

Sıkıştırılmış Algılama kullanarak Uzaklık-Doppler Radar Hedef Tespiti

Range-Doppler Radar Target Detection Using Compressive Sensing

R. Akın Sevimli, Mohammad Tofighi, A. Enis Çetin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
Ankara, Türkiye
{sevimli, tofighi}@ee.bilkent.edu.tr, cetin@bilkent.edu.tr

Özetçe —Sıkıştırılmış algılama(SA) fikri, az sayıda ölçümlerden seyrek bir sinyalin geri çatumını mümkün kılar. SA yaklaşımı bir çok farklı alanda uygulamalara sahiptir. Bu alanlardan birisi de radar sistemleridir. Bu makalede, radar belirsizlik fonksiyonu (Ambiguity Function) SA çatısı altında gürültüden arındırılmıştır. Bu amaç için dışbukey fonksiyonun epigraf kümesine izdüşüm tabanlı yeni bir gürültüden arındırma metodu geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, diğer SA geri çatum algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler—Sıkıştırılmış Algılama, Belirsizlik Fonksiyonu, Radar Sinyal İşleme.

Abstract—Compressive sensing (CS) idea enables the reconstruction of a sparse signal from small number of measurements. CS approach has many applications in many areas. One of the areas is radar systems. In this article, the radar ambiguity function is denoised within the CS framework. A new denoising method on the projection onto the epigraph set of the convex function is also developed for this purpose. This approach is compared to the other CS reconstruction algorithms. Experimental results are presented.

Keywords—Compressive Sensing, Ambiguity Function, Radar Signal Processing.

I. GİRİŞ

Sıkıştırılmış Algılama (SA), günümüzde çeşitli sinyal işleme alanlarda kullanılan bir yaklaşımdır [1]–[4]. SA yaklaşımının kullanıldığı alanlardan birisi de radar hedef tespit sistemleridir. Radar hedef tespiti ve SA ile ilgili bazı araştırmalar yapılmıştır [5]. SA yaklaşımı, radar sinyal işlemede doğal olarak seyrek sinyalleri kullanıldığından dolayı uygundur [6]. [7]'de belirtildiği gibi, SA yaklaşımının radar uygulamaları darbe sıkıştırma, radar görüntüleme ve radar geliş açısı kestirimidir. Bu tür uygulamalar aktif radar sistemleri için kullanılmıştır. SA yaklaşımının radar uygulamalarından birisi de pasif radar sistemlerindeki uyumlu süzgeç, başka bir deyişle belirsizlik fonksiyonudur. Birçok durumda belirsizlik fonksiyonunun çıktısı gürültü olarak gelmektedir. Bu makalede, uzaklık-Doppler radar hedef tespiti için belirsizlik fonksiyonunun Sıkıştırılmış Algılama (SA) kullanarak gürültüden arındırılması (denoising) hedeflenmiştir.

Bölüm II'de, Sıkıştırılmış Algılama gözden geçirilmiştir. Bölüm III'de gürültüden arındırma çözümü sunulmuştur. Bölüm IV'de ise deneysel sonuçlar verilmiştir.

II. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA

SA problemi aşağıda kısaca anlatılmıştır. Eğer elimizde uzunluğu N olan bir v sinyali olduğunu varsayarsak, bu sinyal $N \times 1$ boyutlarındaki tabanlardan oluşturabiliriz. $N \times N$ taban matrisini, $\Psi = [\psi_1|\psi_2|\dots|\psi_N]$ kullanarak v sinyali şu şekilde oluşturulabilir [8]:

$$v = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i \quad \text{veya} \quad v = \psi \cdot s. \quad (1)$$

Eğer v sinyali $K \ll N$ koşulunu sağlıyorsa ve K tane örneği sıfırdan farklı geri kalan örnekleri de sıfır olduğu varsayılırsa K -seyrek olarak nitelendirilir. Alt bir uzayda seyrek olduğu bilinen v sinyali M uzunluğundaki bir y ölçüm sinyaline şu şekilde dönüştürülebilir:

$$y = \phi \cdot v. \quad (2)$$

Buradaki $M \times N$ boyutlarındaki ϕ 'ye ölçüm matrisi denilmektedir. Sonuç olarak, y sinyali K -seyrek olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = \Theta \cdot s = \phi \cdot \psi \cdot s. \quad (3)$$

