

# SAR Görüntü Oluşturma ve Uzam Değişir Odaklama için Seyreklik Güdümlü Bir Yaklaşım

## A Sparsity-driven Approach for SAR Image Formation and Space-variant Focusing

N. Özben Önhon ve Müjdat Çetin

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Sabancı Üniversitesi  
Orhanlı, Tuzla, 34956 İstanbul

onhon@sabanciuniv.edu, mcetin@sabanciuniv.edu

### ÖZETÇE

Sentetik açıklıklı radar (SAR) görüntüleme sistemlerinde, algılama platformunun yerine ve gözlemlenen sahnedeki nesnelerin hareketlerine dair belirsizlikler, önemli problem kaynaklarıdır. Bu tip belirsizlikler SAR verisinde faz hatalarına, buna bağlı olarak, oluşturulan görüntüde bulanıklaşmaya neden olurlar. Algılama platformunun yerinin tam doğru belirlememesinin neden olduğu bulanıklaşma uzam değişmezdir, yani sahnedeki bütün noktalar için bulanıklaşma aynı miktardadır. Bununla birlikte, sahnedeki hareketli hedefler, oluşturulan görüntüde uzam değişir bulanıklaşmaya neden olurlar, yani sadece o hareketli hedeflerin bulunduğu kısımlarda, hareketin hızı ve yönüne bağlı olarak bulanıklaşma olurken hareketsiz arkaplanda bulanıklaşma görülmez. Odaklanmış bir görüntü elde etmek için hareketli nesnelerin neden olduğu faz hatalarının giderilmesi gerekmektedir. Sahnede birbirinden farklı hızlara sahip noktasal hedefler bulunması durumundaki senaryolar için, görüntülenmek istenen sahnenin genellikle seyrek yapıda olduğunu da gözönüne alarak, aynı anda hem görüntü oluşturan hem de hareketli hedeflerden kaynaklanan bulanıklaşmayı gideren seyreklik güdümlü bir yöntem sunuyoruz. Sunulan yöntem, karesel olmayan düzenlileştirilmeye dayalı bir çerçevede hem görüntü hem de faz hatasına bağlı bir amaç fonsiyonunun eniyilmesi üzerine kuruludur.

### ABSTRACT

In synthetic aperture radar (SAR) imaging, the uncertainties on the position of the sensing platform and on the motion of objects in the observed scene, are important problem sources. These types of uncertainties cause phase errors in the SAR data and subsequently defocusing in the formed image. The defocusing caused by the inexact knowledge of the position of the sensing platform is space-invariant, i.e., the amount of defocusing is same for all points in the scene. However, moving targets in the scene cause space-variant defocusing, i.e., the defocusing

arises only in the parts of the image including the moving targets, whereas the stationary background is not defocused. To obtain a focused image, phase errors caused by the moving objects need to be removed. In scenarios involving of multiple point targets moving with different velocities in the scene, considering that the scene to be imaged is usually sparse, we present a sparsity-driven method for joint SAR imaging and removing the defocus caused by moving targets. The proposed method is based on the optimization of a cost function of both the image and phase errors, in a nonquadratic regularization based framework.

### 1. GİRİŞ

Sentetik açıklıklı radar (SAR) görüntülemesinde, algılama platformunun yeri veya görüntülenmek istenen sahnedeki nesnelerin hareketlerine dair belirsizlikler, oluşturulan görüntüde bozukluklara yol açmaktadır. SAR algılama platformunun yerinin doğru olarak belirlenememesi, SAR algılayıcısı tarafından gönderilen sinyalin görüntülenecek alanın merkezine gidip geri gelmesi için gereken zamanın doğru olarak hesaplanamamasına neden olmakta, bunun sonucunda da elde edilen SAR verisinde faz hataları ortaya çıkmaktadır [1]. Bu tip faz hataları oluşturulan görüntünün her yerini aynı şekilde etkiler ve görüntünün bulanıklaşmasına neden olur. Görüntülenecek sahnede hareketli nesnelerin bulunması da oluşturulan görüntüde bulanıklaşmaya neden olmaktadır, fakat bu bulanıklaşma uzam değişirdir, yani sadece hareketli nesnenin olduğu kısımda ortaya çıkar, sahnenin geri kalan hareketsiz kısmında bulanıklaşma olmaz [2]. Bu nedenle, uzam değişmez bulanıklaşmaya neden olan faz hataları için geliştirilen otomatik odaklama teknikleri farklı hızlara sahip nesnelerin bulunduğu bir sahnenin görüntülenmesinde ortaya çıkan bulanıklaşmayı gideremezler. Oluşturulan görüntüdeki uzam değişir bozukluklar sahnedeki nesnelerin yer değiştirme, dönme, yuvarlanma gibi hareketlerine bağlı olabileceği gibi nesnelerin oldukları yerde titreşmesi ya da sallanması gibi rasgele hareketliliğe bağlı olarak da ortaya çıkar. Hareket eden bir nesnenin azimut yönündeki hızı, nesnenin oluşturulan görüntüde azimut yönünde yayılarak, bulanıklaşmasına neden olurken, men-

