

# Bir Yapay Açıklıklı Radar Tekniği ile Odaklanmış Yere Nüfuz Eden Radar Görüntülerinin Elde Edilmesi

Enes Yiğit, Caner Özdemir ve Şevket Demirci  
Mersin Üniversitesi,

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 33343 Çiftlikköy, Mersin  
[enesyigit81@mersin.edu.tr](mailto:enesyigit81@mersin.edu.tr), [cozdemir@mersin.edu.tr](mailto:cozdemir@mersin.edu.tr), [sdemirci@mersin.edu.tr](mailto:sdemirci@mersin.edu.tr)

**Özet:** Bu çalışmada, B-tarama Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) görüntülerindeki istenmeyen hiperbolik imaj tepkisinin odaklanması için bir Şerit-harita Yapay Açıklıklı Radar (Strip-map SAR) algoritması geliştirilmiştir. B-tarama YNR görüntülerinde genel bir problem olan hiperbolik imaj etkisini tamamen ortadan kaldıran algoritmanın formülasyonu detaylı olarak sunulmuştur. Metod, öncelikle yapay YNR verisinde başarılı olarak uygulanmış ve mükemmele yakın odaklanmış YNR görüntüleri sunulmuştur. Daha sonra, algoritmanın gerçek YNR verisine uygulanması amacıyla laboratuvar ortamında bir YNR deney düzeneği imal edilmiş ve toplanan gerçek B-tarama YNR verisine algoritma uygulanmıştır. Algoritma sayesinde yüksek çözünürlükte odaklanmış B-tarama YNR görüntüleri elde edilmiştir.

## 1. Giriş

Yirminci yüzyılın önemli mühendislik buluşlarından biri olan Yapay Açıklıklı Radar (SAR), genel olarak yeryüzünün ya da yeryüzü üzerindeki hedeflerin uzaktan algılama metodlarıyla yüksek çözünürlükte elektromanyetik (EM) haritalarını/görüntülerini çıkaran hava aracı veya uydu bazlı radar sistemi olarak tanımlanabilir [1]. SAR teknikleri Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) uygulamalarında da kullanılabilir [2-4]. YNR uygulamalarında, gömülü olan nesnelerin yeri, büyüklüğü ve EM saçılma özelliklerinin belirlenmesi ana amaçtır. Bu yüzden tarama geometrisine bağlı olarak A-, B-, C-tarama gibi farklı tarama YNR yöntemleri, değişik uygulamalar için kullanılmaktadır [5]. B-tarama YNR konfigürasyonunda, radar yüzey boyunca doğrusal bir hat boyunca hareket ettirilirken, frekans çeşitliliği de kullanılarak iki boyutlu (2-B) uzay-frekans matrisi elde edilir. B-tarama uzay-zaman YNR görüntülerinde; hedefler, hiperbolik imajlar olarak görülmektedir [3]. Ancak, nesnenin yansıtıcılığı ile birlikte gerçek konumunu veren odaklanmış uzamsal görüntü bilgisi çoğu uygulamada gereklidir. Bu amaçla, yakın zamanda birçok görüntü göç ettirme (migration) algoritması çalışılmıştır. YNR profilleri için ters-zaman göç ettirme algoritmaları, Hough-Dönüşüm teknikleri, sonlu-farklar zaman-düzlemi (FDTD) ters-zaman göç ettirme algoritmalarına dayanan geri-yayılım (back-propagation) teknikleri ve Yapay Açıklıklı Radar algoritmaları [6-8] gibi farklı uygulamalar en bilinenleridir. Bu çalışmada, 2-B B-tarama uzay-zaman YNR görüntülerine, bir tip şerit-harita SAR tekniği [5] göç ettirme algoritması uygulanmıştır. Uygulanan algoritmanın neticesinde, yüzey altının ve yüzey altı hedeflerinin yüksek çözünürlüklü gerçek uzay görüntüleri elde edilmiştir. Algoritma ayrıntılı olarak 2. bölümde verilmiştir. 3. bölümde ise; geliştirilen SAR algoritması benzetim ve gerçek YNR verilerine uygulanmış ve sonuçlar sunulmuştur.

