

İleri Sentetik Açıklıklı Radar Görüntüleme Algoritmalarında Parametre Seçimi

Hyper-parameter Selection in Advanced Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithms

Özge Batu ve Müjdat Çetin

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

ozgebatu@su.sabanciuniv.edu, mcetin@sabanciuniv.edu

Özetçe

Sentetik açıklıklı radar (SAR) verilerinden görüntü oluşturmada kullanılan ileri görüntü oluşturma algoritmalarındaki parametre seçimi sorunu ele alıyoruz. Söz konusu algoritmalarındaki düzenleme parametresinin seçimi için yansız öngörücü risk kestirimi yönteminin ve genelleştirilmiş çapraz sağlama yönteminin kullanımını öneriyoruz. Bu yöntemlerin etkinliğini elektromanyetik benzetimlerle elde edilmiş gerçekçi veriler üzerindeki deneylerimizle gösteriyoruz.

Abstract

We consider the problem of hyper-parameter selection in advanced image reconstruction algorithms used in synthetic aperture radar (SAR) imaging. To deal with the parameter selection problem in these algorithms, we propose the use of unbiased predictive risk estimation and generalized cross-validation techniques. We demonstrate the effectiveness of the applied methods through experiments based on electromagnetically simulated realistic data.

1. Giriş

Sentetik açıklıklı radar (SAR), askeri ve sivil birçok uzaktan algılama uygulamasında kullanılan, gündüz ve gece görüşüne sahip olması, hava koşullarından bağımsız çalışması gibi avantajları sayesinde öne çıkan bir algılayıcıdır. Hareketli bir platform (örn. uçak) üzerine yerleştirilen SAR algılayıcısı, hareketi boyunca mikrodalga vuruşları yayar ve bu dalgaların geri yansıyan bölümünü sinyal olarak toplar. SAR görüntüleme, yansıyan sinyalden yansıtıcı alanın görüntüsünü oluşturmak hedeflenir.

SAR için geleneksel görüntü oluşturma yöntemleri Fourier dönüşümüne dayalı algoritmaları kullanır. Söz konusu algoritmalar eksiksiz ve gürültüsüz veriler toplanacağı varsayılarak geliştirilmiştir ve bu sebeple daha zorlu bir senaryoda tatmin edici sonuçlar üretemeyebilir. Ayrıca, herhangi bir içeriksel bilgi ya da elde edilmek istenen görüntünün niteliklerine ilişkin olası kısıtlar hesaba katılmadığından, sadece veriye bağlı bir görüntü oluşturulmuş olur ve bu görüntü görsel ve otomatik değerlendirme için çoğunlukla yetersiz kalır.

Yakın geçmişte, yukarıda bahsedilen sorunların (ve yer darlığından dolayı bahsedemediğimiz diğer sorunların) çözümü için bazı yaklaşımlar geliştirildi [1,2,3]. Bu sayede, eksik ve gürültülü verilerden iyi kalitede görüntülere ulaşmak olanaklı hale geldi. Çalışmamızda model bazlı, karesel olmayan düzenlemeye dayalı, öznelikleri iyileştirme amacı taşıyan bir görüntü oluşturma yöntemini ele alıyoruz [1]. Söz konusu yöntemde görüntü, bir amaç fonksiyonunun enküçültülmesiyle elde edilmektedir. Önerilen yöntemdeki amaç fonksiyonu iki terimden oluşmaktadır. Birinci terim verilere sadakati, ikinci terim ise ön bilgiye uygunluğu sağlar. Bu iki terim arasındaki dengeyi düzenleme parametresi belirler ve düzenlemeye dayalı diğer yöntemlerde olduğu gibi, bu yöntemde de düzenleme parametresinin seçimi önemli bir rol oynamaktadır.

İdeal olarak SAR görüntülerinin otomatik algılama ve hedef sezimi için kullanılması amaçlandığından, otomatik parametre seçimi aşılması gereken önemli bir basamaktır. Şimdiye kadar SAR ile görüntüleme bağlamında bu parametrenin otomatik seçilmesiyle ilgili bir çalışma yapılmamıştır.

SAR görüntüleme probleminde parametre seçimi için, geçmişte başka problemlerde kullanılmış iki yöntemi ele alıyoruz. Bunlardan birincisi yansız öngörücü risk kestirimi yöntemidir [4,5]. İkincisi ise genelleştirilmiş çapraz sağlama yöntemidir [6]. Bu yaklaşımları SAR ile

Bu çalışma TÜBİTAK'ın 105E090 ve Avrupa Komisyonu'nun MIRC-CT-2006-041919 sayılı projeleri kapsamında desteklenmiştir.

görüntüleme problemine uyarlıyoruz ve her iki yöntemin başarımını, doğal noktasal saçılım modelleri kullanılarak oluşturulmuş basit benzetim verileri ve A.B.D Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'nın sağladığı zengin elektromanyetik benzetim verileri üzerinde gösteriyoruz.

2. Karesel Olmayan Düzenleştirmeye Dayalı Sentetik Açıklıklı Radar Görüntüleme

Geleneksel SAR görüntüleme yöntemleri eksik ve gürültülü verilerden yüksek kaliteli görüntü oluşturmada yetersiz kalmaktadır. Oysa otomatik hedef tanıma sistemleri gibi ileri teknolojiler işlevlerini yerine getirebilmek için yüksek çözünürlüklü SAR görüntülerine ihtiyaç duyarlar. Bu güdüyle geliştirilmiş öznitelik iyileştirici algoritmalar, problemi amaca yönelik kısıtlamalar getirerek çözer ve bu sayede daha tatmin edici sonuçlar üretir.

SAR görüntüleme verilerin gürültülü olabileceği hesaba katılarak problem şu ayrık modelle ifade edilebilir:

$$y = Hf + w \quad (1)$$

Burada y ve f sırasıyla veriyi ve görüntüsünü oluşturmaya çalıştığımız saçıcı alanı temsil eden vektörleri, H SAR izdüşüm matrisini ve w gürültüyü belirtmektedir. Görüldüğü gibi SAR görüntüleme problemi, diğer birçok görüntü oluşturma ve geriçatma problemi gibi basit bir gözlem modeliyle ifade edilebilir. Ancak bu modeldeki tüm elemanlar karmaşık değerlidir. Bu bildiride ele aldığımız örneklerde, görüntülenen alan noktasal saçıcılardan oluştuğu için görüntü (but tip sahnelere uygun olan [1]) aşağıdaki eniyileme problemi çözümlenerek bulunur:

$$\hat{f} = \underset{f}{\operatorname{argmin}} \{ \|y - Hf\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \} \quad (2)$$

Burada λ sayılı bir parametredir. Denklem (2)'deki amaç fonksiyonunda birinci terim gözlem sürecinin matematiksel bir modelini kullanarak verilere sadakati sağlar. İkinci terim ise geriçatılmış görüntünün seyrek olması gerekliliğini belirten bir kısıttır. Bu kısıt sayesinde az sayıda noktasal saçıcı içeren sahnelerde süperçözünürlük elde edilmiş olur. Denklem (2)'deki eniyileme probleminin kapalı biçimli çözümü yoktur, ancak verimli döngülü algoritmalarla çözümlenir.

3. Parametre Seçimi

Düzenleştirmeye dayalı yöntemlerde, veri ile ön bilgi birlikte kullanılarak kararlı bir çözüm üretilir. Denklem (2)'deki düzenleme parametresi λ , gerçek görüntünün kestirimini veriye uygunluğuyla ön bilgiye uygunluğu arasında bir denge kurar. Bu parametrenin seçimi için her ikisi de belirlenimci birer yaklaşım olan, yansız öngörücü risk kestirimi yöntemini ve geliştirilmiş çapraz sağlama yöntemini kullanıyoruz.

