Pasif Bistatik Radarlarda Seyreklik Temelli Ters Evrişim Kullanılarak Hedef Tespiti

TARGET DETECTION USING SPARSITY BASED DECONVOLUTION IN PASSIVE BISTATIC RADARS

Musa Tunç Arslan, Mohammad Tofighi, A. Enis Çetin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
Ankara, Türkiye
{mtarslan,tofighi}@ee.bilkent.edu.tr, {cetin}@bilkent.edu.tr

Özetçe —Bu bildiride pasif radar (PR) sistemlerinin menzil çözünürlüğünü artırmak için seyreklilik tabanlı bir ters evrişim yöntemi sunulmaktadır. PR sistemlerinin iki boyutlu uyumlu süzgeç çıktısı bir ters evrişim problemleri gibi düşünülerek incelenmektedir. Ters evrişim algoritması, hedeflerin zaman kaymaları ve l_1 norm benzeri dışbükey maliyet fonksiyonlarının epigraf kümelerini temsil eden hiperdüzlemler üzerine izdüşümü temellidir. Bütün kısıt kümeleri kapalı ve dışbükey olduklarından dolayı yinelemeli algoritma yakınsamaktadır. FM tabanlı PR sistemleri üzerinde benzetim sonuçları sunulmuştur. Algoritma frekans uzayı tabanlı ters evrişim yöntemlerine göre daha yüksek performansa sahiptir.

Anahtar Kelimeler—radar, pasif radar, menzil çözünürlüğü, ters evrişim.

Abstract—We introduce a sparsity based deconvolution scheme to improve the range resolution of passive bistatic radar (PBR) systems. The two-dimensional matched filter output of a PBR system is further analyzed as a deconvolution problem. The deconvolution algorithm is based on making projections onto hyperplanes representing the time delay of a target and the epigraph set of a convex cost function such as the l_1 norm. The iterative algorithm is globally convergent because all constraint sets are closed and convex. Simulation results in a FM based PBR system are presented. The proposed method performs better than frequency domain deconvolution methods.¹

Keywords—radar, passive radar, range resolution, deconvolution.

I. GİRİŞ

PR sistemleri hedef tespiti için ortamda hali hazırda bulunan, FM, DVB-T ya da DAB gibi ticari yayınları kullanır. Daha iyi radar performansı için sinyal yapısının değiştirilmesi gerekmektedir fakat PR sistemlerinin kullandığı ticari yayınların sinyal yapısı değiştirilemez. PR sistemlerinin temel sorunlarından biri menzil çözünürlüğüdür. Örnek olarak, FM yayını

tabanlı PR sistemlerinin iki yönlü menzil çözünürlüğü, 200 kHz'lik FM yayını bantgenişliğinden dolayı, 1,5 km'dir. Menzil çözünürlüğü ters evrişim yöntemleri kullanılarak geliştirilebilmektedir. Bir PR sisteminde gözlemlenen sinyal s_{surv} aşağıdaki gibidir:

$$s_{surv}(t) = \sum_{p=1}^P a_p s(t - \tau_p) e^{j2\pi f_p t} + \nu(t) \quad (1)$$

denklemden a_p sinyaldeki zayıflama, $s(t)$ ticari yayın anteninden yayını yapılan sinyal, τ_p p 'inci hedeften yankılanan sinyale etki eden zaman kayması, f_p p 'inci hedefin hızından kaynaklı Doppler kayması ve $\nu(t)$ gürültüdür. Varış zamanını tahmin etmek için kullanılan klasik yöntem uyumlu süzgeçtir. Uyumlu süzgeçte yayını yapılan sinyal ve gözlemlenen sinyal ilintiye uğramaktadır. PR sistemlerinde yayın sinyali direk olarak radarda bulunmamaktadır bu sebepten dolayı ayrı bir almanç yayın sinyali $s_{ref}(t)$ gözlemlenmekte ve bu şekilde elde edilmektedir. Bir PR sisteminin örneklenmiş sinyaller için uyumlu süzgeç çıktısı $\xi[l, k]$ aşağıdaki gibidir:

$$\xi[l, k] = \sum_{n=0}^{N-1} s_{surv}[n] s_{ref}^*[n - l] e^{j2\pi kn/N} \quad (2)$$

denklemden $s_{surv}[n]$ gözlemlenen sinyalin örneklenmiş hali, $s_{ref}[n]$ referans sinyalinin örneklenmiş hali, l örneklenmiş zaman kaymalarını temsil eden zaman kayması hücresi, k örneklenmiş Doppler kaymalarını temsil eden Doppler hücresidir. Örnek olarak, beş hedefli bir ortam senaryosu için uyumlu süzgeç çıktısı şekil 1'de verilmiştir. Hedefler birbirlerine yakın olduklarından dolayı uyumlu süzgeç hedefleri çözmemektedir. Bu bildiride, yakın hedefleri çözebilmek için, seyreklilik tabanlı ters evrişim şeması sunulmaktadır.

