

Yüksek Frekans Monostatik Deniz Radarının Kartezyen Koordinatlarda İki Boyutlu Hareketli Pencere Zaman Uzaı Sonlu Farklar Yöntemi İle Modellenmesi

Mehmet Burak Özakin⁽¹⁾, Halil Alptuğ Dalgıç⁽²⁾, Serkan Aksoy^(1,2)

⁽¹⁾ Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli
bozakin@gyte.edu.tr, saksoy@gyte.edu.tr

⁽²⁾ TÜBİTAK Bilgem
Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli
halil.dalgic@tubitak.gov.tr

Özet: Bu çalışmada yüksek frekans monostatik bir deniz radarı Kartezyen koordinatlarda Maxwell denklemleri tabanlı iki boyutlu Hareketli Pencere Zaman Uzaı Sonlu Farklar (HP-ZUSF) yöntemi ile modellenmiştir. Sayısal problem uzaı monostatik anten, iletken deniz, kara ve ada bölgelerinden oluşmaktadır. Kara üzerine Brewster açısında yerleştirilen dipol anten ile uyarılan ve denizde yüzey dalgası biçiminde yayılan elektromanyetik dalgaların, boyutları dinamik olarak değişen hareketli bir pencere içinde ilerleyerek ada ile etkileşmesi ve monostatik antene geri gelmesi sağlanmıştır. Böylece menzile bağımlı yol kaybı ve alıcıda gözlenen zaman uzaı işaretleri hesaplanarak, standart ZUSF sonuçları ile doğruluk, hafıza ve hesap süreleri bakımından karşılaştırılmıştır.

Abstract: In this work, a high frequency monostatic marine radar is modelled by a Moving Window Finite Difference Time Domain (MW-FDTD) method which is based on Maxwell's equations in two dimensional Cartesian coordinates. Numerical problem space is consisting of an antenna, a conductive sea, a land and an island. A dipole antenna located at Brewster angle on the land emits electromagnetic waves which are interacted with the island as a surface wave and reflected back to the monostatic antenna by propagating in a moving window whose size is dynamically changed. Finally, range dependent path loss and time domain signal observed on the receiver are calculated and compared with a standard FDTD method in terms of accuracy, memory and computation time.

1. Giriş

Yüksek Frekans (YF) monostatik deniz radar sistemleri kıyı ve sahil güvenliği için yaygın olarak kullanılmakta olup, ufuk ötesi radarları olarak da bilinmektedir. 3 – 30 MHz frekans bandında çalışan bu radarların performans analizi temelde radar sisteminin (anten) konumu ve menzile bağılı yol kayıpları dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu kapsamda sayısal yöntemler ile yapılan modellemeler önemlidir [1]. YF radarlarında kaynak işareti modüle edilmiş bir darbe olması nedeniyle, modelleme için Zaman Uzaı Sonlu Farklar (ZUSF) yönteminin kullanılması uygundur. Fakat burada sayısal olarak modellenecek problem uzaının fiziksel boyutları kaynak dalga boyuna göre çok büyük olması nedeniyle, standart ZUSF çözümü için yüksek hafıza ve hesap zamanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç günümüz bilgisayarları tarafından yeteri kadar karşılanamayacağından, standart ZUSF yöntemi ile benzetim aylarca sürecektir bilgisayar hesap zamanına ihtiyaç duymaktadır. Literatürde bu yetersizliğe çözüm olarak Hareketli Pencere ZUSF, HP-ZUSF (Moving Window Finite Difference Time Domain, MW-FDTD) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemin avantajı problem uzaının tümünde hesap yapmak yerine, sadece elektromanyetik dalgaın ilerlediği ve etkileşimde bulunduğu bölgelerde (hareketli bir pencere sayesinde) hesaplama yapmasıdır. Böylece çok yüksek hafıza ve hesap zamanı ihtiyacı azalmaktadır [2]. HP-ZUSF yöntemi ayrıca Zaman Uzaı Parabolik Denklem (Time Domain Parabolic Equation) yöntemi için de kullanılmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda HP-ZUSF yöntemindeki hareketli pencere bistatik problemler için sadece tek yönde ilerletilmiştir. Bu çalışmada monostatik bir problem için ilk defa adaptif boyutlu bir hareketli pencerenin iki yönde (sağa ve sola) ilerletilmesi ve problem uzaına anten modelinin de eklenmesiyle HP-ZUSF yöntemi uygulanmıştır. Bu sayede ileri ve geri menzile bağımlı yol kayıpları ve alıcıda gözlenen zaman uzaı işaretinin hesaplanması mümkün olmuştur.