3.1. Yansız öngörücü risk kestiricisi (UPRE)

Öngörücü risk şu şekilde tanımlanır:

$$R(\lambda) = E \left[\frac{1}{n} \|H\hat{f}_\lambda - Hf\|^2 \right] \quad (3)$$

Risk, λ parametresi kullanılarak geriye döndürülen görüntü \hat{f}_λ ile özgün görüntü arasındaki uzaklık bilgisini içerir. Özgün görüntüyü bilmediğimizden riskin gerçek değerinin hesaplanması olanaklı değildir. Stein'in yansız risk kestirimi $\hat{R}(\lambda)$, risk için yansız bir kestirimdir :

$$\hat{R}(\lambda) = \sigma^2 + \frac{1}{n} \|H\hat{f}_\lambda - y\|^2 - \frac{2\sigma^2}{n} \sum_1^n \frac{\partial e_i}{\partial y_i} \quad (4)$$

$$e = y - H\hat{f} \quad (5)$$

Burada $\hat{R}(\lambda)$ riskin beklenen değeri, σ^2 gürültünün değışintisidir. UPRE'yi kullanabilmek için gürültüyle ilgili bu ön bilgiye ya da bir kestirime sahip olmak gerekir. Denklem (4)'teki yansız kestirimin şu ifadeye denk geldiği gösterilmiştir [7]:

$$\hat{R}(\lambda) = -\sigma^2 + \frac{1}{n} \sum_1^n e_i^2 + 2 \frac{\sigma^2}{n} \operatorname{trace}(HJ_{ff}^{-1}H^T) \quad (6)$$

Burada J_{ff} amaç fonksiyonunun f 'ye göre ikinci türevini gösterir. Denklem (6)'da verilen fonksiyonun beklenen değeriyle Denklem (3)'te verilen öngörücü riskin beklenen değeri aynıdır. Bu durumda λ parametresi şu şekilde seçilir:

$$\lambda = \operatorname{arg} \min_\lambda \hat{R}(\lambda) \quad (7)$$

3.2. Genelleştirilmiş çapraz sağlama (GCV)

Bu yöntem de Denklem (3) ile verilen öngörücü riski enküçülten λ parametresini bulmayı hedefler; öyle ki veri kümesindeki her nokta üzerinden ortalama alınmak üzere, bir veri noktası eksikken, düzenleştireilmiş çözümden o veri noktasını en iyi öngören λ parametresini seçer. Sonuç olarak λ aşağıdaki amaç fonksiyonu enküçültülerek bulunur [6]:

$$\vartheta(\lambda) = \frac{\frac{1}{n} \|g - H\hat{f}_\lambda\|_2^2}{\left[\frac{1}{n} \operatorname{trace}(I - HH^\#) \right]^2} \quad (8)$$

Burada $H^\#$ veriye uygulandığında düzenleştireilmiş çözümü veren bir operatördür. $\vartheta(\lambda)$ fonksiyonu, Denklem (3) ile verilen öngörücü riskin bir kestirimidir ve gürültüyle ilgili ön bilgi gerektirmez. Bu fonksiyonu enküçülten λ parametresi, öngörücü riski enküçülten parametre değerine yakın bir değer alır.