¹Bu çalışma, kısmi olarak TÜBİTAK tarafından, 113A010 projesi kapsamında desteklenmiştir.

Şekil 1: $\xi[l, k]$, iki boyutlu uyumlu süzgeç çıktısı.

II. PROBLEMİN TANIMI

Her Doppler indisi k için uyumlu süzgeç çıktısını aşağıdaki gibi yazmak mümkündür:

$$\xi_k[l] = \sum_{p=1}^P a_p r(l - l_p) + \nu[l] \quad (3)$$

denklemden a_p sinyaldeki zayıflama, $r(n)$ s_{ref} ve s_{surv} 'ün ilintisi ve ν 'de toplamsal gürültü ve referans sinyalinin evrişimidir [16]. Uyumlu süzgecin çıktısı iki boyutlu olmasına rağmen, her satır tek tek işlenecektir. İlk değişken k altsimgen yapılı ve denklem (3) aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$\xi_k[l] = (h * r)[l] + \nu[l] \quad (4)$$

denklemden $h[l] = \sum_{p=1}^P a_p \delta[l - l_p]$ hedeflerin zaman kaymaları, l_p 'yi temsil eden doğrusal zamanda değişmez bir sistemdir.

Olğan PR sistemlerinde, $\xi_k[l]$ denklem (2) kullanılarak hesap edilir. Fakat bu işlem aynı zamanda denklem (4)'de denktir ve denklem (4) bir ters evrişim problemidir. Özilinti fonksiyonu r , s_{ref} 'in özilintisidir ve sistemde bulunmaktadır. Bu nedenle, h sistemi (ya da eşdeğer bir ifade ile hedeflerin zaman kaymaları), ters evrişim kullanılarak tahmin edilebilir.

III. DIŞBÜKEY MALİYET FONKSİYONUNA SAHİP EPİGRAF KÜMESİNE İZDÜŞÜM İLE TERS EVRİŞİM

Ters evrişim problemi, dışbükey küme üzerine izdüşüm (POCS) yöntemi ile çözülmektedir [1], [3]–[5], [5]–[9], [11], [15], [17], [19], [20]. Uyumlu süzgecin her satırını dikkate alan aşağıdaki kümeler tanımlanmıştır:

$$C_{k,l} = \{h_{k,l} \in \mathbb{R}^N | \xi_k[l] = (h * r)[l]\} \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (5)$$

Her küme $C_{k,l}$, uyumlu süzgeç çıktısı $\xi_k[l]$ 'yi oluşturan h sistemini temsil eder. $C_{k,l}$ kümeleri birer hiperdüzleme denk gelmektedir. Bundan dolayı, $C_{k,l}$ kümeleri kapalı ve dışbükeydir. Buna ek olarak, dışbükey maliyet fonksiyonunun epigraf kümesi, ters evrişim problemini düzenlemek için kullanılır:

$$C_f = \{h = [h^T \ z]^T \in \mathbb{R}^{N+1} : f(h) \leq z\}, \quad (6)$$

denklemden $f(h)$ dışbükey bir maliyet fonksiyonudur. Koyu renk ile yazılmış harfler $\mathbb{R}^{N+1}$ 'e ait vektörlerdir. h vektörü, $h \in \mathbb{R}^N$ 'nin sonunda başka bir terimi ekleyerek oluşturulur. Ters evrişim problemlerinde, dışbükey maliyet fonksiyonu f , ℓ_1 -norm ya da tümel değişim (TD) olabilir. Bu bildiride, maliyet fonksiyonu olarak ℓ_1 -norm kullanılmıştır. ℓ_1 -norm kullanılarak oluşturulmuş C_f kümesi kullanarak çözümün seyrek olduğunu varsaymaktayız. Gerçekte, çözüm h izole darbelardan oluşmaktadır. Başka bir ifade ile, $\xi[k, l]$ içerisinde küçük bir kısım bölgede bulunmaktadır. C_f , ℓ_1 -normu z 'ye eşit ya da küçük bütün h sistemlerin kümesidir. C_f aynı zamanda kapalı ve dışbükeydir.

Bir çözüm olan h^* , $C_{k,l}$ ve C_f kümelerinin kesişimindedir ve kesişimin boş küme olmadığı bir durumda, birbirini takiben başarılı dik izdüşümler ile bulunabilir. Yinelemeler, $\|h_n - h_{n+1}\|$ önceden belirlenmiş bir eşik değerinin altına indiğinde durdurulur. Şekil 5'de, bu ters evrişim problemi için tipik bir yakınsama grafiği görülmektedir.

