

SAR İMGELERİNİN GERİ ÇATILMASI İÇİN SÖZLÜK ÖĞRENİMİ TABANLI BİR YÖNTEM DICTIONARY LEARNING-BASED APPROACH FOR SAR IMAGE RECONSTRUCTION

Abdurrahim Soğanlı, Müjdat Çetin
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Sabancı Üniversitesi
{soganli,mccetin}@sabanciuniv.edu

Özetçe —Sentetik Açıklıklı radar (SAR) görüntüleme probleminin çözümünde seyreklik tabanlı yaklaşımlar son çalışmalarda başarılı sonuçlar vermektedir. Radar sahnesinin noktasal saçıcılık veya düzlük gibi belirli özellikler bakımından bir tanım kümesinde seyrek olduğu varsayımı bu çalışmaların önünü açmıştır. Bu çalışmalarda, SAR verisinin fazının rasgele olmasından dolayı seyreklik tabanlı çalışmalar hedef SAR görüntüsünün mutlak değerinin temsili amaçlanmıştır. Bu çalışmalarda önceden belirlenmiş sözlükler kullanılmıştır. Biz bu çalışmada SAR imgelerinin geri çatılmasında sözlük öğrenimi tabanlı bir yaklaşım öneriyoruz. Çalışmamızda sözlüğü eğitim kümesi ile öğreniyoruz. Çalışmamızı sentetik radar görüntülerinin geri çatılmasında başarılı sonuçlar vermektedir.

Anahtar Kelimeler—*sentetik açıklıklı radar; sözlük öğrenimi; imge geri çatılması.*

Abstract—Recently there has been growing interest on the study of sparse representation-based SAR imaging with the assumption that the underlying SAR scenes exhibit sparsity with respect to SAR image features such as point scatterers and edges of smooth regions. Since the phase of the SAR reflectivity is random, these methods have been employed to magnitude of the complex valued SAR data. Pre-defined overcomplete dictionaries are used for these methods. In this paper we propose a dictionary learning-based SAR image reconstruction method. Our proposed model learns the dictionary from training set of images. We validate our method on synthetic SAR image.

Keywords—*synthetic aperture radar; dictionary learning; image reconstruction.*

I. GİRİŞ

Sentetik açıklıklı radar (SAR) hedef alanın birçok açısından veri toplayan gelişmiş bir mikro dalga sensor sistemidir. SAR görüntüleme, otomatik hedef tanıma ve saptama gibi alanlarda kullanıldığı için, SAR verisinden başarılı bir imge geri çatılması önemli bir durumdur. SAR konusunda geleneksel imge geri çatılması kutupsal format algoritmasıdır [1]. Fakat SAR'ın sınırlı bant genişliğinden dolayı bu yöntem beneklilik ve yan kulak gibi bozulmalara maruz kalmaktadır. Bu bahsedilen eksikliklerin giderilebilmesi için düzenleme tabanlı yöntemler önerilmiştir [2]. Bu yöntemler geleneksel yöntemlerden

daha iyi sonuçlar elde etse de noktasal saçıcılığı ve ayrıtları bastırmaktadır. Tipik bir SAR verisinin fazının rasgele olması geleneksel ve düzenleme yöntemlerinin yeterince başarılı olamamasının sebeplerinden biridir. Bu sorunun çözümü için karmaşık SAR sahnesinin yansıtırlığının mutlak değeri üzerine karesel olmayan bir düzenleme yöntemi önerilmiştir [3]. Bu yöntem hedef görüntünün noktasal saçıcılık ve bölgesel düzlüğünü iyileştirmektedir. Eğer hedef sahne bu özellikler bakımından seyrek ise bu yöntem oldukça iyi bir geri çatılma sağlamaktadır. Yöntemin dezavantajı ise hedef görüntünün farklı özelliklerini bastırma ihtimalidir.

Bahsedilen problemin çözümü ve bu yöntemin devamı niteliğinde olacak şekilde seyreklik tabanlı bir yöntem önerilmiştir [4]. Bu yöntem hedef görüntünün fazını ve mutlak değerini ayırarak ortak bir çözüm önermektedir. Bu çalışma, sahne yansıtırlığının mutlak değerini, önceden belirlenmiş sözlükler ile temsil etmeyi önermektedir. Deneysel sonuçlar bu çalışmanın karesel olmayan düzenleme yöntemi göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Sözlüklerin önceden belirlenmiş ve sabit olması ise yöntemin eksikliklerinden biridir. Bu sebep ile bu yöntemler belirli SAR sahneleri için olumlu sonuçlar vermeyebilir.