Bu çalışma TÜBİTAK'ın 105E090 sayılı projesi kapsamında ve bir TÜBA-GEBİP ödülü ile desteklenmiştir.

zil yönündeki hızı, nesnenin azimut yönünde ötelenmiş ve hem menzil hem de azimut yönünde bulanıklaşmaya uğramış şekilde görüntülenmesine neden olmaktadır [3]. Nesnenin bulunduğu yerdeki titreşme ve sallanma gibi hareketleri de azimut yönünde bulanıklaşmaya neden olurlar [4]. Hareketli nesnelerin görüntülenmesinde ortaya çıkan bulanıklaşmayı gidermek için çok kullanılan bir yöntem, oluşturulan görüntüyü her bir parçadaki hata uzam değişmez olacak şekilde parçalara ayırmak, her parçaya ayrı ayrı geleneksel bir otomatik odaklama tekniğini uyguladıktan sonra birleştirmektir [3, 5]. Bu tip yaklaşımlar geleneksel yolla oluşturulan görüntünün sonradan işlenmesine dayanmaktadır.

Geleneksel görüntüleme, yankulak ve beneklenme gibi sorunlarla başedememekte, seyrek açıklık senaryolarında veya veri eksik olduğunda iyi sonuçlar vermemektedir. Diğer tarafta düzenlileştirilmeye dayalı görüntü oluşturma teknikleri SAR sistemleri için uygulanmış ve bu yöntemlerin geleneksel görüntülemeye karşı birçok üstünlüğü gösterilmiştir [6]. Bu yöntemler eksik veri ve seyrek açıklık durumlarında ortaya çıkan problemlerle başedebilmektedir. Ayrıca, bu yöntemler görüntülenecek sahneye ilgili önsel bilginin görüntülemeye dahil edilmesini sağlayarak daha yüksek çözünürlüklü, görüntünün bastırıldığı görüntüler elde edilmesini sağlarlar.

Bu gözlemlere dayanarak ve SAR'la görüntülenecek alanın çoğu zaman seyrek yapıda olduğunu gözönüne alarak, görüntü oluşturulurken uzam değişmez bulanıklaşmaya neden olan faz hatalarının düzeltilmesini sağlayan karesel olmayan düzenlileştirilmeye dayalı bir çerçeve önermiştik [7, 8]. Bu çalışmamızda bu çerçeveyi genelleştirerek, uzam değişir bulanıklaşmaya neden olan faz hatalarının giderilmesini ve aynı anda seyreklik güdümlü görüntüleme yapmayı sağlayan bir yöntem sunuyoruz. Yöntem, hem sahneye hem de faz hatasına bağlı bir amaç fonksiyonunun koordinat inışı tekniğiyle yinelemeli şekilde enküçültülmesine dayanmaktadır. Her yinelemenin ilk basamağında sahnenin kestirimi bulunur ve ikinci basamakta bulunan sahne kestirimi kullanılarak faz hatası kestirilir ve düzeltilir. Burada, görüntülenmek istenen sahnedeki nesnelerin sadece azimut yönünde bulanıklaşmaya neden olacak şekilde bir harekete sahip oldukları varsayılmaktadır. Sunulan yöntem noktasal hedefler içeren sentetik sahnelere ait verilere uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