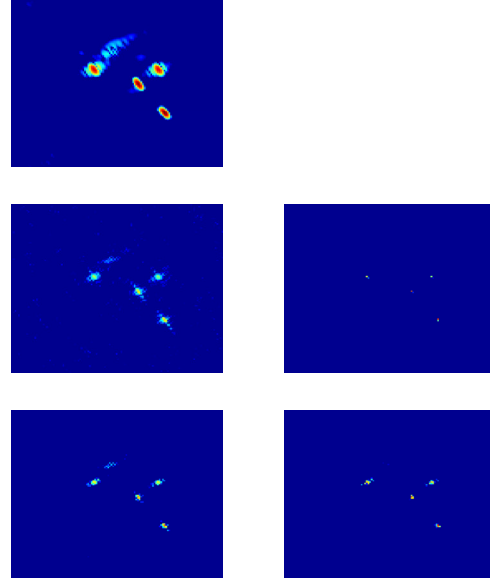
4. Deneysel Sonuçlar

Kullanımını önerdiğimiz iki yöntemin sonuçlarını iki örnek üzerinde gösteriyoruz. İlk örnekte MSTAR veritabanındaki SLICY hedefi için XPATCH elektromanyetik benzetim koduyla oluşturulmuş verileri kullanıyoruz [8]. İkinci örnekte ise A.B.D. Hava

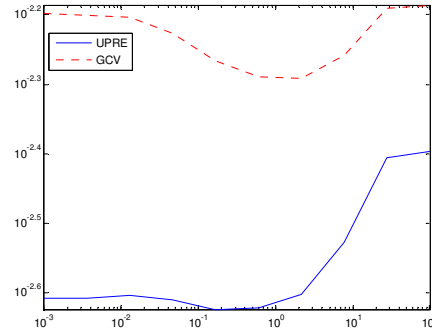
Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'nın sağladığı, içinde bir iş makinesinin bulunduğu sahneye tekabül eden gerçekçi elektromanyetik benzetim verilerini [9] kullanıyoruz. Bu veri kümesi, Şekil 3'te gösterdiğimiz iş makinesinden (bekho) boş uzayda toplanan geniş bantlı (7-13 GHz), tam kutuplaşmalı, karmaşık değerli geri saçılım sinyallerinden oluşmaktadır. Geniş açılı ya da seyrek açıklıklı verilerden SAR ile görüntüleme gibi zor senaryoların incelenmesi için elverişli ve zengin bir veri kümesidir.

İlk örnekteki basit senaryomuzda dört tane noktasal saçıcı var. Şekil 1'de sıklık verilerinden oluşturulan görüntüleri sunuyoruz. Şekil 1(a)'daki görüntü geleneksel SAR görüntüleme yöntemleriyle oluşturulmuştur. Bu görüntünün noktasal saçıcılardan oluşmuş bir alanı göstermede özellikle çözünürlük bakımından yetersiz kaldığı açıkça görülüyor. Şekil 1(b)'de ve Şekil 1(c)'de sırasıyla çok küçük ve çok büyük parametre değeri kullanılarak karesel olmayan düzenlileştirmeye dayalı SAR görüntüleme yöntemiyle oluşturulmuş görüntüleri sunuyoruz. Kullandığımız veriler gürültülü olduğundan çok küçük parametre değerleri için yüksek sıklık bileşenlerinin baskın olduğu görüntüler ortaya çıkıyor. Çok büyük parametre değerleri içinse noktasal saçıcıların zorlukla gözlemlenebildiği hatta gözlemlenemediği sonuçlar elde ediliyor. Bu örnekler parametre seçiminin iyi yapılmasının gerekliliğine işaret ediyor. Şekil 1(d)'de ve Şekil 1(e)'de ise sırasıyla UPRE ve GCV yöntemleriyle otomatik olarak seçtiğimiz parametre değerleriyle elde edilen görüntüleri sunuyoruz. Kullandığımız parametre seçme yöntemlerinin başarımını görsel olarak değerlendiriyoruz. Her iki yöntemle seçilen parametre değerleri, gürültü bileşenlerinin bastırırken noktasal saçıcıların korunmasını sağlayan görüntüler oluşturuyor. Yansız öngörücü risk kestirimi yönteminin, geliştirilmiş çapraz sağlama yöntemine göre parametre değerlerini daha küçük seçme eğiliminde olduğunu gözlemliyoruz. Şekil 2'de aynı problem için elde ettiğimiz UPRE ve GCV fonksiyonlarının farklı parametre değerleri için aldıkları değerleri gösteren grafiği sunuyoruz. Görüldüğü gibi bu iki yönteme ait eğriler farklılık gösterse de oldukça yakın noktalarda en küçük değerlerine ulaşıyorlar. Elde ettiğimiz sonuçları görsel olarak değerlendirdiğimizde UPRE ve GCV yöntemlerinin mantıklı seçimler yaptığını söyleyebiliriz.