$C_{k,l}$ üzerine izdüşüm aşağıdaki gibi hesaplanır [18]:

$$h_{n+1} = h_n + \frac{\xi_k[l] - (h_n * r)[l]}{\|r\|^2} r^T, \quad (7)$$

denklemden h_n , n 'inci yineleme ve h_{n+1} $C_{k,l}$ hiperdüzlemi üzerine izdüşümdür. C_f üzerine izdüşüm aşağıdaki problemi çözerek elde edilir:

$$h_{pi} = \arg \min_{h \in C_f} \|h - h_i\|^2, \quad (8)$$

denklemden $h = [h^T \ 0]$, $\mathbb{R}^{N+1}$ 'e aittir. C_f kümesine izdüşüm, [2]'de detaylı olarak tanımlanmıştır. Özünde ℓ_1 topu üzerine izdüşümdür.

IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde FM tabanlı bir PR sistemi için benzetim sonuçları sunulmaktadır. FM sinyalleri [12]'ye göre üretilmişlerdir. Basitlik açısından ticari yayın almaçı ve radar almaçlarının kartezyen düzleminde aynı noktada oldukları varsayılmıştır.

[16]'de, $\xi_k[l]$ 'nin Fourier dönüşümü, r 'nin Fourier dönüşümüne bölünmekte ve $H(\omega)$ tahmin edilmektedir. Doğal olarak yüksek frekanslarda bölüm işleminin sonucu güvenilir değildir. Bu sebepten dolayı sadece düşük frekanslarda bölüm işlemi yapılmaktadır. Bu ters evrişim işlemi öncesi önceden tasarlanmamış düşük geçirgenli süzgeç kesim frekansı tahminine ihtiyaç duymaktadır.

Gerçekçi bir durumda, [13]'de de belirtildiği gibi FM tabanlı PR sistemleri, birbirleri arasında 8 km ya da daha fazla mesafe olan hedefleri ayırabilmektedir. Bu yayınlanan sinyalin özilintisinin ana lobunun genişliğinden kaynaklanmaktadır. Benzetim çalışmaları amacıyla Tablo I'de verilen sistem senaryosu kullanılmıştır.

Şekil 2'de, yöntemimiz bütün hedefleri ayırabilmektedir. $hedef_1$ ve $hedef_2$ birbirlerine çok yakındırlar ve bu sebepten dolayı şekiller 3 ve 2 içerisinde 50 Hz sırasına denk gelen sonucun ayrıca grafiği görülmektedir. [16]'de açıklanmış frekans düzleminde uygulanan ters evrişim yöntemi ve uyumlu süzgeç 1 ve 2 numaralı hedefleri ayırmayı başaramamışlardır. Bununla birlikte frekans düzleminde uygulanan ters evrişim

Tablo I: 5 hedef içeren sistem senaryosu.

	x-ekseni (Km)	y-ekseni (Km)	Doppler (Hz)	SNR (dB)
Verici	0	0	-	-
Alıcı	0	0	-	-
$hedef_1$	20	20	50	0
$hedef_2$	24	24	50	0
$hedef_3$	-60	-60	-102	0
$hedef_4$	-68	-68	-102	-3
$hedef_5$	-76	-76	-102	-5

yöntemi 3,4 ve 5 numaralı hedefleri birbirlerinden ayıramıştır. Uyumlu süzgeç çıktısı şekil 1’de görülebilmektedir.

Uyumlu süzgeç hiç bir hedefi ayrı hedefler olarak ayıramamaktadır. Bu şekil 1’de açıkça görülmektedir. Fakat, frekans düzleminde ters evrişim uygulandığında 3,4 ve 5 numaralı hedefler ayrı hedef olarak ayrılabilir. Bununla birlikte 1 ve 2 numaralı hedefler daha da yakın olduklarından frekans düzleminde ters evrişim bu hedefleri ayıramamaktadır. Bizim yöntemimiz, hedeflerin ayrıştırılmasını daha da kolaylaştırmakta, 1 ve 2 numaralı hedefleri ayrı hedefler olarak ayırmaktadır.

Şekil 2: Seyreklik tabanlı ters evrişimin sonuçları. Bütün hedefler ayrı hedefler olarak ayrıştırılabilmektedir.

Şekil 4’da, üçüncü bir deney özetlenmektedir. Bu deneyde iki hedef birbirlerinden 9 km mesafeye yerleştirilmiş ve zamanla birbirlerine yaklaştırılmıştır. 9 km’de bütün yöntemler hedefleri ayrıştırabilir. İki hedef arasındaki minimum nokta, hedeflerin zirve noktalarının sırasıyla uyumlu süzgeç, frekans düzleminde ters evrişim ve seyreklik tabanlı ters evrişim için -7 dB, -15,77 dB ve -8,5 dB’dir. 6 km’de uyumlu süzgeç hedefleri ayrıştırıramamakta, frekans ve seyreklik tabanlı ters evrişim yöntemleri ise hedefleri ayrıştırabilir. 4,5 km’de ise sadece seyreklik tabanlı ters evrişim yöntemi hedefleri ayırabilmektedir.

