

SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA KULLANILARAK NOKTA KİPLİ SAR GÖRÜNTÜ OLUŞTURULMASI SPOTLIGHT MODE SAR IMAGE RECONSTRUCTION BY COMPRESSED SENSING

Salih Uğur

Meteksan Savunma Sanayii A.Ş.
sugur@meteksansavunma.com.tr
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
salih@ee.bilkent.edu.tr

Orhan Arıkan

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

ÖZETÇE

Bu çalışmada SAR görüntü oluşturma yöntemi olarak sıkıştırılmış algılama tekniklerinden birisi olan LASSO kısıtlı en iyileştirme yaklaşımı kullanılmıştır. LASSO kapsamında kullanılan kısıt parametresi τ 'nın SAR görüntüsüne etkisini araştırmak amacı ile gerçek SAR görüntüleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Elde edilen görüntüler karşılaştırılmıştır. Seyreklik kısıt parametresi τ 'nın gürbüz seçimi için sinyal gürültü oranı ve ilintiye dayalı yeni bir metrik önerilmiştir.

ABSTRACT

In this work, LASSO formulation, which is one of the compressed sensing techniques, is used as a method of SAR image reconstruction. Simulations on the real SAR images are performed in order to analyze the effect of the τ parameter in LASSO formulation to the formed SAR imagery. Formed images are compared. A parameter, derived from signal to noise ratio and cross correlation, is suggested to robustly select the sparsity limit parameter τ .

1. GİRİŞ

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), hedef bölgenin elektromanyetik yansıtıcılığının görüntüsünü almak amacı ile kullanılan bir sensördür. Gece/gündüz eş performansla kullanımı ve hava koşullarından elektro-optik sensörlere göre daha az etkilenmesi sebebiyle SAR, özellikle askeri keşif uygulamalarının vazgeçilmez bir ögesi olmuştur. SAR'ın başlıca iki kipi bulunmaktadır: şerit kipi ve nokta kipi. Şerit kipinde SAR anteni, üzerine takılı bulunduğu platformla sabit bir açı yapmakta ve böylece radar izdüşümü, hedef alanını bir şerit gibi kapsamaktadır. Şerit kipi ile daha geniş alanlar, nispeten daha düşük çözünürlükle görüntülenebilmektedir. Nokta kipinde ise SAR anteni hedef bölgesinin merkezine yönlendirilmekte ve sentetik açıklığın oluşturulduğu süre boyunca bu noktaya kilitli kalmaktadır. Aynı bölgeden daha uzun süre veri alınabilmesinden dolayı daha yüksek çözünürlük seviyeleri elde edilebilmektedir. Fakat bu kipte görüntülenen alan daha küçük olmaktadır. Bu çalışmada nokta kip SAR'a yönelik görüntü oluşturma

algoritmaları kullanılmıştır. Bunun ana nedeni, nokta kip SAR görüntü oluşturma operatörünün iki boyutlu Fourier dönüşümü olmasından dolayı bilgisayar uygulamalarında daha hızlı ve verimli çalışmasıdır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar şerit kip SAR algoritmalarına da bazı küçük değişikliklerle uyarlanabilir.

Sıkıştırılmış algılama, seyrek sinyallerin örneklenmesi ve yeniden oluşturulması işlemine klasik yöntemler dışında yeni bir bakış açısı getirmiştir. Sıkıştırılmış algılama, seyrek sinyallerin Nyquist oranından çok daha düşük bir oranda örneklenseler dahi yeniden oluşturulabileceklerini göstermiştir [1, 2]. Sıkıştırılmış algılamanın uygulanabilmesi için sinyalin ve sinyalden alınan örneklemlerin sağlaması gerekli koşullar bulunmaktadır. Buna göre örneklenecek sinyal bilinen bir tabanda seyrek olarak tanımlanabilmelidir. Pratikte karşılaştığımız pekçok sinyalin seyrek olduğu tabanlar bulunmaktadır. Bunun en iyi bilinen örneği elektro-optik kameralardan alınan görüntülerdir. Bu görüntüler DCT, dalgacık gibi tabanlarda seyrekler ve bu sayede başarı ile sıkıştırılabilmektedirler. Sıkıştırılmış algılama için sağlanması gerekli diğer öge evreyumsuzluktur. Bu gereksinim de seyrek sinyalden alınan örneklemlerin gelişigüzel bir düzende olması ile yerine getirilir.

Sıkıştırılmış algılamanın uygulanacağı problemler aşağıda verildiği şekilde bir denklem sistemi olarak tanımlanabilir,

$$b = Ax. \quad (1)$$

Bu problemin sıkıştırılmış algılama yöntemi ile çözümü l_0 normunun minimizasyonu ile elde edilmektedir. l_0 norm minimizasyonu kombinatorik bir problem olduğundan pratik çözümlere ulaşılmasını çok zorlaştırmaktadır. Bunun yerine çözümler, genellikle l_0 normun l_1 norma gevşetilmesi ile elde edilmeye çalışılmaktadır,

$$\min \|x\|_1 \quad s.t. \quad b = Ax. \quad (2)$$

Bazı koşulların sağlanması durumunda l_1 norm çözümünün l_0 çözümüne eşit olacağı gösterilmiştir [3]. Literatürde

sıkıştırılmış algılama problemlerinin çözümüne yönelik çok sayıda algoritma bulunmaktadır [4, 5, 6, 7].

Radar ve SAR alanlarında sıkıştırılmış algılamanın bazı örneklerini görmek mümkündür [8, 9, 10]. Sıkıştırılmış algılama tekniğinin SAR görüntü oluşturulmasına uygulanmasındaki en büyük problem SAR görüntülerindeki benek gürültüsünün seyrek taban bulunmasında yarattığı zorluktur. Elektro-optik görüntülerin aksine genel SAR görüntüleri için uygun bir seyrek taban mevcut değildir. Fakat insan yapısı, içeriğinde metal bulunan ve dolayısı ile elektromanyetik yansıtıcılığı yüksek nesnelere bulunduğu SAR resimlerini dalgacık tabanında seyrek olarak betimlemenin mümkün olduğu bildirilmiştir [11]. Bu sayede insan yapısı nesne içeren SAR görüntülerine sıkıştırılmış algılama tekniğinin uygulanması tatmin edici sonuçlar vermektedir.

Makalenin ikinci bölümünde SAR için LASSO çözümü tanımlanmakta ve τ parametresinin bu çözümdeki yeri irdelenmektedir. Üçüncü bölümde, yapılan simülasyonların sonuçları verilmektedir. Dördüncü bölümde sonuçlar özetlenmektedir.

2. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA İLE SAR GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA

SAR sensörü nokta kipi için hedef alandan yansıyan sinyali aşağıda verildiği gibi vektör tabanlı yazmak mümkündür [12],

$$b = Fx + n. \quad (3)$$

Formülde b hedef alandan yansıyan (faz tarihçelerini içeren) sinyal vektörünü, x hedef alanın elektromanyetik yansıtıcılığı vektörünü, n toplam beyaz gürültü vektörünü belirtmektedir. Tipik SAR görüntüsü iki boyutlu olduğu için burada verilen vektörler (mesafe ve yanca eksenlerinde) iki boyutlu sinyal matrislerinin sütunları ard arda eklenerek oluşturulmaktadır. Formüldeki F matrisi ise nokta mod SAR sensöründe faz tarihçeleri ile hedef alanın elektromanyetik yansıtıcılığı arasındaki bağıntıyı veren ters Fourier dönüşümü operatörüdür. Bu modelde SAR görüntü oluşturma işlemi denklem (3).’de bilinmeyen x vektörünün tahmin edilmesidir.

Sıkıştırılmış algılama uygulamalarında denklem (3). ile belirtilen model genellikle az denklemlilik bir yapı olmaktadır. Bu sebeple, sıkıştırılmış algılama uygulamasında, F matrisi ters Fourier matrisinin bütünü olmayıp, sadece alınan ölçüm noktalarına denk gelen koordinatlardaki elemanları içermektedir.

