

Paralel Çok Seviyeli Hızlı Çokkutup Yöntemiyle Çeşitli Hava Hedeflerine Ait Radar Kesit Alanı Değerlerinin Hesaplanması ve Karşılaştırılması[†]

Burak Tiryaki^{1,2}, Alper Ünal², Özgür Ergül^{1,2} ve Levent Gürel^{1,2}

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

²Bilişimsel Elektromanyetik Araştırma Merkezi (BiLCEM)

Bilkent Üniversitesi

TR-06800, Bilkent, Ankara

E-posta: lgurel@ee.bilkent.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, çeşitli hava hedeflerini içeren saçılım problemlerinin yüksek doğrulukta çözümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekçi frekanslarda ele alınan bu hedeflere ait radar kesit alanı değerleri yüksek doğrulukta hesaplanmış ve farklı hedefler için elde edilen değerler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Benzetimler için oluşturulan on milyonlarca bilinmeyenli matris denklemleri paralel donanımlar üzerinde çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (ÇSHÇY) ile çözülmüştür. ÇSHÇY'nin yüksek verimle çalışabilmesi için etkin paralelleştirme yöntemleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, ele alınan hedeflerin fiziksel optik gibi yaklaşık tekniklerle analizlerinde her zaman yeterli hassasiyetin elde edilemediği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, paralel ÇSHÇY ile gerçekleştirilen benzetimler, karmaşık yapılara sahip hedefler için son derece önemli bilgiler sunmaktadır.

1. Giriş

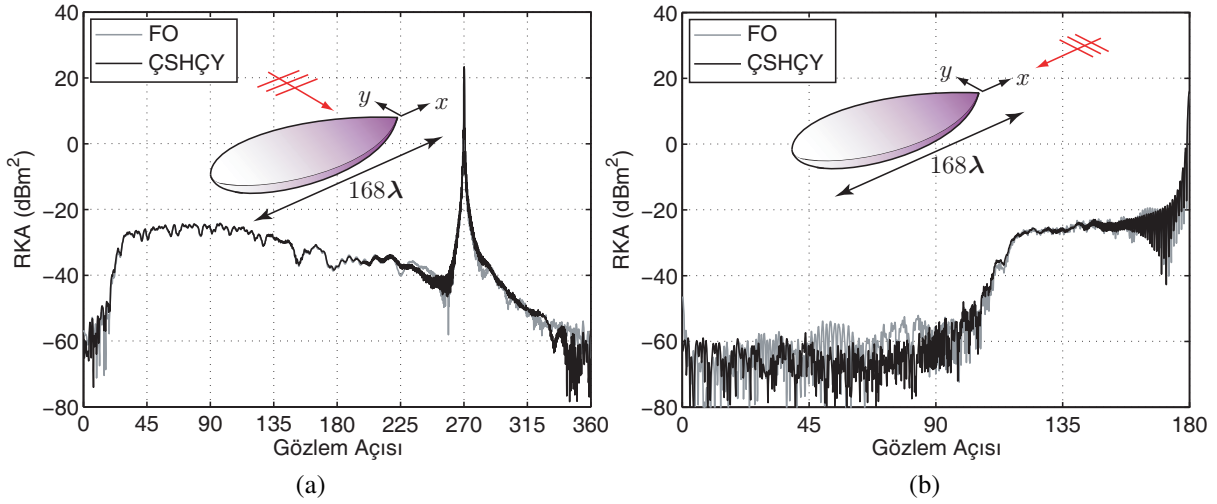
Karmaşık geometrilere sahip hava hedeflerini içeren elektromanyetik saçılım problemlerinin çözümlerinde, fiziksel optik (FO) gibi yaklaşık teknikler her zaman başarılı değildir. Bu hedeflerin yüksek doğrulukta incelenmesi için Maxwell denklemlerinden doğrudan türetilen yüzey integral denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan, gerçekçi frekanslarda ele alındıklarında, hava hedeflerinin boyları birkaç yüz dalga boyuna ulaşmaktadır. Dolayısıyla, integral denklemlerinin kullanıldığı çözümlerde, bu hedeflerin ayrıklaştırılmaları sonucunda milyonlarca bilinmeyenli matris denklemleri ortaya çıkmaktadır. Bu denklemlerin çözümlerinde doğrudan yöntemler yetersiz kalmakta ve çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (ÇSHÇY) [1] gibi iteratif çözümlere gereksinim duyulmaktadır.