## 2. SAR GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA MODELİ

SAR genellikle bir uçaktan ya da uydudan yeryüzündeki belirli bir alanın ya da hedefin görüntülenmesinde kullanılır. SAR algılayıcısı uçuş yolu boyunca belirli noktalarda yeryüzüne sinyal gönderir ve yeryüzünden yansıyan sinyalleri toplar. Çoğu SAR uygulamasında FM ötüş sinyalleri kullanılır. Bir FM ötüş sinyali :

$$s(t) = Re \{ \exp[j(\omega_0 t + \alpha t^2)] \} \quad (1)$$

şeklinde.  $\omega_0$  merkezi frekans,  $2\alpha$  ötüş hızıdır. Yeryüzünden yansıyıp geri dönen sinyal, gönderilen ötüş sinyaliyle görüntülenecek alanın o azimut noktasına tekabül eden gözlem

açısındaki izdüşümünün evrişimidir.

$$q_m(t) = Re \left\{ \int p_m(u) \exp[j[\omega_0(t - \tau_0 - \tau(u)) + \alpha(t - \tau_0 - \tau(u))^2]] du \right\} \quad (2)$$

Burada  $p_m(u)$ , görüntülenecek alanın  $m$ . gözlem açısındaki (azimut noktasındaki) izdüşümüdür. SAR platformundan sahne merkezine uzaklık  $d_0$  olarak adlandırılırsa, menzil yönünde  $d_0 + u$  uzaklığındaki bir yansıtıcıdan yansıyan sinyalin uğradığı gecikme  $\tau_0 + \tau(u)$  kadardır. Burada  $\tau_0$ , SAR'dan gönderilen sinyalin sahne merkezine gidip geri gelmesi için gereken zamandır. Görüntü oluşturmak için kullanılan veri, toplanan sinyallerin belli bir ön işlemden geçirilmesinden sonra elde edilir. Bu işlem hedeften geri dönen sinyalin gönderilen FM ötüş sinyalinin eşvreli ve dördün halleriyle çarpılıp bir alçak geçiren süzgeçten geçirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlemden sonra elde edilen SAR verisiyle görüntülenilen alan arasındaki ilişki

$$U = \frac{2}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0)) \quad (3)$$

olmak üzere

$$r_m(t) = \iint_{x^2+y^2 \leq L^2} F(x, y) \exp\{-jU(x \cos \theta + y \sin \theta)\} dx dy \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $L$ , SAR'ın aydınlattığı alanın yarıçapını,  $F(x, y)$  görüntülenecek sahnenin yansıtırlıklarını,  $\theta$  ise  $m$ . azimut pozisyonundaki gözlem açısını göstermektedir. Tüm gözlem açılarından geri dönen sinyallerin hepsi iki boyutlu uzamsal sıklık uzayında birleştirildiğinde görüntülenilen sahnenin yansıtırlıklarının iki boyutlu Fourier dönüşümü elde edilir. Bu sürekli değişkenli bir modeldir. Bütün gözlem açılarından toplanan sinyalleri içeren ayrık gözlem modeli ise (5)'te görüldüğü gibidir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ r_M \end{bmatrix}}_r = \underbrace{\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ C_M \end{bmatrix}}_C f \quad (5)$$

Burada  $r$ , örneklenmiş gözlem verisi vektörü,  $C$  gözlem çekirdeği,  $M$  toplam azimut noktası sayısı ve  $f$  de görüntülenecek sahnenin yansıtırlıklarının bir kolon vektörüne yığılanmış halidir. Başka bir ifadeyle,  $r$  SAR verisi sahnedeki bütün noktalara ait SAR verilerinin toplamıdır.

$$r = \underbrace{C_{kln-1} f(1)}_{rp_1} + \underbrace{C_{kln-2} f(2)}_{rp_2} + \dots + \dots + \underbrace{C_{kln-I} f(I)}_{rp_I} \quad (6)$$

Burada,  $C_{kln-i}$  model matrisinin  $i$ . kolonunu,  $f(i)$  sahnedeki  $i$ . noktadaki karmaşık değerli yansıtırlığı,  $rp_i$  de  $i$ . noktaya ait SAR verisini göstermektedir.  $I$  sahnedeki toplam nokta sayısıdır. Görüntülenecek sahnede azimut yönünde hareket eden ya da titreşen nesnelere bulunması halinde oluşturulan görüntüde o nesnelerin olduğu yerlerde azimut yönünde

bulanıklaşma oluşacaktır. Bu bulanıklaşma, o hareketli noktaya ait veride azimut yönünde değişim gösteren bir faz hatası oluşmasından kaynaklanmaktadır. Sahnedeki  $i$ . nokta olan  $f(i)$ 'nin azimut yönünde hareket halinde ya da durduğu yerde rasgele titreştiğini varsayalım. Bu noktaya ait SAR verisinin hareketsiz haldeki durumuyla ilişkisi (7)'de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} rp_{i_{1e}} \\ rp_{i_{2e}} \\ \vdots \\ rp_{i_{Me}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\phi_i(1)} rp_{i_1} \\ e^{j\phi_i(2)} rp_{i_2} \\ \vdots \\ e^{j\phi_i(M)} rp_{i_M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Burada,  $\phi_i$ ,  $f(i)$  noktasının hareketinden kaynaklanan azimut yönünde değişen faz hatasını,  $rp_i$  ve  $rp_{ie}$ ,  $f(i)$ 'nin sırasıyla, durağan ve hareket halinde olması durumlarına ait SAR verilerini göstermektedir. Benzer şekilde,  $f(i)$ 'nin durağan ve hareket halinde olması durumları arasındaki ilişki, model matrisi cinsinden (8)'de görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} C_{kln-i_1}(\phi) \\ C_{kln-i_2}(\phi) \\ \vdots \\ C_{kln-i_M}(\phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\phi_i(1)} C_{kln-i_1} \\ e^{j\phi_i(2)} C_{kln-i_2} \\ \vdots \\ e^{j\phi_i(M)} C_{kln-i_M} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Burada,  $C(\phi)$  sahnedeki nesnelerin azimut yönündeki hareketini hesaba katan model matrisidir. Sistemde bir de gözlem gürültüsü olduğu düşünülürse, SAR görüntüleme sistemi,  $v$  gözlem gürültüsü,  $g$  de gürültülü gözlem olmak üzere

$$g = C(\phi)f + v \quad (9)$$

şeklinde ifade edilir.  $v$  beyaz Gauss gürültüsüdür. Burada amaç verilen  $g$  verilerinden,  $\phi$  ve  $f$ 'yi kestirmektir.

### 3. ÖNERİLEN YÖNTEM

SAR görüntülemesinde, görüntülenmek istenen sahne çoğu zaman seyrek yapıdadır. Bunu gözönüne alarak, bir yandan görüntü oluşturulurken bir yandan da bazı hedeflerin titreşmesi ya da azimut yönünde hareketi nedeniyle ortaya çıkan bulanıklaşmanın düzeltilmesini sağlayan, seyreklik güdümlü bir yöntem sunuyoruz. Bunu gerçekleştirmek için, sahneye ait önsel seyreklik bilgisinin probleme dahil edildiği, karesel olmayan düzenlemeyle dayalı bir çerçeve kullanmaktayız. Yöntem, (10)'da gösterilen amaç fonksiyonunun hem  $f$  hem de hareketli hedeflerden kaynaklanan faz hatalarına göre koordinat inişi tekniğiyle enküçültülmesiyle uygulanmaktadır.

$$\arg \min_{f, \phi} J(f, \phi) = \arg \min_{f, \phi} \|g - C(\phi)f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (10)$$

Burada,  $C(\phi)$  sahnedeki hedeflerin hareketlerini hesaba katarak oluşturulan model matrisidir. Algoritma yinelemeli olup, her yinelemede ilk basamakta (11)'deki amaç fonksiyonu  $f$ 'ye göre enküçültülür.

$$\hat{f}^{(n+1)} = \arg \min_f J(f, \hat{\phi}^{(n)}) = \arg \min_f \|g - C(\hat{\phi}^{(n)})f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (11)$$

İlk basamakta bulunan sahne kestirimi  $\hat{f}$  kullanılarak,

$$\beta_m = [e^{j\phi_1(m)}, e^{j\phi_2(m)}, \dots, e^{j\phi_I(m)}] \quad (12)$$

olmak üzere, ikinci basamakta (13)'te verilen enküçültme problemi her azimut pozisyonu için çözülür.  $\beta_m$ ,  $m$ . azimut pozisyonunda sahnedeki bütün noktalardan gelen faz hatalarını içeren vektördür.

