

# Geniş Açılı Radarda Görüntü Oluşturma ve Yönbağımlılık Tespiti için Seyrek Sinyal Temsiline Dayalı bir Yaklaşım

## A Sparse Signal Representation-based Approach to Image Formation and Anisotropy Determination in Wide-Angle Radar\*

*Kush R. Varshney<sup>†</sup>, Müjdat Çetin<sup>‡</sup>, John W. Fisher III<sup>†</sup>, and Alan S. Willsky<sup>†</sup>*

<sup>†</sup> Laboratory for Information and Decision Systems,  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, A.B.D.

<sup>‡</sup>Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Tuzla, 34956, İstanbul, Türkiye

krv@mit.edu, mctin@sabanciuniv.edu, fisher@csail.mit.edu, willsky@mit.edu

### Özetçe

Geniş açılı sentetik açıklıklı radar (SAR) ölçümlerinden aynı anda görüntü oluşturulması ve yönbağımlılık tespiti sorununu ele alıyoruz. Geleneksel SAR görüntü oluşturma yöntemleri yönbağımsız saçılım varsayımıyla çalışırlar, oysa bu varsayım geniş açılı açıklıklar için geçerli değildir. Biz yönbağımlı saçılımın tam ötesi bir sözlükle seyrek biçimde temsiline dayalı bir yöntem öneriyoruz. Sözlük farklı düzeylerde açısal sürerliğe sahip elemanlardan oluşuyor. Bu ters problemi çözdüğümüzde sahnedeki her uzamsal konum için karmaşık değerli, yönbağımlı bir tepki elde ediyoruz. Bu çözüme erişmek için karşımıza çıkan eniyileme sorunu için çok karmaşık olmayan, grafiksel yapıya yaklaşıp bir algoritma geliştiriyoruz. Gerçekçi elektromanyetik benzetimler üzerinde sunduğumuz deneysel sonuçlarla önerdiğimiz yöntemin etkinliğini gösteriyoruz.

### Abstract

We consider the problem of jointly forming images and determining anisotropy from wide-angle synthetic aperture radar (SAR) measurements. Conventional SAR image formation techniques assume isotropic scattering, which is not valid with wide-angle apertures. We present a method based on a sparse representation of aspect-dependent scattering with an overcomplete dictionary composed of elements with varying levels of angular persistence. Solved as an inverse problem, the result is a complex-valued, aspect-dependent response for each spatial location in a scene. Our formulation leads to an optimization problem for which we develop a tractable, graph-structured approximate algorithm. We present experimental results on realistic electromagnetic simulations demonstrating the effectiveness of the proposed approach.

### 1. Giriş

Geniş açılı sentetik açıklıklı radar (SAR) yakın geçmişte havacılık elektroniği ve yöngüdümlü teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde ilgi çekmeye başladı.

\*Bu çalışma TÜBİTAK'ın 105E090, A.B.D. Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'nın FA8650-04-1-1719 ve FA8650-04-1-1721, ve Avrupa Komisyonu'nun MIRG-CT-2006-041919 ve FP6-2004-ACC-SSA-2 sayılı projeleri kapsamında desteklenmiştir. Bu bildirinin içeriğinin bir kısmı daha önce İngilizce olarak yayınlanmıştır [1].

Teoride geniş açılı ölçümler bize daha iyi çapraz menzillik çözünürlüğü sağlarlar. Ancak geleneksel görüntüleme yöntemleri birkaç sebepten ötürü geniş açılı verileri işlemeye elverişli değildir. Bu bildirinin odak noktasını da teşkil eden önemli bir mesele yönbağımlılıktır. Geniş açılı açıklıklarda sahneye çeşitli yönlerden bakılır ve saçıcılar yöne bağımlı bir tepki verirler. Geleneksel görüntüleme yöntemleri yönbağımsızlık varsayımıyla çalışırlar ve bu nedenle geniş açılı açıklıklarda doğru olmayan saçılım tahminlerine yol açarlar. Ayrıca saçıcıların yönbağımlılığını tespit etmemiş olurlar, oysa yönbağımlılık sahnenin analizi (örneğin otomatik hedef tanıma) için önemli bir öznitelik olabilir.