Burada, $\Theta = \phi \cdot \psi$ denklemi $M \times N$ boyutlarındaki bir matristir. $K < M < N$ koşulunu sağlamak kaydıyla v sinyali y vektörü kullanılarak geri çatlabilir. Bu problem aşağıdaki şekilde çözülebilir.

$$\hat{s} = \min \|s\|_1 \quad \text{öyle ki} \quad y = \Theta \cdot s. \quad (4)$$

[8]'de belirtildiği gibi ölçüm işlemi uyarlanabilir değildir ve v sinyaline göre değişmez. Bunun için belli başlı problemler oluşmaktadır. Bunlardan birisi, kararlı bir ölçüm matrisi oluşturma problemidir. Θ matrisini oluşturma konusunda, ϕ ve ψ matrislerin birbirleriyle maksimum evre uyumsuz(incoherent) olması gerekmektedir.

Bir diğer problem sinyalin eniyileme problemi için uygun geri çatum algoritması dizayn edilmesidir. Bu problem için birçok algoritma geliştirilmektedir. l_1 normunu enküçüleme, s vektörünün küçük genlikteki katsayılarını sıfıra eşitlemeye zorladığı ve seyrek bir çözüm verdiği gösterilmiştir. Bu makalede, uzaklık-Doppler radar hedef tespiti için kullanılan belirsizlik fonksiyonuna SA yaklaşımı kullanarak gürültüden arındırma yapılmıştır.

III. BELİRSİZLİK FONKSİYONU VE UZAKLIK-DOPPLER HEDEF TESPİTİ

Belirsizlik fonksiyonu radar ve sonar sinyal işleminde konum ve Doppler düzlemlerinde tanımlanmış iki boyutlu

bir fonksiyondur [9]. Belirsizlik fonksiyonu, genel olarak iki sinyal arasındaki benzerlikleri belirlemede kullanılır [10]. Bu fonksiyonu kullanarak ortam senaryosunda bulunan bir hedefin yığın hızı ve konumu bulunabilir. Belirsizlik fonksiyonu Denklem 5'de ifade edilmiştir:

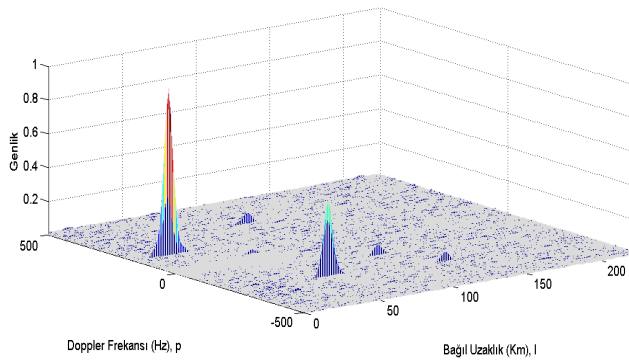
$$\xi[l, p] = \sum_{i=0}^{N-1} s_{surv}[i] s_{sref}^*[i-l] e^{-\frac{j2\pi ip}{N}}. \quad (5)$$

Bu denklemde, $s_{surv}[i]$ tarama sinyalini, $s_{sref}[i-l]$ kaynak sinyalini temsil eder. l uzaklık eksenini, p Doppler eksenidir. Varsayalım ki çarpım $b[i, l] = s_{surv}[i] s_{sref}^*[i-l]$ olsun. Eğer $b[i, l]$ belirsizlik fonksiyonu içerisinde yerleştirilirse Denklem 5 şu şekilde ifade edilebilir:

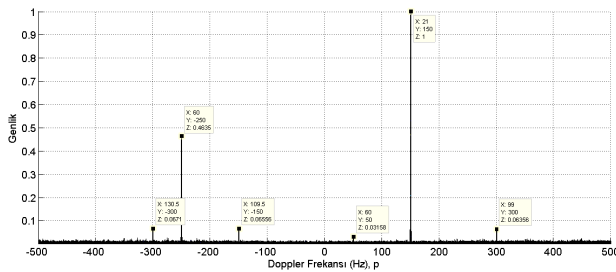
$$\xi[l, p] = \sum_{i=0}^{N-1} b[i, l] e^{-\frac{j2\pi ip}{N}}, \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (6)$$

Belirsizlik fonksiyonu $b[i, l]$ 'nin FFT'si alınarak hesaplanır. Hedefler Şekil 1'de görüldüğü üzere belirsizlik fonksiyonunun tepe noktalarını oluştururlar. Şekil 2 ve 3'de, 6 hedefin Doppler frekansları ve bağlı uzaklıklarına ait grafikler görülmektedir.

Belirsizlik fonksiyonu seyrek bir fonksiyondur. Örneğin, Şekil 1'deki Uzaklık-Doppler haritasında çeşitli hızlarda hareket eden 6 hedef vardır. 6 hedefin olduğu yerlerin dışında kalan uzaklık-Doppler haritası değerlerinin hiç bir önemi yoktur. Bu nedenle sıkıştırılmış algılama yapmak için BF ideal bir yapıya sahiptir.

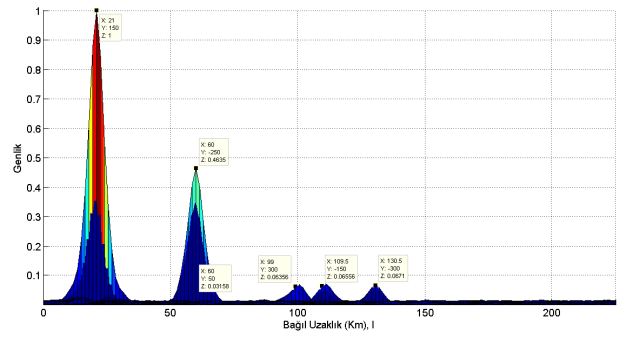


Şekil 1. 3D Uzaklık-Doppler frekans grafiği



Şekil 2. Doppler frekans grafiği

Sıkıştırılmış algılama uygulamasında $M \times N$ boyutundaki ölçüm matrisimiz ϕ olsun. Bu durumda sıkıştırılmış ölçümler-



Şekil 3. Bağlı uzaklık grafiği

imizi şu şekilde ifade edebiliriz:

$$y_l = \phi \cdot \xi_l, \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (7)$$

Burada her l değeri için bir ölçüm seti elde edilmektedir. ξ_l vektörünün boyutu FFT'nin boyutu olan N 'dir ve $\xi(l, p)$ vektörün değerlerini içerir. y_l 'nin boyutu olan M ise N 'den çok küçüktür. Bu makalede, SA problemi y_l vektörlerinden $\xi(l, p)$ 'nin geri çatılmasıdır. Seyreklik varsayımı kullanıldığı için SA sayesinde gürültüden arındırma (denosung) de yapılmış olur.

Bu makalede gürültüden arındırma için Taban Kovalama (Basis Pursuit(BP)) [11], Ortogonal Uyum Kovalama (Orthogonal Matching Pursuit(OMP)) [12], Sıkıştırılmış Örneklemeli Uyum Kovalama (Compressive Sampling Matched Pursuit(COSAMP)) [13], gürültüden arındırma tabanlı Dış Bükey Maliyet Fonksiyonun Epigraf Kümesine Dikey İz Düşümü (Projections Onto Epigraph Set Of A Convex Cost Function(PESC)) [14] metdotları kullanılmıştır.