Sıkıştırılmış algılama teorisi [5], [6] görüntü işleme alanında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teori hedef görüntünün belli bir sözlük alanında seyrek olarak temsil edilebilmesi durumunda eksik verilerden hedef görüntüyü geri çatılabileceğini öne sürmektedir. Bu durumda öne sürülecek sözlüğün durumu önem kazanmaktadır. Sözlük olarak ön tanımlı birçok alternatif önerilmiştir. Ancak son çalışmalar göstermektedir ki ön tanımlı bir sözlükten ziyade öğrenilmiş sözlüklerin hedef görüntüleri seyreklik açısından daha iyi temsil etmektedir. Bu açıdan sözlük öğrenimi için birçok yöntem öne sürülmüştür. Bu yöntemlerin en başarılılarından biri de K-SVD yöntemidir [7]. Bu yöntem, seyreklik katsayılarını ve sözlük elemanlarını ortak bir şekilde çözmektedir. K-SVD imge görüntüleme medikal görüntüleme [8], görüntü temizleme [9] gibi birçok alanda başarılı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmalar göstermektedir ki ön tanımlı bir sözlükten ziyade eğitim kümesinden öğrenilen bir sözlük daha başarılı sonuçlar vermektedir.

Bu sebeple biz bu çalışmada, SAR görüntü geri çatılması için sözlük öğrenimi tabanlı bir yöntem öneriyoruz. SAR yansıtırlığının rasgele fazının olması sebebiyle karmaşık bir

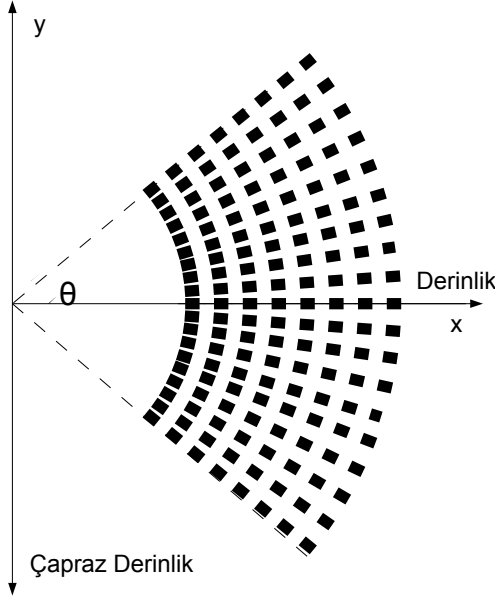


Figure 1: 2 boyutlu frekans uzayında SAR veri örneklerinin temsili.

SAR verisi üzerine sözlük öğrenimi yapılması başarılı sonuçlar vermeyebilir. Bu sebeple [4] de önerildiği gibi yansıtırlığın mutlak değeri üzerinden bir yöntem geliştireyoruz. Hedef imgenin fazını [4]'deki yöntem ile çözerken, mutlak değerini K-SVD ile öğrenilen bir sözlük vasıtasıyla seyreklik tabanlı bir algoritma ile çözüyoruz.

II. ARKAPLAN VE SAR GÖRÜNTÜ MODELİ

A. SAR Görüntü Modeli

[1] de önerildiği gibi noktasal ışık kipindeki SAR'ın tomografik formunu dikkate alıyoruz. Tipik bir SAR algılayıcısının uçuş yolu boyunca gönderdiği FM ötüş sinyali şu şekildedir:

$$s(t) = \begin{cases} e^{j(w_0 t + \alpha t^2)} & |t| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

Bu denklemde w_0 merkezi frekans, T_p darbe süresi, 2α ise ötüş hızıdır. Tüm açıklık pozisyonları için dönüş sinyalleri radar algılayıcısı tarafından toplanır. Ön işlemlerden sonra, belli bir θ açısı için karmaşık hedef alanı ile dönüş sinyallerinin ilişkisi şu şekilde belirtilebilir:

$$r_\theta(t) = \iint_{x^2 + y^2 < L} f(x, y) e^{-jK(t)(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (2)$$

Bu denklemde L hedef alanın yarıçapı, $K(t)$ ise şöyle bir uzamsal frekanstır:

$$K(t) = \frac{2}{c} (w_0 + 2\alpha(t - 2\frac{R_\theta}{c})) \quad (3)$$

c ışık hızı, R_θ ise θ açısında radar ve hedef alanın birbirlerine olan uzaklığıdır. Şekil 1 de görüldüğü üzere tüm dönüş sinyalleri frekans uzayında izdüşümsel bir kesit oluşturmaktadır. Karmaşık yansıtırlık alanı ile izdüşümlerin ilişkisi ayrıık formda temsili şu şekildedir:

$$y = Hx + n \quad (4)$$

Burada H SAR izdüşüm operatörü, n ise sistemin maruz kaldığı gürültüdür. Bu açıdan SAR imge geri çatması, tipik bir ters problem olarak görülebilir.