Yakın geçmişte yönbağımlı saçılım tespiti üzerinde bir miktar çalışma yapıldı. Bunları parametrik [2, 3] ve görüntü uzayındaki yöntemler [4, 5, 6] olarak gruplayabiliriz. Yer darlığından dolayı bu yaklaşımlardan detaylı biçimde bahsedemiyoruz. Parametrik modeller saçılımın doğru modellenmesine hassastırlar, ve mevcut parametrik yöntemler geniş açılı açıklıklarda geçerli değildirler. Mevcut görüntü uzayı yöntemlerinin çoğu ise altaçıklıklara bağlı olduklarından çözünürlük kaybına neden olurlar.

Bu bildiride geniş açılı SAR için görüntüleme ve yönbağımlılık tespitinin birlikte yapılabilirdiği bir yöntem öneriyoruz. Çerçevemiz tam ötesi sözlüklerle seyrek sinyal temsiline dayanıyor. Her uzamsal konumdaki saçılımı elemanları farklı düzeyde yönbağımlılık içeren bir sözlükten az sayıda elemanla temsil etmeye çalışıyoruz. Bu yaklaşımda beklenen saçılım çeşitleri için önsel bilgi kullanabiliyoruz, ancak saçılımların kısıtlı parametrik bir aileden gelmesi gerekmiyor. Yaklaşımımız tüm uzamsal noktaları ve tüm açıklığı aynı anda kullanıyor ve çapraz menzillik yönünde çözünürlük kaybına neden olmuyor. Yöntemimiz bir eniyileme sorununun çözümüne dayanıyor ve bu sorun için grafiksel yapıya fırsatçı bir algoritma geliştiriyoruz. Deneylerimiz önerilen yöntemin etkinliğini gösteriyor.

### 2. Verilerin Tam Ötesi Sözlük ile Temsili

İki boyutlu görüntüleme amaç yeryüzündeki  $s(x, y)$  bölgesinin karmaşık değerli saçılım işlevini belirlemektir. Burada  $x$  ve  $y$  menzillik ve çapraz menzillik

yönlerindeki koordinatlarıdır. Ancak yönbağımlılığı dikkate aldığımızda saçılım radarın sahneye bakış açısı olan  $\theta$ 'ya da bağlı olduğundan, saçılım işlevini  $s(x, y, \theta)$  olarak genellememiz gerekir. Biz bu çalışmada  $s(x, y, \theta)$ 'yı belirleyerek yönbağımlılık tespiti ve görüntü oluşturmayı birarada gerçekleştirmeyi hedefliyoruz. Evre tarihi verileri için aşağıdaki gözlem modelini varsayalım:

$$r(f, \theta) = \sum_{p=1}^P s(x_p, y_p, \theta) \exp \left\{ -j \frac{4\pi f}{c} (x_p \cos \theta + y_p \sin \theta) \right\}. \quad (1)$$

Burada  $c$  yayılım hızı,  $f$  ise radar ölçümlerinin sıklığıdır. Tek bir uzamsal konum  $p$  için yönbağımlı saçılım işlevini aşağıdaki  $M$  boyutlu sözlük ile temsil edelim:

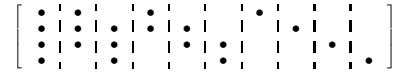
$$s(x_p, y_p, \theta) = \sum_{m=1}^M a_{p,m} b_m(\theta). \quad (2)$$

Burada  $b_m(\theta)$   $m$ 'inci sözlük elemanıdır. Bu temsili kullanarak evre tarihi verilerini şöyle ifade edelim:

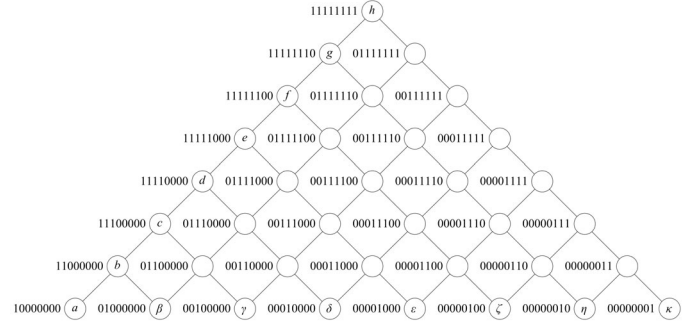
$$r(f, \theta) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M a_{p,m} b_m(\theta) \exp \left\{ -j \frac{4\pi f}{c} (x_p \cos \theta + y_p \sin \theta) \right\}. \quad (3)$$

Geleneksel yönbağımsız saçılım varsayımı yukarıdaki ifadenin  $M = 1$  ve  $b_1(\theta)$ 'nin sabit olduğu özel durumudur. Şimdi evre tarihi verilerini  $K$  sıklıkta ve  $N$  bakış açısında örneklediğimizi varsayalım. Bu ayrık verileri şöyle düzenleyelim: önce her bir sıklıktaki farklı açılardaki verileri altalta dizelim, sonra da farklı sıklık verilerini altalta dizelim. Bunun sonucunda  $N \cdot K$  uzunluktaki  $\mathbf{r}$  vektörünü elde ederiz. Benzer biçimde  $N$  uzunluğundaki  $\mathbf{b}_m$  vektörünü ve  $N \times M$  boyutlarındaki ( $M > N$ )  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1 \ \mathbf{b}_2 \ \dots \ \mathbf{b}_M]$  matrisini oluşturabiliriz. Buradaki  $\mathbf{B}$  matrisi (sözlüğü) yönbağımlı saçılım tespiti amacıyla yönelik olarak tasarımıımıza tabidir. Bu tasarımda  $M > N$  seçimini yaptığımızdan  $\mathbf{B}$  tam ötesi bir sözlüktür. Bir de  $M \cdot P$  uzunluğundaki  $\mathbf{a} = [a_{1,1} \ a_{1,2} \ \dots \ a_{1,M} \ a_{2,1} \ \dots \ a_{P,M}]^T$  vektörünü oluşturabiliriz. Tüm bunların sonunda Denklem (3)'teki ifadenin ayrık halini  $\mathbf{r} = \Phi \mathbf{a}$  şeklinde ifade edebiliriz. Burada  $\Phi$   $N \cdot K \times M \cdot P$  boyutlu, ve  $\mathbf{B}$  matrisi ile Denklem (3)'teki üstel terimin (ki bu terim SAR algılama parametreleri tarafından belirlenir) bileşik etkisini temsil eden bir matristir. Bu eşitlik  $M \cdot P$  bilinmeyen için  $N \cdot K$  tane doğrusal denklemi ifade etmektedir. Genelde  $\mathbf{B}$  matrisini oluştururken  $M \gg N$  seçtiğimizden,  $P$  ve  $K$ 'den bağımsız olarak,  $M \cdot P > N \cdot K$  eşitsizliği geçerlidir, ve dolayısıyla bilinmeyen sayısı denklem sayısından fazladır. Bu denklem kümesinin çözümünden Bölüm 3'te bahsedeceğiz.

Şimdi tam ötesi sözlüğümüz  $\mathbf{B}$ 'yi nasıl tasarladığımızı anlatalım. Sözlükteki eleman sayısı gözlem açısı sayısından çok daha fazla olmalıdır ve az sayıda sözlük elemanının doğrusal birleşimi ile olası yönbağımlı saçılım çeşitleri doğru biçimde temsil edilebilmelidir. En olası saçılım mekanizmalarının açıda süreklilik göstermesini bekleyebiliriz. Buna dayanarak açıda sürekli yönbağımlı saçılımları birer sözlük elemanı ile temsil etmeyi seçiyoruz. Ancak şunu da belirtmeliyiz ki bizim yaklaşımımız açıda sürekli olmayan saçılım mekanizmalarının da birden fazla sözlük elemanının birleşimi ile



Şekil 1: Sözlük  $\mathbf{B}$ 'nin  $N = 4$  durumu için gösterimi.