V. SONUÇ

Bu bildiride, PR sistemleri için l_1 tabanlı ters evrişim yöntemi sunmaktayız. Ters evrişim yöntemi POCS çerçevesinde çözmekteyiz. Sunulmuş olan yöntem, PR sistemlerinde hedef tespiti performansını artırmaktadır. Deneysel olarak, seyreklik

Şekil 3: Frekans düzleminde ters evrişimin sonuçları. 50 Hz’deki iki yakın hedef ayrıştırılamamaktadır.

tabanlı ters evrişim yönteminin, frekans düzleminde gerçekleştirilen ters evrişim yöntemine göre daha yüksek performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Şekil 4: Uygulanan yöntemlerin hedef tespit etme performansları (o), frekans uzayında ters evrişim (.), seyreklik tabanlı ters evrişim (*).

Şekil 5: $\|h_n - h_{n+1}\|^2$ versus the iteration number of the PESC algorithm.

KAYNAKÇA

- [1] A. E. Cetin, ve A. Bozkurt, ve O. Gunay, ve Y. H. Habiboglu, ve K. Kose, ve I. Onaran, ve R. A. Sevimli, ve M. Tofighi. "Projections Onto Convex Sets (POCS) Based Optimization by Lifting", IEEE GlobalSIP, Austin, Texas, USA, 2013.
- [2] A. Enis Cetin, ve Mohammad Tofighi, "Denoising Using Wavelets and Projections onto the ℓ_1 -Ball", <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/denoising>
- [3] L.M. Bregman, "Finding the common point of convex sets by the method of successive projection.(Rusça)", {USSR} Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1965.
- [4] Yair Censor, "Row-action methods for huge and sparse systems and their applications", SIAM review, 1981.
- [5] Yair Censor, ve Gabor T. Herman, "On some optimization techniques in image reconstruction from projections", Applied Numerical Mathematics, 1987.
- [6] Antonin Chambolle, "An Algorithm for Total Variation Minimization and Applications", J. Math. Imaging Vis., 2004.
- [7] G. Chierchia, ve N. Pustelnik, ve J.-C. Pesquet, ve B. Pesquet-Popescu, "An epigraphical convex optimization approach for multicomponent image restoration using non-local structure tensor", IEEE ICASSP, 2013.
- [8] P.L. Combettes, "The foundations of set theoretic estimation", Proceedings of the IEEE, 1993.
- [9] Z. Deprem, ve A. E. Cetin, "Crossterm-free Time-Frequency Distribution Reconstruction via Lifted Projections", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014.
- [10] John Duchi, ve Shai Shalev-Shwartz, ve Yoram Singer, ve Tushar Chandra, "Efficient Projections Onto the L1-ball for Learning in High Dimensions", Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning, 2008.
- [11] K. Kose ve A. E. Cetin, "Low-Pass Filtering of Irregularly Sampled Signals Using a Set Theoretic Framework", IEEE Signal Processing Magazine, 2011.
- [12] A. Lauri, ve F. Colone, ve R. Cardinali, ve C. Bongioanni, ve P. Lombardo, "Analysis and emulation of FM radio signals for passive radar", IEEE Aerospace Conference, 2007.
- [13] Karl Erik Olsen, ve Karl Woodbridge, "Performance of a multiband passive bistatic radar processing scheme-Part II", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2012.
- [14] Mark A. Richards, "Fundamentals of radar signal processing", Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- [15] K. Slavakis, ve S. Theodoridis, ve I. Yamada "Online Kernel-Based Classification Using Adaptive Projection Algorithms", IEEE Transactions on Signal Processing, 2008.
- [16] Akif Sinan Taşdelen, H. Koymen, "Range resolution improvement in passive coherent location radar systems using multiple FM radio channels", IET Forum on Radar and Sonar, 2006.
- [17] K. S Theodoridis ve I. Yamada, "Adaptive Learning in a World of Projections", IEEE Signal Processing Magazine, 2011.
- [18] M. Tofighi, A. Bozkurt, K. Kose, A.E. Cetin, "Deconvolution using projections onto the epigraph set of a convex cost function", Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) 22nd, 2014.
- [19] M. Tofighi, K. Kose, A.E. Cetin, "Denoising Using Projections Onto The Epigraph Set of Convex Cost Functions", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'14), 2014.
- [20] H.J. Trussell, M. Civanlar, "The feasible solution in signal restoration", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1984.
- [21] G. Chierchia, N. Pustelnik, J.-C. Pesquet, B. Pesquet-Popescu, "Epigraphical projection and proximal tools for solving constrained convex optimization problems", Signal, Image and Video Processing 2014.