Sıkıştırılmış Algılama ile Darbe-Doppler Radar Hedef Tespiti

Compressive Sensing Based Target Detection in Delay-Doppler Radars

Oğuzhan Teke, Orhan Arıkan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: teke,oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Ali Cafer Gürbüz
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: acgurbuz@etu.edu.tr

Özetçe —Sıkıştırılmış Algılama teorisi, Nyquist oranının altında ve rastsal örnekleme yaparak, seyrek bir sinyalin geri çatılabileceğini gösterir. Bu özelliği ile SA yaklaşımı, birçok farklı uygulamaya sahiptir. Bu uygulamaların önemli bir tanesi de doğası gereği seyrek sinyaller ile uğraşan radar sistemleridir. SA yöntemi, radar sinyalleri için uygun olsa da, Neyman-Pearson yaklaşımı altındaki klasikleşmiş radar tespit sistemleri, SA ile geri çatılan sinyallerde, özellikle ızgara-dışılık durumunda, yüksek yanlış alarm oranlarına sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada, radar hedef tespitinde SA tekniklerinin kullanımını mümkün kılan yeni bir tespit yapısı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler—Radar Sinyal İşleme, Sıkıştırılmış Algılama.

Özet—Compressive Sensing theory shows that, a sparse signal can be reconstructed from its sub-Nyquist rate random samples. With this property, CS approach has many applications. Radar systems, which deal with sparse signal due to its nature, is one of the important application of CS theory. Even if CS approach is suitable for radar systems, classical detections schemes under Neyman-Pearson formulations may result high probability of false alarm, when CS approach is used, especially if the target has off-grid parameters. In this study, a new detection scheme which enables CS techniques to be used in radar systems is investigated.

Keywords—Radar Signal Processing, Compressive Sensing.

I. GİRİŞ

Sıkıştırılmış Algılama(SA) üzerinde yoğun olarak çalışılmakta olan bir araştırma alanıdır [1], [2]. Geliştirilen SA teknikleri çeşitli uygulama alanlarında potansiyel olarak kullanılabilirler [1]-[7]. Bu uygulama alanlarından birisi de radar hedef tespitidir [8]. Ancak son derece oturmuş olan radar hedef tespit teknikleri ile SA tekniklerinin kıyaslanması ortak bir başarımların belirlenmesini gerektirmektedir. Bu çalışmadaki amacımız, Radar hedef tespitinde SA tekniklerinin kullanılabilirliği ortak bir yapı önermek ve bu yapının başarımlarını ölçebilecek kriterleri belirlemektir.

II. DARBE-DOPPLER RADAR HEDEF TESPİTİ VE SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA YAKLAŞIMI

Darbe-Doppler sistemlerinde radar eş fazlı toplam N_p adet darbe gönderir:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N_p} p(t - (i-1)T_{PRI}) e^{j2\pi f_c t}, \quad (1)$$

burada $s(t)$, eş fazlı darbe katarı, $p(t)$ gönderilen darbe, T_{PRI} darbeler arası süre, f_c ise taşıyıcı frekansdır.

K tane hedeften kaynaklanan dönüş sinyali, taban bantta şu şekilde yazılabilir,

$$y(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k s(t - \tau_k) e^{-j2\pi \nu_k t} + n(t), \quad (2)$$

burada τ_k , k . hedefin mesafesinden dolayı dönüş sinyalindeki gecikme, ν_k ise k . hedefin hızından dolayı dönüş sinyalindeki Doppler frekans kaymasıdır; α_k hedefin yansıma katsayısıdır; $n(t)$ ise ölçümden kaynaklanan gürültüdür. Mesafesi R_k ve açılal hızı v_k olan bir hedef için:

$$\tau_k = \frac{2R_k}{c}, \quad \nu_k = \frac{2f_c}{c} v_k, \quad (3)$$

şeklinde gecikme ve Doppler parametreleri bulunabilir.

Klasik darbe-Doppler hedef tespiti, ardışık olarak alınan yansıma sinyallerinin uyumlu süzgeçten her bir gönderilen darbe için geçirilmesi ve sonrasında aynı menzile karşılık gelen farklı darbelerin uyumlu süzgeç çıktıların FFT kullanılarak Doppler bölgesine dönüştürülmesine dayanır. Bu şekilde elde edilen mesafe-Doppler verisi eşiklenerek hedef tespiti yapılır. Eşik değeri gürültü kaynaklı yanlış hedef tespit kıstaslarına uyum sağlayacak şekilde belirlenir.