A. Taban Kovalama (Basis Pursuit (BP))

Taban kovalama algoritması, dışbükey eniyileme ile sinyalin temsilcilerini bulmayı denemektedir. Ölçümler doğal olarak $y_l = \phi \cdot \xi_l$, $l = 1, 2, \dots, L$ denklemi kullanarak hesaplanır ve aşağıdaki maliyet fonksiyonu enküçüklenir:

$$\min \| y_l - \phi \xi_l \|_2^2 + \lambda \| \xi_l \|_1, \quad (8)$$

Burada λ , çözümün seyreklik seviyesini tespit etmek için kullanılan parametredir.

B. Ortogonal Uyum Kovalama (Orthogonal Matching Pursuit (OMP))

Ortogonal Uyum Kovalama, seyrek çözümler bulan bir fırsatçı algoritmadır. Bu algoritma, çok bilinen Uyum Kovalama (MP) algoritmasının bir uzantısıdır. Algoritmanın avantajları hızı ve hesaplama olarak verimli olmasıdır. En güçlü hedefi bulmak için uyumlu süzgecin çıkışında kullanılmıştır [15]. Bu algoritma ξ_l vektörünü geri çatmak için, ϕ 'nin hangi sütunlarının ölçüm matrisi y_l 'e ne kadar fazla katkı yaptığını bulmayı dener. Her bir döngüde ϕ 'nin sütunları alınır ve y_l 'nin kalan kısımlarıyla korelasyonu bulunur. y_l 'nin katkısı çıkarılır ve kalanıyla döngü yapılır. M tane döngüden sonra ξ_l vektörünü temsil eden taban kümesinden sütunların kümesi bulunur.

C. Sıkıştırılmış Örneklemeli Uyum Kovalama (Compressive Sampling Matched Pursuit (COSAMP))

Sıkıştırılmış Örneklemeli Uyum Kovalama, sinyalin gürültülü örneklerinden oluşan sıkıştırılmış halini geri kazandıran döngülü fırsatçı bir algoritmadır. Pratik birçok problem için verimi oldukça yüksektir. Böyle olmasının sebebi, örnekleme matrisiyle sadece vektör-matris çarpımının gerekli olmasıdır.

D. Dış Bükey Maliyet Fonksiyonun Eepikraf Kümesine Dikey İzdüşümü (Projections Onto Epigraph Set Of A Convex Cost Function (PESC))

Dış Bükey Maliyet Fonksiyonun Eepikraf Kümesine Dikey İzdüşümü, sinyal işlemede kullanılan yeni bir çerçevedir [16], [17]. Dışbükey eniyileme problemlerini çözmeyi hedefler. Bu yeni gürültüden arındırma yönteminde, korelasyon verisinin her bir sütunu $b[i, l]$, kesim frekansı $\pi/4$ olan yüksek geçirgen filtreden geçirilir ve $b[i, l]$ 'nin sütunları olan alçak geçirgen filtreden geçirilmiş versiyonu $b_l[l]$ 'den çıkartılır. Alçak geçirgen filtrelenmiş veri ileride kullanılmak için tutulur. $b_h[l]$ çıktısı l_1 -norm fonksiyonun epigraf kümesine izdüşümü bulunur. Bu vektörün boyutu 1 arttırılır. Bu izdüşüm operasyonu aşağıdaki enküçüküleme problemi çözülerek bulunabilir:

$$b_p[l] = \underset{b}{\operatorname{argmin}} (\|b_h[l] - b[l]\|^2 + b[N + 1]^2) \quad (9)$$

öyle ki $\sum_l |b[l]| \leq z$

Burada $b_p[l]$ izdüşümü yapılmış vektördür. Bu adımdan sonra, yüksek geçirgen filtrelili ve izdüşümü yapılmış veri alçak geçirgen filtrelili veri, $b_l[l]$ ile birleştirilir. Bu gürültüden arındırma yöntemi hiçbir parametre belirtilmesine gerek duymamaktadır.

IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, SA yaklaşımında kullanılan Taban Kovalama (BP), Ortogonal Taban Kovalama (OMP), Sıkıştırılmış Örneklemeli Uyum Kovalama (COSAMP) ve Dış Bükey Maliyet Fonksiyonun Eepikraf Kümesine Dikey İzdüşümü (PESC) kullanarak deneysel sonuçlar sunulmuştur ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Uzaklık-Doppler radar hedef tespit işleminde FM tabanlı pasif radar sistemi üzerinde durulmuştur. Bunun için 6 hedefi kapsayan bir senaryo üretilmiştir. Tablo I'de oluşturulan sistem senaryosu bulunmaktadır. Bilgisayar ortamında

Tablo I. Sistem Senaryosu

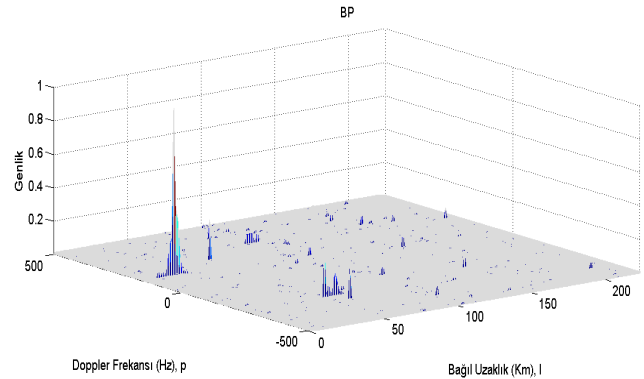
	Hedef 1	Hedef 2	Hedef 2	Hedef 2	Hedef 2	Hedef 6
Bağıl Uzaklık(km)	20,25	60	60	99,75	110,25	129,75
Bağıl Hız(m/s)(Doppler Frekansı)	150	-250	50	300	-150	-300
SNR(dB)	4,1	-3,8	-20,8	-21,1	-21,6	-22,1

oluşturulmuş sinyaller (Referans ve Tarama) akış şemasından Şekil 4'deki gibi geçirilmiştir. Gelen sinyallerden yığınları temizlemek için uyarlanabilir süzgeç kullanılmıştır. Burada uyarlanabilir süzgeçler için LMS, RLS ve GAL algoritmaları kullanılmış ve en iyi sonuçların LMS'de olduğu gözlenip bütün algoritmalarda kullanılmıştır. Hedefler en son adımda uzaklık-Doppler haritası kullanarak tespit edilir. Başlangıçta da anlatıldığı gibi sıkıştırılmış algılama için $M \times N$ boyutundaki ölçüm matrisini oluşturmak gerekir. Geri çatım yöntemleri için M tane rastgele seçilmiş Fourier katsayıları kullanılmıştır. Bu

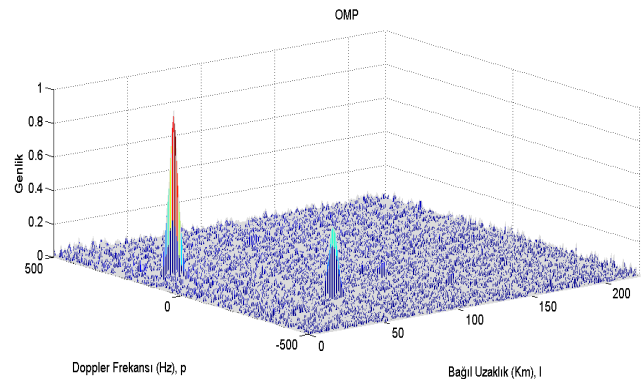


Şekil 4: Sistem akış şeması

katsayılar birim matrisin ters FFT alınarak bulunmuştur. Genel olarak, $N = 4000$ ve $M = 400$ seçilmiştir. Sıkıştırılmış algılamada bunun anlamı, oluşturulan 4000 boyutunda bir sinyali 400'e indirmek ve sinyali az veriyle temsil etmektir. PESC algoritması için herhangi bir değer kullanılmamıştır. Aşağıda bu gürültüden arındırma tekniklerini kullanarak oluşturulan grafikler verilmiştir. Şekil 5, 6, 7 ve 8'de bahsedilen