Elektromanyetik saçılım problemlerinin iteratif çözümlerinde kullanılan ÇSHÇY, $N \times N$ boyutlarındaki yoğun matris denklemlerine ait matris-vektör çarpımlarını, sonuçların hassasiyetinden ödün vermeden, $\mathcal{O}(N \log N)$ sürede ve $\mathcal{O}(N \log N)$ bellek kullanımıyla gerçekleştirebilmektedir. Öte yandan, çok büyük hava hedeflerini içeren saçılım problemlerinin çözümünde ÇSHÇY bile yetersiz kalmakta, dolayısıyla bu algoritmanın paralelleştirilmesine ve paralel donanımlar üzerinde çalıştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu konuda, yerel belleklere sahip işlemcilerin "Infiniband" gibi hızlı ağlarla birbirlerine bağlandığı, göreceli olarak ucuz bilgisayar kümeleri tercih edilmektedir. Öte yandan, ÇSHÇY'nin bu tür sistemler üzerinde paralelleştirilmesi son derece zordur. Özellikle, işlemciler arasında gerekli olan iletişimler yüzünden, paralelleştirmeden sağlanan verim önemli ölçüde düşmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda, ÇSHÇY'nin çok seviyeli yapısına uygun olan sıradüzensel (hierarchical) paralelleştirme tekniği geliştirilmiştir [2]. Bu yeni teknik sayesinde, hesaplamaların işlemciler arasında yüksek verimle dağıtılması sağlanmış, ihtiyaç duyulan haberleşmelerin sayısı da azaltılmıştır. Böylece, milyonlarca bilinmeyenle modellenen hava hedeflerine ait saçılım problemleri yüksek doğrulukta çözülmüş, çeşitli hedefler için hesaplanan radar kesit alanı (RKA) değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

2. Paralel Çok Seviyeli Hızlı Çokkutup Yöntemi

Bu çalışmada, hava hedeflerine ait saçılım problemlerinin sayısal çözümleri için hedeflerin yüzeyleri dalga boyuna göre küçük üçgenlerle ayrıklaştırılmıştır. İletken yüzeyler üzerinde indüklenen elektrik akımı Rao-Wilton-Glisson (RWG) temel fonksiyonlarıyla açılmıştır. Momentler metodunun uygulanmasıyla elde edilen

[†]Bu çalışma, TÜBİTAK (105E065, 105E172 ve 107E136), Türkiye Bilimler Akademisi (LG/TÜBA-GEBİP/2002-1-12), ASELSAN ve SSM tarafından desteklenmektedir.



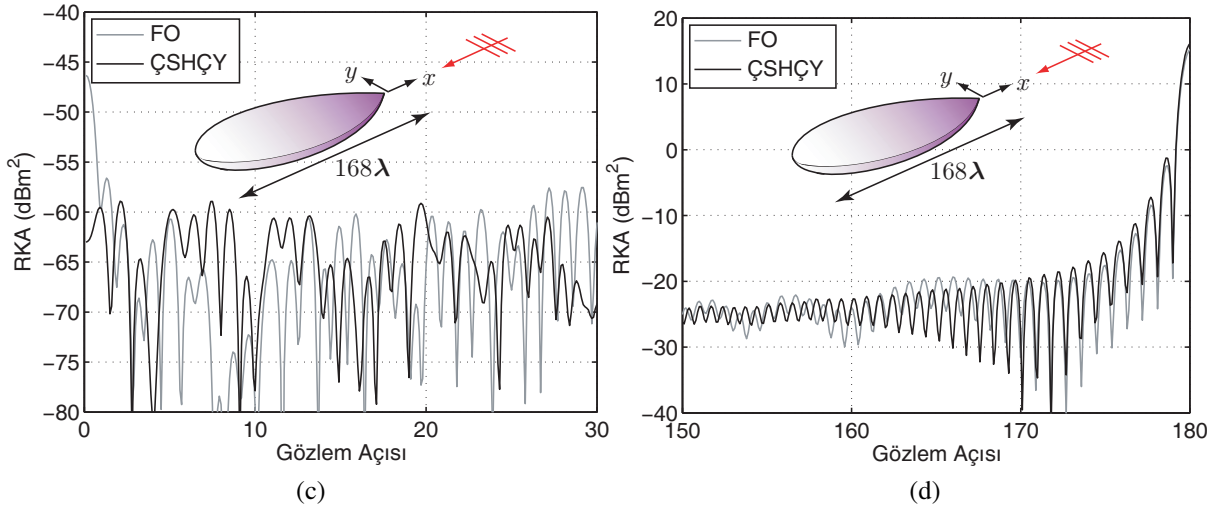
Şekil 1. Boyu 168 dalga boyu olan NASA Almond geometrisine ait RKA değerleri. Hedef (a) yandan (90°) ve (b) burundan (0°) aydınlatılmıştır.