SA yaklaşımında, Denklem 2’de verilen dönüş sinyalinin Nyquist sınırının altında kalan rastlantısal yapıdaki örnekleri

kullanılarak hedef tespiti amaçlanır. Bu amaçla önce gecikme-Doppler alanı ayrıklaştırılır. $[\tau_0, \tau_f] \times [\nu_0, \nu_f]$ çarpım alanındaki sürekli parametrelerden N nokta seçilerek, ayırık parametre alanı oluşturur, $\mathbf{B} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$. Buradaki her θ_j farklı bir (τ_j, ν_j) ikilisine karşılık gelir. Seçilen noktalarda bulunan bir hedeften gelen yansıma sinyali, kullanılacak SA sözlüğündeki vektörleri oluşturur:

$$\mathbf{a}_i = s(t - \tau_i) e^{-j2\pi\nu_i t} \quad 1 \leq i \leq N, \quad (4)$$

burada $t \in \mathbb{R}^M$ rastsal yapıdaki örnekleme anlarıdır. Bu yapı ile SA sözlüğü, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N] \in \mathbb{R}^{M \times N}$ olacak şekilde oluşturulur. Buradaki önemli nokta, örnekleme anlarının eş aralıklı olmamasıdır. Ayrıca örnek sayısı, M , Nyquist sınırının altındadır.

Eğer hedef pozisyonları ayrıklaştırılmış parametre alanındaki noktalara tam karşılık olarak geliyor ise, geri dönüş sinyali:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (5)$$

olarak ifade edilebilir. Ortamda K tane hedef var ise, $\mathbf{x}$ sinyali K -seyrek bir yapıdadır. Denklem 5'de verilen modele göre örneklenen gözlem sinyalinden, seyrek yapıdaki $\mathbf{x}$ sinyalini çözmek SA'nın hedef aldığı problemidir. Bu problemin çözümü için aşağıdaki enküçükleme problemi yazılır:

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_0 \quad s.t. \quad \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|_2 < \varepsilon. \quad (6)$$

Denklem 6'in çözümü, SA yaklaşımı altında gözlemlenen sinyaldeki, seyrek hedef noktalarını verir. Ne yazık ki Denklem 6 doğası gereği, tüm olası seyrek sinyaller üzerinden bir arama yapmayı gerekli kılar, bu da üstel bir karmaşıklığa karşılık gelir. Dolayısı ile Denklem 6'nın direk çözümü yerine, benzer çözümleri veren alternatif yöntemler denir. [3]-[6]'de önerilen yöntemler, ℓ_0 eniyilemesine çözmeye çalışan düşük karmaşıklığa sahip fırsatçı tekniklerdir. Diğer yöntemler ise, ℓ_0 normu yerine ℓ_1 normu üzerinden eniyileme yapmaya çalışır [1], [2]. Güncel olarak [9]'de önerilen teknik ise, fırsatçı OMP tekniğine benzer olup, adımlar sırasında sözlükteki parametreleri kontrollü olarak ayarlayarak daha başarılı çözümler bulmaya çalışır.

Şekil 1. (a) Parametre ızgarasında olan 5-seyrek radar sahnesi, (b) Bu sahnedeki gelen sinyalin OMP ile çözümü

Eğer hedefin parametreleri, SA sözlüğü oluşturulurken seçilen ayırık parametre noktalarına, $\mathbf{B} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$, karşılık geliyor ise, yukarıda bahsedilen yöntemlerin hepsi,

$K \ll N$ olduğu durumda başarılı bir şekilde seyrek $\mathbf{x}$ sinyalini çözebilir. Şekil 1'de, ızgara noktalarına tam oturan parametrelere sahip bir hedef sahnesini, ve bu sahnedeki elde edilen dönüş sinyalinin SA yapısı altında geriçatımını göstermektedir. Dönüş sinyali, rastsal ve Nyquist sınırının altında örneklenmesine rağmen, seyrek sahne başarılı bir şekilde geri çatılabilmiştir.

SA teorisindeki dezavantaj, hedefin parametreleri, (τ'_i, ν'_i) , N nokta ile ayrıklaştırılmış parametre alanındaki ızgara noktalarına denk gelmediğinde kendini belli eder. Böyle bir ızgara dışılık durumunda, Denklem 5'deki gibi bir model yazılamaz. Çünkü tabandaki, $\mathbf{A}$, hiç bir parametre noktası, gözlem sinyalinin yapısına uymaz. Hala ortamda çok az hedef olduğunu bilsek bile, gerçek parametreler ızgara dışında kaldığı için gözlem sinyali, $\mathbf{A}$ tabanında seyrekliğini yitirir. Şekil 2, Şekil 1'de verilen sahnedeki parametre noktalarının, ızgara aralıklarının geçmeyecek şekilde kaydırıldığı bir durumdaki geri çatım sonucunu vermektedir. Böyle bir durumda, ızgara dışılıktan kaynaklanan hata, varsayılan gürültü seviyesinin, ε , altına inemez ve bir çok yanlış hedef oluşturur.

