

Seyreklik GÜdümlü Odaklanmış SAR Görüntü Oluşturma

Sparsity-driven Focused SAR Image Formation

N. Özben Önhon, Müjdat Çetin

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

Özetçe

Görüntüleme sistemlerinin çoğu gözlem modelindeki hatalardan olumsuz etkilenmektedir. Bunun en belirgin örneklerinden biri sentetik açıklıklı radar (SAR) görüntülemesinde ortaya çıkar. SAR algılama platformuyla görüntülenen sahne merkezi arasındaki uzaklığın tam ölçülemediği ya da gönderilen sinyalde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan rasgele gecikmeler, SAR görüntüleme sisteminde model hatalarına neden olurlar. Bu hatalar SAR verisine faz hataları olarak yansır ve oluşturulan görüntüde bulanıklaşmaya yol açar. Faz hataları çoğunlukla sadece çapraz menzil yönünde değişirler. Bununla birlikte, birçok durumda hem menzil hem de çapraz menzil yönünde değişen 2 boyutlu faz hatalarıyla da karşılaşmak mümkündür. Bu çalışmada, SAR sistemleri için aynı anda hem görüntüleme hem de faz hatası kestirimi yapan, seyreklik güdümlü bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem hem 1 boyutlu hem de 2 boyutlu faz hatalarını düzeltebilmektedir. Deney sonuçları önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir.

Abstract

Most imaging systems are adversely affected by the errors in the observation model. One significant example is encountered in synthetic aperture radar (SAR) imaging. Inexact measurement of the distance between the SAR sensing platform and the scene center or random delays on the transmitted signal result in model errors. These errors appear as phase errors in the SAR data and they cause defocusing of the reconstructed image. Mostly, phase errors vary only in the cross-range direction. However, in many scenarios, it is possible to encounter 2D phase errors, which are both range and cross-range dependent. In this study, a sparsity-driven method for joint SAR imaging and phase error estimation is proposed. This method is able to correct 1D as well as 2D phase errors. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

1. Giriş

Birçok görüntüleme sisteminde model hataları en önemli sorun kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Bu tip hatalar genellikle algılama platformu ya da gözlemlenen nesnenin hareketinin ya da yerinin tam doğru olarak ölçülemediğinden kaynaklanır. Ayrıca bazı çevresel etkiler de bu tip model hatalarına neden olurlar. Model hatalarına ilişkin en iyi örneklerden biri sentetik açıklıklı radar (SAR) görüntülemesinde ortaya çıkar. SAR tarafından gönderilen

