

Evreyumlu Görüntüleme Uygulamaları için Kenar Koruyan bir Düzenleştirme Yöntemi*

Müjdat Çetin[†], William C. Kar[‡], ve Alan S. Willsky[†]

[†]Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139, A.B.D.

[‡] Multi-Dimensional Signal Processing Laboratory, Boston University, 8 Saint Mary's St., Boston, MA 02215, A.B.D.

mccetin@mit.edu

Özetçe

Evreyumlu görüntülerin duyucu ölçümlerinden gerıçatılması sorunu için kenar koruyan düzenlemeye dayalı bir yöntem öneriyoruz. Görüntüleri oluşturmak için eniyilediğimiz maliyet işlevsisinde, bir yandan gürültünün sebep olabileceği yapay olguları bastırmak, öte yandan görüntülenen sahnedeki nesnelere sınırlarını korumak amacını taşıyan, karesel olmayan düzenleme kısıtları yer alıyor. Kullandığımız maliyet işlevsi birçok evreyumlu görüntüleme uygulamasında karşılaşılan, saçılan alanın karmaşık değerli ve rasgele evreli yapısını da hesaba katıyor. Bu biçimde oluşturduğumuz zorlu eniyileme sorununu, yarı karesel düzenlemeye dayalı bir algoritma geliştirerek çözüyoruz. Üç evreyumlu görüntüleme uygulamasından deneysel sonuçlar sunuyoruz, bunlar: sayısal holografı, sentetik açıklıklı radar, ve tıbbi sesötesi görüntüleme. Önerilen yöntemin, evreyumluluk beneklerinin bastırıldığı ve sahnedeki farklı bölgelerin sınırlarının korunduğu görüntüler ürettiğini gözlemliyoruz.

1. Giriş

Bu çalışmanın konusu evreyumlu sistemlerde görüntü gerıçatılması sorunudur. Evreyumlu görüntüleme, saçılan alanın hem şiddeti, hem de evresindeki uzamsal ya da zamansal değişimlerin kaydedilmesi esasına dayanır. Evreyumlu görüntüleme birçok mikrodalga, optik, ve akustik uygulamada kullanılır, örnekler arasında sentetik açıklıklı radar (SAR), holografı, sonar, lazer ve sesötesi görüntüleme mevcuttur. Hem evreyumlu, hem de evreyumsuz görüntüleme, ölçülen verilerden bir görüntünün gerıçatılması kötü konumlanmış bir ters problemdir.

*Bu çalışma A.B.D. Hava Kuvvetleri Bilimsel Araştırma Ofisi'nin F49620-00-0362 ve F49620-96-1-0028, Ordu Araştırma Ofisi'nin DAAD19-00-1-0466 ve DAAG55-97-1-0013, Deniz Araştırma Ofisi'nin N00014-00-1-0089, ve Ulusal Sağlık Enstitüleri'nin NINDS 1 R01 NS34189 sayılı projeleri kapsamında desteklenmiştir. Bu bildirinin içeriğinin bir kısmı daha önce İngilizce olarak yayınlanmıştır [1].

Kötü konumlanmış ters problemlerin çözümünde genelde düzenleme yöntemleri kullanılır. Ancak ilk akla gelen, Tikhonov düzenlemesi gibi yalın yöntemlerin bir sakıncası, oluşturulan görüntüde nesnelere sınırları gibi önemli özelliklerin bastırılmasıdır. Yakın geçmişte geliştirilen kenar koruyan düzenleme yöntemleri, evreyumsuz görüntüleme uygulamalarında bu sorunu giderdi [2, 3]. Bizim ilgilendiğimiz evreyumlu görüntüleme uygulamalarında ise ek bazı zorluklarla karşılaşılıyor. Öncelikle, burada kullanılan sinyaller genelde karmaşık değerlidir. Ayrıca birçok uygulamada, saçılan alan rasgele bir evreye sahiptir.¹ Bu durum iki çeşit zorluğa yol açar. Birincisi, saçıcıların yapıcı ve yıkıcı karışmalarından dolayı geleneksel evreyumlu görüntüler beneklenme biçiminde kendini gösteren yapay olgular sergilerler.² İkincisi, saçılan alanların karmaşık değerli ve rasgele evreli yapılarından dolayı, evreyumsuz görüntüleme için geliştirilmiş olan yöntemler evreyumlu uygulamalarda doğruluğu sınırlı sonuçlar üretirler.