B. Sözlük Öğrenimi

Sözlük öğrenimi ile ilgili genel durum şu şekilde açıklanabilir. $x \in \mathbb{C}^N$ bir imge olsun. Bu imgeye ait $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ boyutundaki parçalar 1 boyutlu düzlemde x_s olarak temsil edilebilir. Bu durumda istenilen, $\alpha_s \in \mathbb{C}^K$ seyreklik katsayıları ile bu parçaları seyrek olarak temsil edebilen $D \in \mathbb{C}^{n \times K}$ sözlüğünü oluşturabilmektir. Burada genel olarak $K > n$ olarak seçilir. Bu bilgiler ışığında genel sözlük öğrenimi problemi aşağıdaki iki şekilde ifade edilebilir:

$$\min_{D, \alpha_s} \sum_s \|R_s f - D\alpha_s\|_2^2 \quad \text{s.t.} \quad \forall s \quad \|\alpha_s\|_0 \leq T_0 \quad (5)$$

$$\min_{D, \alpha_s} \sum_s \|\alpha_s\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \forall s \quad \|R_s f - D\alpha_s\|_2^2 \leq \epsilon \quad (6)$$

Denklem (5)'de R parça çekme operatörü, T_0 ise seyreklik seviyesini belirleyen parametredir. Lagrange katsayısı kullanılarak sözlük öğrenimi problemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\min_{D, \alpha_s} \sum_s \|R_s f - D\alpha_s\|_2^2 + \sum_s \mu_s \|\alpha_s\|_0 \quad (7)$$

Bu problemde ilk terim sözlüğün seyreklik seviyesi ile görüntünün yakınlığını kontrol ederken, ikinci terim seyreklik seviyesini kontrol eder. İkinci terimdeki düzgeden dolayı bu problemin doğrudan bir çözümü yoktur. Bu yüzden iki aşamalı çözümler önerilmiştir. Bu çözümlerden biri de K-SVD yöntemidir. Bu yöntem ilk aşamada ortogonal eşleştirmeyi kovalayan bir seyreklik algoritmasını OMP [10] kullanır. Alternatif olarak [11]–[13] algoritmaları da kullanılabilir. İkinci aşamada ise sözlüğün elemanlarını düzenler.

III. ÖNERİLEN YÖNTEM

SAR imge geri çatılması için bir önceki bölümde anlatılan yöntemleri de göz önünde bulundurarak üç aşamalı bir yöntem öneriyoruz. Tipik bir SAR yansıtırlığının faz ve mutlak değerini iki ayrı parametre olarak düşünürsek yansıtırlığı $x = P|x|$ şeklinde temsil edebiliriz. Burada P faz bilgisini içeren diyagonal bir matristir. Bu durumda sözlük öğrenme tabanlı algoritmamız şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \{|\widehat{f}|, \widehat{\Theta}, \widehat{D}, \widehat{\alpha}_s\} = \arg \min_{|f|, \Theta, D, \alpha_s} & \sum_s \|R_s |f| - D\alpha_s\|_2^2 \\ & + \sum_s \mu_s \|\alpha_s\|_0 \\ & + \lambda \|g - H\Theta |f|\|_2^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Burada ilk terim sözlüğün seyreklik temsili ile hedef görüntünün yakınlığını kontrol eder. İkinci terim ise seyreklik seviyesini kontrol eder. Üçüncü ve son terim ise sonucun gözlemlenen veri ile olan bağlılığını kontrol eder. Burada, λ bu bağlılığı kontrol eden bir parametredir. Bu parametre gözlemlenen verideki gürültü ile ters orantılıdır.