2. Maxwell Denklemleri Tabanlı ZUSF Çözümü

Zaman Uzayı Sonlu Farklar (ZUSF) diferansiyel denklemlerdeki zaman veya konuma ait analitik türevler yerine sonlu fark tabanlı sayısal eş değerlerini kullanan zamanda iteratif bir sayısal çözüm yöntemidir [3].

Maxwell denklemleri tabanlı ZUSF çözümünün kayıplı ortamda uygulanması için tüm alan ve kaynak akım bileşenleri zamanda ve konumda ayrıklaştırılarak Yee hücrelerine yerleştirilir. Denklemlerde yer alan analitik türevler yerine Taylor seri açılımından merkezi fark eşdeğerleri kullanılarak oluşturulan sayısal türevler ile zamanda en ileri olan alan bileşeni için ZUSF güncelleme denklemleri elde edilir. Örneğin elektrik alanın x bileşeni E_x için iki boyutlu Kartezyen koordinatlardaki ZUSF güncelleme denklemi

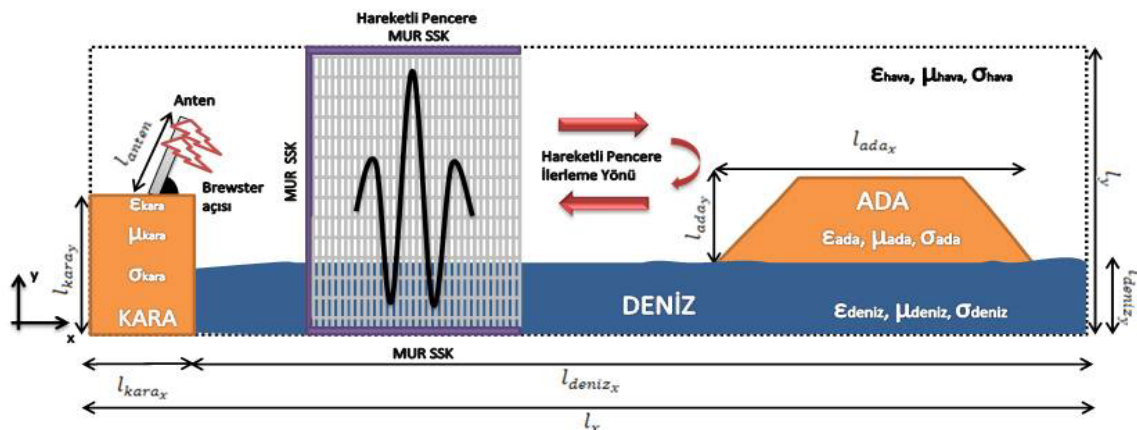
$$E_x|^{n+1}_{i+\frac{1}{2},j} = \left(\frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j} - \sigma_{i+\frac{1}{2},j}\Delta t}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j} + \sigma_{i+\frac{1}{2},j}\Delta t} \right) E_x|^{n}_{i+\frac{1}{2},j} + \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j} + \sigma_{i+\frac{1}{2},j}\Delta t} \right) \left[\frac{|H_z|^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} - |H_z|^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}}{\Delta y} - J_{kaynak_x}|^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} \right] \quad (1)$$

olarak verilir [3]. Burada n zaman iterasyon indisi, i ve j sırasıyla x ve y doğrultularındaki hücre indisleri, Δy [m] y doğrultusundaki birim hücre uzunluğu, ε [F/m] dielektrik sabiti, σ [S/m] elektriksel iletkenlik, Δt [sn] birim zaman adıdır. Diğer elektrik ve manyetik alan bileşenleri için de benzer şekilde güncelleme denklemleri elde edilir. Ayrıca iki boyutlu ZUSF çözümünün sayısal kararlılığı için $\Delta x = \Delta y$ olması halinde, birim zaman adımı $\Delta t \leq \Delta x / \sqrt{2}c$ olarak verilen Courant-Friedrich-Levy (CFL) kararlılık koşulunu sağlaması gerekmektedir [3]. Burada c [m/sn] elektromanyetik dalga yayılım hızıdır.