SAR görüntü oluşturulması işleminin sıkıştırılmış algılama tekniği kullanılarak yapılması için denklem (3).’de hedef alanın elektromanyetik yansıtıcılığı temsil eden x vektörünün seyrek olduğu bir tabana ihtiyaç vardır. x vektörünün seyrek olduğu tabanı Φ ile gösterirsek,

$$x = \Phi x_0, \quad (4)$$

x_0 seyrek bir sinyal olarak belirtilir. x ’i denklem (3).’de yerine koyarsak,

$$b = F \Phi x_0 + n = A x_0 + n, \quad (5)$$

sıkıştırılmış algılama tekniğini uygulayacağımız sinyal modelini elde etmiş oluruz. Denklem (5).’den x_0 ’ın (dolayısı ile x ’in) sıkıştırılmış algılama tekniği ile bulunması için aşağıda

verilen ve BPDN olarak isimlendirilen optimizasyon problemi çözülmektedir,

$$\min \|x_0\|_1 \quad s.t. \quad \|b - Ax_0\|_2 \leq \sigma. \quad (6)$$

Bazı sıkıştırılmış algılama problemlerine l_1 norm sınırı koyarak aşağıda verildiği şekilde de çözüm aramak mümkündür [7],

$$\min \|b - Ax_0\|_2 \quad s.t. \quad \|x_0\|_1 \leq \tau. \quad (7)$$

Denklem (7). LASSO formülasyonu olarak bilinmektedir. SAR sensörünün askeri keşif uygulamaları genellikle insan yapısı bir hedefin tespitine ve tanınmasına dayanmaktadır. Bu tip hedeflerin, bilinen fiziksel boyutları, görüntünün çözünürlük değerleri ve seyrek olduğu taban dönüşümü kullanılarak, seyrek oldukları tabandaki l_1 normları için kabaca tahminler yapmak mümkündür. Bu tahminin kullanılmasıyla birlikte sıkıştırılmış algılama yöntemi ile SAR görüntü oluşturma problemi denklem (7).’te verilen LASSO optimizasyon probleminin çözümü haline getirilmiş olur. Bu çalışmamızda, τ parametresinin LASSO yöntemi ile SAR görüntü oluşturma tekniğine etkisi incelenmekte ve hedef özelliklerinin en üst düzeyde tespiti için uygun τ değeri hakkında çıkarımlar yapılması amaçlanmaktadır.

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde LASSO denkleminin çözümü ile SAR görüntü oluşturulması denemeleri MSTAR verileri [13] kullanılarak yapılmıştır. MSTAR veri tabanı kompleks değerli ham SAR görüntüleri içermektedir. Kompleks değerli ham SAR görüntülerinden, geri yansıma sinyalleri [14]’de detayları verilen yöntemle elde edilmiştir. Elde edilen görüntülerin kıyaslanabilmeleri amacıyla, Polar Format Algoritması (PFA) ile de SAR görüntüleri oluşturulmuştur [15].

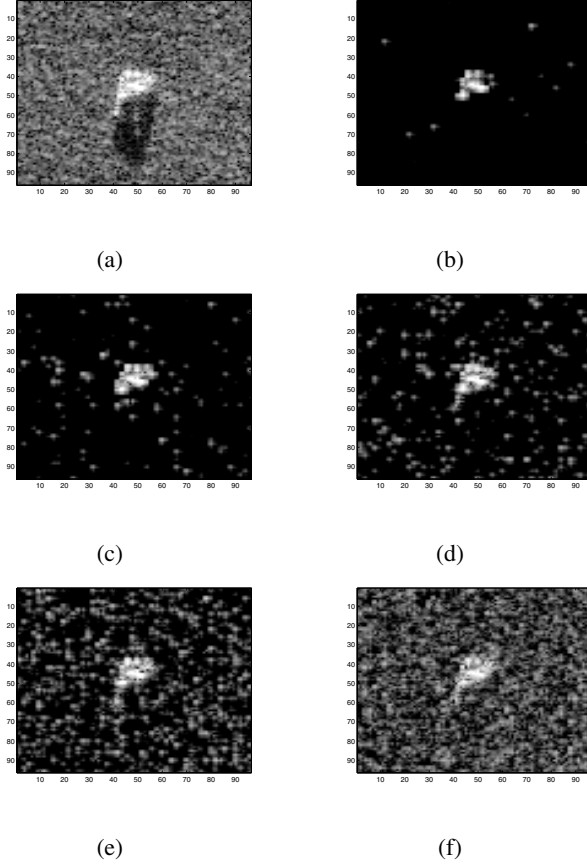
Denklem (7).’in çözümü için literatürde sıklıkla kullanılan ve [7]’de detayları verilen algoritma kullanılmıştır. (5). denkleminin az denklemlilik olması tüm geri yansıma vektörünün gelişigüzel örneklenmesi ile sağlanmıştır. Toplam geri yansıyan verinin %20 kullanılarak oluşturulan kümeler ile denemeler yapılmıştır. Çalışmamızda SAR görüntülerinin seyrek olarak tanımlandığı taban olarak, [10]’da olduğu gibi Daubechies-4 dalgacık tabanı kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü katsayıları kullanılarak iki boyutlu dönüşüm matrisi oluşturulmuştur.

