

YER DALGASININ ENGEBELİ VE KARMA EMPEDANSLI YÜZEY ÜZERİNDE YAYILIMININ SPEKTRAL HIZLANDIRILMIŞ MOMENT METODU VE PARABOLİK DENKLEM YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Aslı Burçin NAİBOĞLU
naiboglu@NETAS.com.tr

Tel: +90 216 522 2083

Fax: +90 216 522 22 22

Nortel Netaş - Alemdağ Caddesi 171, 34768 Ümraniye, İstanbul

Funda AKLEMAN YAPAR

funda@ehb.itu.edu.tr

Tel: +90 212 285 3495

Fax: +90 212 285 3679

İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi 34469 , Maslak / İSTANBUL

Özet: Bu çalışmada, özellikle HF (yüksek frekans) radarları için önem taşıyan, değişken empedanslı ve/veya engebeli arazi üzerinde yer dalgası yayılımı incelenmiştir. Bu amaçla, troposferde elektromanyetik dalga yayılımının modellenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan adım adım parabolik denklem yöntemi (SSPE) ve son zamanlarda yer dalgası için kullanılmaya başlanan ileri-geri spektral hızlandırılmış moment metodu (MOM) uygulanmıştır. İleri geri spektral hızlandırılmış MoM ile engebeli arazi üzerinde dalga yayılımına ilişkin elde edilen değerler SSPE kullanılarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve mükemmel bir uyum gözlenmiştir.

1. Adım Adım Parabolik Denklem

SSPE, geri saçılma etkileri az olan pürüzlü yüzeyler de dahil olmak üzere düşey ve/veya yatay olarak değişen kırılma indisine sahip ortamlarda ve özellikle VHF ile üzerindeki frekanslarda dar-bandlı dalga yayılımının modellenmesi için etkili bir yöntemdir. Helmholtz denklemi ve sınır koşullarıyla ifade edilen iki boyutlu yayılım problemi hem geometride hem de kırılma indisinde boyuna değişimlerin yavaş olduğu parabolik forma indirgenebilmektedir. Sınır değer problemini, başlangıç değer problemine dönüştürmek, çözümü ayrık Fourier dönüşümü bakımından enine sınır koşulları sağlandığı sürece sayısal uygulamaya uyumlu kılmaktadır. Adım adım boyuna uygulamayla, SSPE yöntemi, 2 boyutlu kartezyen uzayda şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$u(x, z) = \exp \left[j \frac{k_0}{2} (n^2 - 1) \Delta x \right] \times FFT^{-1} \left[\exp \left[- j \frac{k_z^2 \Delta x}{2 k_0} \right] FFT \{u(x_0, z)\} \right] \quad (1)$$

Burada, x ve z sırasıyla mesafe(boyuna) ve yükseklik(enine) koordinatları ifade etmektedir. $\Delta x = x - x_0$, k_x , k_0 , n , FFT ve FFT^{-1} sırasıyla enine mesafedeki adımı, enine ve serbest uzay dalga sayısı, kırılma indisi, hızlı Fourier ve ters hızlı Fourier dönüşümlerini temsil etmektedir. Başlangıçta özellikle iki boyutlu dalga denklemlerine uygulanan Parabolik Denklem yöntemi, günümüzde hem iki boyutlu hemde üç boyutlu birçok karmaşık probleme uygulanabilir hale gelmiştir. Özellikle, iki boyutlu problemlerden sualtı akustik dalga iletimi ve yeryüzünde yer ve gök dalga iletimi problemlerine yaklaşık 30 yıldan fazla süredir uygulanmaktadır. Burada $u(x, z)$ fonksiyonu düşey polarizasyon için H_y , yatay polarizasyon için ise E_y bileşenlerine karşı düşmektedir.

SSPE belli bir dereceye kadar engebeli arazilerdeki yayılımının modellenmesinde uygulanabilmektedir. