

Sentetik Açıklıklı Radar ile Görüntü Geriçatılmasına İstatistiksel bir Yaklaşım *

Müjdat Çetin ve W. Clem Karl
Department of Electrical and Computer Engineering, Boston University
8 Saint Mary's Street, Boston, MA 02215, A.B.D.
{mccetin,wckarl}@bu.edu

Özetçe

Bu çalışmada, odaklanmış sentetik açıklıklı radar (SAR) ile görüntü geriçatılması sorununa bir en büyük sonsal dağılım (EBS) kestirimi sorunu olarak yaklaşıyoruz. İstatistiksel yaklaşımımız görüntülenen alanın yansıtırlık işlevi ya da toplanan verilerin niteliği ile ilgili sahip olduğumuz önsel bilgileri de hesaba katmamıza olanak vererek, geleneksel geriçatma yöntemlerine karşı yeni bir seçenek oluşturuyor. Önerdiğimiz yöntemin etkinliğini ve getirilerini benzetimli SAR verilerinden elde ettiğimiz sonuçlar ile sunuyoruz.

1 Giriş

Geleneksel radarlar farklı erimdeki hedefleri (yansıtıcıları) birbirinden ayırtma yeteneğine sahiptirler. Ancak çapraz-erim doğrultusunda bunu yapabilmeleri çok büyük antenler gerektirdiğinden, bir alanın iki boyutlu betimlemesini yapamazlar. SAR ise alana birden fazla gözlem noktasından darbeler gönderip, geriye yansıyan işaretleri evreyumlu biçimde birleştirerek, alanın yüksek çözünürlüklü bir görüntüsünü oluşturabilir. Yani küçük bir antenle elde edilmiş çoklu gözlemleri kullanarak büyük bir antenin etkisini *sentezler* [7].

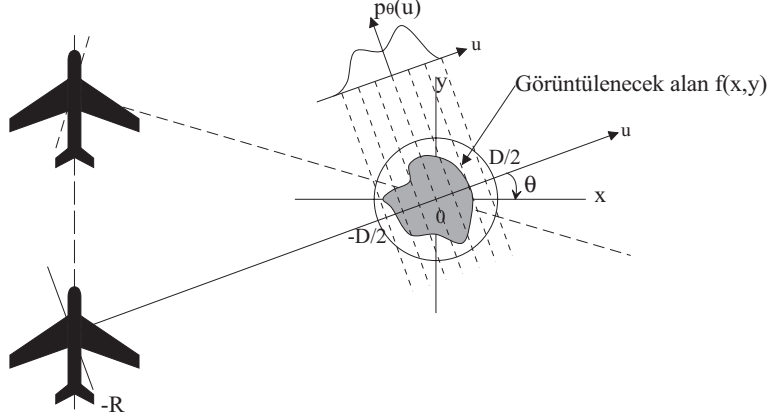
Odaklanmış SAR ile toplanan işaretler (belli önışlemlerden geçtikten sonra) alanın yansıtırlık işlevinin bant-sınırlı Fourier dönüşümünden (FD) oluşur. Görüntü geriçatılması geleneksel olarak iki boyutlu hızlı FD'ne dayalı bir yöntemle yapılır. Bu yöntem eksik ve gürültülü gözlemlerin varlığından olumsuz etkilenmesinin yanı sıra, görüntülenen alanın özellikleriyle ilgili sahip olunan önsel bilgilerin geriçatma sırasında kullanılmasına da olanak sağlamaz. Oysa buna olanak sağlanması, oluşturulan görüntüde önemli özneliliklerin ortaya çıkmasını ve bu sayede, bu görüntü kullanılarak verilecek otomatik kararların kolaylaşmasını sağlayabilir. Bu çalışmada önerdiğimiz geriçatma yöntemi bu eksikliklerin giderilmesi amacını taşımaktadır.