İkinci örneğimizde [9]'deki verileri kullanıyoruz ve Şekil 3'teki iş makinesinin görüntüsünü oluşturmaya çalışıyoruz. Şekil 4'te SAR görüntülemeyle elde edilen görüntüleri sunuyoruz. Bu görüntüleri oluşturmak için [10]'da önerilen bileşik geniş açılı görüntüleme yöntemini kullanıyoruz. Şekil 4(a)'daki görüntü geleneksel yöntemlerle oluşturulmuştur. Bu görüntünün düşük çözünürlük gösterdiği ve ayırdedici özelliklerin kaybolduğu görülüyor. Diğer taraftan Şekil 4(b)'de ve Şekil 4(c)'de sırasıyla UPRE ve GCV kullanılarak



Şekil 1 SLICY hedefi için oluşturulan SAR görüntüleri. (a) Geleneksel yöntemle elde edilen görüntü. (b) Çok küçük parametre değeri kullanılıyor. (c) Çok büyük bir parametre değeri kullanılıyor. (d) UPRE ile seçilen parametre değeri kullanılıyor. (e) GCV ile seçilen parametre değeri kullanılıyor.



Şekil 2 UPRE ve GCV fonksiyonları için elde edilen eğriler.

karesel olmayan düzenlileştirmeye dayalı SAR görüntüleme yöntemiyle oluşturulmuş görüntüleri sunuyoruz. Yüksek çözünürlüklü bu görüntülerde özneliklerin korunduğunu gözlemliyoruz. Yansız öngörücü risk kestirimi yönteminin ve geliştirilmiş çapraz sağlama yönteminin çok yakın parametre değerleri seçtiğini ve sonuç olarak birbirine çok yakın görüntüler ürettiğini görüyoruz. Bu görüntüleri yine görsel olarak değerlendiriyoruz. Özniteliklerin korunması ve yüksek çözünürlük elde edilmesi açısından bakıldığında her iki yöntemin de mantıklı sonuçlar ortaya koyduğunu söyleyebiliriz.

5. Vargılar

Karesel olmayan düzenlemeye dayalı sentetik açıklıklı radar görüntüleme yöntemlerinde parametre seçme problemini ele aldık. Şimdiye kadar SAR ile görüntüleme bağlamında düzenleme parametresinin otomatik seçimi için önerilmiş ve kullanılan bir yöntem yoktu. Çalışmamızda bu parametrenin seçimi için yansız öngörücü risk kestirimi yöntemini ve geliştirilmiş çapraz sağlama yöntemini kullandık. Elde edilen görüntüleri görsel olarak değerlendirdiğimizde önerilen yöntemlerin düzenleme parametresini makul biçimde seçtiğini gözlemledik. Parametre seçiminin otomatik olarak seçilire hale gelmesiyle görüntü oluşturma işlemi de otomatikleşmiş oldu. Böylece yüksek çözünürlüklü görüntülerin otomatik algılama sistemlerinde kullanılabilmesi adına ilerleme sağlanmış oldu.

İleriki çalışmalarımızda kullanımını önerdiğimiz UPRE ve GCV yöntemlerinde yapılabilecek iyileştirmeler üzerinde durmayı planlıyoruz. Genel olarak yansız öngörücü risk kestirimi yönteminin geliştirilmiş çapraz sağlama yöntemine göre biraz daha küçük parametre değerleri seçme eğiliminde olduğunu gözlemledik. Bu yöntemlerin, SAR görüntüleme probleminin yapısına uygun olarak daha sağlıklı çalışması için yapılabilecek geliştirmeler ve farklı risk fonksiyonlarının değerlendirilmesi yakın zamandaki çalışma planımızı oluşturuyor.