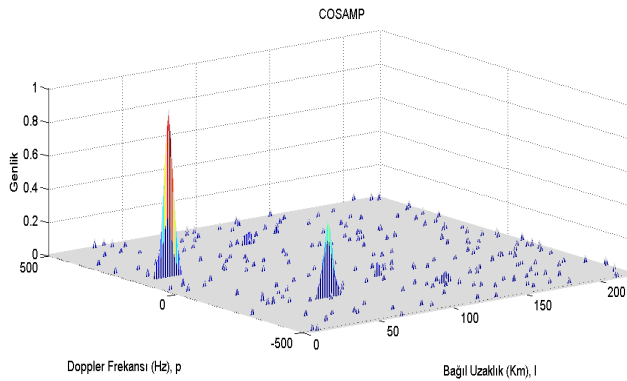
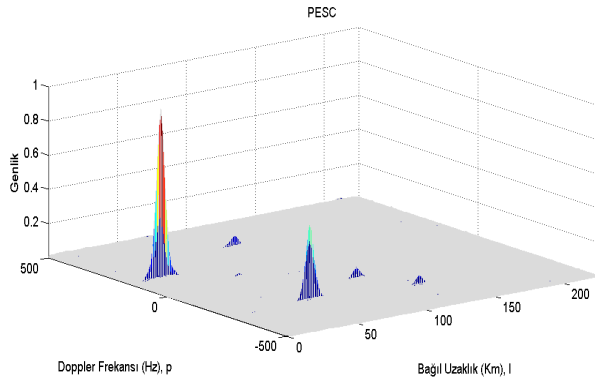
Şekil 5. M=400 için BP Doppler frekans grafiği



Şekil 6. M=400 için OMP Doppler frekans grafiği

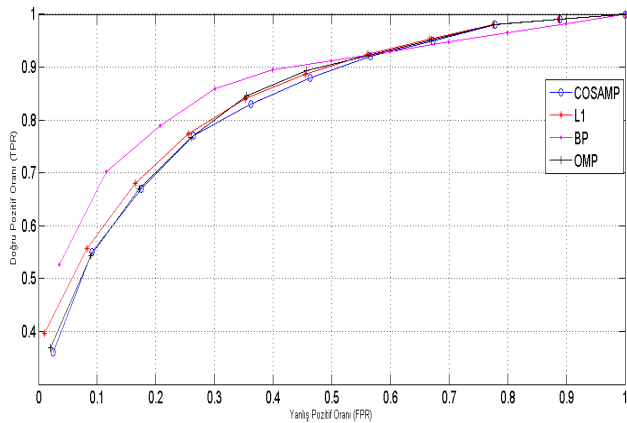
yöntemlerle gürültüden arındırma yapılmış ve Doppler frekans grafikleri çizdirilmiştir. Tümü için $M = 400$ olarak alınmış ve gelen sinyalin %10 ile işlem yapılmıştır. Genel olarak, sistem senaryosuna göre SNR'ı yüksek olan hedefler hepsinde bulunmuş küçük olanlar bazılarında görülmemektedir. SNR'ı küçük olan hedef sistem senaryosunda 50'dedir ve bazı grafiklerde net görülmemektedir. Yalnız, PESC yöntemiyle bulunan grafikte görülmemektedir.

Bu makalede, kullanılan 4 farklı gürültüden arındırma yöntemi için Sabit Yanlış Alarm Oranı (CFAR) kullanarak farklı eşik değerleri için hata oranı hesaplanmıştır. Bu karşılaştırmayı yaparken CFAR için gerekli olan parametreler; eğitim hücresi için gerekli olan değer, güvenlik hücresi için gerekli olan

Şekil 7. $M=400$ için COSAMP Doppler frekans grafiği

Şekil 8. PESC Doppler frekans grafiği

değer ve yanlış alarm olasılığını (Pfa) gösteren değerdir. Bu makalede kullanılan değerler, eğitim hücresi boyutu için 10, güvenlik hücresi boyutu için 10 ve Pfa için 0.1 olarak alınmıştır. Şekil 9'de 0 ile 1 eşik değerleri arasında 0.1 değer aralıklı oluşturulan Karar İletişim Grafiği (ROC) bulunmaktadır. Bu grafik kullanarak bulunan doğruluk oranlarının ortalaması BP için 0.8644, OMP için 0.8120, COSAMP için 0.8091 ve PESC için 0.8165 olarak bulunmuştur. Buna göre, farklı eşik değerleri için ortalama başarı oranı en yüksek olan *BP*'dir.