3. Hareketli Pencere Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi ve Uygulanması

Büyük ölçekli problemlerin çözümü için geliştirilen HP-ZUSF yöntemi problem uzayının tümünde hesap yapmak yerine, hareketli bir pencere eşliğinde sadece elektromanyetik dalganın ilerlediği ve etkileşimde bulunduğu etkin bölgelerde hesaplama yaparak hafıza ve hesap zamanı ihtiyaçlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Hareketli pencere, kaynaktan hedefe doğru ilerleyen elektromanyetik dalgaları kapsayacak boyutta ve takip edecek hızda olmalıdır. Ayrıca açık uzay bir problem için hareketli pencerenin ilerlediği yönde en öndeki sınır hariç diğer sınırlara Soğurucu Sınır Koşulu (SSK) uygulanmalıdır [4]. Bu çalışmada birinci mertebe doğruluklu Mur türü SSK kullanılmıştır.

Şekil 1’de gösterilen iki boyutlu Kartezyen koordinatlardaki problem uzayı monostatik verici/alıcı dipol anten, hava, kara, deniz ve ada bölgelerinden oluşmaktadır. Buradaki hava, kara, deniz ve adanın elektromanyetik parametreleri ve problem uzayının gerçek boyutları Tablo 1’de verilmiştir. Kara üzerine Brewster açısında yerleştirilen dipol antene Gaussian zarflı 5 MHz frekansında modüleli bir işaret uygulanmıştır. Birim hücre uzunluğu $\Delta x = \Delta y = \lambda/15$ m olarak seçildiğinden, CFL kararlılık koşulu gereği $\Delta t = 6.2853 \times 10^{-9}$ sn alınmıştır.



Şekil 1: Problem uzayı ve hareketli pencere.

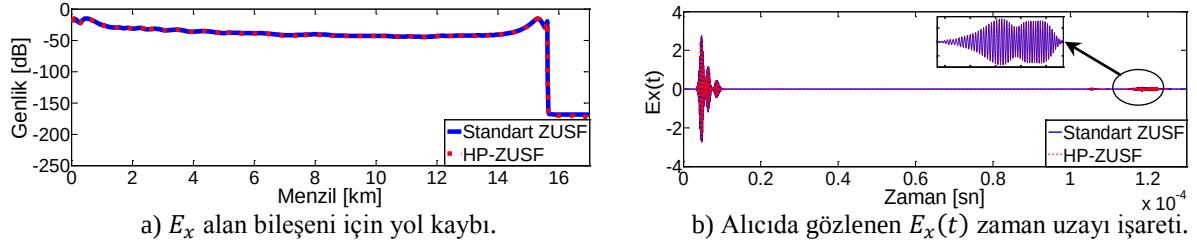
Tablo 1: Hava, kara, deniz ve adanın elektromanyetik parametreleri ve problem uzayının gerçek boyutları.

	Hava	Kara	Deniz	Ada	l_x	35000 m	l_{deniz_x}	34800 m
ε [F/m]	ε_0	$13 \times \varepsilon_0$	$70 \times \varepsilon_0$	$10 \times \varepsilon_0$	l_y	850 m	l_{deniz_y}	50 m
μ [H/m]	μ_0	μ_0	μ_0	μ_0	l_{kara_x}	200 m	l_{ada_x}	10000 m
σ [S/m]	0	5×10^{-3}	5	2×10^{-2}	l_{kara_y}	10 m	l_{ada_y}	386 m

Kartezyen koordinatlarda iki boyutlu HP-ZUSF yönteminin uygulandığı bu çalışmada hareketli pencerenin başlangıçtaki optimum genişliği adanın (hedef cisim) genişliğinin yarısına eşit alınmıştır. Modellenen pencerenin antenin uyarılması ile harekete geçmesi için hedefe doğru ilerleyen yüzey dalgası biçiminde yayılan elektromanyetik dalgaların pencerenin en uç noktasına gelmesi beklenmektedir. İlerleyen elektromanyetik dalgaların adayla etkileştiği anda optimum genişlikteki hareketli pencerenin sol sınırının konumu sabit tutularak, sağ sınırı başlangıçtaki pencere genişliği (ada genişliğinin yarısı) kadar ilerletilip adanın ortasına getirilmektedir. Böylece ilerlemenin bittiği anda pencere içerisinde adanın başlangıç ve orta kısmına kadar meydana gelen saçılan elektromanyetik dalgalar kaybedilmeden hafızada tutulmaktadır. Daha sonra, tüm bu saçılan elektromanyetik dalgaların monostatik antende alınabilmesi için hareketli pencere ters yönde (sola) hareket ettirilmiş ve problem uzayının sol sınırına ulaştığında pencere genişliği adaptif olarak değiştirilerek kısaltılmıştır.