yoğun matris denklemleri, BiCGSTAB gibi iteratif yöntemlerle çözülmüştür. İterasyonlar için ihtiyaç duyulan matris vektör çarpımları ise ÇSHÇY ile hızlı ve verimli bir biçimde gerçekleştirilmiştir. ÇSHÇY’de, matris elemanlarının RWG fonksiyonları arasındaki elektromanyetik etkileşimlere karşılık geldiği göz önüne alınır. Problemden ele alınan hedef özyinelemeli (recursive) olarak parçalara ayrılır. Parçalama işlemine hedefi içine alan bir kutuyla başlanır ve dolu kutuların alt kutulara bölünmesiyle, çok seviyeli olarak devam edilir. Öyle ki, en alt seviyedeki kutular içerisinde 20-30 ayrıklaştırma elemanı bulunmaktadır. Ayrıca, ağaç yapısındaki her kutu için ışınım ve gelen dalga örüntüleri tanımlanmaktadır. Bu şekilde kurulan çok seviyeli ağaç yapısı üzerinde çalışan ÇSHÇY, ayrıklaştırma elemanları arasındaki etkileşimleri gruplar bazında yaparak, matris-vektör çarpımlarının karmaşıklığını $\mathcal{O}(N^2)$ ’den $\mathcal{O}(N \log N)$ ’e düşürebilmektedir.

ÇSHÇY’nin paralelleştirilmesi bu yöntemin karmaşık yapısından dolayı son derece zordur. Çok seviyeli ağaç yapısı işlemcilerle eşit olarak dağıtılsa bile, işlemciler arasında gerekli olan iletişimler yüzünden, paralelleştirmeden sağlanan verim önemli ölçüde düşmektedir. Kutuların işlemcilerle dağıtıldığı basit paralelleştirme teknikleri, özellikle işlemci sayısının artmasıyla birlikte, son derece verimsiz hale gelmektedir. Yakın zamanda ÇSHÇY’nin paralelleştirilmesinin iyileştirilmesi amacıyla karma (hybrid) teknikler geliştirilmiştir [3]–[5]. Ağaç yapısının üst seviyelerinde kutular yerine ışınım ve gelen dalga örüntülerinin işlemcilerle dağıtılmasıyla birlikte, paralelleştirmeden elde edilen verim artırılmıştır. Öte yandan, hava hedefleri gibi karmaşık geometriler içeren problemlerin çözümlerinde karma teknikler bile yetersiz kalmaktadır. Özellikle, işlemci sayısının 32’den fazla olduğu durumlarda, arzu edilen hızlanma sağlanamamakta ve işlemci başına kullanılan bellek miktarı istenilen seviyelere düşürülememektedir. Bu doğrultuda, var olan tekniklere alternatif olarak geliştirilen sıradüzensel paralelleştirme tekniğinde, hem kutular, hem de kutuların örüntüleri aynı anda işlemcilerle dağıtılmaktadır [2]. Böylece, paralelleştirmeden sağlanan verim önemli ölçüde artmakta ve literatürdekilerden çok daha büyük problemlerin yüksek doğrulukta çözümleri mümkün hale gelmektedir.

3. Sayısal Örnekler

Bu çalışmada incelenen hedeflere örnek olarak radara görünmezlik özelliğine sahip olan Stealth Flamme, literatürde sıkça kullanılan bir değerlendirme (benchmark) geometrisi olan NASA Almond ve askeri alanda büyük öneme sahip olan Generic F-16 sayılabilir. Şekil 1’de boyu 168 dalga boyu olan NASA Almond geometrisine ait saçılım problemlerinin çözümleri sunulmuştur. ÇSHÇY ile gerçekleştirilen çözümler için geometri 6,056,484 bilinmeyenle ayrıklaştırılmıştır. Hedef yandan ve burundan olmak üzere iyi farklı açıdan düzlem dalgayla aydınlatılmıştır. Her iki durumda da, ÇSHÇY ve FO ile elde edilen RKA değerleri bistatik açıya bağlı olarak incelenmiştir. Şekil 1(a)’da gösterildiği gibi hedef yandan aydınlatıldığında, iki metodla elde edilen sonuçlar birbirleriyle oldukça tutarlıdır. Ancak, Şekil 1(b)’de gösterildiği gibi hedef burundan aydınlatıldığında ise, FO’nun hassasiyetinin bozulması nedeniyle, sonuçlar arasındaki farkın arttığı gözlemlenmektedir. Bu aydınlatma