Şekil 9: Karar İletişim Grafiği (ROC).

V. SONUÇLAR

Bu makalede, BP, OMP, COSAMP ve PESC gibi farklı geri çatım teknikleri kullanarak belirsizlik fonksiyonu gürültüden arındırılmıştır. SA tabanlı gürültüden arındırma yöntemleri deneysel olarak gürültüyü kaldırmış ve hedeflerin tespiti işleminde yardım etmiştir. En iyi sonuçlar BP yöntemi kullanarak elde edilen çözümlerle bulunmuştur.

KAYNAKÇA

- [1] C. R. Berger, Z. Wang, J. Huang, and S. Zhou, "Application of compressive sensing to sparse channel estimation," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, no. 11, pp. 164–174, 2010.
- [2] D. L. Donoho, "Compressed sensing," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, 2006.
- [3] M. Lustig, D. Donoho, and J. M. Pauly, "Sparse mri: The application of compressed sensing for rapid mr imaging," *Magnetic resonance in medicine*, vol. 58, no. 6, pp. 1182–1195, 2007.
- [4] R. Baraniuk and P. Steeghs, "Compressive radar imaging," in *Radar Conference, 2007 IEEE*. IEEE, 2007, pp. 128–133.
- [5] O. Teke, A. C. Gurbuz, and O. Arikan, "A robust compressive sensing based technique for reconstruction of sparse radar scenes," *Digital Signal Processing*, 2013.
- [6] M. Herman and T. Strohmer, "Compressed sensing radar," in *Radar Conference, 2008. RADAR'08. IEEE*. IEEE, 2008, pp. 1–6.
- [7] J. H. Ender, "On compressive sensing applied to radar," *Signal Processing*, vol. 90, no. 5, pp. 1402–1414, 2010.
- [8] R. G. Baraniuk, "Compressive sensing [lecture notes]," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 24, no. 4, pp. 118–121, 2007.
- [9] F. Colone, D. O'hagan, P. Lombardo, and C. Baker, "A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 2, pp. 698–722, 2009.
- [10] T. Tsao, M. Slamani, P. Varshney, D. Weiner, H. Schwarzlander, and S. Borek, "Ambiguity function for a bistatic radar," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 1041–1051, 1997.
- [11] S. Chen and D. Donoho, "Basis pursuit," in *Signals, Systems and Computers, 1994. 1994 Conference Record of the Twenty-Eighth Asilomar Conference on*, vol. 1. IEEE, 1994, pp. 41–44.
- [12] J. A. Tropp and A. C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 12, pp. 4655–4666, 2007.
- [13] D. Needell and J. A. Tropp, "Cosamp: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 26, no. 3, pp. 301–321, 2009.
- [14] M. Tofighi, K. Köse, and A. E. Cetin, "Denosing using projection onto convex sets (pocs) based framework," *CoRR*, vol. abs/1309.0700, 2013.
- [15] C. R. Berger, B. Demissie, J. Heckenbach, P. Willett, and S. Zhou, "Signal processing for passive radar using ofdm waveforms," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 4, no. 1, pp. 226–238, 2010.
- [16] A. E. Cetin, A. Bozkurt, O. Gunay, Y. H. Habiboglu, K. Kose, I. Onaran, R. A. Sevimli, and M. Tofighi, "Projections onto convex sets (pocs) based optimization by lifting," *IEEE GlobalSIP 2013, Austin, Texas, USA*, 2013.
- [17] G. Chierchia, N. Pustelnik, J.-C. Pesquet, and B. Pesquet-Popescu, "Epigraphical projection and proximal tools for solving constrained convex optimization problems: Part i," *CoRR*, vol. abs/1210.5844, 2012.