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_m^{(n+1)} &= \arg \min_{\beta_m} J(\hat{f}^{(n+1)}, \beta_m) = \\ &= \arg \min_{\beta_m} \|g_m - C_m T^{(n+1)} \beta_m\|_2^2 \\ & \text{s.t. } |\beta_m(i)| = 1 \quad \forall i \end{aligned} \quad (13)$$

Burada,  $T$ , ana köşegeni  $\hat{f}(i)$  elemanlarından oluşan bir köşegen matristir.

$$T^{(n+1)} = \text{diag} \{ \hat{f}^{(n+1)}(i) \} \quad (14)$$

(13)'te görülen kısıtlı eniyileme problemi,  $\beta_m(i)$ 'lerin büyüklüklerine ceza uygulayan bir terim içeren (15)'te görülen kısıtsız probleme dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_m^{(n+1)} &= \arg \min_{\beta_m} \|g_m - C_m T^{(n+1)} \beta_m\|_2^2 + \lambda_2 \sum_{i=1}^I (|\beta_m(i)|^q - 1)^2 \\ &= \arg \min_{\beta_m} \|g_m - C_m T^{(n+1)} \beta_m\|_2^2 + \lambda_2 \|\beta_m\|_{2q}^{2q} - 2\lambda_2 \|\beta_m\|_q^q \\ & \quad m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (15)$$

Burada,  $q = 1$  olarak kullanılmıştır. Bu eniyileme probleminin çözülmesi sonucunda elde edilen  $\hat{\beta}_m$  vektörü kullanılarak,

$$B_m^{(n+1)} = \text{diag} \{ \hat{\beta}_m^{(n+1)}(i) \} \quad (16)$$

olmak üzere, model matrisinin  $m$ . azimut pozisyonu için olan kısmı (17)'de görüldüğü gibi güncellenir.

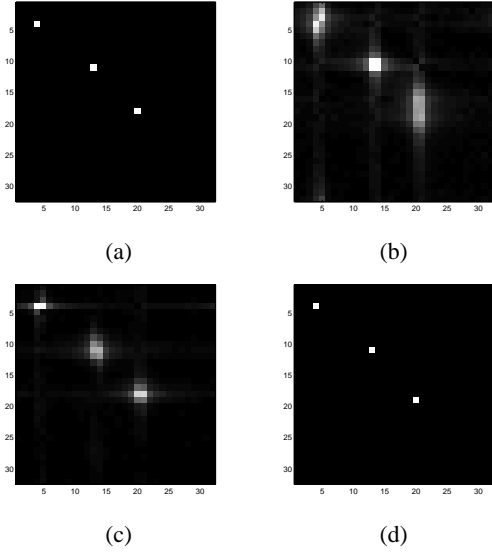
$$C_m(\hat{\phi}^{(n+1)}) = C_m B_m^{(n+1)} \quad (17)$$

Bu faz kestirim kısmı bütün azimut pozisyonları için tamamlandıktan ve model matrisinin tamamı güncellendikten sonra, algoritma bir sonraki yinelemeye geçer.

### 4. DENEY SONUÇLARI

Önerilen yöntemi test etmek için,  $32 \times 32$ 'lik sentetik sahneler kullanılarak deneyler yapılmıştır. Burada, yapılan iki deneye ait sonuçlar sunulmaktadır. İlk deneyde, görüntülenmek istenen sahnede üç tane noktasal hedef bulunmaktadır. Bu hedeflerden birisi (sahnede diğer iki hedefin ortasında bulunan hedef) durağan, diğer iki hedef ise azimut yönünde farklı sabit hızlarla hareket ediyor olarak modellenmiştir. Bunu gerçekleştirmek için bu iki hedefe ait verilere birbirinden farklı karesel faz hataları eklenmiştir. Son olarak da SAR verisinin tamamına SNR değeri 29 dB olacak şekilde gözlem gürültüsü eklenmiştir. İkinci deneyde ise, sahnede dört tane noktasal hedef bulunmaktadır. Hedeflerin hepsinin oldukları yerlerde titreştikleri varsayılmıştır. Bu durumu modellemek için de bu dört hedefe ait verilere birbirinden bağımsız  $[-\pi/2, \pi/2]$  aralığında düzgün dağılımlı rasgele faz hataları eklenmiştir. Bu deney için SNR değeri 22 dB'dir. Her iki deney için de en çok bilinen uzam değişmez otomatik odaklama tekniği olan

PGA (Phase Gradient Autofocus) [9] uygulanmış ve hareketli nesnelerin uzam değışir bulanıklaşmaya neden olmalarından ötürü iyi sonuçlar elde edilemediği görölmüştür. Şekil 1 ve Şekil 2’de sırasıyla birinci ve ikinci deneye ait sonuçlar sunulmaktadır. Sonuçlardan, önerilen yöntemin hareketli hedeflerden kaynaklanan bulanıklaşmayı giderdiği, bir yandan da karesel olmayan düzenlemeyle dayalı bir çerçeve kullanmasından ötürü oluşturulan görüntüde önemli özneliklerin ortaya çıkmasını sağladığı görölmektedir.



