

# Faz Hatalı SAR Verileri için Karesel Olmayan Düzenlemeye Dayalı Bir Görüntü Oluşturma Tekniği A Nonquadratic Regularization Based Image Reconstruction Technique for SAR Data with Phase Errors

N. Özben Önhon, Müjdat Çetin

Sabancı Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Orhanlı, Tuzla, 34956 İstanbul  
onhon@su.sabanciuniv.edu, mcetin@sabanciuniv.edu

## Özetçe

*Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntülemesinde karşılaşılan önemli problemlerden biri faz hatalarıdır. Faz hataları, SAR'ın bulunduğu platformla hedef arasındaki uzaklığın tam olarak ölçülememesi ya da gönderilen işaretlerin atmosferdeki türbülansa bağlı olarak rasgele gecikmelere uğraması nedeniyle, SAR tarafından gönderilen sinyallerin hedefe gidip geri gelmesi için gereken zamanın tam olarak belirlenememesinden kaynaklanır ve oluşturulan SAR imgesinde çapraz menzil yönünde bulanıklaşmaya neden olurlar. Bu çalışmada, karesel olmayan düzenlemeye dayalı bir çerçevede aynı anda hem görüntüleme hem de faz hatası kestirimi ile düzeltmesi yapan bir yöntem önerilmektedir. Yöntem, hem görüntüye hem de faz hatasına bağlı bir amaç fonksiyonunun eniyilenmesine dayanmaktadır. Deneysel sonuçları, önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir.*

## Abstract

*One of the fundamental problems in Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging is phase errors. Phase errors occur when the time required for the transmitted signal from SAR to the target and back cannot be obtained properly either because the distance between the SAR platform and the target cannot be measured exactly or in the case of random delays in the signal due to propagation in atmospheric turbulence. Phase errors cause blurring of the reconstructed image in the cross range direction. In this study, a nonquadratic regularization-based framework is proposed for joint image formation and phase error removal. The method involves the optimization of a cost function with respect to the image as well as the phase errors. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.*

## 1. Giriş

Günümüzde, uzaktan algılama uygulamalarının önemli bir kısmını Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntülemesi oluşturmaktadır. Bütün görüntüleme sistemlerinde olduğu gibi SAR görüntülemesinde de sistem belirsizlikleri istenilen

kalitede görüntüleme yapılmasını engeller. Bu tip belirsizliklerden biri, her azimut noktasında (yapay açıklık pozisyonu) SAR'dan gönderilen işaretin hedefe gidip geri gelmesi için gereken zamanın tam olarak belirlenememesinde ortaya çıkar. Bu belirsizliğin başlıca sebepleri, SAR platformuyla hedef arasındaki uzaklığın tam olarak ölçülememesi ya da gönderilen işaretlerin atmosferdeki türbülans nedeniyle rasgele gecikmelere uğramasıdır. Bunlar SAR verisinde faz hatalarına neden olurlar ve sonuçta buna bağlı olarak görüntüde bulanıklık oluşur. Elde edilen geleneksel SAR görüntüsünü sonradan işleyerek bu bulanıklığı gidermeye çalışan otomatik odaklama teknikleri olarak da bilinen birçok teknik geliştirilmiştir [1-6]. Ancak SAR verisinin eksik ve gürültülü olduğu durumda geleneksel görüntü kötü olacağı için böyle bir görüntüde faz hatalarının neden olduğu bulanıklaşmayı gidermek ve buna bağlı olarak memnun edici sonuçlar elde etmek zorlaşır. SAR verisinin eksik ve gürültülü olduğu durumlar için düzenlemeye dayalı görüntü oluşturma teknikleri kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [7]. Bu nedenle bu çalışmada da SAR görüntüsünü oluşturmak için karesel olmayan düzenlemeye dayalı görüntü oluşturma tekniği kullanılmıştır. Karesel olmayan düzenlemeye dayalı bir teknikte görüntü oluşturulurken aynı anda bir yandan da faz hatalarının kestirilip düzeltildiği yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntem, hem görüntüye hem de faz hatasına bağlı bir amaç fonksiyonunun koordinat inişi tekniği kullanılarak eniyilenmesine dayanmaktadır. Koordinat inişi tekniği iki basamaktan oluşmaktadır. İlk basamakta amaç fonksiyonu, oluşturulacak görüntüye, ikinci basamakta da faz hatasına göre enküçültülerek yinelemeli olarak sonuca ulaşılır. SAR verileri üzerinde elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir.