Şekil 2. Boyu 168 dalga boyu olan ve burundan aydınlatılan NASA Almond geometrisine ait (a) 0° – 30° ve (b) 150° – 180° açılarındaki RKA değerleri.

için elde edilen RKA değerleri Şekil 2’de geri saçılım (0°) ve ileri saçılım (180°) açıları civarında daha yakından incelenmiştir. FO ile elde edilen değerlerin sadece 170° – 180° aralığında ÇSHÇY ile elde edilen değerlerle tutarlı oldukları gözlemlenmektedir.

Şekil 3’te, boyları 320 dalga boyu olan Stealth Flamme, NASA Almond ve Generic F-16 hedefleri için ÇSHÇY ile hesaplanan RKA değerleri karşılaştırılmıştır. Hedefler burundan 30° açıyla gelen düzlemsel dalgayla aydınlatılmış ve elde edilen RKA değerleri bistatik açıya bağlı olarak incelenmiştir. Oluşturulan ve çözülen matris denklemlerindeki bilinmeyen sayıları, Stealth Flamme, NASA Almond ve Generic F-16 için sırasıyla 24,386,412, 19,817,088 ve 21,550,104’tür. Literatürde aynı hassasiyetle yapılan diğer çözümlerle karşılaştırıldığında, bu hedefler ilk defa bu kadar yüksek (ve gerçekçi) frekanslarda incelenmiştir. Benzetimler sonucunda elde edilen bulgulardan bazıları şunlardır:

- 1) Generic F-16 hedefinin RKA değerleri ileri saçılım açısı (210°) dışında bazı yansıma açılarında yükselmektedir. Özellikle 150° ve 330° ’de yüksek RKA değerleri elde edilmiştir.
- 2) Şekil 3(a)’da gösterildiği gibi, Generic F-16 ve NASA Almond için geri saçılım açısı (30°) civarında elde edilen RKA değerleri oldukça farklı seviyelerdedir. F-16 için elde edilen değerler yaklaşık 20 desibel (dB), yani 100 kat daha fazladır. NASA Almond geometrisi için ileri saçılım açısından 90° ’ye kadar göreceli olarak yüksek RKA değerleri elde edilmektedir. Ancak, geri saçılım açısı dahil olmak üzere 90° ’den küçük açılarda hesaplanan RKA değerleri çok düşük seviyelerdedir.
- 3) Şekil 3(b)’de gösterildiği gibi, Stealth Flamme hedefi için 120° , 190° ve ileri saçılım açısı civarlarında yüksek RKA değerleri elde edilmektedir. Radara görünmezlik özelliğinden dolayı bu hedefin RKA değerleri bu yansıma açıları dışında çok düşük seviyelerdedir.

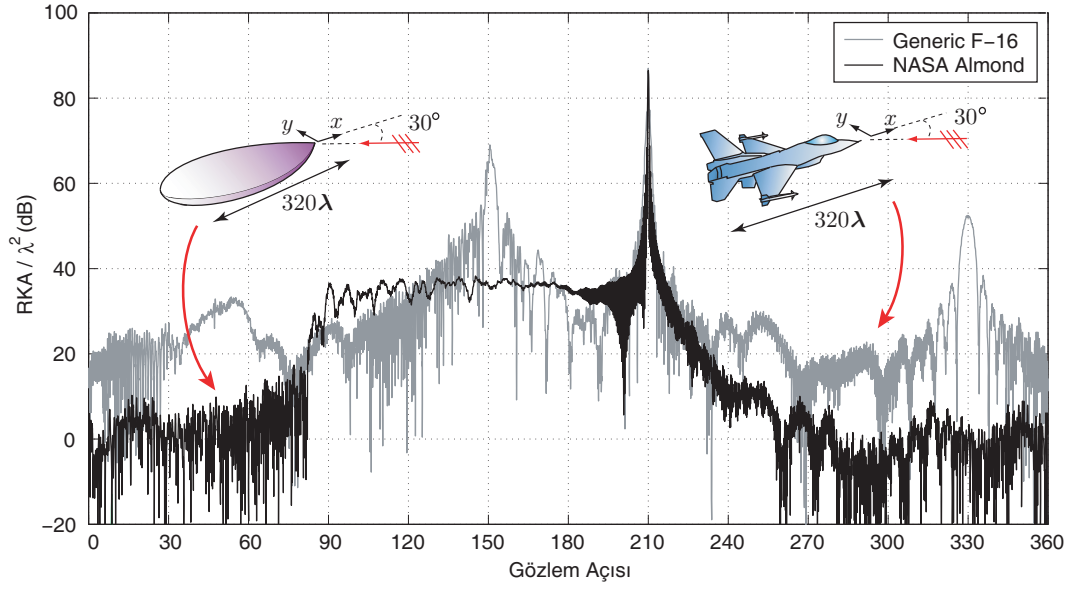
Her biri yaklaşık 20 milyon bilinmeyenle modellenen bu hedeflere ait RKA değerleri 64 işlemcili paralel donanımlar üzerinde toplam üç saatten kısa sürede hesaplanmıştır.