2 SAR Gözlem Modeli

Şekil 1'deki yer düzlemi geometrisini ele alalım. Uçakta bulunan radar sürekli olarak görüntülenmek istenen alanın merkezine çevrilir ve izlenen yol boyunca birçok noktadan yüzeye yüksek bant genişlikli darbeler gönderilip geri dönen veriler toplanır. Amaç bu verilerden yüzeyin yansıtırlık görüntüsü $f(x, y)$ 'nin geriçatılmasıdır. En çok kullanılan darbe çeşidi doğrusal FM ötüş (chirp) işaretleridir:

$$s(t) = \begin{cases} e^{j(\omega_0 t + \alpha t^2)}, & |t| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T_p}{2} \end{cases} \quad (1)$$

*Bu çalışma A.B.D. Hava Kuvvetleri Bilimsel Araştırma Bölümü'nün F49620-96-1-0028, Ulusal Sağlık Enstitüleri'nin NINDS 1 R01 NS34189, ve Ordu Araştırma Bölümü'nün ARO DAAG55-97-1-0013 sayılı projeleri kapsamında desteklenmiştir.



Şekil 1: Odaklanmış SAR ile veri toplanan yer düzlemi geometrisi.

Burada ω_0 taşıyıcı sıklık, 2α ise ötüş hızıdır. Radarın bulunduğu uçak ile görüntülenecek alanın merkezini birleştiren doğru (u eksen) ile x eksen arasındaki açı θ , uçak ile alanın merkezi arasındaki uzaklık R olduğu anda, bu işaretin gerçek kısmının yere gönderildiğini varsayalım. Yer yüzeyinden geri dönen işaret bir dayanak ötüş işaretiyle çarpılıp, alçak geçiren süzgeçten geçirilir. Bunun sonucunda elde edilen işareti, karesel bir evre terimini gözardı ederek, aşağıdaki biçimde ifade edebiliriz [9]:

$$r_\theta(t) = \int_{-D/2}^{D/2} p_\theta(u) \exp \left\{ -j \frac{2}{c} (\omega_0 + 2\alpha(t - \frac{2R}{c})) u \right\} du = \int_{-D/2}^{D/2} p_\theta(u) \exp \{ -j \Omega(t) u \} du. \quad (2)$$

Burada D görüntülenilen alanın çapı, c ışık hızı, $\Omega(t) = \frac{2}{c} (\omega_0 + 2\alpha(t - \frac{2R}{c}))$ uzamsal sıklık, ve $p_\theta(u)$ alanın içinde radara $R + u$ uzaklığında olan tüm noktaların¹ karmaşık yansıtırlıklarının toplamıdır. Yansıtırlıkların karmaşık olmasının nedeni alana gönderilen işaretin hem genlik ölçeklenmesine, hem de evre kaydırmasına uğramasıdır. Yansıtırlık büyüklüğü bir noktadaki geri saçılım gücüyle orantılı, yansıtırlık evresi ise çoğu durumda rasgele ve diğer noktadaki evrelerle ilintisizdir [7]. Edindiğimiz gözlem $r_\theta(t)$, alanın yansıtırlık izdüşümü $p_\theta(u)$ 'nin bant-sınırlı FD'nden oluşmaktadır. Bant sınırlaması, gözlem zamanı t 'nin ve dolayısıyla uzamsal sıklık $\Omega(t)$ 'nin sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

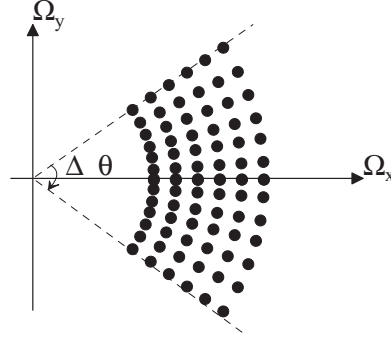
SAR gözlem modelinin izdüşümsel özelliği bilgisayarlı tomografiyi (BT) andırmaktadır. BT'den bilinen izdüşüm-dilim savını [8] kullanarak $r_\theta(t)$ 'nin, aynı zamanda alanın bulmak istediğimiz yansıtırlık işlevi $f(x, y)$ 'nin iki boyutlu Fourier dönüşümü $F(\Omega_x, \Omega_y)$ 'den θ açısında alınmış sonlu bir dilim olduğunu söyleyebiliriz:

$$r_\theta(t) = F(\Omega(t) \cos \theta, \Omega(t) \sin \theta). \quad (3)$$

Bu eşitliği derlitoplu olarak $r_\theta(t) = (C_\theta f(x, y))(t)$ biçiminde yazabiliriz. Burada C_θ sürekli değişkenli gözlem çekirdeğidir. Tüm açılardan yapılan gözlemler örneklenip biraraya getirilince, bunlar uzamsal sıklık düzleminde Şekil 2'deki gibi yer alırlar. Şimdi uygulamada kullanacağımız ayrık gözlem modelini oluşturacağız. Bunun için, r_θ örneklenmiş gözlem vektörü, C_θ ayrık gözlem çekirdeği, ve f de örneklenmiş yansıtırlık görüntüsünün sütunlarını alt alta dizerek oluşturduğumuz vektör olsun. Bu tanımlarla, tüm açılardan toplanan verileri göz önüne alan ayrık gözlem modelimizi şu biçimde yazabiliriz:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r_{\theta_1} \\ r_{\theta_2} \\ \vdots \\ r_{\theta_N} \end{bmatrix}}_r = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{\theta_1} \\ C_{\theta_2} \\ \vdots \\ C_{\theta_N} \end{bmatrix}}_C f. \quad (4)$$

¹Çoğu durumda $R \gg D$ eşitsizliği geçerli olduğundan, bu noktaların bir doğru üzerinde yer aldığını varsayacağız.



Şekil 2: Toplanan verilerin uzamsal sıklık düzleminde gösterimi. Burada $\Delta\theta$ radarın ölçüm yaptığı konumların kapladığı açısall genişliktir.

Burada N radarın yere darbe gönderip, veri topladığı gözlem noktası sayısıdır. Bu modelden hareketle, BT'dekine benzer biçimde, alan ile belli bir çözünürlükteki izdüşümler arasındaki ilişkiyi ifade eden bir izdüşüm matrisi de elde edilebilir [4].

3 Görüntü Geriçatma Yöntemi

Ölçüm gürültüsünü de hesaba katarak, gözlemlerimizi şöyle modelleyebiliriz:

$$g = r + v = Cf + v. \quad (5)$$

Burada v 'nin ortak değışinti matrisi Σ olan karmaşık, sıfır ortalamalı Gauss gürültüsü olduğunu varsayacağız. Görüntü geriçatılmasında amaç, gürültülü ayrık gözlem vektörü g 'den, yansıtırlık işlevi f 'nin bir kestirimini elde etmektir. SAR gözlemlerinden görüntü geriçatılması geleneksel olarak g 'yi oluşturan verilerin, önce uzamsal sıklık düzleminde üzerinde yer aldıkları, Şekil 2'de gösterilen kutupsal ızgaradan dikdörtgensel ızgaraya tekrar örneklenmeleri ve ardından iki boyutlu ters hızlı Fourier dönüşümlerinin alınması ile yapılır. Biz ise alanın geriçatılmış yansıtırlığına, bir EBS kestirimi sorununun çözümü olarak bakıyoruz. Alanın yansıtırlığının aşağıdaki gibi bir genellenmiş Gauss olasılık yoğunluk işlevine (OYİ) [2] sahip olduğunu varsayıyoruz:

$$p_f(f) \sim \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2}\|L|f|\|_k\right), \quad 1 \leq k \leq 2. \quad (6)$$

Burada L bir matris, ve $\|\cdot\|_k$ vektörün ℓ_k normudur. Bu OYİ, $k = 2$ seçtiğimizde Gauss dağılımına, $k = 1$ seçtiğimizde ise Laplace dağılımına indirgenir. Bu tip dağılımlar daha önce görüntü onarımı [10] ve BT ile görüntü geriçatma [2] sorunlarında kullanılmıştır. Önsel dağılımı $|f|$ 'ye dayalı seçmemizin nedeni, alanla ilgili sahip olunan önsel bilgilerin genelde karmaşık yansıtırlığın büyüklüğü cinsinden olmasındandır. Bu yaklaşımımız alanın gerçek ve sanal kısımlarına dayalı olarak çalışan yöntemlerin [1, 5] özellikle dağıtık hedeflerin özniteliklerini korumadaki eksikliklerini gidermeyi amaçlamaktadır. L 'yi köşegen bir matris olarak seçtiğimizde, önsel OYİ bağımsız bileşenlerden oluşur. L köşegen değilse, alanın farklı noktalarındaki yansıtırlıkların büyüklükleri L 'nin yapısının belirlediği bir biçimde birbiriyle ilintilidir. Bu tip bir önsel OYİ varsayımıyla, alanın yansıtırlık görüntüsünün EBS kestirimini bulmak, aşağıdaki eniyileme sorununa indirgenir:

$$\begin{aligned} \hat{f}_{EBS} &= \arg \max_f \left[p_{f|g}(f|g) \right] \\ &= \arg \min_f \left[\|\Sigma^{-\frac{1}{2}}(g - Cf)\|_2^2 + \lambda^2 \|L|f|\|_k \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Yukarıdaki amaç işlevinde birinci terim çözümün toplanan verilerle, ikinci terim ise çözümün önsel bilgiyle tutarlılığının ölçüleridir. Bu eniyileme sorununu çözmek için yarı karesel düzenleştirme yönteminin [3, 6] özel bir durumu olan özyineli bir algoritma kullanıyoruz.

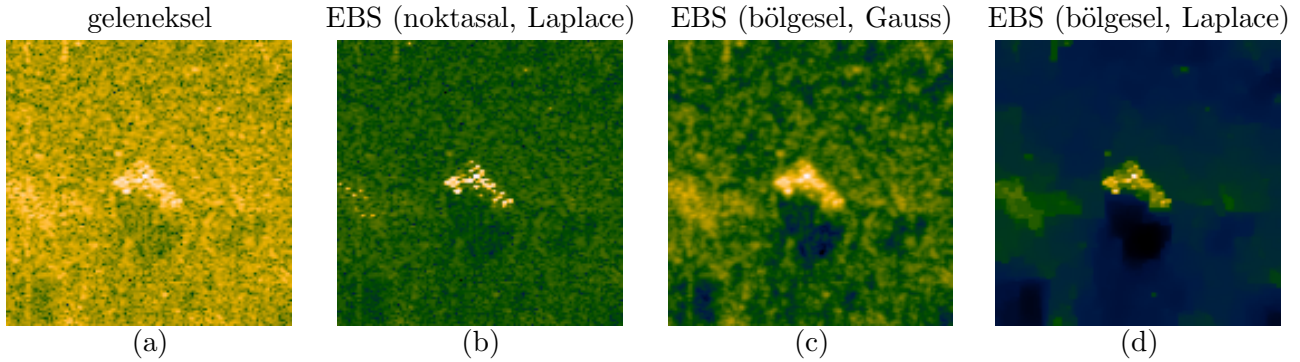
4 Deneysel Sonuçlar

Tablo 1’deki parametre değerlerine sahip bir SAR sistemini benzetimledik. Şimdi bu sistem tarafından toplanan verileri kullanarak görüntü geriatma yöntemimizi sınavacağız.

taşıyıcı sıklık (ω_0)	$2\pi \times 10^{10} \text{ rad/s}$
tş hızı (2α)	$2\pi \times 10^{12} \text{ rad/s}^2$
darbe süresi (T_p)	$4 \times 10^{-4} \text{ s}$
açısal genişlik ($\Delta\theta$)	2.3 derece

Tablo 1: Örneklere kullanılan benzetimli SAR sisteminin parametre değerleri.