## 2. SAR Görüntülemesi

### 2.1. SAR Görüntüleme Modeli

SAR görüntüleme amaçlı kullanılan bir radardır. Genellikle bir uçaktan ya da uydudan yeryüzündeki belirli bir alanın ya da hedefin görüntülenmesinde, SAR algılayıcısı uçuş yolu

---

Bu çalışma TÜBİTAK'ın 105E090 ve Avrupa Komisyonu'nun MIRG-CT-2006-041919 sayılı projeleri kapsamında ve bir TÜBA-GEBİP ödülü ile desteklenmiştir.

boyunca belirli noktalarda yeryüzüne sinyal gönderir ve yeryüzündeki saçıcılardan yansıyan sinyaller toplanır. Görüntüleme için kullanılan veri toplanan sinyallerin demodülasyon da içeren bir ön işlemeden sonra elde edilir. Her azimut noktasında gönderilen sinyal bir ötüş (chirp) sinyalidir ve

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \alpha t^2) \quad (1)$$

şeklinde. Burada  $\omega_0$  taşıyıcı sıklık,  $2\alpha$  ötüş hızıdır. Yeryüzünden yansıyıp geri dönen sinyal, gönderilen ötüş sinyaliyle görüntülenecek alanın o azimut noktasına tekabül eden gözlem açısındaki izdüşümünün evrişimidir.

$$q_\theta(t) = \text{Re} \left\{ \int p_\theta(u) e^{j[\omega_0(t-\tau_0-\tau(u)) + \alpha(t-\tau_0-\tau(u))^2]} du \right\} \quad (2)$$

Burada  $p_\theta(u)$ , görüntülenecek alanın  $\theta$  gözlem açısındaki izdüşümüdür. SAR'ın bulunduğu platformdan görüntülenecek alanın merkezine olan uzaklık  $R$  ve menzildeki herhangi bir yansıtıcıya olan uzaklık  $R + u$  olarak tanımlanıp ışık hızına  $c$  denirse, gönderilen sinyalin uğrayacağı gecikme  $\tau_0 = 2R/c$  ve  $\tau(u) = 2u/c$  olmak üzere  $\tau_0 + \tau(u)$  kadardır. Her azimut noktası için geri dönen sinyal  $q_\theta(t)$ 'den, alanın izdüşümü  $p_\theta(u)$ 'yu elde edebilmek için bir ters evrişim işlemi uygulanmalıdır. Bu işlem hedeften geri dönen sinyalin gönderilen FM ötüş sinyalinin (3)'te görülen eşvreli ve dördün halleriyle çarpılıp bir alçak geçiren süzgeçten geçirilmesiyle gerçekleştirilir. Elde edilen sonuç (4)'te gösterilmiştir [8].

$$\begin{aligned} c_i(t) &= \cos(\omega(t - \tau_0) + \alpha(t - \tau_0)^2) \\ c_o(t) &= -\sin(\omega(t - \tau_0) + \alpha(t - \tau_0)^2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$r_\theta(t) = \int p_\theta(u) e^{j\left[\frac{-2u}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0))\right]} du \quad (4)$$

Uzamsal sıklık

$$U = \frac{2}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0)) \quad (5)$$

olarak ifade edilirse

$$r_\theta(t) = \int p_\theta(u) e^{-juU} du \quad (6)$$

bulunur ve buradan da her azimut noktasında geri dönen sinyalin görüntülenen alanın o noktadaki izdüşümünün bir boyutlu Fourier dönüşümü olduğu görülmektedir. Tüm azimut noktalarından geri dönen sinyallerin hepsi iki boyutlu uzamsal sıklık uzayında birleştirildiğinde görüntülenen alanın iki boyutlu Fourier dönüşümü elde edilir. Bu veriler iki boyutlu uzamsal sıklık uzayında kutupsal bir ızgara üzerinde bulunurlar. SAR görüntülemesinin, bilgisayarlı tomografi (BT) görüntülemesiyle olan benzerliğinden yararlanıldığında, BT'den bilinen izdüşüm-dilim savı [9] kullanılarak  $r_\theta(t)$ 'nin, görüntülenen alan  $f(x,y)$ 'nin iki boyutlu Fourier dönüşümünden  $\theta$  açısında alınmış sonlu bir dilim olduğu

söylenilebilir. Buna bağlı olarak görüntülenen alan ile SAR verisi arasındaki ilişki şöyledir.