Şekil 2. (a) Şekil 1'deki sahnenin parametrelerinin kaydırıldığı durumda OMP çözümü, (b) Aynı ızgara-dışı sahnenin PPOMP ile çözümü.

III. ÖNERİLEN SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI RADAR TESPİT TEKNİĞİ

Klasik radar tespiti iki hipotez arasındaki seçime dayanır. Bu hipotezler aşağıda ifade edildiği gibi, alınan sinyallerin sadece gürültü olduğu veya hedef kaynaklı bir sinyal de içerdiği hipotezleridir:

$$\begin{aligned} H_0 &: \mathbf{n}, \\ H_1 &: \mathbf{h} + \mathbf{n}. \end{aligned} \quad (7)$$

Hipotezlerin seçiminde karşılaşılan hatalar "yanlış alarm" olarak adlandırılan hedef olmadığı durumda hedef var, H_1 , seçimini yapmak ve "hedef kaçırma" olarak adlandırılan hedef olduğu durumda hedef yok, H_0 seçimini yapmaktır. radarın tipik çalışma ortamında nadiren hedef ile karşılaşıldığı için "yanlış alarm" üretimi çok daha sık olmakta ve belirli bir orandan fazla olmamasına dikkat edilmektedir. Bu yaklaşım Neyman-Pearson(N-P) kriteri olarak bilinen hedef tespit tekniğinin kullanılmasıyla en iyi şekilde uygulanmaktadır. Bu yaklaşımda elde edilen tespit sinyalleri eşiklenir ve eşik aşıldığı menzil ve Doppler hücrelerinde hedef olduğu kararına varılır.

Bu yaklaşımın SA tekniklerinin kullanıldığı duruma doğru- dan uygulanması ciddi güçlükler neden olmaktadır. Özellikle Şekil 2'de gösterilen durumda, hedeflerin yer aldığı hücrelerin oldukça uzağında önemli sayıda hücrede aşılmaktadır. Bu

Şekil 3. Gürültü kaynaklı eşik belirlenmesinin blok diagramı.

durum N-P yaklaşımının önemli sayıda sanal hedef tespitine neden olmaktadır. Bu durumu aşmak amacıyla, burada SA tekniklerinin kullanımına imkan veren yeni bir hedef tespit yapısı önerilmektedir.

Bu yapı iki aşamalı hedef tespitine dayalıdır. İlk aşama N-P benzeri bir eşik kullanarak, bir menzil-Doppler bölgesinin tümünün sadece gürültü kaynaklı olup olmadığının tespitidir. Eğer bölgenin tümü eşik altında kalır ise ikinci aşamaya geçilmez. Bölgede eşik aşıldığı durumda hedeflerin yerini gürbüz bir şekilde bulmak amacıyla ikinci aşamaya geçilir. BU aşamada SA geriçatımı ile elde edilen hedef bölgesindeki en güçlü sinyallere dayalı bir eşik seviyesi belirlenir ve bu eşik geçildiği hücrelerde hedef tespit edildiği kararına varılır.

Gürültü seviyesi ve gürültünün olasılık dağılım fonksiyonu bilindiği takdirde, istenilen yanlış alarm seviyesini sağlayan gürültü eşiklerini klasik yaklaşımda analitik olarak bulmak mümkündür. Ancak SA tekniklerinin hepsi, doğrusallıktan oldukça uzak ve takip etmesi matematiksel olarak oldukça zor olan yinelemelere sahip çözüm yöntemleri içermektedir. Dolayısıyla, istenilen yanlış alarm olasılığını veren gürültü eşik analitik olarak bulunamaz. Fakat Monte Carlo simülasyonları ile, deneysel olarak bu eşikleri elde etmek mümkündür.

IV. MONTE CARLO BENZETİMLERİ

Bu kısımda, SA yaklaşımında kullanılan klasik ℓ_1 en-küçüklemesi çözümü, fırsatçı geriçatım tekniği olan OMP yöntemi, doğrudan korelasyon yöntemleriyle birlikte [9]'de önerilen PPOMP yöntemlerinin yanlış-doğru sezim oranları Monte Carlo yöntemi ile oluşturulmuştur.