Denemelerimizde alınan sonuçların, görsel kıyas yanında sayısal olarak da karşılaştırılabilmeleri amacı ile görüntülere ait dört adet metrik ölçülmüştür. İlk metrik ölçüm hatası metriğidir ve ölçüm vektörü ile çözüm arasındaki enerji farkını vermektedir,

$$OH = \|b - Ax_0\|_2^2. \quad (8)$$

İkinci metrik, hedefin bulunduğu bölge kullanılarak elde edilmektedir. Bu metrikte PFA yöntemi ile oluşturulan görüntü ile LASSO denklemi çözülerek elde edilen görüntünün çapraz ilintisi alınmaktadır. Çıkan sonuç, PFA yöntemi ile oluşturulan görüntünün kendi ilintisine bölünerek normalize edilmektedir. Üçüncü metrikte, LASSO denklemi çözülerek elde edilen görüntüye ait sinyal gürültü oranı hesaplanmaktadır,

$$SGO = 10 \log_{10} \frac{\|x^t\|_2^2 / N^t}{\sigma_{x-x^t}^2}. \quad (9)$$



Şekil 1: (a) MSTAR veri tabanından PFA yöntemi ile oluşturulan görüntü. LASSO denkleminin farklı τ değerleri ile çözümü sonucu elde edilen görüntüler, (b) $\tau = 25$, (c) $\tau = 50$, (d) $\tau = 75$, (e) $\tau = 150$, (f) $\tau = 300$.

Denklemden, x^t LASSO denklemi çözülerek elde edilen görüntüde hedefin bulunduğu bölgeyi, N^t hedef bölgesinin toplam piksel sayısını, $\sigma_{x-x^t}^2$ görüntüde hedef dışındaki art alanın varyansını temsil etmektedir. Dördüncü metrik olarak çapraz ilinti ve SGO metriklerinin çarpımı kullanılmaktadır.

Simülasyonlarda kullanılan MSTAR verisinin PFA ile oluşturulmuş görüntüsü Şekil 1.(a)'da verilmektedir. Şekil 1'de verilen diğer görüntüler değişik τ değerleri için denklem (7)'in çözümü ile elde edilmiş sonuçlardır.

Yapılan denemelerde elde edilen görüntülere ait metrikler Tablo 1'de verilmektedir. Tabloda Şekil 1'deki τ değerlerine ek olarak, daha geniş bir aralıkta alınmış ölçümler listelenmektedir. Bunun sebebi, metrik değerlerinde oluşan değişimlerin daha iyi yansıtılabilmesidir.

Denemelerde kullanılan MSTAR görüntüsünün dalgacık tabanında l_1 normu 714 olarak ölçülmüştür. Aynı görüntünün sadece hedefi içeren bölgesinin (diğer bölgeler sıfırlanmıştır) dalgacık tabanında l_1 normu 123 olarak ölçülmüştür. Görüntünün dalgacık tabanında toplam enerjisinin %90'ı enerjileri en yüksek 925 nokta tarafından oluşturulmaktadır. Enerjinin %90'ını sağlayan bu kısmın l_1 normu 256 olarak ölçülmüştür. Görüntünün sadece hedefi içeren bölgesinin dalgacık tabanında toplam enerjisinin %90'ı enerjileri en yüksek

τ	OH	İlinti	SGO	İlinti*SGO
25	$1.9 \cdot 10^5$	0.41	36.0	14.7
50	$1.4 \cdot 10^5$	0.55	28.2	15.5
75	$1.4 \cdot 10^5$	0.60	25.1	15.1
100	$6.8 \cdot 10^4$	0.63	23.6	14.9
150	$3.4 \cdot 10^4$	0.63	21.6	13.7
200	$1.2 \cdot 10^4$	0.72	21.4	15.4
210	$9.7 \cdot 10^3$	0.71	21.0	15.0
220	$7.1 \cdot 10^3$	0.72	21.0	15.0
230	$5.4 \cdot 10^3$	0.70	20.5	14.3
240	$4.4 \cdot 10^3$	0.72	20.5	14.8
250	$2.3 \cdot 10^3$	0.73	20.8	15.2
260	716.5	0.72	20.6	14.8
270	276.9	0.70	19.7	13.9
280	64.5	0.70	20.0	14.1
290	$3.3 \cdot 10^{-3}$	0.68	19.9	13.5
300	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.58	19.1	11.0
500	$3.3 \cdot 10^{-15}$	0.34	15.7	5.3