$$Z(U) = r_\theta(t) = \iint_{x^2+y^2 \leq L^2} f(x,y) e^{-jU(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (7)$$

Burada  $L$  görüntülenen alanın yarıçapıdır. (7)'deki ifade derlitoplu olarak  $r_\theta(t) = (C_\theta f(x,y))(t)$  şeklinde yazılabilir. Bu sürekli değişkenli bir modeldir. Uygulamada kullanılmak üzere bu model örneklenerek (8)'de görülen ayrık gözlem modeli elde edilir [7].

$$\begin{bmatrix} r_{\theta 1} \\ r_{\theta 2} \\ \vdots \\ r_{\theta M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta 1} \\ C_{\theta 2} \\ \vdots \\ C_{\theta M} \end{bmatrix} f \quad (8)$$

Burada  $r$ , örneklenmiş gözlem verisi vektörü,  $C$  gözlem çekirdeği,  $M$  toplam azimut noktası sayısı ve  $f$  de görüntülenecek alanın bir kolon vektörüne yığılan halidir. Sistemde bir de gözlem gürültüsü olduğu düşünülürse, SAR görüntüleme sistemi,  $v$  gözlem gürültüsü,  $g$  de gürültülü gözlem olmak üzere

$$g = Cf + v \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Gözlem gürültüsü genellikle beyaz Gauss gürültüsü olarak kabul edilir. Bu şekilde ifade edilebilen sistemlerde düzenleştirmeye dayalı görüntü oluşturma teknikleri kullanılabilir.

## 2.2. Düzenleştirmeye Dayalı Görüntü Oluşturma

SAR görüntülemesi için kullanılan geleneksel yöntemde, SAR verilerinin uzamsal sıklık düzleminde üzerinde buldukları kutupsal ızgaradan dikdörtgensel ızgaraya aradeğerleme yapılarak örneklenmesinden sonra iki boyutlu ters hızlı Fourier dönüşümlerinin alınmasıyla SAR imgesi oluşturulur. Geleneksel yöntemin dışında, düzenleştirmeye dayalı görüntü oluşturma tekniği SAR görüntülemesinde kullanılmış ve başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [7]. Bu yöntemin geleneksel yöntemle göre önemli üstünlükleri, eksik ve gürültülü gözlemlerin varlığından çok etkilenmemesi ve görüntülenen sahneye ilişkin önsel bilginin kullanılmasına olanak vererek görüntüdeki önemli özneliklerin ortaya çıkmasını sağlamasıdır. Düzenleştirmeye dayalı görüntü oluşturmada, (10)'da amaç fonksiyonu verilen eniyileme problemi  $f$ 'ye göre enküçültülerek çözümler.

$$\hat{f} = \arg \min_f \|g - Cf\|_2^2 + \lambda \|f\|_k^k \quad (10)$$

Burada  $\lambda$  düzenleştirme parametresidir. (10)'daki ifade  $k=2$  için Tikhonov düzenleştirmesidir. Tikhonov düzenleştirmesi için sonuç analitik olarak elde edilebilir.  $k < 2$  için ise problem yinelemeli olarak çözülür. Bununla birlikte  $l_k - norm$  kısıtlarının  $k < 2$  için  $k=2$  durumuna göre daha yüksek çözünürlüklü spektral kestirimler verdiği gösterilmiştir. Ayrıca  $k$  küçüldükçe büyük piksel değerlerine

daha az ceza uygulanmaktadır [7]. Bunun için görüntülenen alanın seyrek (sparse) olması durumunda genellikle  $k=1$  olarak seçilir. SAR görüntülemesinde de çoğu zaman görüntülenecek alan seyrek olduğu için bu çalışmada da düzenleme  $k=1$  seçilerek uygulanmıştır.

