki yol durumları gerçekleştirilecektir.

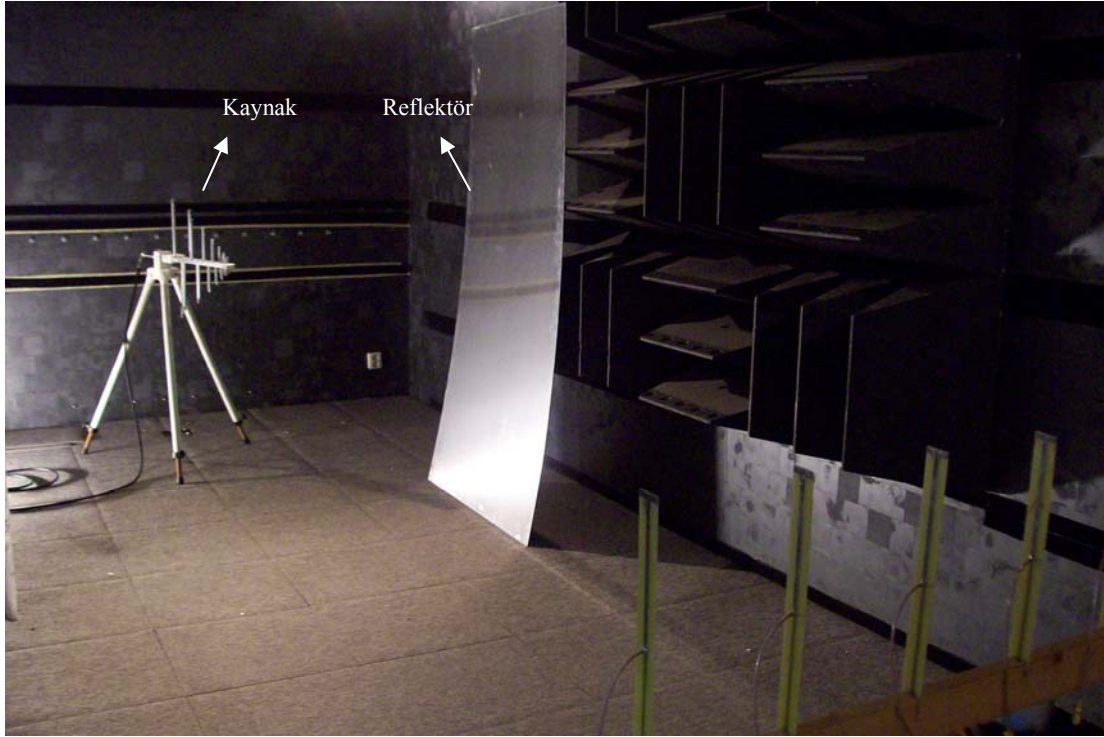
Yapılan uygulama sonucunda kullanılacak parametre ve algoritmaların seçimi için farklı denemeler yapılmış ve optimum olanlarına karar verilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde bu çalışmalar verilmektedir.

Farklı geliş açılarındaki korelasyon katsayısının karakteristiğinin belirlenmesi

İlk uygulama çalışmasında dönen tablonun dört farklı konumu için ölçümler alınmıştır. Tablonun her farklı konumunda iki farklı yolun geliş açısı ölçülerek belirlenmiştir. MUSIC algoritması kullanılarak tek kaynak-iki yol ve iki kaynak-iki yol durumları için geliş açıları hesaplanmıştır. Bu şekilde tespit edilen geliş açılarındaki MVBF huzme şekillendirme uygulanarak bu yönlerdeki zaman işareti elde edilmiş ve korelasyon katsayıları hesaplanmıştır ve sonuçlar evreuyumlu (coherent) durum için Tablo 1 ve evreuyumlu olmayan durum için Tablo 2’de verilmiştir. Sonuçlar anlaşılacağı gibi evreuyumlu durumda korelasyon katsayısı bire yakın değer almakta, diğer durumda ise daha küçük değerler almaktadır. Buna göre 0.8 civarında bir eşik seviye uygulandığında dizilim antende algılanan yolların farklı kaynaktan mı veya aynı kaynaktan mı çıktığı anlaşılacaktır. Bu sonuca göre korelasyon katsayısının gerçek ortamda iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.