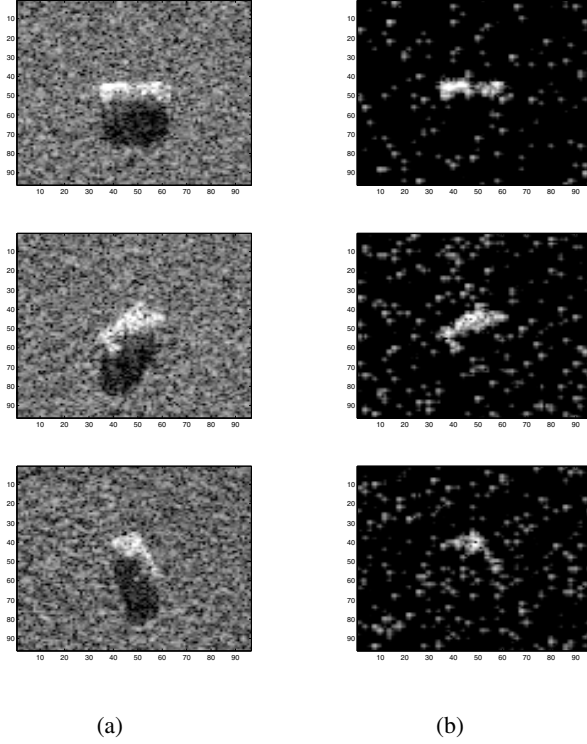
Tablo 1: MSTAR verilerinden, LASSO denkleminin farklı τ değerleri ile çözümü sonucu elde edilen metrikler.

43 nokta tarafından oluşturulmaktadır. Enerjinin %90'ını sağlayan bu kısmın l_1 normu 57 olarak ölçülmüştür.

Farklı τ değerleri ile yaptığımız denemeler bu rakamları doğrular niteliktedir. Hedefe ait görüntüdeki detayların orijinal görüntüdeki detaylara ulaştığı τ değeri Şekil 1'den 50 – 75 arası olarak tespit edilebilmektedir. τ değerinin 150 – 300 aralığında olduğu görüntüler ise resmin bütün olarak (benek gürültüsü dahil) orijinal MSTAR görüntüsüne en çok yaklaştığı değerlerdir.

Tablo 1'de verilen değerlerden çıkarılacak yorumlar da görüntülerden elde edilen sonuçları doğrular niteliktedir. Ölçüm hatası, τ değeri 250'yi geçtikten sonra ciddi bir düşüş göstermektedir. Buradan, resmin tümünü (benek gürültüsü dahil) betimleyecek seyrek tabanın l_1 normunun 250 civarında olması gerektiği çıkarımı yapılabilmektedir. Çapraz ilinti metriğinin τ değeri 50'yi geçtikten sonra artış göstermeye başlaması hedefin l_1 normu ile ilgili bir ipucu sağlamaktadır. Fakat, çapraz ilinti metriği, τ değeri 200 – 300 arasındaki iken en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu değerlerde her ne kadar hedef alan görüntüsü orijinal görüntüye en fazla yaklaşmış olsa da görüntünün tümüne yayılan gürültü oldukça fazlalıkmaktadır. Bunu da sinyal gürültü oranı metriğinden (SGO) görmek mümkündür. τ değeri arttırıldıkça hedef dışındaki diğer bölgeler de resimde daha çok yer almaya başlamakta, bu da SGO değerini olumsuz etkilemektedir. τ değerini daha da fazla arttırmak resimdeki gürültüyü çok arttırmakta ve hedefin seçilebilirliğini azaltmaktadır. Tablonun son sütununda çapraz ilinti ve SGO metriklerinin çarpımları verilmiştir. Bu metrik τ değeri için iyi bir seçicilik sağlamaktadır. Metrik en yüksek noktasına 50 – 75 arası bir değerde ulaşmaktadır; ayrıca 200 civarında da yüksek değerlerdedir. Bu değerler hedef bölgesi ve resmin tümüne ait l_1 norm değerleri ile uyumludur.