### 3. Faz Hataları

2. bölümdeki SAR görüntülemesine ilişkin bütün ifadeler sistemde hiçbir belirsizliğin, modelde hiçbir hatanın olmadığı durumlar içindir. Yani  $C$ 'nin mükemmel olarak bilindiği varsayılmaktadır. Oysa SAR tarafından gönderilen sinyallerin hedefe gidip geri gelmesi için gereken zaman olan demodülasyon zamanı tam doğru olarak belirlenemiyorsa, model matrisi  $C$  tam doğru olarak bilinemez. Bu durumda, hedeften geri dönen sinyaller, ön işleme sırasında (3)'teki sinyaller yerine (11)'de görülen zaman hatalı ifadelerle çarpılır.

$$\begin{aligned} c_i(t) &= \cos(\omega(t - \tau_0 + \varepsilon) + \alpha(t - \tau_0 + \varepsilon)^2) \\ c_o(t) &= -\sin(\omega(t - \tau_0 + \varepsilon) + \alpha(t - \tau_0 + \varepsilon)^2) \end{aligned} \quad (11)$$

Burada  $\varepsilon$ , demodülasyon zaman hatasıdır ve SAR platformundan hedef merkezine olan  $R$  uzaklığının ölçülmesinde yapılacak hataya  $\Delta R$  denirse  $\varepsilon = 2\Delta R / c$  şeklinde ifade edilir ve her gözlem açısı için farklıdır. Demodülasyon zaman hatası, ön işlemeden sonra elde edilen SAR verisinde faz hatasına karşılık gelir. Faz hatalı SAR verisi ile faz hatasız veri arasındaki ilişki bazı yaklaşımlardan sonra

$$Z_\varepsilon(U) = e^{j\frac{\alpha}{2}U} Z(U) \quad (12)$$

olarak elde edilir [8]. Daha önce (5)'te gösterilen uzamsal sıklık ifadesi (12)'de kullanıldığında aşağıdaki ifade bulunur..

$$Z_\varepsilon(U) = e^{j\varepsilon\omega_0} e^{j\varepsilon(2\alpha(t-\tau_0))} Z(U) \quad (13)$$

$2\alpha(t - \tau_0)$  ifadesi, genelde  $\omega_0$ 'a oranla oldukça küçük olduğu için ihmal edilirse

$$Z_\varepsilon(U) = e^{j\varepsilon\omega_0} Z(U) \quad (14)$$

olarak yazılabilir [8]. Eldeki veriler sürekli olmayıp örneklenmiş veriler olduğu için (14)'teki ifadenin değişken değiştirilerek (15)'teki gibi yazılması faz hatasının oluşturulacak imgeyi nasıl etkilediğinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.

$$Z_\varepsilon(l, m) = e^{j\phi(m)} Z(l, m) \quad (15)$$

Burada  $l$  menzil yönündeki ayırık uzamsal sıklık noktalarını,  $m$  de yapay açıklık pozisyonlarını göstermektedir.  $\phi(m) = \varepsilon(m)\omega_0$  faz hatasını belirtmektedir. Görüldüğü gibi faz hatası her yapay açıklık pozisyonu için farklı bir değer almaktadır. Bu nedenle faz hatalarının SAR imgesinde çapraz menzil doğrultusunda bulanıklaşmaya neden olduğu görülür. Otomatik odaklama tekniklerinin genel yaklaşımı geleneksel

olarak oluşturulan SAR imgesi üzerinden faz hatası kestirimi yapmak ve kestirilen faz hatasını kullanarak SAR verilerini düzeltmek ve bu düzeltilmiş verilerden de yeni bir görüntü oluşturmaktır. Bu çalışmada ise faz hatalı SAR imgesini oluşturma aşamasında kestirilmekte ve giderilmektedir. Önerilen yöntemde, bir yandan karesel olmayan düzenlemeye dayalı tekniklerle görüntü oluşturulurken aynı anda bir yandan da faz hataları kestirilir. Kestirilen faz hataları, hatalı model matrisi  $C$ 'nin düzeltilmesinde kullanılır.