3.1. Monostatik Durumda Yol Kaybı Hesabı ve Alıcıda İşaretin Elde Edilmesi

Yol kaybı hesabı için her bir konuma ait zaman uzayı işaretine Hızlı Fourier Dönüşümü, HFD (Fast Fourier Transform, FFT) uygulanarak elde edilen frekans uzayı işaretinin genliğinin maksimum değeri RMS hesabı üzerinden ele alınmıştır. Bu işlem düz bir menzil boyunca tüm konumlar için tekrarlanmıştır. Şekil 2.a ve Şekil 2.b'de E_x alan bileşeni için sırasıyla menzil boyunca standart ZUSF ve HP-ZUSF ile hesaplanan yol kaybı hesabı ve monostatik antende gözlenen zaman uzayı işareti görülmektedir. Buna göre, standart ZUSF ve HP-ZUSF sonuçları çok iyi örtüşmektedir. Diğer alan bileşenleri için de aynı seviyede doğruluk elde edilmiştir.



Şekil 2: YF monokromatik deniz radarı için yol kaybı ve alıcı antendeki zaman uzayı işareti grafikleri.

Tablo 2'de incelenen problemin standart ZUSF ve HP-ZUSF yöntemleri ile yapılan benzetimleri için gerekli hafıza ve hesaplama süreleri gösterilmiştir. Buna göre HP-ZUSF ile yaklaşık % 79 daha az hafıza kullanılmasıyla standart ZUSF yönteminden dört kat daha hızlı hesap süresi ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 2: Standart ZUSF ve HP-ZUSF yöntemleri için hafıza kullanımı ve hesap zamanı.

	Standart ZUSF	HP-ZUSF
Hafıza Kullanımı (MB)	1475.5276	316.1843
Hesap Süresi (Saat)	3.1329	0.7287

4. Sonuç

Yüksek frekans monostatik bir deniz radarının performansının standart ZUSF yöntemi ile incelenmesi için oluşturulan problem uzayı fiziksel boyutları bakımından büyük ölçekli olduğundan, yüksek miktarda hafıza ve hesap süresi gerekmektedir. Bu zorluğun giderilmesi için geliştirilen HP-ZUSF yöntemi kullanılarak iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda ölçüleri dinamik değiştirilen hareketli bir pencere kullanılmıştır. Bu pencere kaynaktan hedefe doğru ilerleyen elektromanyetik dalgaların hedefle etkileşmesi sonrasında monostatik antene geri gelmesi için iki yönlü hareket ettirilmiştir. Böylece menzil boyunca yol kaybı ve alıcı antendeki zaman uzayı işaretleri hesaplanmıştır. Sonuçlar standart ZUSF yöntemiyle de hesaplanarak, geliştirilen HP-ZUSF yönteminin aynı doğrulukta olduğu gösterilmiştir. Böylece, yaklaşık % 79 daha az hafıza kullanımı ile hesap süresi bakımından HP-ZUSF yönteminin dört kat daha hızlı çalıştığı gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda çözümün üç boyutlu koordinatlar için geliştirilmesi ve deniz yüzeyi üzerindeki (gemi vb.) cisimlerin monostatik radar kesit alanlarının hesaplanması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Fidel B., Heyman E., Kastner R., "Hybrid ray-FDTD moving frame approach to pulse propagation", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Haziran 1994, Washington, USA, s.1414-1417.
- [2] Akleman F. ve Sevgi L., "A novel finite-difference time-domain wave propagator", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 48(5), s.839-841, 2000.
- [3] Aksoy S., Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi, Ders Notları. Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, 2014.
- [4] Dalgıç H. A., Yüksek Frekans Deniz Radarının Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2013.