nce askeri bir aracın görüntülerini oluşturacağız. Bu örnekteki benzer SAR görüntüleri otomatik hedef tanıma (OHT) algoritmaları tarafından kullanılmak üzere oluşturulmaktadır. OHT algoritmaları SAR görüntülerinden çıkardıkları zneliteliklere dayalı karar stratejileri oluştururlar. Geriatılan görüntüde zneleliklerin korunması ve güçlendirilmesi OHT algoritmalarının başarımını olumlu yönde etkiler. Hedef tanımda kullanılan bir öznelik kümesi görüntüdeki baskın noktasal saıcılardan yerleridir. Bir başka öznelik kümesi de hedefin şekline dayalı bölgesel zneliklerdir. Şimdi görüntü geriatma yöntemimizin bu öznelikler açısından etkinliğini geleneksel yöntemlerle karşılaştıracağız. Şekil 3(a)’da geleneksel yöntemle oluşturulmuş SAR görüntüsünü gösteriyoruz. Bizim yöntemimiz için, önce noktasal öznelikleri ele alalım. Bunları güçlendirmek için (6)’daki önsel dağılımda L ’yi birim matris seçerek alandaki noktaların birbirinden bağımsız olduğunu varsayabiliriz. Böyle sıfır ortalamalı bir nsel OYİ, büyük yansıtıcılık değerlerinin olasılığını düşük tutarak yapay olguların azaltımına yarayacaktır. Ancak gürültüyü ve yapay olguları azaltırken, hedef üzerindeki yansıtıcıları da bastırmak istemediğimiz için, ağır kuyruklu Laplace dağılımını kullanacağız. Daha önce belirttiğimiz gibi bunu k ’yi 1 seçerek yapabiliriz. Bu biçimde oluşturduğumuz görüntüyü Şekil 3(b)’de gösteriyoruz. Bunu geleneksel SAR görüntüsüyle karşılaştırdığımızda, EBS görüntüsünde noktasal özneliklerin çok belirgin biçimde ortaya çıktığını söyleyebiliriz.

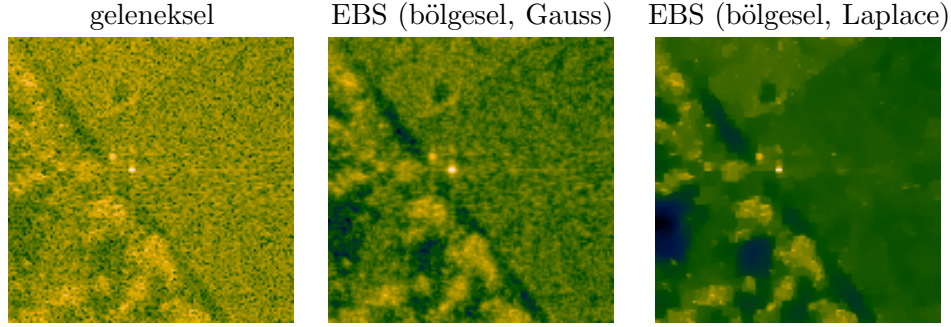


Şekil 3: Askeri bir aracın geleneksel ve istatistiksel yöntemlerle geriatılmış görüntüleri.

Şimdi de bölgesel öznelikleri ele alacağız. OHT algoritmalarının bu tip öznelikleri kullanmasındaki amaç hedefin şekilsel özellikler kullanılarak tanınmasıdır. Bunun için öncelikle hedefin bltlendirme ile arkaplandan ayrılması gerekir. Ancak Şekil 3(a)’daki geleneksel SAR görüntüsünün bltlendirilmesi görüntüdeki yapay olgular nedeniyle kolay değildir. Biz bu sorunun giderildiği bir görüntü oluşturmayı amaçlıyoruz. Dağıtık hedeflerin ve doğal görüntülerin bir özelliği tektürel bölgelerin dzliğidir. Bu özelliği, önsel dağılımımızda birbirine yakın noktaların ilintili olduğunu varsayarak kullanacağız. Bunun için L ’yi iki boyutlu ayrık bir türev işleci olarak seçeceğiz. Eğer $k = 2$ seçersek, alanın türevlerinin önsel olarak bağımsız zdeşe dağılmış Gauss OYİ’ne sahip rasgele değişkenler olduğunu varsaymış oluyoruz. Bu durumda, Şekil 3(c)’deki görüntüyü elde ediyoruz. Bu EBS zm arkaplanı geleneksel görüntüye göre biraz daha dzliğiyor, ancak bunu yaparken hedef ile arkaplan arasındaki ayrılırları da bulandırıyor. Bunu k ’yi kltrek nleyebiliriz,