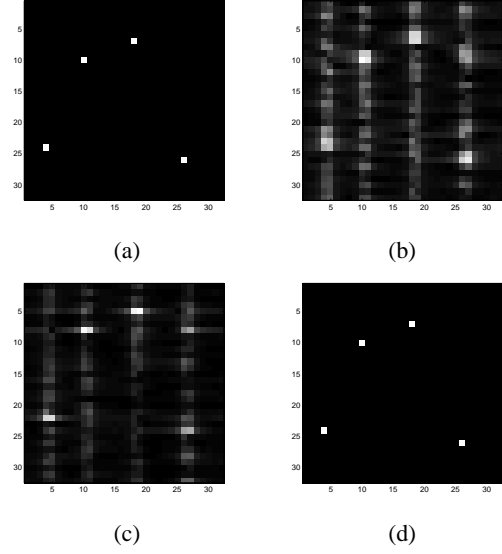
Şekil 1: Birinci deneyin sonuçları. (a) Özgün sahne. (b) Geleneksel görüntü. (c) PGA ile düzeltilen görüntü. (d) Önerilen yöntemle oluşturulan görüntü.

## 5. VARGILAR

SAR görüntülemesinde, oluşturulan görüntüde, sahnedeki noktasal hedeflerin hareketi nedeniyle ortaya çıkan azimut yönündeki bulanıklaşmaları düzelten seyreklik güdümlü bir yöntem sunulmuştur. Karesel olmayan düzenlemeyle dayalı bir çerçeveye sahip bu yöntem, bir yandan seyreklik güdümlü görüntü oluşturma diğer yandan hareketli hedefler nedeniyle görüntüde meydana gelen bulanıklaşmayı giderme işlemlerini aynı anda gerçekleştirme imkanı vermektedir. Yapılan ilk sentetik sahneli deneylerde başarılı sonuçlar elde edilmiş ve fikrin geçerliliği gösterilmiştir. Bundan sonraki çabamız bu yöntemi daha gerçekçi ve karmaşık veriler üzerinde uygulamak yönünde olacaktır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] C. V. Jakowatz, Jr., D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia ve P. A. Thompson, *Spotlight- Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*, Springer, 1996.
- [2] W. G. Carrara, R. M. Majewski ve R. S. Goodman, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Artech House, 1995.



Şekil 2: İkinci deneyin sonuçları. (a) Özgün sahne. (b) Geleneksel görüntü. (c) PGA ile düzeltilen görüntü. (d) Önerilen yöntemle oluşturulan görüntü.

- [3] C. V. Jakowatz, Jr., D. E. Wahl ve P. H. Eichel, ‘Refocus of constant velocity moving targets in synthetic aperture radar imagery’, *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery V, SPIE*, 1998.
- [4] A. R. Fasih, B. D. Rigling ve R. L. Moses, ‘Analysis of target rotation and translation in SAR imagery’, *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, SPIE*, 2009.
- [5] J. Fienup, ‘Detecting moving targets in SAR imagery by focusing’, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, sayfa 794-809, 2001.
- [6] M. Çetin ve W.C. Karl, ‘Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization’, *IEEE Trans. Image Processing*, sayfa 623-631, 2001.
- [7] N. Ö. Önhon ve M. Çetin, ‘A nonquadratic regularization based technique for joint SAR imaging and model error correction’, *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, Proc. SPIE*, cilt 7337, 2009.
- [8] N. Ö. Önhon ve M. Çetin, ‘Joint sparsity-driven inversion and model error correction for radar imaging’, *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing*, sayfa 1206-1209, 2010.
- [9] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia ve C. V. Jakowatz, Jr., ‘Phase Gradient Autofocus - A robust tool for high resolution SAR phase correction’, *IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst.*, cilt 30, sayı 7, sayfa 827-835, 1994.