Bu çalışmalara ek olarak, farklı MSTAR görüntüleri ile yapılan denemeler Şekil 2'de verilmektedir. Şekil 2.(a) sütununda verilen görüntüler PFA yöntemi ile oluşturulmuştur.



Şekil 2: (a) MSTAR veri tabanından PFA yöntemi ile oluşturulan görüntüler. (b) LASSO denkleminin çözümü sonucu elde edilen görüntüler.

LASSO denkleminin çözümü ile elde edilen görüntüler Şekil 2.(b) sütununda yer almaktadır. Seyrek algılama çözümünde, τ parametresi olarak hedef bölgelerine ait l_1 norm değerleri kullanılmıştır. Sonuçlardan görüntü üzerinde hedeflere ait özelliklerin, seyrek algılama çözümlerinde başarı ile çıkarıldığı gözlenmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada sıkıştırılmış algılama yöntemi ile nokta kipli SAR görüntüleri oluşturulmuştur. Görüntü oluşturma yöntemi olarak LASSO denkleminin çözümü kullanılmıştır. LASSO denklemindeki τ parametresinin oluşturulan görüntüye etkisi incelenmiştir. SAR görüntülerinden özellikle otomatik tanıma/tasnif gibi işlemlerin yüksek doğrulukla yapılması, hedefle ilgili öz niteliklerin görüntüden en doğru şekilde çıkarılabilmesi ile yakından ilgilidir. Görüntüden hedefe ait özelliklerin çıkarılması, bunun yanı sıra benek gürültüsünün en yüksek düzeyde bastırılabilmesi için hedefe ait (seyrek tabandaki) l_1 norm değerinin LASSO denkleminde τ olarak kullanılması uygun gözükülmektedir. Önümüzdeki dönemlerde, görüntünün seyrek olduğu tabanlarda, sınıflandırmaya yönelik metriklerin tespit edilmesi üzerine çalışılmalar yapılması planlanmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] D. L. Donoho, "Compressed Sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, April 2006.
- [2] E. Candes and T. Tao, "Near-Optimal Signal Recovery from Random Projections: Universal Encoding Strategies," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 12, pp. 5406-5425, December 2006.
- [3] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust Uncertainty Principles: Exact Signal Reconstruction From Highly Incomplete Frequency Information" *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, February 2006.
- [4] S. S. Chen, D. L. Donoho, and M. A. Saunders, "Atomic Decomposition by Basis Pursuit," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 20, no. 1, pp. 33-61, 1998.
- [5] S. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 12, pp. 3397-3415, December 1993.
- [6] J. A. Tropp, "Greed is Good: Algorithmic Results for Sparse Approximation," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 10, pp. 2231-2242, October 2004.
- [7] E. van den Berg and M. P. Friedlander, "Probing the Pareto frontier for basis pursuit solutions," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 31, no. 2, pp 890-912, January 2009.
- [8] R. Baraniuk and P. Steeghs, "Compressive Radar Imaging," *IEEE Radar Conference 2007*, pp. 128-133, April 2007.
- [9] M. A. Herman and T. Strohmer, "High Resolution Radar via Compressed Sensing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 6, pp. 2275-2284, June 2009.
- [10] V. M. Patel, G. R. Glenn, D. M. Healy and R. Chellappa, "Compressed Synthetic Aperture Radar," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 4, no. 2, April 2010.
- [11] G. Rilling, M. Davies, and B. Mulgrew, "Compressed Sensing Based Compression of SAR Raw Data," *SPARS'09 - Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations*, March 2010.
- [12] M. Çetin and W. C. Karl, "Feature-Enhanced Synthetic Aperture Radar Image Formation Based on Nonquadratic Regularization," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 4, April 2001.
- [13] <http://cis.jhu.edu/data.sets/MSTAR>. Center for Imaging Science Image Database.
- [14] M. Çetin, "Feature-Enhanced Synthetic Aperture Radar Imaging," Ph.D. dissertation, College of Eng., Boston Univ., Boston, MA, 2001.
- [15] W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar, Signal Processing Algorithms*, Artech House Inc., 1995.