Şekil 2:  $\mathbf{B}$  sözlüğünün grafiksel yapısı.

temsiline olanak tanımaktadır. Sözlük elemanları olan  $\mathbf{b}_m$  vektörlerinin her birini bir açısız genişlik ve bir açısız merkeze tekabül edecek darbeler biçiminde oluşturuyoruz. Örneğin  $N = 4$  durumunda, darbe şeklini de dikdörtgenel olarak seçersek,  $\mathbf{b}_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$  yönbağımsız sözlük elemanımızdır, diğer elemanlardan bazıları ise şöyledir:  $\mathbf{b}_2 = [1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{b}_3 = [0 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ ;  $\mathbf{b}_4 = [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ ; son olarak da en dar açılı yönbağımlılığa sahip darbe şöyledir:  $\mathbf{b}_M = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ . Bu örnekteki  $N = 4$  durumu için tüm sözlük  $\mathbf{B}$ 'yi Şekil 1'de gösteriyoruz. Bu şekilde noktalar matrisin değeri sıfır olmayan elemanlarını gösteriyor. Sözlük elemanlarını burada tarif ettiğimiz biçimde seçince şu ilişki geçerli oluyor:  $M = \frac{1}{2}N^2 + \frac{1}{2}N$ . Darbeler için bizim buradaki örnekte kullandığımız dikdörtgenselden farklı şekiller de (üçgen, Gauss gibi) elbette kullanılabilir.

Bu biçimde oluşturduğumuz  $\mathbf{B}$  sözlüğünün doğal grafiksel bir yapısı olduğunu keşfedebiliriz. Sözlük elemanları olan  $\mathbf{b}_m$  vektörleri bir grafik üzerindeki düğümlere tekabül edecek biçimde düzenlenebilirler. Böyle bir grafiği  $N = 8$  durumu için Şekil 2'de gösteriyoruz. Her düğüme tekabül eden  $\mathbf{b}$  vektörü ilgili düğümün solunda görülebilir. Bu  $N$  seviyeli grafikteki kök düğüm yönbağımsız sözlük elemanıdır; grafikte aşağı doğru ilerledikçe daha dar açısız genişliği olan yönbağımlı saçılımlara erişiriz. Bu tip grafiklerden bildirinin geri kalan kısmında  $N$  seviyeli "sözlük grafiği" olarak bahsedeceğiz. Bu yapı bir sonraki bölümde ters problem çözümü için sunacağımız fırsatçı algoritmaların geliştirilmesinde anahtar bir rol oynamaktadır.

### 3. Ters Problemin Çözümü

Bir önceki bölümde oluşturduğumuz  $\mathbf{r} = \Phi \mathbf{a}$  denklem kümesinin tek bir çözümü yoktur. Ayrıca buradaki  $\Phi$  sözlüğü evre tarihi verilerinin az sayıda sözlük elemanı ile temsil edilmesine olanak sağlayacak biçimde oluşturulmuştur. Bu bakımdan bu ters problemi bir seyrek sinyal temsili problemi olarak görüp,  $\mathbf{a}$  için sonsuz sayıdaki çözüm içinden seyrek olanları, yani  $\ell_0$  normu küçük olanları tercih edecek bir çözüm öneriyoruz. Ancak  $\|\mathbf{a}\|_0$  ifadesini enküçülten bir çözüm bulmak kombinezonsal bir eniyileme problemidir. Bu nedenle problemi  $\ell_0$  yerine  $\ell_k$  ( $k < 1$ ) normu kullanarak gevşetiyoruz. Bu tip gevşetmelerle ilgili son yıllarda ilginç teorik sonuçlar elde edilmeye başlandı. Ayrıca verilerimizin gürültülü olabileceğini hesaba katarak problemi  $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{a} + \mathbf{n}$  şeklinde kuruyoruz. Burada  $\mathbf{n}$  gözlem gürültüsüdür. Bu gözlemler ışığında, aşağıdaki maliyet işlevini enküçülten  $\mathbf{a}$ 'yı problemin çözümü olarak seçiyoruz:

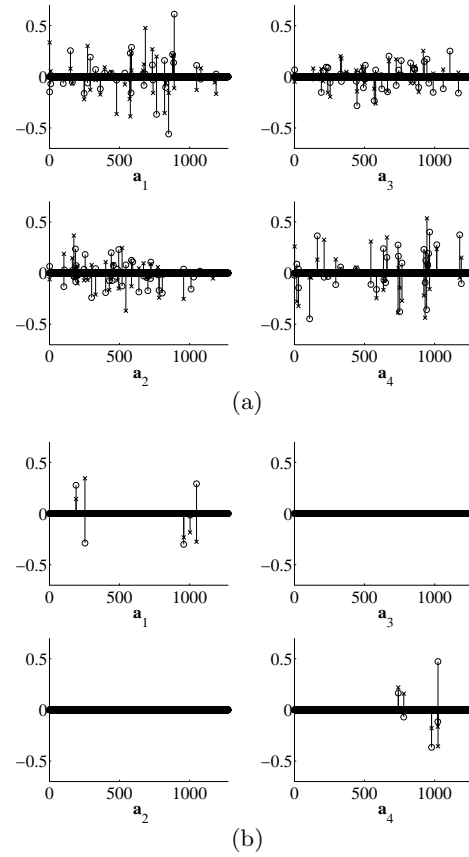
$$J(\mathbf{a}) = \|\mathbf{y} - \Phi\mathbf{a}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{a}\|_k^k, \quad k < 1. \quad (4)$$

Burada  $\ell_k$  normunun seyrekleştirici bir etkisi vardır,  $\alpha$  ise verilere sadakat ile seyreklik arasında denge kuran bir parametredir. Bu problemin çözümü için, daha önce yönbağımsız SAR görüntüleme için kullanılan özyineli bir algoritmayı [7] kullanabiliriz. Teorik olarak bu algoritma her büyüklükteki eniyileme problemine uygulanabilir. Ancak burada oluşturduğumuz yönbağımlı görüntüleme senaryosunda  $\Phi$  matrisinin sütun sayısı  $\mathcal{O}(N^2P)$  mertebesindedir. İlgilendiğimiz gerçekçi görüntüleme senaryolarında yüzlerce gözlem açısı ve uzamsal konum olacağından bu matrisin boyu önerilen yöntemin uygulanmasında hem hafıza hem de hesaplama yükü bakımından zorluklar oluşturacaktır. Bu nedenle, Bölüm 2’de tarif ettiğimiz grafiksel yapıyı kullanarak hafıza gereksinimlerini azaltan fırsatçı bir algoritmayı çözüm için öneriyoruz.

$N$  seviyeli sözlük grafiğinde düğümler sözlük elemanlarını temsil etmektedir. Oluşturduğumuz sözlük yapısında her uzamsal konum  $p'$  için sadece birkaç ve çoğu durumda sadece bir sözlük elemanın yönbağımlı saçılım işlevi  $s(x_{p'}, y_{p'}, \theta)$ 'yi temsil etmek için yeterli olması hedeflenmektedir. Bu nedenle seyrek sinyal temsili problemi sözlük grafiğinde bir ya da birkaç düğümün aranması problemi olarak görülebilir. Genelde  $P > 1$  uzamsal konum ve dolayısıyla aynı anda  $P$  tane sözlük grafiği bulunduğu için, problemin çözümü için eşzamanlı  $P$  tane arama gerekmektedir.