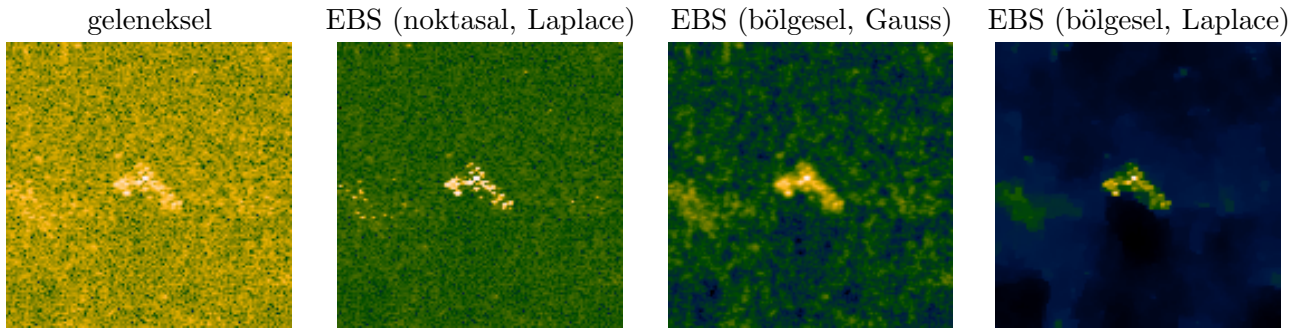
çünkü k 'yi küçülttüğümüzde Gauss'a göre kuyruğu daha büyük değerler alan bir dağılım seçerek, daha büyük değerli türevlerin, yani daha seçik ayrıtların oluşmasına izin vermiş oluruz. Bu noktadan hareketle, Şekil 3(d)'de Laplace dağılımı ($k = 1$) kullanarak oluşturduğumuz görüntüyü gösteriyoruz. Bu görüntü, ayrıtlarda bulandırma yapmaksızın geleneksel yöntemin sakıncalarını gideriyor. Bu görüntünün bölütlendirilmesinin geleneksel görüntüye göre çok daha kolay olacağını düşünüyoruz.

Şekil 4'te düz bir alandaki ağaçlar, bir yol ve noktasal yansıtıcılardan oluşan bir sahnenin geriçatılmış görüntülerini gösteriyoruz. Bu örnekte bölgesel öznelikleri koruyan önsel dağılımlar kullanıyoruz. Özellikle Laplace OYİ kullandığımızda elde ettiğimiz görüntü, belirgin ağaç şekilleri ve gölgeler ile düz bir arkaplan oluşturulması sayesinde, görsel açıdan geleneksel görüntüden daha üstün nitelikler taşıyor.



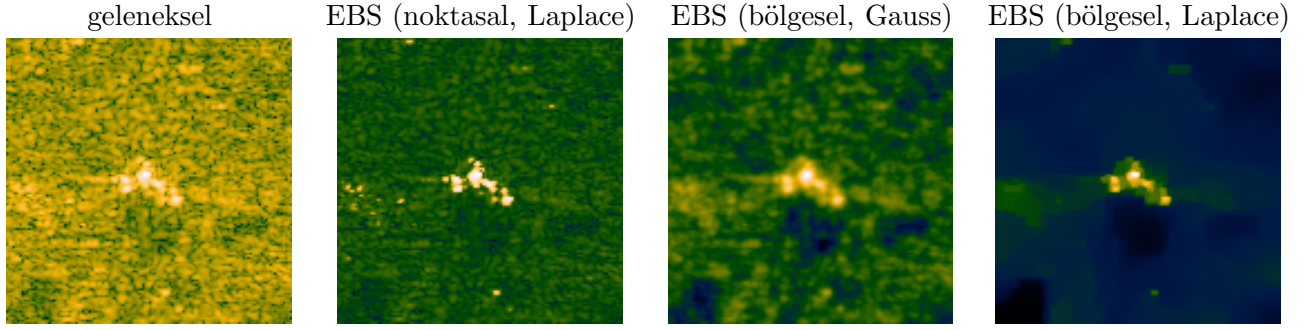
Şekil 4: Ağaçlık bir alanın geleneksel ve istatistiksel yöntemlerle geriçatılmış görüntüleri.