Şekil 3. İki kaynak ve girişim kaynağının TYO içerisindeki görünümü



Şekil 4. Tek kaynak ve reflektörün TYO içerisindeki görünümü

Tablo 1. Çoklu yansımali ortamda korelasyon katsayısının farklı geliş açlarına göre durumu

	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ
Θ_1	-45°	-42.5°	-40°	-39.1°	-35°	-34.3°	-30°	-28.5°
Θ_2	5°	6.5°	10°	10.4°	15°	15.8°	20°	20.2°
ρ	~1	0.86	~1	0.92	~1	0.88	~1	0.84

Tablo 2. Çoklu yansımaz ortamda korelasyon katsayısının farklı geliş açlarına göre durumu

	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ	Gerçek açı & ρ	Hesap açı & ρ
Θ_1	-45°	-43.2°	-40°	-39.7°	-35°	-34.5°	-30°	-29.2°
Θ_2	5°	5.8°	10°	10.3°	15°	15.6°	20°	21.3°
ρ	~0	0.52	~0	0.47	~0	0.65	~0	0.75

Farklı huzme şekillendirme metotlarının karşılaştırılması

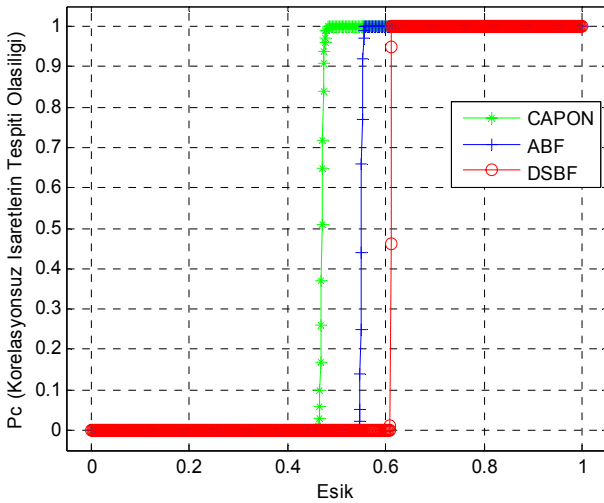
Farklı yönlerden gelen işaretler arasındaki korelasyon katsayılarının hesaplanmasında huzme şekillendirme algoritmalarının seçilmesi oldukça

önemlidir. Litaratürde çok farklı yöntemler vardır. Bu çalışmada bunlardan üçü karşılaştırılacaktır: MVBF, uyarlamalı huzme şekillendirme ve geciktir-ve-topla huzme şekillendirme (DSBF).

İdeal durumda iki işaret ilintili olduğunda korelasyon katsayısı bir civarında, ilintisiz olduğunda korelasyon katsayısı sıfır civarında olacaktır. Fakat uygulamada bu değerler farklılık göstermektedir. Özellikle ilintisiz olma durumunda korelasyon katsayısı değerleri 0.75 değerlerine kadar yükselebilmektedir.

Şekil 5-6'da evreyuysuz iki farklı kaynak varlığında farklı geliş açılarında üç farklı metodun performansı incelenmektedir. Deneysel sonuçlara göre şekillerdeki düşük değerden yüksek değere geçiş anının olduğu geçiş değeri ne kadar düşük ise sınıflandırma o derece başarılı olacaktır. Buna göre bütün bu sonuçlara göre MVBF metodu diğer metotlara göre daha başarılı olmaktadır. MVBF maksimum 0.75 eşik değerine çıkarken diğer metotlar 0.9 değerlerine yaklaşmaktadır. Bu yüksek eşik değerleri çoklu yanlış karar verilmesine sebep olacaktır.

Yukarıdaki Tablo 1-2 ve Şekil 5-6 sonucunda huzme şekillendirme metodu MVBF, eşik değeri de 0.8 olarak belirlenmiştir.

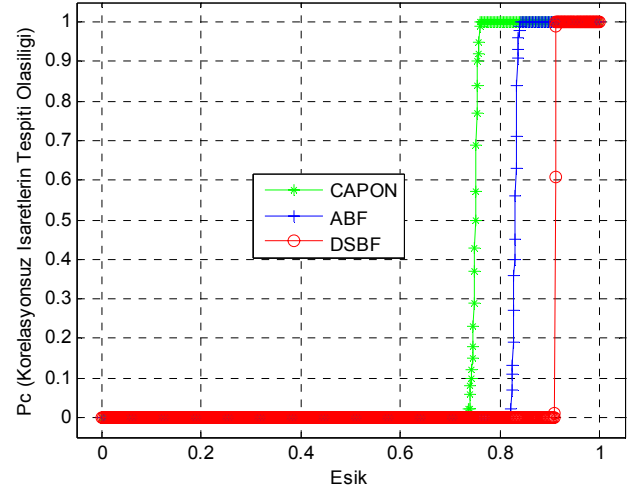


Şekil 5. $\Theta_1=-40^\circ$, $\Theta_2=10^\circ$ için eşik değere karşı ilintisiz işaretlerin tespiti olasılığı (girişimsiz ortam)