### 4. Önerilen Yöntem

SAR görüntülemesinde görüntülenecek alan genellikle seyrek yapıda olduğu için imge oluşturma kısmında bölüm 2.2'de anlatılan yöntem bağlamında  $\ell_1$  - *norm* düzenlemesi kullanılmıştır. Yöntem, aşağıdaki amaç fonksiyonunun hem  $f$  hem de  $\phi$ 'ye göre koordinat inişiyile yinelemeli olarak enküçültülmesi üzerine kuruludur.

$$J(f, \phi) = \|g - C(\phi)f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (16)$$

Burada  $g$ , daha önce (8)'de gösterilmiş olan ve tüm gözlem açılarından elde edilen  $r_\theta(t)$  ya da diğer gösterimiyle  $Z(U)$  verilerinin örneklenmiş halini içeren gözlem vektörü  $r$ 'nin gürültülü halidir. Bu durum Denklem (9)'da da görülmektedir. Her yinelemenin ilk basamağında  $J(f, \phi)$  amaç fonksiyonu  $f$ 'ye göre enküçültülür.

$$\hat{f}^{(n+1)} = \arg \min_f J(f, \phi^{(n)}) \Rightarrow \arg \min_f \|g - C(\phi^{(n)})f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (17)$$

Burada  $n$  yineleme sayısını göstermektedir. İkinci basamakta ise birinci basamakta bulunan  $f$  kullanılarak, faz hatası her azimut noktası için aşağıdaki eniyileme problemi çözülerek bulunur.

$$\hat{\phi}^{(n+1)} = \arg \min_\phi J(\hat{f}^{(n+1)}, \phi) \Rightarrow \hat{\phi}_m = \arg \min_\phi \|g_m - C_m(\phi)\hat{f}^{(n+1)}\|_2^2 \quad (18)$$

$m = 1, 2, \dots, M$  için

$g_m$  SAR verisinin,  $C_m(\phi)$  de model matrisinin  $m$ . azimut noktasına ait kısmını,  $M$  de toplam azimut noktası sayısını göstermektedir. (18)'deki ifade her azimut noktası için açıldığında çözüm analitik olarak bulunur. Bulunan faz hatası kullanılarak model matrisi  $C$  güncellenir ve bir sonraki yinelemeye geçilir. Yineleme

$$\|f^{(n+1)} - f^{(n)}\|_2^2 / \|f^{(n)}\|_2^2 \quad (19)$$

oranı belli bir eşikten küçük oluncaya kadar devam eder ve bu şekilde faz hatalarının etkileri giderilmiş SAR imgesi elde edilir.

### 5. Deneysel Sonuçları

Önerilen yöntem  $32 \times 32$ 'lik sentetik bir sahne ve A.B.D Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'nın sağladığı içinde bir iş makinesinin (bekho) bulunduğu sahneye ait gerçekçi elektromanyetik benzetim verileri için uygulanmıştır. Bu veri kümesi boş uzayda toplanan geniş bantlı (7-13 GHz), tam kutuplaşmalı, karmaşık değerli geri saçılım sinyallerinden

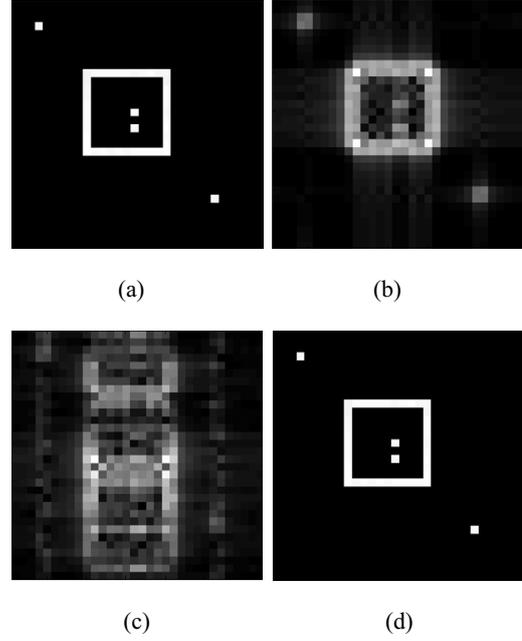
oluşmaktadır. Her iki deneyde de veriye  $[-\pi/2, \pi/2]$  aralığında düzgün dağılımlı bir rasgele faz hatası eklenmiştir. Şekil 1'de sentetik sahne için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Faz hatası olduğunda geleneksel yöntemle oluşturulan görüntüden özgün sahneye ait pek bir bilgi çıkarılamazken önerilen yöntemle oluşturulan görüntü, özgün sahneyi görsel olarak ayırt edilemeyecek kadar iyi yansıtmaktadır. Şekil 2'de ise bekho verisi için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Önerilen yönteme dayanılarak bulunan sonuç, yöntemin verideki faz hatalarını büyük bir doğrulukla kestirip düzelttiğini göstermektedir.