sinyalin görüntülenecek alanın merkezine gidip geri gelmesi için gereken süre tam doğru olarak ölçülemeyebilir. Bunun nedenlerinden biri SAR platformuyla görüntülenecek alanın merkezi arasındaki uzaklığın ölçümündeki hatalar, diğer bir nedeni de atmosferdeki türbülans vb. çevresel etkilerden ötürü iletilen sinyalde oluşan rasgele gecikmelerdir [1]. Bu belirsizlikler SAR verisinde faz hatasına neden olur. Faz hataları, oluşturulan (geriçatılan) görüntüde bulanıklaşmaya ve kontrast kaybına neden olur. Her açıklık noktasında yeni bir sinyal gönderildiğinden ve her sinyale ait hata farklı olduğundan en çok karşılaşılan faz hataları sadece çapraz menzil (azimut) yönündedir. Bununla birlikte, düşük frekanslı aşırı genişbantlı (UWB) SAR sistemlerinde iyonosfer kaynaklı saçılma ve dağılma gibi etkiler, oluşturulan görüntüyü hem çapraz menzil hem de menzil yönünde bulanıklaştıran 2 boyutlu faz hatalarının oluşmasına neden olur [2]. Ayrıca, 3 boyutlu SAR görüntülemesinde ortaya çıkan faz hataları da hem çapraz menzil hem de menzil yönündedir. Faz hatalarının giderilmesi için otomatik odaklama teknikleri olarak adlandırılan birçok teknik geliştirilmiştir [3-7]. Bu tekniklerin çoğu geleneksel yolla oluşturulan görüntünün sonradan işlenmesine dayanmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel görüntüleme seyrek açıklık senaryolarında veya veri eksik olduğunda iyi sonuçlar vermemektedir. Diğer tarafta düzenlemeye dayalı görüntü oluşturma teknikleri SAR sistemleri için uygulanmış ve bu yöntemlerin geleneksel görüntülemeye karşı birçok üstünlüğü gösterilmiştir [8]. Bu yöntemler eksik veri ve seyrek açıklık durumlarında ortaya çıkan problemlerle başedebilmektedir. Ayrıca, bu yöntemler görüntülenecek sahneyle ilgili önsel bilginin görüntülemeye dahil edilmesini sağlayarak daha yüksek çözünürlüklü, yankulak ve beneklenme gibi bozuklukların giderildiği görüntüler elde edilmesini sağlarlar. Bununla birlikte, bu yöntemlerde gözlem modelinde hiçbir belirsizliğin olmadığı yani gözlem modelinin hatasız olarak bilindiği kabul edilir. Bütün bu gözlemlere dayanarak ve SAR'la görüntülenecek alanın çoğu zaman seyrek yapıda olduğunu gözönüne alarak, görüntü oluşturulurken faz hatalarının düzeltilmesini sağlayan karesel olmayan düzenlemeye dayalı bir çerçeve öneriyoruz. Bu fikrin sadece çapraz menzil yönünde değişen bir boyutlu faz hataları için olan sınırlı versiyonunu [9]'da sunmuştuk. Önerdiğimiz algoritma yinelemeli olup, hem görüntü hem de faz hatasına bağlı bir amaç fonksiyonunun enküçültülmesine dayanmaktadır. Her yinelemenin ilk basamağında sahnenin kestirimi bulunur ve ikinci basamakta bulunan sahne kestirimi kullanılarak faz hatası kestirilir ve düzeltilir. Faz hatasının boyutuna ve yapısına bağlı olarak, faz hatası kestirimi farklı şekillerde yapılır. Önerilen yöntem

benzer hata tiplerinin görüldüğü SAR dışındaki diğer gözlem sistemleri için de uygulanabilir.

2. SAR Görüntülemesi

2.1. SAR Görüntüleme Modeli

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

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

şeklinde. ω_0 merkezi frekans, 2α 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 θ gözlem açısındaki izdüşümüdür ve

$$p_\theta(u) = \iint_{x^2+y^2 \leq L^2} \delta(u - \cos\theta - \sin\theta) f(x, y) dx dy \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada L , SAR'ın aydınlattığı alanın yarıçapını, $f(x, y)$ görüntülenecek alanı göstermektedir. SAR platformundan sahne merkezine uzaklık R olarak adlandırılırsa, menzil yönünde $R + u$ uzaklığındaki bir yansıtıcıdan yansıyan sinyalin uğradığı gecikme $\tau_0 + \tau(u)$ kadardır. Burada τ_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 eşvrelili ve dördün halleriyle çarpılıp bir alçak geçiren süzgeçten geçirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlemden sonra elde edilen SAR verisiyle görüntülenen alan arasındaki ilişki

$$\Omega(t) = \frac{2}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0)) \quad (4)$$

olmak üzere

$$r_\theta(t) = \int_{-L}^L p_\theta(u) e^{-j\Omega(t)u} du \\ = \iint_{x^2+y^2 \leq L^2} f(x, y) e^{-j\Omega(t)(x \cos\theta + y \sin\theta)} dx dy \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Tüm gözlem açılarından geri dönen sinyallerin hepsi iki boyutlu uzamsal sıklık uzayında birleştirildiğinde görüntülenen alanın iki boyutlu Fourier dönüşümü elde edilir. (5)'teki ifade derli toplu olarak $r_\theta(t) = (C_\theta f(x, y))(t)$ şeklinde yazılabilir. Bu sürekli değişkenli bir modeldir. Bütün gözlem açılarından toplanan

sinyalleri içeren ayrık gözlem modeli ise (6)'da görüldüğü gibidir.

$$\begin{bmatrix} r_{\theta 1} \\ r_{\theta 2} \\ \vdots \\ r_{\theta M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta 1} \\ C_{\theta 2} \\ \vdots \\ C_{\theta M} \end{bmatrix} f \quad (6)$$

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

$$g = Cf + v \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Elde edilen veri görüntülenen alanın iki boyutlu Fourier dönüşümü olduğu için SAR sistemleri için geleneksel görüntüleme yöntemi iki boyutlu ters Fourier dönüşümü almaya dayanmaktadır.