Her sözlük grafiği için her arama adımında problemi az sayıda sözlük elemanı dikkate alarak çözmeyi öneriyoruz. Böylece hem hesaplama yükü hem de hafıza gereksinimi kontrol altında tutulur. Örneğin Şekil 2’deki grafiği düşünürsek, problemin ilk adımda sadece tepedeki altı düğüm dikkate alınarak çözüldüğünü düşünelim. Problemin çözümünde kullanılan düğümlerin oluşturduğu altküme ”yönlendirme grafiği” ismini verelim. Böyle bir adımdan sonra aramanın devam edip etmeyeceği, edecekse hangi düğümlere doğru yönleneceği ile ilgili kuralların uygulanması gerekir. Bu kuralları oluşturmak için kullandığımız fikir şudur: gerçek saçılım davranışını temsil eden sözlük elemanı yönlendirme grafiğinin içinde değilse, elde edeceğimiz çözüm vektörü  $\mathbf{a}$  gerçeğe ”en yakın” çözüme tekabül eden sözlük elemanı için sıfır olmayan bir katsayıya sahip olacaktır. Örneğin doğru düğüm sözlük grafiğinin alt kısımlarındayken yönlendirme grafiği tepedeyse, büyük ihtimalle yönlendirme grafiğinin en alt seviyesindeki vektörlere tekabül eden katsayılar sıfır olmayan değerler alacaklardır. Öte yandan gerçek saçılımı temsil eden düğüm yönlendirme grafiğinin içindeyse, ona tekabül eden katsayının sıfır olmayan bir değer almasını bekleriz. Bu beklentilerimiz benzetim sonuçları tarafından da destekleniyor [1].

Yukarıdaki fikir ve gözlemlere bağlı olarak her uzamsal konum için şöyle bir yordam öneriyoruz. Sözlük grafiğinin tepesine yerleştirdiğimiz bir yönlendirme grafiği ile aramaya başlayalım. Çözüm yönlendirme grafiğinin en alt seviyesi dışındaki bir yerdeyse arama işlemini sonlandıralım. Eğer çözüm en alt seviyedeyse, o seviyedeki düğümlerin katsayılarının büyüklüğüne göre bir sonraki arama adımı için yönlendirme grafiğini alt-sağ veya alt-sol yönünde kaydıralım. Yeni yönlendirme grafiğiyle problemi tekrar çözelim ve aynı durma ve devam etme kurallarını uygulayalım. Bu işlemi  $P$  tane uzamsal konum



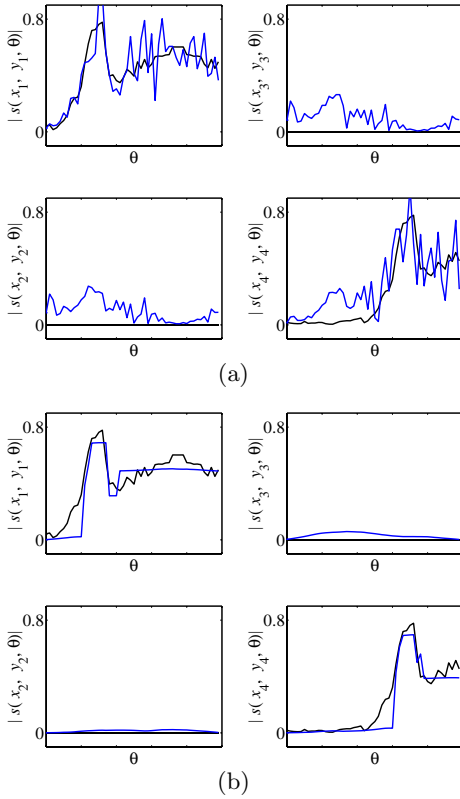
Şekil 3: Çözüm olarak bulunan  $\mathbf{a}$  vektörleri. (a) Geleneksel en küçük kareler, en küçük norm yöntemi. (b) Önerilen yöntem. Gerçek kısım  $\circ$  ve sanal kısım  $\times$  ile gösteriliyor.

için paralel olarak yaptığımızı ve her konumdaki arama işleminin diğerlerini etkileyebileceğini de belirtelim. Elimizdeki  $P$  konumun hepsindeki aramalar sonlanınca problemin çözümüne varmış oluruz.