Görüldüğü üzere önerilen maliyet fonksiyonumuzda bilinmeyen terimler $|x|, D, \alpha_s, P$ 'dir. Bunlar sırası ile hedef görüntünün mutlak değeri, seyreklik için kullanılan sözlük, seyreklik katsayısı ve faz matrisidir. Bu problemin çözümü için üç aşamadan oluşan döngülü bir yöntem öneriyoruz. İlk aşamada önceki bölümde anlatılan K-SVD yöntemi ile seyreklik katsayıları ve sözlük öğreniliyor. İkinci aşamada ise [4]'deki yöntem kullanılarak faz matrisi elde ediliyor. Daha sonra bu iki sonuç kullanılarak hedef görüntünün mutlak değeri elde ediliyor.

A. Sözlük Öğrenimi Bölümü

Bu bölümde seyreklik sözlüğü D ve seyreklik katsayılarının çözümü yapılıyor. Bu aşamada diğer iki parametre sabit tutulmaktadır. Böylece maliyet fonksiyonumuz aşağıdaki hale gelmiş oluyor:

$$\{\hat{D}, \hat{\alpha}_s\} = \arg \min_{D, \alpha_s} \sum_s \|R_s |f| - D\alpha_s\|_2^2 + \sum_s \mu_s \|\alpha_s\|_0 \quad (9)$$

Bu altproblem görüldüğü üzere tipik bir sözlük öğrenme problemidir. Bu yüzden bu altproblemi K-SVD kullanarak çözüyoruz. Eğer sözlük önceden bir eğitim kümesinden öğrenilmiş ise bu aşamada yalnızca seyreklik katsayıları öğrenilir. Eğer sözlük öğrenimi yapılmamış ise bu aşamada hem sözlük hem de seyreklik katsayıları ayrı ayrı öğrenilir.

B. Faz Probleminin Çözümü

Bu bölümde diğer değişkenler sabit tutulur ve faz matrisi P çözülür. Bu durumda altproblem aşağıdaki şekilde oluşur:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \|y - H B \beta\|_2^2 + \lambda_2 \sum_{i=1}^N (|\beta_i| - 1)^2 \quad (10)$$

Burada $x = B\beta$ dir. B hedef görüntünün mutlak değerlerini içeren bir matris olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$B = \text{diag} \left\{ \frac{\sum_s R_s^T D \alpha_s}{\sum_s R_s^T R_s} \right\} \quad (11)$$

β ise faz bilgisini içeren vektördür. Bu altproblemde ikinci terim, faz değerinin mutlak değerinin 1'e eşit olmasını zorlamaktadır. Bu altproblem çözümü [3]'de belirtildiği gibi eşlenik gradyan yöntemi kullanılarak çözülebilir.

C. Mutlak Değerin Bulunması

Bu bölümde, ilk iki aşamada elde edilen değişkenlerin değerleri kullanılarak x 'in mutlak değeri bulunur. Bu aşama için altproblem aşağıdaki gibidir:

$$|\hat{x}| = \arg \min_{|x|} \sum_s \|R_s |x| - D\alpha_s\|_2^2 + \lambda \|y - H\Theta |x|\|_2^2 \quad (12)$$

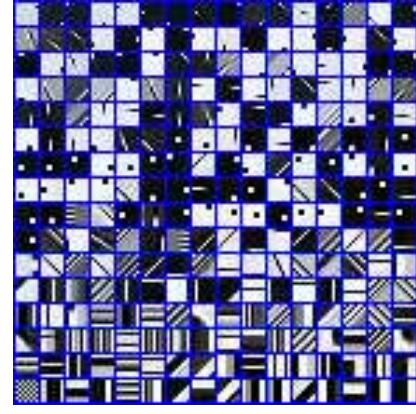


Figure 2: Sentetik eğitim kümesinden öğrenilen sözlüğün 256 adet elemanı.

Bu altproblem önceki iki problem nazaran basit bir şekilde çözülebilir. $|x|$ değişkenine göre türev alınıp gerekli düzenlemeler yapıldığında altproblem çözümü aşağıdaki duruma gelmektedir:

$$|\hat{x}| = \left(\sum_s R_s^T R_s + 2\lambda \Theta^H H^H \Theta \right)^{-1} \left(\sum_s R_s^T D \alpha_s + 2\lambda \Theta^H H^H y \right) \quad (13)$$

Böylece bir döngüdeki hedef görüntüye ait mutlak değer bulunmuş oluyor. Bu aşamada sonucun karmaşık çıkması mümkün olabilir. Bu durumda sonucun mutlak değerini almayı uygun gördük. Ancak bu aşamadaki altprobleme sonucun karmaşık olmamasına dair zorlayıcı bir terim eklenebilir.

IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen yöntemin etkinliğini gösterebilmek için 64x64 boyutunda sentetik bir SAR görüntüsü oluşturulmuştur. Bu sentetik deneyde basitlik olması açısından SAR izdüşüm modeli olarak eksik bir Fourier matrisi kullanılmıştır. Sentetik görüntüye rasgele bir faz eklendikten sonra sentetik görüntü bu matris ile çarpılmıştır. Daha sonra elde edilen bu sonuca gürültü eklenmiştir. Böylece elimizde sentetik bir SAR verisi olmuş oluyor. Amacımız bu veriden hedef görüntüyü elde edebilmektir. Bu amaçla oluşturulan sentetik bir eğitim kümesinden K-SVD yöntemi kullanılarak sözlük öğrenilmiştir. Eğitim kümesi 8×8 boyutunda parçalardan oluşmaktadır. Öğrenilen sözlük $D \in \mathbb{C}^{64 \times 256}$ boyutundadır. Öğrenilen sözlüğün her bir elemanı Şekil 2'de görüldüğü gibidir.

Önerilen yöntem; karesel olmayan düzenleme yöntemi ve geleneksel yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Sentetik deneyde ait sonuçlar Şekil 3'teki gibidir. Verinin sınırlı bir bantta olmasından dolayı geleneksel yöntemin kötü bir geri çatma işlemi yaptığı görülüyor. Karesel olmayan düzenleme yöntemi ise geleneksel yöntemden daha başarılı bir sonuç vermesine rağmen, hedef görüntüdeki örüntüleri başarılı bir şekilde temsil edemiyor. Bu sonuçlara karşılık gelen sinyalin gürültüye oranı (SNR) Tablo I de gösterilmiştir. Önerdiğimiz yöntem; geleneksel yöntemden ve karesel olmayan düzenleme yönteminden daha başarılı bir performans sağladığı görülmektedir. Özellikle hedef görüntüdeki örüntülerin, önerdiğimiz yöntem

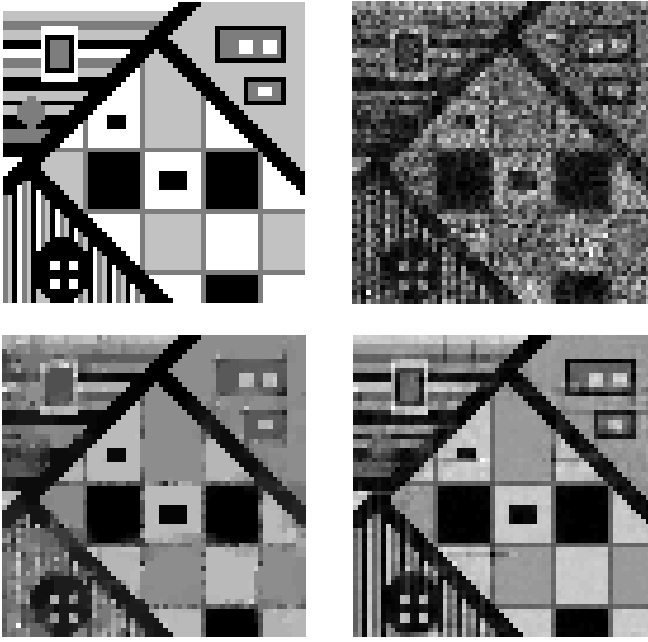


Figure 3: Sentetik görüntü deney sonucu. Gerçek görüntü (sol üst), geleneksel yöntem sonucu (sağ üst), karesel olmayan düzenleme yönteminin sonucu (sol alta), önerilen yöntem (sağ alt).

ile daha iyi bir şekilde temsil edilebildiği görülebilmektedir. Karesel olmayan düzenleme yöntemi görüntüdeki bazı özellikleri bastırırken önerdiğimiz yöntem daha başarılı bir sonuç vermektedir. Şekil 4'te ise önerdiğimiz yöntemin TerraSAR-X'ten [14] alınan bir sahnenin geri çatılmasında gösterdiği performansı gösteriyoruz. Burada öğrenilen sözlük örnek SAR görüntülerinden oluşan bir eğitim kümesinden oluşmaktadır. SAR görüntüleri için, sentetik deneylerden farklı olarak kullanılacak olan eğitim kümesinin seçimi de önem kazanmaktadır. Görüldüğü gibi geleneksel yöntemlerde beneklilik fazla iken önerdiğimiz yöntem daha başarılı bir sonuç vermektedir.