## 2. Şerit-Harita SAR bazlı YNR Odaklama Algoritması

Monostatik konfigürasyondaki tipik bir YNR sisteminde, radar anteni  $x$  eksenindeki yapay açıklık boyunca hareket ettirilirken, toprak altındaki farklı konumlardaki  $N$  adet noktasal saçıcıdan oluşan Elektromanyetik (EM) saçılmayı toplamaktadır. Vericiden gönderilen bir  $X(t)$  darbesinin;  $(x_i, z_i)$ 'de konumlandırılmış  $i$ nci hedeften yansıyan EM saçılması;  $\rho_i$  ise; tüm saçıcılardan toplanan EM sinyali  $e(x, t)$  aşağıdaki gibi verilebilir:

$$e(x, t) = \sum_{i=1}^N \rho_i X \left[ \frac{t - 2\sqrt{z_i^2 + (x_i - x)^2}}{c_m} \right] \quad (2.1)$$

Burada  $c_m$  ortamdaki ışık hızı,  $t$  ise zaman değişkenidir. Denklem (2.1)'in Fourier dönüşümü alındığında

$$e(x, w) = \left( \frac{1}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} X(w) \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j2k\sqrt{z_i^2 + (x_i - x)^2}} \quad (2.2)$$

elde edilecektir. Burada  $k = w/c_m$  dalganın bulunduğu ortam için dalga sayısıdır.  $X(w)$ ; darbe sinyalinin Fourier dönüşümüdür. Denklem (2.2)'nin uzay bölgesindeki  $(k_x)$  Fourier dönüşümü alındığında

$$E(k_x, w) = \left( \frac{1}{2\pi} \right) X(w) \frac{e^{-j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{4k^2 - k_x^2}} \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2} \cdot z_i - jk_x x_i} \quad (2.3)$$

denklemin elde edilir. Yukarıdaki denklemde  $e^{-j(\frac{z}{4})} / \sqrt{4k^2 - k_x^2}$  genlik terimi, ifadenin fazını etkilemediğinden ihmal edilebilir [5]. Ancak, 2-B uzaydaki  $N$  adet saçıcı için ideal YNR görüntüsü aşağıdaki gibi olmalıdır:

$$g_0(x, z) = \sum_{i=1}^N \rho_i \delta(x - x_i, z - z_i) \quad (2.4)$$

Burada  $\delta(x-x_i, z-z_i)$ , 2-B birim-darbe fonksiyonudur. Böyle bir görüntünün  $x$ - ve  $z$ - yönlerinde 2-B uzamsal Fourier dönüşümü alındığında

$$G_0(k_x, k_z) = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-jk_x x_i - jk_z z_i} \quad (2.5)$$

elde edilecektir. Bu durumda, (2.3) ve (2.5) denklemleri karşılaştırıldığında ve aşağıdaki uzay-frekans aktarım denklemi kullanıldığında

$$k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2} = \sqrt{\frac{4w^2}{c_m^2} - k_x^2} \quad (2.6)$$

aşağıda verilen özdeşliğe ulaşılabilir.

$$G_0(k_x, k_z) = \frac{E(k_x, w)}{X(w)} \quad (2.7)$$

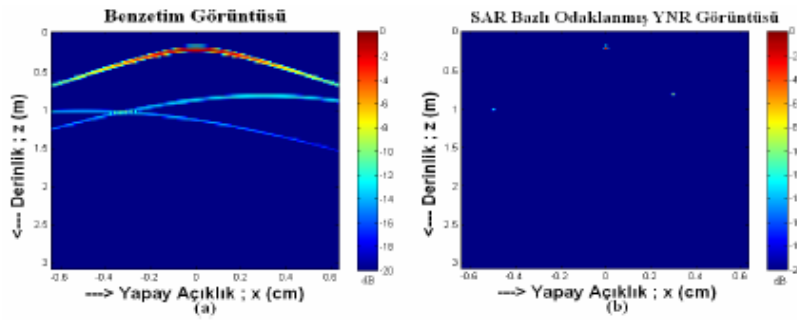
Burada  $k_x$  ve  $k_z$  gerçek uzamsal frekanslar olduğundan, (2.7)'nin 2-B ters Fourier dönüşümü (IFT) alındığında hedeflerin gerçek konumları odaklanmış olarak aşağıdaki denklem ile elde edilecektir.

$$YNR_{\text{odak}}(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E(k_x, k_z)}{X(w)} e^{j(k_x x + k_z z)} dk_x dk_z \quad (2.8)$$

### 3. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları

#### a) Benzetim Sonuçları

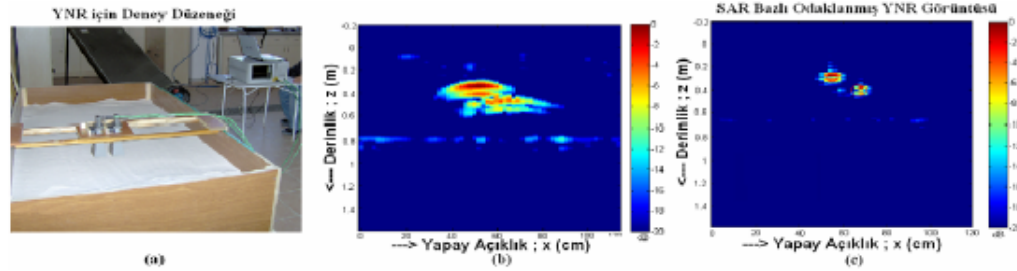
Yukarıda sunulan algoritma, öncelikle benzetim sonuçlarına uygulanmıştır. Yapay hedef düzeneği için MATLAB® ortamında yapay olarak 2-B B-tarama YNR benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ( $x_1 = -50 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 100 \text{ cm}$ ), ( $x_2 = 0 \text{ cm}$ ,  $z_2 = 20 \text{ cm}$ ) ve ( $x_3 = 30 \text{ cm}$ ,  $z_3 = 80 \text{ cm}$ ) koordinatlarına 3 adet noktasal saçıcı yerleştirilmiştir. Ortam; doğrusal, isotropik ve kayıpsız kabul edilmiş ve ortamın dielektrik sabiti 2.32 olarak alınmıştır. Benzetimde toprak-hava yüzeyinden yansıma ihmal edilmiştir.  $z$ -ekseni yönünde 128cm yapay açıklık boyunca toplam 128 ayrı noktasal, geri-saçılma elektrik alan sinyali; 4.5–8.5 GHz arasında 128 değişik frekans noktası için değiştirilmiştir. Böylece toplam 128x128'lik 2-B uzamsal-frekans B-tarama geri-saçılma verisi toplanmıştır. Bu verinin 1-B IFT'si alınarak elde edilen orijinal YNR görüntüsü Şek. 1(a)'da verilmiştir. Beklenildiği üzere, şekilde istenmeyen hiperbolik imajlar oluşmaktadır [3, 5]. Aslında, nesnelerin doğru konumu bu hiperbolların tepe noktasıdır. Daha sonra, yukarıda ayrıntıları verilen algoritmanın uygulanması sonucunda Şek. 1(b)'de görülen YNR görüntüsü elde edilmiştir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, yüksek çözünürlükte mükemmel yakın odaklanmış YNR görüntüsü elde edilmiş ve üç değişik noktasal hedef gerçek yerlerinde nokta şeklinde görüntülenmiştir. Algoritmayı uygularken, 2-B orijinal veri ( $k_x, w$ ) bölgesinde doğrusal olmayan bir ızgara üzerinde oturmaktadır. Bu veriyi ( $k_x, k_z$ ) bölgesinde, eşit bölmeli 2-B dikdörtgen ızgaraya taşıyabilmek için, bir tip "sinc interpolasyon" tekniği uygulanmıştır.



Şekil 1. Farklı derinliklerde bulunan noktasal hedeflerden nümerik olarak elde edilmiş B-tarama YNR görüntüleri: (a) Benzetim sonunda elde edilen görüntü (b) Uygulanan algoritma sonucu elde edilen görüntü.