İlk aşamada, gürültü kaynaklı yanlış sezimleri engellemek için gerekli olan eşikler araştırılmıştır. Bunun için seyrek çözümlere varyansı, σ_n^2 , 0.01 olan gürültü, gözlem sinyali olarak verilmiştir. Çözümlere farklı eşikler uygulayarak, sadece gürültü kaynaklı yanlış sezim oranları incelenmiştir. Bu yöntemin blok diagramı Şekil 3'de gösterilmiştir. Belirlenen sabit gürültü oranında 2000 bağımsız ve özdeş Monte Carlo benzetimi yapılmış ve γ_N eşikine göre elde edilen gürültü kaynaklı P_{FA} değerleri Şekil 4'de verilmiştir.

Şekil 4'e göre, gürültü kaynaklı yanlış sezim oranı 10^{-5} olarak istenildiği takdirde, PPOMP için 0.4139, OMP için 0.3813, L1 için 0.1703 ve CR için 0.3424 olan eşikler kullanılmalıdır.

Sadece gürültünün olduğu durumda yanlış sezim oranını istenilen seviyeye indiren eşik belirlendikten sonra, ikinci analiz, bu eşikler altında sistemin ne kadar doğru sezim yapabildiğidir. Şekil 5'de belirlenen bir gürültü eşikine göre, 5-seyrek hedefin ortalama doğru sezim oranları verilmiştir. Burada her yöntem için aynı P_{FA} değerlerini veren eşik değerleri kullanılarak, gürültü kaynaklı yanlış sezim oranını sabit tutulmuştur.

Şekil 4. Sadece gürültü altında, farklı geriçatım yöntemlerinin P_{FA} ve sezim seviyesi ilişkisi.

Şekil 5. γ_N eşiklemesi sonucundaki gürültü kaynaklı yanlış sezime karşı doğru sezim oranları.

Şekil 5'e göre, doğrudan korelasyonlar üzerinden sezim yapmak, seyrek çözümlerden daha yüksek bir sezim oranı sağlamıştır. Bu aslında doğal bir sonuçtur, çünkü sadece korelasyon kullanmak, seyrek olmayan, aksine yoğun olan çözümler üretir. Bu tür yoğun bir çözümde ise, yüksek sezim oranları bulmak normaldir. Fakat buradaki önemli nokta, ızgara dışılıktan dolayı oluşan yanlış sezim miktarlarıdır. Yüksek sinyal-gürültü oranından dolayı, gürültü eşikini geçen fakat aslında hedef olmayan noktaların sayısı, yöntemleri değerlendirmedeki önemli bir unsurdur.

Şekil 6. Izgara dışılık kaynaklı eşik belirlenmesinin blok diagramı.

Bir sonraki sonuç ise, ızgara dışılık kaynaklı sezim hataları üzerinedir. Buradaki analizde, gürültü kaynaklı yanlış sezim oranı sabit olacak şekilde, her bir yöntem için farklı bir gürültü eşiği belirlenir. Bu gürültü eşikleri Şekil 4'de verilen Monte Carlo benzetim sonuçlarından bulunabilir. Bu örnek için, gürültü kaynaklı yanlış sezim oranı, $P_{FA,I}$, 10^{-5} olarak belirlenmiş, ve her bir yöntemle karşılık gelen gürültü eşiği, γ_N , yukarıda belirtildiği gibi bulunmuştur. 500 bağımsız Monte Carlo benzetiminde, parametreleri ve büyüklükleri rastgele seçilen ve 5-seyrek çözümü olan sinyallere, $\sigma_n^2 = 0.01$ olan gürültü eklenmiş, çözümlerin gürültü eşiğini, γ_N , geçen noktaları için, ikinci bir eşikleme, γ_I , sonucunda oluşan yanlış sezim sayısına karşın doğru sezim oranları Şekil 7'de verilmiştir. Bu analizin blok diagramı ise Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 7. γ_I eşiklemesi sonucundaki ızgara-dışılık kaynaklı yanlış sezime karşın doğru sezim oranları.

Şekil 7'de göze çarpan ilk sonuç, ℓ_1 enküçükleme yönteminin düşük doğru sezim oranlarında daha başarılı çalıştığıdır. Bu başarıyı sırayla OMP ve direkt korelasyon metodları izler. Fakat yüksek doğru sezim yüzdeleri istenildiğinde, bu 3 yöntem de geometrik olarak artan yanlış sezim sayılarına sahiptir. PPOMP ise daha farklı bir yapı izler, çok düşük doğru sezim oranlarında, direkt korelasyon yöntemine yakın sonuçlar vermesine karşın, yüksek doğru sezim yüzdelere geçişte, daha gürbüz bir yapı izleyerek yanlış sezim sayısını çok değiştirmez. Örneğin 0.88'lik bir doğru sezim oranı için, PPOMP $10^{-2.86}$ mertebesinde yanlış sezim oranına sahipken, OMP yaklaşık olarak $10^{-1.36}$, ℓ_1 eniyilemesi 10^{-2} , doğrudan korelasyon yöntemi ise $10^{-0.35}$ mertebesinde yanlış sezim oranına sahiptir.