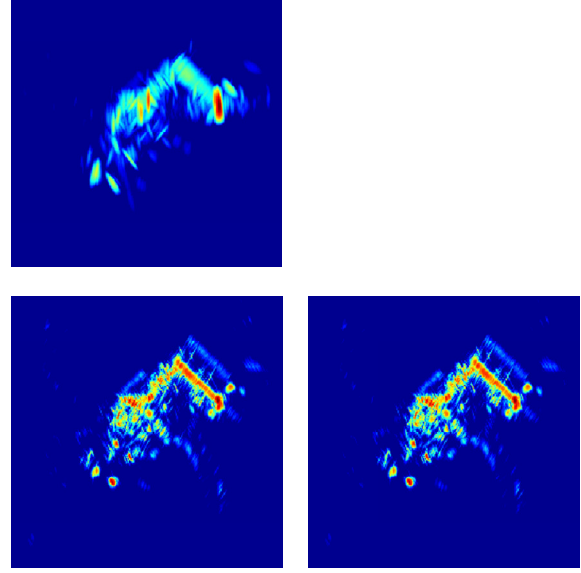
Üzerinde durduğumuz bir diğer nokta da bu yöntemlerin gerektirdiği hesaplamaların kolaylaştırılması. Şu anki çalışmamızda her farklı parametre değeri için görüntü oluşturuyoruz ve UPRE ve GCV fonksiyonlarının alacağı değerleri hesaplıyoruz. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak adına bu fonksiyonları, farklı parametre değerleri için çok sayıda görüntü oluşturmadan kullanmayı olanaklı hale getirmeyi planlıyoruz. Ayrıca, UPRE ve GCV fonksiyonlarını enküçülten parametre değerlerini bulmak için daha etkin eniyileme yöntemleri kullanarak hesaplama karmaşıklığını azaltmayı hedefliyoruz.

6. Kaynakça

- [1] Çetin, M. ve Karl, W. C., "Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization", *IEEE Trans. Image Processing*, cilt 10, s. 623-631, Nisan 2001.
- [2] Benitz, G. R., "High-definition vector imaging", *Lincoln Lab. J.* cilt 10, s. 147-170, 1997.
- [3] DeGraaf, S. R., "SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods", *IEEE Trans. Image Processing*, cilt 7, s. 729-761, Mayıs 1998.
- [4] Stein, M. S., "Estimation of the Mean of a Multivariate Normal Distribution", *The Annals of Statistics*, cilt 9, s. 1135-1151, Kasım 1981.
- [5] Vogel, C. R., *Computational Methods for Inverse Problems*, SIAM, Philadelphia, 2002.



Şekil 3: Saçılım öngörülerinde kullanılan iş makinesi (bekho) modeli



Şekil 4: İş makinesi (bekho) için oluşturulan SAR görüntüleri. (a) Geleneksel yöntemle elde edilen görüntü. (b) UPRE ile seçilen parametre değeri kullanılarak oluşturulan görüntü. (c) GCV ile seçilen parametre değeri kullanılarak oluşturulan görüntü.

- [6] Golub, G. H., Heath, M. ve Wahba, G., "Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter", *Technometrics*, cilt. 21, s. 215-223, Mayıs 1979.
- [7] Solo, V., "A SURE-fired way to choose smoothing parameters in ill-posed inverse problems", *Proc. IEEE ICIP96*, IEEE, IEEE Press, 1996.
- [8] Air Force Research Laboratory, Model Based Vision Laboratory, Sensor Data Management System MSTAR (<https://www.sdms.afrl.af.mil/datasets/mstar/>), 1997.
- [9] "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.
- [10] Moses, R. L., Potter, L. C. ve Çetin, M., "Wide Angle SAR Imaging", *Algorithms for SAR Imagery XI*, SPIE, Orlando, FL, A.B.D., Nisan 2004.