#### b) Ölçüm Sonuçları

Geliştirilen odaklama metodunu gerçek YNR görüntüsüne uygulamak amacıyla, X-bant frekanslarında dielektrik sabiti 2.4 civarında olan kuru kum malzeme ile doldurulan  $190\text{cm} \times 100\text{cm} \times 80\text{cm}$  boyutlarındaki tahta havuz imal edildi (Şek. 2(a)). Kum havuzun içine kesit çapı  $4.5\text{cm}$  ve boyu  $43\text{cm}$  olan ve yine çapı  $6\text{cm}$  ve boyu  $32\text{cm}$  olan metal borular değişik derinliklere yatay olarak gömüldü. Daha sonra, bistatik konfigürasyonda X-bant dikdörtgensel piramit boynuz antenler ve Agilent ENA5071B Network Analizörü (Şek. 2(a)) yardımıyla,  $120\text{cm}$  yapay açıklık boyunca, iletim saçılma verisi  $S_{21}$  toplanırken frekans da  $4.0\text{--}7.1\text{GHz}$  arasında toplam 201 kesikli nokta için değiştirildi. Şek. 2(b)'de söz konusu nesnelere için B-tarama konfigürasyonu neticesinde oluşan YNR görüntüsü görülmektedir. Uyguladığımız SAR algoritmasının sonucunda elde ettiğimiz yeni görüntü Şek. 2(c)'de verilmektedir. Uygulanan SAR algoritmasının neticesinde ise  $30\text{cm}$  derinlikteki metal boru ile  $40\text{cm}$  derinlikteki metal boru'dan oluşan EM saçılması doğru yerlerinde ve çok iyi bir şekilde odaklanmış olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Kum havuzuna gömülmüş farklı boyutlardaki metal borulardan elde edilen YNR görüntüleri: (a) YNR için kurulan deney düzeneği, (b) B-tarama sonrasındaki orijinal görüntü, (c) SAR algoritması sonucu elde edilen odaklanmış görüntü.

#### 4. Sonuç

Bu bildiriye; 2-B B-tarama YNR görüntülerindeki hiperbolik imaj bozulmalarını gidermek amacıyla şerit-harita SAR tekniğine dayalı bir odaklama algoritması sunulmuştur. Geliştirilen SAR algoritması ilk olarak ideal hedefler için denenmiş ve benzetim sonuçlarında mükemmel odaklanma sağlanmıştır. Gerçek yeraltı EM saçılma verisinin elde edilmesi amacıyla kurulan bir YNR deney düzeneği yardımıyla, gerçek 2-B B-tarama YNR verisi elde edilmiştir. Daha sonra, geliştirilen algoritma gerçek YNR verisine uygulanmış ve yüksek çözünürlüklü, odaklanmış YNR görüntüleri başarılı olarak elde edilmiştir. Geliştirilen algoritma, literatürdeki bilinen odaklama algoritmalarına göre oldukça hızlı çalışmaktadır. Ancak  $(k_x, w)$  bölgesinde, doğrusal olmayan bir ızgara üzerinde bulunan veriyi  $(k_x, k_z)$  bölgesinde, eşit bölümlü 2-B dikdörtgensel ızgaraya taşıyabilmek için, kullanılan interpolasyon tekniği uzun matris işlemlerinde dolayı zaman almaktadır. Söz konusu durum için, farklı interpolasyon teknikleri geliştirilerek, algoritmanın işleyişi çok daha hızlı hale getirilebilir.

**5. Teşekkür:** Bu çalışmayı, EEEAG-104E085 proje koduyla destekleyen TÜBİTAK'a, laboratuvar imkânlarını sağlayan Mersin Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne ve deneylerde kullanılan kum malzemesini hibe eden Mersin Trakya Cam Sanayi A.Ş.'ne teşekkür ederiz.

#### 6. Kaynaklar

- [1]. Özdemir C., "Synthetic Aperture Radar", K. Chang (Ed), Encyclop. of RF and Microw. Engin., New York, Wiley, 2005.
- [2]. Özdemir C., Lim S., ve Ling H., "A Synthetic-Aperture Algorithm for Ground-Penetrating Radar Imaging", Microw. Opt. Tech. Letters, 42, s.412-414, 2004
- [3]. Vitebskiy S., Carin L., Ressler M. ve Le F., "Ultrawide-band, short-pulse ground-penetrating radar: simulation and measurement," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35, s. 762-772, May 1997.
- [4]. Chen V. C., "Radar Imaging", Encyclop. of RF and Microw. Engin., Washington, Wiley, 2005.
- [5]. Soumekh M., Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms, New York, Wiley, 1999.
- [6]. Fisher E., McMechan G. A., Amman A. P., ve Cosway S. W. "Examples of reverse-time migration of single-channel, ground-penetrating radar profiles," *Geophysics*, 57, s.577-586, 1992.
- [7]. Leuschen C. J., Plumb R.G. "A matched-filter-based reverse-time migration algorithm for ground-penetrating radar data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, s.929-936, 2001.
- [8]. Morrow I. L., ve Van Genderen P. A. "2D polarimetric backpropagation algorithm for ground-penetrating radar applications," *Microwave Opt. Techn. Lett.*, 28, s.1-4, 2001.