İşaret-girişim oranına göre performans analizi

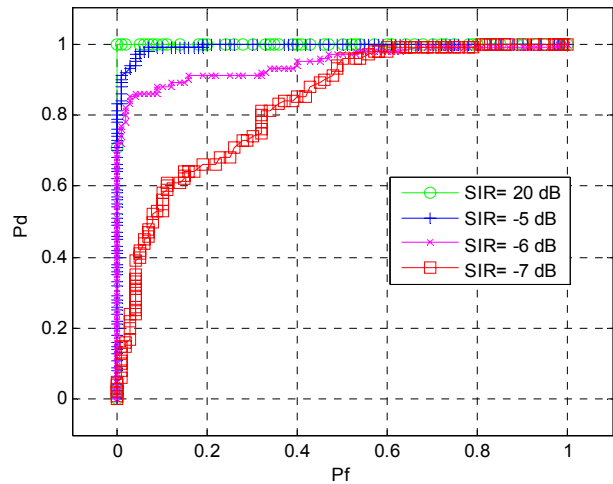
Bu uygulamada, TYO içerisine yerleştirilen yönlendirilmiş bir antene bağlanan bir beyaz gürültü üretici ile dizilim antene girişim uygu-

lanmaktadır. Farklı güç seviyelerinde uygulanan bu gürültü ile farklı SIR (signal-to-interference) seviyelerinde başarı performansı ROC grafiği çizilerek incelenmiştir.



Şekil 6. $\Theta_1=-30^\circ$, $\Theta_2=20^\circ$ için eşik değere karşı ilintisiz işaretlerin tespiti olasılığı (girişimsiz ortam)

Şekil 7'de görüleceği gibi SIR değeri -5 dB değerinden düşük değerler almaya başladığında ROC grafiğindeki Pd değerleri düşmeye başlamaktadır. Bu sebeple girişim olan bir ortamda SIR oranı -5 'den düşük değerleri aldığıında başarı oranı düşmektedir sonucuna varılmaktadır.



Şekil 7. Farklı SIR değerlerine karşılık Pd grafiği

Bu uygulamaların sonucunda birçok metodun uygulanarak performansının ölçülmesi sağlan-

mıştır. Özellikle gerçek uygulamada kalibrasyon problemin çözülmesi ilk olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda gerçek simülasyonlarda denenen algoritmaların gerçek ortamda da başarılı sonuçlar verdiği görülmüş fakat gerçek uygulamada çalışma sırasında oldukça farklı problemlerle karşılaşılabilceği görülmüştür.

Sonuçlar

Bu çalışmanın en önemli varsayımı olan aynı kaynaktan çıkan işaretlerin yüksek ilinti katsayısına, farklı kaynaktan çıkan işaretlerin düşük ilinti katsayısına sahip olduğu hipotezi uygulama ile gösterilmiş ve çeşitli başarımlar analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda; gerçek zamanlı çalışabilecek, çoklu yansımali ortamlarda yüksek çözünürlükle çalışabilecek, 8 antenli ULA kullanarak gelen işaretin yönünü tespit edebilecek bir DF sistemi kurulmuştur. Bu DF sisteminden ortamda en az 2 tane kurulması durumunda ise çoklu yansımali ve kaynaklı ortamda yanlış-konum eleme yöntemi kullanılarak sistem her bir vericinin konumunu da tespit edebilir. Ancak sözü geçen metodun uygulamasında huzme şekillendirme aşamasında MVBF metodu kullanılacaktır.

Kaynaklar

Johnson, D.H. ve Dudgeon, D.E., (1993). *Array signal processing and techniques*, Prentice Hall, New Jersey.

Pillai, S.U. ve Kwon, B.H., (1989). Forward/Backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification, *IEEE Transactions*

on Acoustics, Speech, and Signal Processing, **37**, 1, 8-15.

Rheeden, D.R.V. ve Gupta, S.C., (1999). A temporal smoothing approach to direction of arrival estimation of coherent signals in fading channels, *IEEE WCNC*, **1**, 286-290.

Schmidt, R.O., (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **34**, 3, 276-280.

Shan, T., Wax, M. ve Kailath, T., (1985). On spatial smoothing of direction-of-arrival estimation of coherent signals, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **33**, 4, 806-811.

Valaee, S. ve Kabal, P., (2004). An information theoretic approach to source enumeration in array signal processing, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **52**, 5, 1171-1178.

Wax, M. ve Sheinvald, J., (1994). Direction finding of coherent signals via spatial smoothing for uniform circular arrays, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **42**, 5, 613-620.

Wax, M. ve Kailath, T., (1985). Detection of signals by information theoretic criteria, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **33**, 387-392.

Wax, M. ve Ziskind, I., (1989). Detection of the number of coherent signals by MDL principle, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **37**, 1190-1196.

Yong, G., Ci, X.X. ve Zhong, Z.Z., (2001). Erasing false-location of two stations direction-finding cross location in multi-path and multiple sources environments, *CIE International Conference on Proceedings*, 864-868.

Zhou, Y., (2005). Emitter number detection based on clustering and the application of information theoretic criteria, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **4**, 12, 1021-1024.