Şimdi de askeri aracın yüksek değişintili beyaz Gauss gürültüsü eklenerek işaret gürültü oranı (İGO) oldukça düşük (1 dB) duruma getirilmiş olan verilerden oluşturulan görüntülerine bakacağız. Bu durumda Şekil 5'teki sonuçları elde ediyoruz. EBS kestiriminin yüksek gürültüye rağmen oldukça temiz görüntüler oluşturuyor olması, yöntemin gürültüye dayanıklılığını gösteriyor.



Şekil 5: Düşük nitelikli verilerden geleneksel ve istatistiksel yöntemlerle geriçatılmış görüntüler. (İGO = 1 dB)

Son olarak sınırlı veriler kullanılarak elde ettiğimiz sonuçları sunacağız. Burada tam sentetik açıklığın sadece yarısı boyunca veri topluyoruz. Bunu yapmak, açısız gözlem genişliğinin ve dolayısıyla çapraz-erim çözünürlüğünün yarıya inmesi anlamına geliyor. Geriçatılan görüntüleri Şekil 6'da gösteriyoruz. Geleneksel yöntemle oluşturulan görüntüde hedefin belirginliği daha da azalırken, EBS kestirimlerimiz eksik verilere rağmen hedefin özneliklerini korumayı başarıyor.



Şekil 6: Tam sentetik açıklığın yarısından toplanan sınırlı verilerden geleneksel ve istatistiksel yöntemlerle geriçatılmış görüntüler.

5 Vargılar

Odaklanmış SAR ile görüntü geriçatılması sorunu için istatistiksel bir yöntem önerdik. Yöntemimiz, görüntülenecek alanla ilgili bilgilerimizi bir önsel OYİ aracılığıyla dikkate almamızı sağlıyor, ve özellikle indirgenmiş (eksik ya da gürültülü) gözlemlerin varlığında gürültü bastırımı, yapay olgu azaltımı, ve özneliliklerin korunumu açılarından geleneksel yöntemlerden daha üstün SAR görüntüleri oluşturuyor. SAR görüntülerinin bu biçimde oluşturulmasının bölütlendirme ve nesne tanıma işlemlerinin başarımına etkisinin nicel çözümlemesi üzerinde çalışıyoruz.

Kaynakça

- [1] Borden B., “Regularization of noisy ISAR images containing extended features,” *IEEE Trans. Image Processing*, 8(1):124-127, Ocak 1999.
- [2] Bouman C. ve Sauer K., “A generalized Gaussian image model for edge-preserving MAP estimation,” *IEEE Trans. Image Processing*, 2(3):296-310, Temmuz 1993.
- [3] Charbonnier P., Blanc-Féraud L., Aubert G., ve Barlaud M., “Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging,” *IEEE Trans. Image Processing*, 6(2):298-310, Şubat 1997.
- [4] Çetin M. ve Karl W. C., “A statistical tomographic approach to synthetic aperture radar image reconstruction,” *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Image Processing*, Ekim 1997, Santa Barbara, California, A.B.D., cilt 1, s. 845-848.
- [5] Frieden B. R. ve Bajkova A. T., “Bayesian cross-entropy reconstruction of complex images,” *Applied Optics*, 33(2):219-226, Ocak 1994.
- [6] Geman D. ve Yang C., “Nonlinear image recovery with half-quadratic regularization,” *IEEE Trans. Image Processing*, 4(7):932-946, Temmuz 1995.
- [7] Jakowatz Jr. C. V., Wahl D. E., Eichel P. H., Ghiglia D. C., ve Thompson P. A., *Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: a Signal Processing Approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, A.B.D., 1996.
- [8] Kak A. C. ve Slaney M., *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Press, New York, A.B.D., 1988.
- [9] Munson Jr. D. C., O’Brien J. D., ve Jenkins W. K., “A tomographic formulation of spotlight mode synthetic aperture radar,” *Proc. IEEE*, 71(8):917-925, Ağustos 1983.
- [10] Vogel C. R. ve Oman M. E., “Fast, robust total variation-based reconstruction of noisy, blurred images,” *IEEE Trans. Image Processing*, 7(6):813-824, Haziran 1998.