## 6. Vargılar

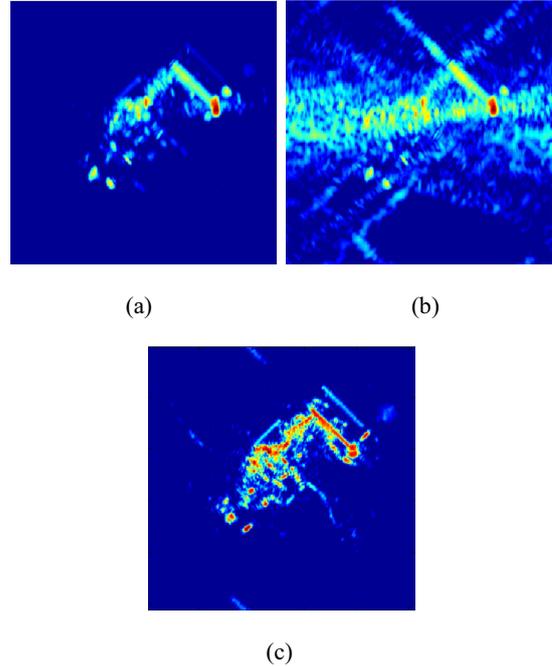
Bu çalışmada, faz hatalı SAR verilerinin görüntülenmesinde karesel olmayan düzenlemeyle dayalı bir görüntüleme yöntemi önerilmiştir. Yinelemeli bir algoritmaya sahip bu yöntemde, her yinelemede bir yandan görüntü oluşturma adımları atılırken bir yandan da faz hataları kestirilip düzeltilmektedir. Önerilen yöntemin, faz hatalarını görüntü oluşturma aşamasında gidermesi, eksik ve gürültülü gözlemlerin varlığından çok etkilenmemesi ve düzenleme kullanıldığı için görüntüdeki önemli özniteliklerin ortaya çıkmasını sağlaması gibi bir çok avantajı bulunmaktadır. Yöntemin etkinliği yapılan deneylerde de görülmüştür.

## 7. Kaynakça

- [1] D.E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia and C. V. Jakowatz, "Phase Gradient Autofocus – A robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst.*, vol.30, no. 3, Jul. 1994.
- [2] W. D. Brown and D. C. Ghiglia, "Some methods for reducing propagation-induced phase errors in coherent imaging systems—I:Formalism," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 5, pp. 924–942, 1988.
- [3] D. C. Ghiglia and W. D. Brown, "Some methods for reducing propagation-induced phase errors in coherent imaging systems—II: Numerical results," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 5, pp. 943–957, 1988.
- [4] C. E. Mancill and J. M. Swiger, "A map drift autofocus technique for correcting higher-order SAR phase errors," in *Proc. 27th Annual Tri-Service Radar Symp.*, Monterey, CA, Jun. 1981, pp. 391–400.
- [5] L. Xi, L. Guosui, and J. Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 35, no. 10, pp. 1240–1252, Oct. 1999.
- [6] F. Berizzi and G. Corsini, "Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization," *IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst.*, vol. 32, no. 7, pp. 1185–1191, Jul. 1996.
- [7] M. Çetin and W. C. Karl, "Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization," *IEEE Trans. Image Processing* **10**, pp. 623–631, Apr. 2001.
- [8] C. V. Jakowatz, Jr., D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*. Norwell, MA: Kluwer, 1996.
- [9] Kak A. C. ve Slaney M., "*Principles of computerized tomographic imaging*," IEEE Press, New York, 1988.



Şekil 1: (a) Özgün sentetik sahne (b) Faz hatasız durum için geleneksel yöntemle oluşturulan görüntü (c) Faz hatalı durum için geleneksel yöntemle oluşturulan görüntü (d) Faz hatalı durum için önerilen yöntemle oluşturulan görüntü.



Şekil 2: (a) Faz hatasız durum için geleneksel görüntü (b) Faz hatalı durum için geleneksel görüntü (c) Faz hatalı durum için önerilen yöntemle oluşturulan görüntü.