2.2. Faz Hataları

τ_0 'daki herhangi bir hata SAR verisinde faz hatası oluşmasına neden olur. Genellikle faz hatasının her açıklık pozisyonu için sabit kaldığı, yani sadece çapraz menzil yönünde değiştiği varsayılır. Bu çoğu zaman doğru olmasına rağmen, iletilen sinyal üstündeki ionosfer kaynaklı etkiler, özellikle düşük frekanslı UWB SAR sistemlerinde iki boyutlu faz hatalarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca darbeden darbeye frekans seçirmesi, iletim hattındaki yansımalar gibi dalga biçimi hataları da iki boyutlu faz hatalarına sebep olur [10]. İki boyutlu faz hatası olması durumunda SAR verisinin her noktası farklı bir hata içermektedir ve buna bağlı olarak faz hatalı SAR verisiyle faz hatasız veri arasındaki ilişki

$$r_\varepsilon(s) = e^{j\phi(s)} r(s) \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $r(s)$ hatasız SAR verisindeki s . örneği ve $\phi(s)$ bu veri örneğine karşılık gelen faz hatasını belirtmektedir. Faz hatası gözlem modeli hatası olarak düşünüldüğünde (8)'deki ifade

$$C_s(\phi(s)) f = e^{j\phi(s)} C_s f \quad (9)$$

şeklinde yazılır. C_s model matrisinin s . veri noktasına ait kısmını göstermektedir.

3. Seyreklik GÜdümlü Görüntü Oluşturma

Düzenlilemeye dayalı görüntü oluşturma teknikleri görüntülenen sahneye ait önsel bilginin görüntü oluşturma işlemine dahil edilmesine olanak vererek sahne kestiriminin gürbüz olarak yapılmasına olanak sağlar. Bu teknikler görüntü oluşturma problemini bir eniyileme problemi olarak ele alırlar. Amaç fonksiyonu, verideki hataya ait en küçük kareler terimi ile sahneye ait önsel bilgiye ait yan kısıt terimlerinden oluşmaktadır. Bu yan kısıt, sahnenin yapısı hakkındaki bilginin (seyreklik, düzlük vb.) eniyileme problemine katılmasını sağlar. SAR görüntülemesinde, görüntülenecek

sahne çoğu zaman seyrek ve bu durumda enerji konsantrasyonu yüksek çözümlere ihtiyaç vardır. Bunu sağlamak için karesel olmayan bir yan kısıt seçmek uygun olur. Kullanılabilecek birçok karesel olmayan yan kısıt seçeneği vardır. Genel $l_p - norm$ ailesi de bunlardan biridir. $l_p - norm$ kısıtlarının $p < 2$ için $p = 2$ durumuna göre daha yüksek çözünürlüklü spektral kestirimler verdiği gösterilmiştir. Ayrıca p küçüldükçe büyük piksel değerlerine daha az ceza uygulanmaktadır [8]. Bu gözlemlere dayanarak, seyrek çözüm istenen durumlarda, $p < 2$ seçimiyle $l_p - norm$ kısıtlarını kullanmak iyi bir yaklaşımdır. Bunlardan yola çıkarak, (10)'daki yapıda bir eniyileme problemi, seyrek çözüm elde etmek için uygun olur.

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

Burada, λ düzenleme parametresidir.