Buradaki diğer sonuç ise, yanlış-doğru sezim performansına karşılık gelen karmaşıklığıdır. Düşük doğru sezim oranlarında, ℓ_1 en uygun yöntemdir. Fakat bu yöntemin ihtiyaç duyduğu dışbükey eniyileme çözümlerini, gerçek zamanlı çalışan radar sistemlerinde uygulamak oldukça zordur. OMP ise adımlarında iç çarpımlar hesaplayarak devam eden fırsatçı bir tekniktir. OMP'nin en önemli özelliği düşük hesaplama karmaşıklığıdır. Bu sayede, gerçek zamanlı çalışan sistemlerde kolayca uygulanabilir. Direkt korelasyon ise, OMP yönteminin aslında ilk adımıdır. Sadece tek bir iç çarpıma ihtiyaç duymasına karşın, yüksek doğru sezim oranları istenildiğinde, çok yüksek yanlış sezim oranlarına sebebiyet verir. PPOMP

yöntemi, OMP yöntemine göre daha yüksek bir karmaşıklığa sahiptir. Fakat döngülerine, sadece iç çarpımlar olarak devam eder. Dolayısıyla, ℓ_1 ile OMP arası bir karmaşıklığa sahiptir. Ama en önemli özelliği, diğer 3 yöntemden çok daha gürbüz bir performansa sahip olmasıdır. Düşük doğru sezim oranlarında, OMP'den daha karmaşık bir yöntem olmasına karşın OMP ile benzer performanslar sunarken, yüksek sezim oranlarında, kendisinden daha karmaşık olan ℓ_1 'e göre yaklaşık 7 kat daha iyi doğru sezim oranı sunmuştur.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, SA yaklaşımı altındaki Darbe-Doppler radar sistemlerinin sezimlemeleri üzerine bir inceleme sunulmuştur. Klasik yaklaşımda, tek bir gürültü eşiği belirlenmekte ve bu eşiği geçen sonuçlar, sezim olarak kabul edilmektedir. Bu tip bir yöntem, SA yaklaşımıyla çalışan sistemlerde, ızgara-dışı problemi nedeniyle yüksek yanlış sezim oranları üretmektedir. Bu çalışmada, enterferans problemini engellemek üzere, ikinci bir eşikleme denlenmiştir. İkinci eşikleme sonucunda elde edilen doğru-yanlış sezim eğrilerine göre, SA'nın temel yöntemi ℓ_1 iyilemesi, fırsatçı OMP tekniğine göre daha başarılı bir performans yakalamıştır. Ancak ℓ_1 yönteminin karmaşıklığı, gerçek zamanlı radar sistemleri için uygun değildir. [9]'da önerilen PPOMP yöntemi, OMP ile ℓ_1 arası bir karmaşıklığa sahip olmasına karşın, yüksek doğru sezim oranlarında, ℓ_1 'den daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Fakat, düşük sezim oranlarında OMP ile benzer veya daha kötü sonuçlar sunmuştur. Bu çalışma, ikinci bir eşikleme kullanılarak ve uygun geriçatım yöntemini seçerek, Darbe-Doppler radar sistemlerinde SA yaklaşımının kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, 2006.
- [2] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 52, pp. 489–509, 2006.
- [3] S. Mallat and Z. Zhang, "Matching pursuits with time-frequency dictionaries," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, 1993.
- [4] J. Tropp and A. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655–4666, Dec. 2007.
- [5] D. Needell and J. A. Tropp, "Cosamp: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Appl. Comp. Harmonic Anal.*, arXiv math.NA 0803.2392, 2008.
- [6] T. Blumensath and M. E. Davies, "Iterative hard thresholding for compressed sensing," *preprint*, 2008.
- [7] A. C. Gurbuz, V. Cevher, and J. H. McClellan, "A compressive beamformer," in *ICASSP 2008*, Las Vegas, Nevada, March 30–April 4 2008.
- [8] J. H. Ender, "On compressive sensing applied to radar," *Signal Processing*, vol. 90, no. 5, pp. 1402–1414, 2010.
- [9] O. Teke, A.C. Gurbuz O. Arikan, "Perturbed Parameter Orthogonal Matching Pursuit," unpublished