Bu sorunları çözmek için, bilhassa evreyumlu görüntüleme uygulamaları için kenar koruyan bir düzenleme yöntemi öneriyoruz. Yaklaşımımız yansıtırık *genliklerinin* düzlüğünü sağlayan ℓ_p normlu düzenleme kısıtları içeren bir maliyet işlevsisinin eniyelenmesi üzerine kuruludur. Bu eniyileme sorununu yarı karesel düzenlemeye [5] dayalı bir algoritma geliştirerek çözüyoruz. Bu yöntem çalışmamızın özgün teknik katkısını teşkil ediyor. Bu biçimde geliştirdiğimiz yaklaşımın başarımını birkaç evreyumlu görüntüleme uygulamasından örnekler üzerinde sunuyoruz.

¹Bu özellik, kaydırılmış sıklıklı Fourier verilerinden yüksek nitelikli görüntüler oluşturulabilmesini sağlar [4]. Bu nedenle, Fourier dönüşümü hologramları, çoğu zaman, görüntülenecek özgün sahnedeki her noktaya kayıt öncesi rasgele bir evreye katılarak oluşturulur.

²Görüntülenen yüzeyin pürüzlülüğü ile kullanılan dalga boyu aynı düzeyde olduğunda beneklenme görülür.

2. Önerilen Yöntemin Genel Hatları

Aşağıdaki ayrık gözlem modelini varsayalım:

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}\mathbf{f} + \mathbf{w}. \quad (1)$$

Burada \mathbf{y} duyucu tarafından ölçülen (ve muhtemelen bir ön işlemden geçirilmiş) verilere, \mathbf{f} bulmak istediğimiz örneklenmiş görüntüye, ve \mathbf{w} ölçüm gürültüsüne karşılık gelen vektörlerdir. \mathbf{T} ise görüntülenmek istenen alan ile veriler arasındaki ilişkiyi modelleyen matristir. \mathbf{T} 'nin yapısı veri toplama sürecinin fizikine, geometrisine ve de duyucunun parametrelerine bağlıdır. Örneğin, \mathbf{T} bant-sınırlı, belki kaydırılmış sıklıklı bir Fourier dönüşümü işleci, ya da Radon dönüşümü gibi izdüşümsel bir işleç olabilir. Bazı uygulamalarda gözlem süreci, Denklem (1)'de varsayılanın aksine, doğrusal bir ilişki ile modellenemiyor olabilir. Bu bildiride biz sadece doğrusal durumu dikkate alıyoruz, ancak sunduğumuz fikirler ve yöntem doğrusal olmayan gözlem modellerine de uyarlanabilir.

Amacımız Denklem (1)'deki \mathbf{y} verilerini kullanıp, \mathbf{f} 'nin bir kestirimini elde etmektir. Geleneksel görüntü geriçatma yöntemleri uygulama alanına bağlı olarak çeşitlilik gösterir, bunlardan çoklukla kullanılan bazıları ters Fourier dönüşümüne ya da geri izdüşüme dayalıdır.

Biz geriçatılmış görüntü $\hat{\mathbf{f}}$ 'yi aşağıdaki maliyet işlevsini enküçülterek buluyoruz:

$$J_0(\mathbf{f}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{T}\mathbf{f}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{D}\mathbf{f}\|_p^p. \quad (2)$$

Burada $\|\cdot\|_p$ bir vektörün ℓ_p normu, \mathbf{D} iki boyutlu ayrık bir uzamsal türev işleci, $|\mathbf{f}|$ karmaşık değerli \mathbf{f} vektörünün öğelerinin genliklerinden oluşan vektör, ve λ ile $p < 2$ sayıl parametrelerdir. Bu işlevsinin birinci terimi çözümün verilere sadakatini sağlar, ikinci terim ise düzenleştirmeye bir düzlük kısıtıdır. Denklem (2)'de $p \leq 1$ durumunda $J_0(\mathbf{f})$ 'nin türevi alınmadığından, ℓ_p normunun bir yaklaşımını kullanacağız. Bunun sonucunda aşağıdaki biraz değiştirilmiş işlevsiyi elde ediyoruz:

$$J(\mathbf{f}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{T}\mathbf{f}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=1}^M (|\mathbf{D}\mathbf{f}|_i|^2 + \epsilon)^{p/2}. \quad (3)$$

Burada $\epsilon \geq 0$ küçük bir sabit, $(\cdot)_i$ bir vektörün i 'nci öğesi, M ise $\mathbf{D}\mathbf{f}$ vektörünün boyudur.