4. Önerilen Yöntem

Bir yandan SAR görüntüsü oluşturulurken bir yandan da faz hatalarının düzeltilmesini sağlayan, seyreklik güdümlü bir yöntem sunuyoruz. Bu yöntem hem 2 boyutlu hem de 1 boyutlu faz hatalarını düzeltebilmektedir. 2 boyutlu faz hataları ayrıştırılabilen ve ayrıştırılmayan olarak gruplandırılabilir. 2 boyutlu ayrıştırılabilen faz hataları, biri menzil diğeri de çapraz menzil yönünde değişen iki tane 1 boyutlu faz hatasına ayrıştırılabilirken, 2 boyutlu ayrıştırılmayan faz hataları için bu geçerli değildir. M tane çapraz menzil pozisyonu, K tane de menzil pozisyonu olduğu düşünülürse, bilinmeyen sayısı 1 boyutlu faz hataları için M , 2 boyutlu ayrıştırılabilen faz hataları için $M + K$, 2 boyutlu ayrıştırılmayan faz hataları için $M \times K$ tanedir. Bu nedenle 2 boyutlu ayrıştırılmayan faz hatalarının kestirimi diğerlerine göre daha zor bir problemdir. Yöntem, aşağıdaki amaç fonksiyonunun hem f hem de ϕ 'ye göre koordinat inişiyile yinelemeli olarak enküçültülmesi üzerine kuruludur.

$$J(f, \phi) = \|g - C(\phi)f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (11)$$

Her yinelemenin ilk basamağında, ikinci basamakta kullanılacak olan imge, $J(f, \phi)$ amaç fonksiyonu f 'ye göre enküçültülerek bulunur.

$$\hat{f}^{(n+1)} = \arg \min_f J(f, \phi^{(n)}) = \arg \min_f \|g - C(\phi^{(n)})f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (12)$$

Burada n yineleme sayısını göstermektedir. $C(\phi^{(n)})$ de model matrisinin n . iterasyonda bulunan faz hatasına karşılık gelen model matrisini göstermektedir. İkinci basamak faz hatasını kestirim basamağı olup farklı tipteki faz hataları için farklı yollar izlenir.

4.1. 1 Boyutlu Faz Hataları

Sadece çapraz menzil yönünde değişen 1 boyutlu faz hataları, (13)'te verilen amaç fonksiyonunun her azimut noktası için enküçültülmesiyle bulunur [9].

$$\Delta \hat{\phi}_m^{(n+1)} = \arg \min_{\Delta \phi_m} \|g_m - e^{j\Delta \phi_m} C_m(\hat{\phi}_m^{(n)}) \hat{f}^{(n+1)}\|_2^2 \quad (13)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

Burada $\Delta \hat{\phi}_m^{(n+1)}$, $(n+1)$. yinelemede kestirilen faz hatası artışını, g_m SAR verisinin, $C_m(\hat{\phi}_m)$ de model matrisinin m . azimut noktasına ait kısmını göstermektedir. (13)'teki ifade her azimut noktası için açıldığında çözüm

$$R = \text{Re}\{\hat{f}^H C_m(\hat{\phi}_m^{(n)})^H g_m\} \quad I = \text{Im}\{\hat{f}^H C_m(\hat{\phi}_m^{(n)})^H g_m\} \quad (14)$$

olmak üzere

$$\Delta \hat{\phi}_m^{(n+1)} = -\arctan\left(\frac{-I}{R}\right) \quad (15)$$

şeklinde analitik olarak bulunur. Her yinelemede bulunan faz hatası artışı kestirimi kullanılarak model matrisi aşağıda verilen eşitlikte görüldüğü gibi güncellenir.

$$C_m(\hat{\phi}_m^{(n+1)}) = e^{j\Delta \hat{\phi}_m^{(n+1)}} C_m(\hat{\phi}_m^{(n)}) \quad (16)$$

4.2. 2 Boyutlu Ayrıştırılabilen Faz Hataları

SAR verisinde 2 boyutlu ayrıştırılabilen faz hatası olması durumunda çapraz menzil yönündeki değişim bir önceki bölümde anlatıldığı gibi bulunur ve model matrisi güncellenir. Faz hatasının menzil yönündeki değişimi de çapraz menzil yönündeki faz hatası kestirimi işleminin aynısı bu sefer her menzil pozisyonu için uygulanarak bulunur. Model matrisi menzil yönündeki faz hatası kestirimi kullanılarak güncellenir ve bir sonraki yinelemeye geçilir.