## 4. Deneysel Sonuçlar

Önerdiğimiz yöntemin sonuçlarını iki örnek üzerinde gösteriyoruz. İlk örnekte doğal noktasal saçılım modelleri kullanılarak oluşturulmuş XPatch benzetim verilerini kullanıyoruz. İkinci örnekte ise A.B.D. Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı’nın sağladığı, içinde bir iş makinesinin bulunduğu sahneye tekabül eden gerçekçi elektromanyetik benzetim verilerini [8] kullanıyoruz.

İlk örnekteki basit senaryomuzda dört tane uzamsal konum (piksel) var. Bu noktaların koordinatları  $(0, 0)$ ,  $(0, \frac{1}{2})$ ,  $(\frac{1}{2}, 0)$ , ve  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$  metre. Kullandığımız ölçümler 9 GHz, 9.016 GHz, ve 9.032 GHz olmak üzere  $K = 3$  sıklıkta ve  $98^\circ$ ’lik açıklığa yayılmış  $N = 50$  açısal gözlem noktasında. Bu örnekte dört noktadan ikisinde saçıcı yok, diğer ikisinde ise gerçekçi (XPatch öngörülerine dayalı) yönbağımlı saçılım var. Önerdiğimiz yöntemde  $\ell_k$  normu için  $k = 0.1$  kullanıyoruz. Ayrıca karşılaştırma olması bakımından ters problemin geleneksel en küçük kareler, en küçük norm yaklaşımıyla çözümünün sonuçlarını da gösteriyoruz. Şekil 3 dört konumdaki  $\mathbf{a}$  vektörleri için bulunan çözümleri gösteriyor. Bu örnekteki  $N = 50$  seçimi için her uzamsal noktada  $M = 1275$  tane sözlük vektörü var. Bu vektörleri Şekil 1’deki gibi soldan sağa sıraladığımızı düşünürsek, Şekil 3’teki her bir çizim aynı sırayla bu vektörlere tekabül eden katsayıları gösteriyor. Beklediğimiz gibi,



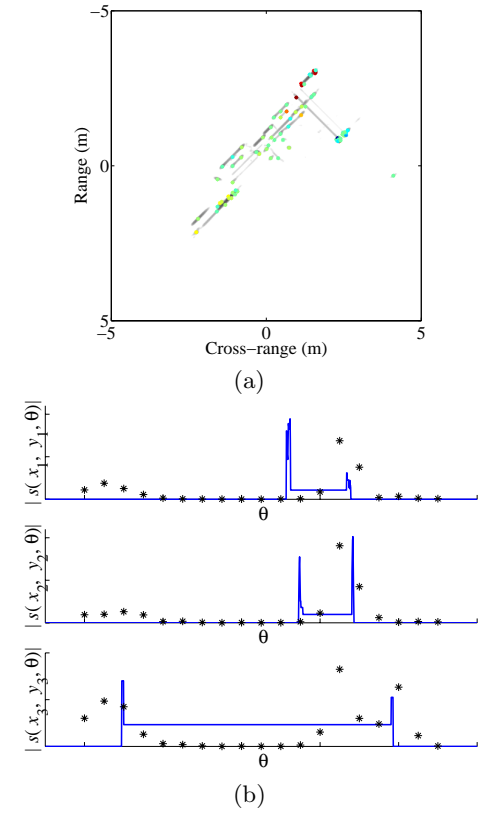
Şekil 4: Tahmin edilen yönbağımlılığın büyüklüğü. (a) En küçük kareler, en küçük norm yöntemi. (b) Önerilen yöntem. Mavi: tahmin edilen; siyah: gerçek yönbağımlılık.