V. VARGILAR

Bu çalışmada sözlük öğrenimi tabanlı bir SAR imge geri çatılması yöntemi öneriyoruz. Önceden tanımlı bir seyreklik sözlüğünden ziyade, son yıllarda kullanımı artan öğrenme tabanlı sözlüklerin kullanılmasının görüntü işleme analarında başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Böyle bir motivasyon ile yola çıkarak SAR imgelerinin geri çatılması için sözlük öğrenimi tabanlı bir yöntem öneriyoruz. Geleneksel imge geri çatılması algoritmaları hedef görüntünün bazı özellik-

Table I: İmge geri çatma yöntemlerinin şekil 3 deki deneye göre karşılaştırılması.

| Yöntem | SNR (dB) |
|----------------------------------|----------|
| <i>Geleneksel Yöntem</i> | 4.2145 |
| <i>Karesel Olmayan Düzenleme</i> | 8.2013 |
| <i>Önerilen Yöntem</i> | 13.4755 |

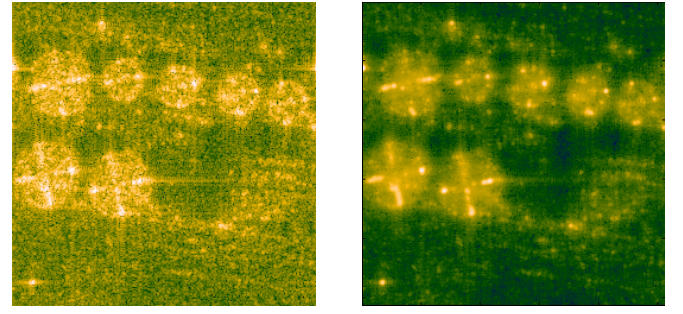


Figure 4: SAR görüntü deney sonucu. Geleneksel yöntemle geri çatılmış görüntü (solda), önerilen yöntem ile geri çatılmış görüntü (sağda).

lerini bastırırken önerdiğimiz yöntem benzer imgelerden öğrenilen sözlük sayesinde oldukça başarılı sonuçlar sağlamaktadır. Çalışmalarımızın devamı olarak SAR görüntülerinin geri çatılmasında kullanılacak olan eğitim kümesinin geliştirilmesini hedefliyoruz. Örnek olarak yüksek çözünürlükteki SAR görüntüleri, düşük kalitedeki SAR görüntülerinin geri çatılmasında eğitim kümesi olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] D.C. Munson Jr. and J. L. C. Sanz. Image reconstruction from frequency-offset fourier data. *Proceedings of the IEEE*, 72(6):661–669, 1984.
- [2] Tikhonov A. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. *Soviet Math. Dokl.*, 5:1035/1038, 1963.
- [3] M. Cetin and W.C. Karl. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization. *IEEE Trans. Image Processing*, 10(4):623–631, 2001.
- [4] S. Samadi, M. Cetin, and M.A. Masnadi-Shirazi. Sparse representation-based synthetic aperture radar imaging. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 5(2):182–193, 2011.
- [5] D.L. Donoho. Compressed sensing. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 52(4):1289–1306, 2006.
- [6] E.J. Candes, J. Romberg, and T. Tao. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 52(2):489–509, 2006.
- [7] M. Aharon, M. Elad, and A. Bruckstein. K-SVD: an algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation. *IEEE Trans. Signal Processing*, 54(11):4311–4322, 2006.
- [8] S. Ravishanker and Y. Bresler. MR image reconstruction from highly undersampled k-space data by dictionary learning. *IEEE Trans. Medical Imaging*, 30(5):1028–1041, 2011.
- [9] M. Elad and M. Aharon. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries. *IEEE Trans. Image Processing*, 15(12):3736–3745, 2006.
- [10] Y.C. Pati, R. Rezaifar, and P. S. Krishnaprasad. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition. *Conference Record of The 27th Asilomar Conference Signals, Systems and Computers*, pages 40–44 vol.1, 1993.
- [11] S.G. Mallat and Z. Zhang. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 41(12):3397–3415, 1993.
- [12] I.F. Gorodnitsky and B.D. Rao. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: a re-weighted minimum norm algorithm. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 45(3):600–616, 1997.
- [13] S. Chen, D. Donoho, and M. Saunders. Atomic decomposition by basis pursuit. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(1):33–61, 1998.
- [14] Astrium TerraSAR-X sample imagery.: <http://www.astriumgeo.com/en/23-sample-imagery>.