Burada kullandığımız ℓ_p normları ($p < 2$) gibi karesel olmayan düzenleştirmeye kısıtlarının, kenar koruyan çözümler ürettiği daha önce görüntü onarımı [3] ve bilgisayarlı tomografi [2] gibi gerçek değerli sinyaller içeren uygulamalarda gösterildi. Biz ise karmaşık değerli ve bazı durumlarda rasgele evreli sinyaller içeren SAR ve holografi gibi uygulamalarla ilgileniyoruz. Bu durumda karmaşık değerli yansıtırlık işlevi \mathbf{f} 'nin genliğine dayalı düzlük kısıtları kullanma zorunluluğu eniyileme sorununu daha zorlu hale getiriyor. Bir sonraki bölümde, bu tip eniyileme sorunlarının çözümü için yarı karesel düzenleştirmeye [5] dayalı verimli bir yöntem sunuyoruz.

3. Evreyumlu Görüntüleme için Yarı Karesel Düzenleştirme

Yarı karesel düzenleştirme yöntemlerinin anafikri başlangıçta önerilen maliyet işlevsisi yerine, enküçük değeri bu işlevsiyle aynı olan, ancak işlemesi çok daha kolay olan genişletilmiş bir işlevsiyi eniyilemektir. Bu fikir kullanılarak evreyumsuz görüntü işleme uygulamaları için tasarlanmış olan mevcut yöntemler evreyumlu görüntüleme uygulamalarında karşılaşılan daha karmaşık yapıları eniyileme sorunlarını çözmekte yetersiz kalıyorlar. Biz bu sorunu çözebilmek için iki tane yardımcı vektör (\mathbf{b} ve \mathbf{s}) kullanarak, aşağıdaki denklemi sağlayan $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ genişletilmiş maliyet işlevsini oluşturuyoruz:

$$\inf_{\mathbf{b}, \mathbf{s}} K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s}) = J(\mathbf{f}). \quad (4)$$

Burada $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ 'yi \mathbf{f} 'ye göre karesel (yarı karesel ismi buradan geliyor) ve \mathbf{b} ile \mathbf{s} 'ye göre eniyilenmesi kolay olacak biçimde oluşturuyoruz. Bu sayede $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ bir öbek koordinat iniş algoritmasıyla eniyilenebilir.

Şimdi özel olarak Denklem (3)'teki maliyet işlevsimiz $J(\mathbf{f})$ 'yi ele alalım. Bu $J(\mathbf{f})$ için aşağıdaki $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ 'nin Denklem (4)'teki ilişkiyi sağladığını gösterebiliriz [6]:

$$K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{T}\mathbf{f}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=1}^M \left[\mathbf{b}_i (|\mathbf{D}\mathbf{S}\mathbf{f}|_i|^2 + \epsilon) + \left(\frac{p}{2\mathbf{b}_i} \right)^{\frac{p}{2-p}} \left(1 - \frac{p}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

Burada, \mathbf{S} şöyle tanımlanmıştır:

$$\mathbf{S} \triangleq \text{diag}\{\exp(-j\mathbf{s}_l)\}, \quad (6)$$

ve \mathbf{s}_l , \mathbf{s} vektörünün l 'inci öğesini, $\text{diag}\{\cdot\}$ ise l 'inci köşegen öğesi ayrıncı içindeki ifadeye eşit olan köşegen bir matrisi temsil eder. Denklem (4)'teki ilişkiden dolayı, $J(\mathbf{f})$ ve $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$, \mathbf{f} cinsinden aynı enküçük noktayı paylaşırlar. Denklem (5)'teki $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ 'nin \mathbf{f} 'ye göre karesel bir işlev olduğunu belirtelim.³ Buradaki yarı karesel yapıdan yararlanmak için, $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ üzerinde özyineli bir öbek koordinat iniş algoritması kullanarak, aynı zamanda $J(\mathbf{f})$ 'yi de enküçülten kestirim $\hat{\mathbf{f}}$ 'yi bulabiliriz:

$$\hat{\mathbf{s}}^{(n+1)} = \arg \min_{\mathbf{s}} K(\hat{\mathbf{f}}^{(n)}, \hat{\mathbf{b}}^{(n)}, \mathbf{s}) \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{b}}^{(n+1)} = \arg \min_{\mathbf{b}} K(\hat{\mathbf{f}}^{(n)}, \mathbf{b}, \hat{\mathbf{s}}^{(n+1)}) \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{f}}^{(n+1)} = \arg \min_{\mathbf{f}} K(\mathbf{f}, \hat{\mathbf{b}}^{(n+1)}, \hat{\mathbf{s}}^{(n+1)}). \quad (9)$$

Burada n özyineleme adımı sayacıdır. Denklem (5)'teki $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ için, [6]'da türetilen sonuçları Denklem (7)-(9)'da kullanarak, şu denklemleri elde edebiliriz:

³Genel olarak herhangi bir kenar koruyan maliyet işlevsisi $J(\mathbf{f})$ 'den geçerli bir $K(\mathbf{f}, \mathbf{b}, \mathbf{s})$ 'nin nasıl bulunabileceğine burada değinmiyoruz. Sadece bunun dışbükey çiftleşik ilkeleri kullanılarak yapılabileceğini belirtip, ilgi duyan okurları [5]'e yönlendiriyoruz.

$$\hat{\mathbf{s}}_i^{(n+1)} = \phi[(\hat{\mathbf{f}}^{(n)})_i] \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{b}}_i^{(n+1)} = \frac{p}{2 \left[(\mathbf{D}\hat{\mathbf{S}}^{(n+1)}\hat{\mathbf{f}}^{(n)})_i^2 + \epsilon \right]^{1-p/2}} \quad (11)$$

$$\left[\mathbf{T}^H \mathbf{T} + \lambda (\hat{\mathbf{S}}^{(n+1)})^H \mathbf{D}^T \text{diag} \left\{ \hat{\mathbf{b}}_i^{(n+1)} \right\} \mathbf{D} \hat{\mathbf{S}}^{(n+1)} \right] \hat{\mathbf{f}}^{(n+1)} = \mathbf{T}^H \mathbf{y}. \quad (12)$$

Burada $\phi[z]$ karmaşık sayı z 'nin evresidir. Denklem (10) ve (11)'i, Denklem (12)'nin içine yerleştirerek $\hat{\mathbf{f}}^{(n+1)}$ için tek bir özyineli ifade elde edebiliriz, bu da tüm algoritmayı teşkil eder. Denklem (12)'deki her bir özyineleme basamağı, bilinmeyen $\hat{\mathbf{f}}^{(n+1)}$ için doğrusal bir denklem kümesinin çözümünü gerektirir. Bu çözüm için, eşlenik gradyan algoritmasını kullanıyoruz. Denklem (12)'deki özyinelemeyi, $\delta > 0$ küçük bir sabit sayı olmak üzere, $\|\hat{\mathbf{f}}^{(n+1)} - \hat{\mathbf{f}}^{(n)}\|_2^2 / \|\hat{\mathbf{f}}^{(n)}\|_2^2 < \delta$, koşulu sağlanana kadar tekrar ediyoruz. Bu tip algoritmaların rasgele bir ilkendirme ile başlatıldıklarında, yerel bir enküçük değere yakınsayacakları garanti edilebilir [2, 7].

4. Deneysel Sonuçlar

Önerdiğimiz yöntemin başarımını üç görüntüleme uygulaması üzerinde sunuyoruz, bunlar: sayısal holografi, SAR, ve tıbbi sesötesi görüntüleme. Denklem (3)'teki p ve λ parametrelerini geriçatılan görüntülerin niteliklerini öznel bir biçimde değerlendirerek seçiyoruz.