4.3. 2 Boyutlu Ayrıştırılmayan Faz Hataları

2 boyutlu ayrıştırılmayan faz hatası olması durumunda SAR verisinin her noktasındaki faz hatası birbirinden farklı ve bağımsızdır. Bu nedenle faz hatası SAR verisinin her noktası için (17)'de verilen amaç fonksiyonunun enküçültülmesiyle bulunur.

$$\Delta \hat{\phi}_s^{(n+1)} = \arg \min_{\Delta \phi_s} \|g_s - e^{j\Delta \phi_s} C_s(\hat{\phi}_s^{(n)}) \hat{f}^{(n+1)}\|_2^2 \quad (17)$$

for $s = 1, 2, \dots, S$

Burada, g_s SAR verisinin S . noktasını, $C_s(\hat{\phi}_s)$ model matrisinin o noktaya karşılık gelen satırını, S de SAR verisindeki toplam nokta sayısını göstermektedir. Faz kestirimi (15)'tekinen benzer olarak

$$R = \text{Re}\{\hat{f}^H C_s(\hat{\phi}_s^{(n)})^H g_s\} \quad I = \text{Im}\{\hat{f}^H C_s(\hat{\phi}_s^{(n)})^H g_s\} \quad (18)$$

göstermek üzere

$$\Delta \hat{\phi}_s^{(n+1)} = -\arctan\left(\frac{-I}{R}\right) \quad (19)$$

şeklinde bulunur.

5. Deneysel Sonuçları

Önerilen yöntem, A.B.D Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'nın sağladığı "MSTAR" veri setinin bir parçası olan "Slicy" verisi [11] için uygulanmıştır. Şekil 1'de "Slicy" verisine, 2 boyutlu ayrıştırılmayan, $[-\pi, \pi]$ aralığında düzgün dağılımlı rasgele bir faz hatası eklendiği durumdaki sonuçlar görülmektedir. Şekil 2'de de aynı veriye 2 boyutlu ayrıştırılabilen faz hatası eklendiği durum için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Buradaki faz hatası, biri menzil diğeri

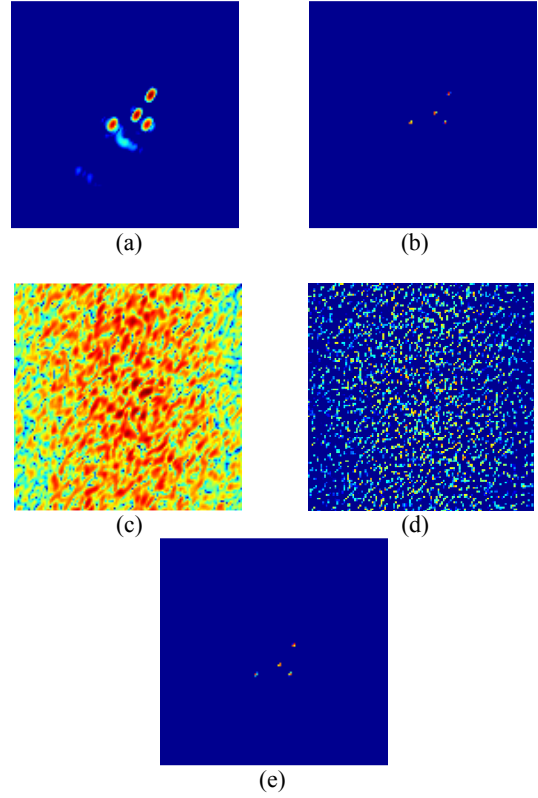
de çapraz menzil yönünde olmak üzere iki tane 1 boyutlu $[-3\pi/4, 3\pi/4]$ aralığında düzgün dağıllımlı rasgele faz hatasından oluşmaktadı. şekillerden görüldüğü üzere faz hatalı durumlarda hem geleneksel yolla oluşturulan görüntü hem de karesel olmayan dzenlileştirmeye dayalı teknikle oluşturulan görüntü, faz hatasız durumlarda oluşturulan görüntülere oranla oldukça bozunmuşlardır. Bununla beraber önerilen yöntemin uygulanmasıyla, aynı anda hem faz hataları düzeltilmiş hem de dzenlileştirmeye dayalı görüntü oluşturmanın sağladığı avantajlardan yararlanılmıştır. Sonuçlar nerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir.