önerdiğimiz yöntemle elde edilen **a** vektörü çok daha seyrek bir yapıya sahip, ve saçıcı olmayan noktalarda neredeyse tüm katsayılar olması gerektiği gibi sıfır. Diğer noktalarda ise yönbağımlı bir saçılım tahmin ediliyor. Şimdi bu saçılım sonuçlarını Şekil 4'teki  $s(x_p, y_p, \theta)$  işlevlerine bakarak inceleyelim. Önerdiğimiz yöntemin yönbağımlılık tespiti bakımından daha başarılı olduğunu görüyoruz. Böyle bir senaryoda yönbağımlılığı gözardı ederek görüntü oluştursaydık, piksellerde tahmin edilen yansıtırlık değerleri doğru değerleri yansıtmazdı.

İkinci örneğimizde [8]'deki verileri kullanıyoruz. Burada  $-10^\circ$  ile  $100^\circ$  arasındaki  $110^\circ$ 'lik açıklıkta,  $N = 1541$  açısal gözlem noktasında, ve 7.047 GHz, 9.994 GHz, ve 12.953 GHz olmak üzere  $K = 3$  sıklıkta veriler kullanıyoruz. Önce geleneksel olarak oluşturulmuş altaçıklık görüntülerinden [6]  $P = 75$  tane (baskın saçıcıların bulunduğu) uzamsal konum çıkarıyor ve yöntemimizi bu noktalar üzerinde uyguluyoruz. Şekil 5(a)'da saçıcılar için belirlenen saçılım merkez açısını renk ile kodlayarak gösteriyoruz. Burada kırmızı  $-10^\circ$ 'ye, yeşil  $45^\circ$ 'ye, mavi  $110^\circ$ 'ye tekabül ediyor. Farklı saçıcılar için farklı saçılma yönleri tespit ettiğimizi görüyoruz. Şekil 5(b)'de birkaç tane saçıcı için tespit edilen yönbağımlı saçılımın büyüklüğünü gösteriyoruz. Burada düz çizgiler önerdiğimiz yöntemin sonucunu, yıldızlar ise [6]'daki yaklaşımla elde edilen altaçıklık piksel değerlerini gösteriyor. Önerdiğimiz yöntemin sonuçlarının açısal tepki bakımından daha detaylı bilgi verdiğini görüyoruz.

## 5. Kaynakça

[1] K. R. Varshney, M. Çetin, J. W. Fisher III, ve A. S. Willsky, "Joint Image Formation and Anisotropy Char-



Şekil 5: Bir iş makinesinin oluşturulan görüntüsü ve yönbağımlılık analizi. (a) Saçılma yönünün görüntü üzerinde renk ile gösterimi. (b) Belirlenen yönbağımlı saçılım örnekleri.

acterization in Wide-Angle SAR," Algorithms for SAR Imagery XIII, Orlando, FL, A.B.D., Nisan 2006.

[2] L. C. Potter ve R. L. Moses, "Attributed scattering centers for SAR ATR," *IEEE Trans. Image Processing*, cilt 6, s. 79–91, Ocak 1997.

[3] L. C. Trintinalia, R. Bhalla, ve H. Ling, "Scattering center parameterization of wide-angle backscattered data using adaptive Gaussian representation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 45, s. 1664–1668, Kasım 1997.

[4] M. R. Allen ve L. E. Hoff, "Wide-angle wideband SAR matched filter image formation for enhanced detection performance," *Algorithms for SAR Imagery*, Orlando, FL, A.B.D., Nisan 1994.

[5] P. Runkle, L. H. Nguyen, J. H. McClellan, ve L. Carin, "Multi-aspect target detection for SAR imagery using hidden Markov models," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, cilt 39, s. 46–55, Ocak 2001.

[6] M. Çetin ve R. L. Moses, "Sıklık bandı eksiklikleri olan geniş açılı verilerden sentetik açıklıklı radar ile görüntüleme" *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Antalya, Nisan 2006.

[7] M. Çetin ve W. C. Karl, "Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization," *IEEE Trans. Image Processing*, cilt 10, s. 623–631, Nisan 2001.

[8] "Backhoe data dome and Visual-D challenge problem." Air Force Research Laboratory Sensor Data Management System (<https://www.sdms.afrl.af.mil/main.php>), 2004.