Şekil 1'de holografi deneyimizin sonuçlarını sunuyoruz. Şekil 1(a)'daki özgün sahnenin her pikselindeki yeğnliğe birbiriçimli dağılımlı (ve pikselden piksele ilintisiz) rasgele bir evre katıp, sonra bant-sınırlı bir Fourier hologramı oluşturuyoruz. Şekil 1(b)'de hologramdan geleneksel biçimde ters Fourier dönüşümüyle geriçatılmış görüntünün genliğini gösteriyoruz. Bu görüntüye, evreyuysuzluk beneklenmesine bağlı yapay olgular hakim görünüyor. Şekil 1(c)'deki, bizim yöntemimizle ($p = 1.2$) geriçatılmış görüntü ise beneklenmenin ve gürültünün bastırılması, ve de aynı zamanda nesne ve bölgelerin kenarlarının korunması sayesinde, görüntülenen gerçek sahneyi daha iyi yansıtıyor. Şimdi bizim yöntemimizle bazı benzerlikler taşıyan daha basit iki yaklaşımın, buradaki geriçatma sorununun çözümünde nasıl yetersiz kaldıklarını göstereceğiz. Şekil 1(d)'de evreyuysuz görüntüleme uygulamaları için tasarlanmış kenar koruyan bir düzenleştirme yönteminin doğrudan bu deneyde kullanılmasının sonucunu sunuyoruz. Bu tip teknikler gerçek değerli sinyaller için tasarlanmış oldukları için, genlik ve evre bileşenlerini doğru biçimde işleyemiyorlar. Bu durumda, alanın gerçek ve sanal bileşenlerinde belli bir düzleme etkisi sağlanıyor, ancak yine de, Şekil 1(b)'deki geleneksel görüntüden sadece biraz daha iyi olan, beneklenme hakimiyetinde bir genlik görüntüsü elde ediliyor. Şekil 1(e)'de ise, Şekil 1(b)'deki geleneksel görüntünün genliğinin, yönbağımlı yayıma dayalı kenar koruyan düzenleştirme ile işlenmesinin sonucunu sunuyoruz.



(a)



(b)



(c)



(d)



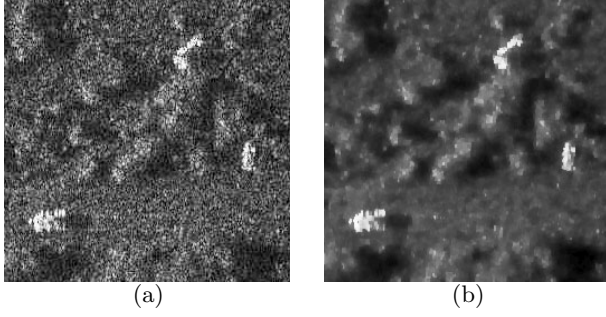
(e)

Şekil 1: Bir görüntünün bant-sınırlı Fourier hologramından geriçatılması. (a) Özgün sahne. (b) Geleneksel yöntemle geriçatılmış görüntü. (c) Önerilen yöntemle ($p = 1.2$) geriçatılmış görüntü. (d) Evreyuysuz görüntüleme için tasarlanmış kenar koruyan bir düzenleştirme yöntemiyle geriçatılmış görüntü. (e) Geleneksel olarak geriçatılmış görüntünün yönbağımlı yayıma dayalı kenar koruyan düzenleştirme ile sonradan işlenmesi.

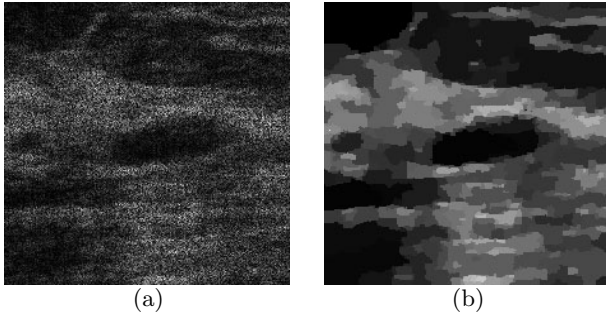
Beneklenmeye bağlı yapay olgular biraz olsun bastırılmış görünüyor, ancak aynı zamanda, önemli miktarda detayın kaybolduğunu gözlemliyoruz. Bu örnek bizim model tabanlı görüntü geriçatma yaklaşımımızın, görüntü pekiştirme amacıyla yapılabilecek bir sonradan işleme üstünlüğünü gösteriyor.