4. Sonuç

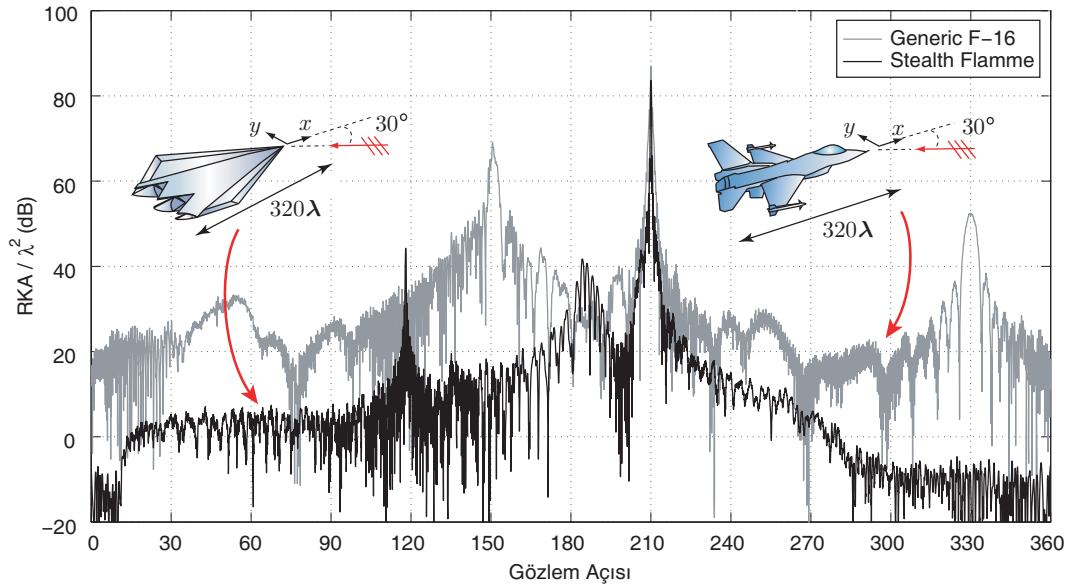
Paralel ÇSHÇY ile milyonlarca bilinmeyenle modellenen karmaşık hava hedeflerine ait saçılım problemlerinin çözümleri mümkün hale gelmektedir. FO gibi hassasiyeti sınırlı yöntemlerle elde edilmeyen bu hassas çözümler sayesinde hava hedeflerinin gerçekçi frekanslardaki elektromanyetik tepkileri daha iyi anlaşılacaktır.

Kaynaklar

- [1] J. Song, C.-C. Lu ve W. C. Chew, “Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 45, no. 10, s. 1488–1493, Ekim 1997.
- [2] Ö. Ergül ve L. Gürel, “Hierarchical parallelisation strategy for multilevel fast multipole algorithm in computational electromagnetics,” *Electron. Lett.*, cilt 44, no. 1, s. 3–5, Ocak 2008.



(a)



(b)

Şekil 3. Boyları 320 dalga boyu olan Stealth Flamme, NASA Almond ve Generic F-16 geometrilerine ait bistatik RKA değerleri. Hedefler burundan 30° açıyla aydınlatılmıştır.

[3] S. Velampambil ve W. C. Chew, "Analysis and performance of a distributed memory multilevel fast multipole algorithm," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, cilt 53, no. 8, s. 2719–2727, Ağustos 2005.

[4] L. Gürel ve Ö. Ergül, "Fast and accurate solutions of integral-equation formulations discretised with tens of millions of unknowns," *Electron. Lett.*, cilt 43, no. 9, s. 499–500, Nisan 2007.

[5] Ö. Ergül ve L. Gürel, "Efficient parallelization of the multilevel fast multipole algorithm for the solution of large-scale scattering problems," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 56, no. 8, s. 2335–2345, Ağustos 2008.