6. Vargılar

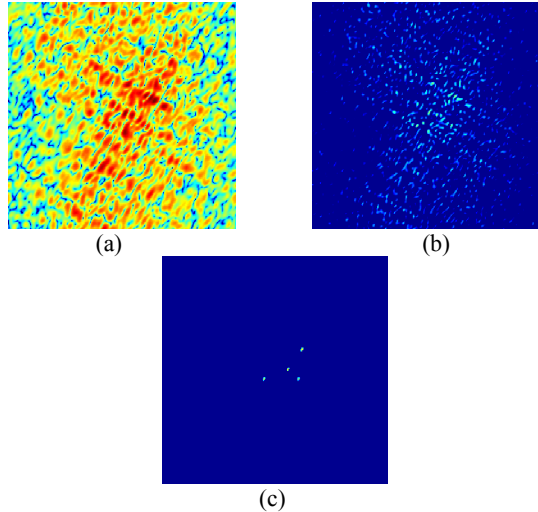
Bu çalışmada, aynı anda SAR görüntülemesi ve faz hatası kestirimi yapan, seyreklik güdümlü bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, faz hatalarını görüntü oluşturma aşamasında giderirken, düzenlileştirme kullanıldığı için eksik ve gürültülü gözlemlerin varlığından çok etkilenmez ve görüntüdeki önemli özniteliklerin ortaya çıkmasını sağlar. Yöntem, hem 1 boyutlu hem de 2 boyutlu ayrıştırılabilen ve ayrıştırlamayan faz hatalarını düzeltebilmektedir. Sonuçlar, yöntemin etkinliğini göstermektedir.

7. Kaynakça

- [1] J. 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*. Norwell, MA: Kluwer, 1996.
- [2] D.W. Warner, D. Ghiglia, A. FitzGerrell, ve J. Beaver, "Two dimensional phase gradient autofocus," *Proc. SPIE*, cilt 4123, 2000.
- [3] D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, ve C.V. Jakowatz, "Phase Gradient Autofocus - A robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst.*, cilt 30, sayı 3, 1994.
- [4] C. E. Mancill ve 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, Haziran 1981, sayfa 391–400.
- [5] L. Xi, L. Guosui, ve J. Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, cilt 35, sayı 10, sayfa 1240–1252, Ekim 1999.
- [6] F. Berizzi ve G. Corsini, "Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization," *IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst.*, cilt 32, sayı 7, sayfa 1185–1191, Temmuz 1996.
- [7] J.R. Fienup ve J.J. Miller, "Aberration correction by maximizing generalized sharpness metrics," *J. Opt. Soc. Amer. A*, cilt 20, sayı 4, 2003.
- [8] M. etin ve W. C. Karl, "Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization," *IEEE Trans. Image Processing* **10**, sayfa 623–631, Nisan 2001.
- [9] N.. nhon ve M. etin, "A non-quadratic regularization based technique for joint SAR imaging and model error correction," *Proc. SPIE*, cilt 7337, 2009.
- [10] W.G. Carrara, R.M. Majewski, and R.S. Goodman, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*. Artech House, 1995.
- [11] *MSTAR, Air Force Research Laboratory, Model Based Vision Laboratory, Sensor Data Management System*, <http://www.mbvlab.wpafb.af.mil/public/sdms/datasets/mstar/>.



şekil 1: Ayrıştırlamayan faz hatası için sonuçlar. (a) Faz hatasız durumda geleneksel yolla oluşturulan görüntü (b) Faz hatasız durumda karesel olmayan dzenlileştirmeye dayalı teknikle oluşturulan görüntü (c) Faz hatalı durumda geleneksel yolla oluşturulan görüntü (d) Faz hatalı durumda karesel olmayan dzenlileştirmeye dayalı teknikle oluşturulan görüntü (e) Faz hatalı durumda önerilen yöntemle oluşturulan görüntü.



şekil 2: Ayrıştırılabilen faz hatası için sonuçlar. (a) Faz hatalı durumda geleneksel yolla oluşturulan görüntü (b) Faz hatalı durumda karesel olmayan dzenlileştirmeye dayalı teknikle oluşturulan görüntü (c) Faz hatalı durumda önerilen yöntemle oluşturulan görüntü.