Bu bölümdeki diğer örneklerimizde sadece geleneksel ve önerilen yöntemlerle geriçatılmış görüntüleri sunacağız. Şekil 1'deki holografi örneğindeki gibi daha detaylı bir deneysel çözümlemenin benzer sonuçlar verdiğini söyleyebiliriz.

Şekil 2(a) üç askeri aracın ağaçlık bir alandaki ge-



Şekil 2: (a) Bir sahnenin geleneksel SAR görüntüsü. (b) Önerilen yöntemle ($p = 0.7$) geriçatılmış görüntü.



Şekil 3: (a) Geleneksel bir tıbbi sesötesi görüntü. (b) Önerilen yöntemle ($p = 0.7$) geriçatılmış görüntü.

leneksel SAR görüntüsünü içeriyor. Bu görüntüde kolayca görülen beneklenmeye bağlı yapay olgular, SAR görüntülerinin otomatik olarak bölütlenmesi gibi sorunların çözümünü çok güçleştirirler. Oysa, Şekil 2(b)'deki, bizim yöntemimizle ($p = 0.7$) geriçatılmış görüntüdeki bölgelerin (araç, ağaç, gölge, arkaplan) birbirinden ayrılması çok daha kolay görünüyor.

Son örneğimiz tıbbi sesötesi görüntüleme alanından. Şekil 3(a)'daki geleneksel görüntü beneklenmeye bağlı yapay olgular içeriyor. Bizim yöntemimiz ($p = 0.7$) Şekil 3(b)'deki sonucu üretiyor. Burada yapay olguların azaldığını ve dokusal sınırların korunduğunu görüyoruz.

5. Vargılar

Evreyumlu sistemlerde görüntü oluşturulması sorununa yeni bir yaklaşım sunduk. Bu yaklaşımda görüntülerin geriçatılmasına düzenlenmiş bir maliyet işlevsinin eniyilenmesi sorunu olarak bakıyoruz. Bu çerçevede, evreyumlu görüntüleme karşılaşılan sinyallerin özelliklerini dikkate alan kenar koruyucu kısıtlar kullanıyoruz. Bu çalışmanın en önemli özgün teknik katkısı evreyumlu görüntüleme bağlamında oluşturulan eniyileme sorunlarını verimli biçimde çözen bir yarı karesel düzenleme yöntemidir. Deneysel sonuçlarımız bu

yaklaşımın geleneksel yöntemlere göre birkaç bakımdan daha üstün görüntüler oluşturduğunu gösteriyor. Bu iyileştirmeler, görüntülenen sahnelerin görsel ya da otomatik olarak yorumlanması amacı için umut verici görünüyor. Şu anki çalışmalarımız, bu yöntemin çeşitli veri kümeleri üzerinde, ve bu bildiride dikkate almadığımız başka evreyumlu görüntüleme uygulamalarında kullanılması hedeflerini taşıyor.

6. Kaynakça

- [1] Çetin M., Karl W. C., ve Willsky A. S., "Edge-preserving image reconstruction for coherent imaging applications," *IEEE International Conference on Image Processing*, 2002, cilt 2, s. 481-484.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Munson Jr. D. C. ve Sanz J. L. C., "Image reconstruction from frequency-offset Fourier data," *Proc. IEEE*, 72:661-669, Haziran 1984.
- [5] Geman D. ve Reynolds G., "Constrained restoration and the recovery of discontinuities," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 14(3):367-383, Mart 1992.
- [6] Çetin M., *Feature-Enhanced Synthetic Aperture Radar Imaging*, "Doktora tezi, Boston Üniv., Şubat 2001.
- [7] Delaney A. H. ve Bresler Y., "Globally convergent edge-preserving regularized reconstruction: an application to limited-angle tomography," *IEEE Trans. Image Processing*, 7(2):204-221, Şubat 1998.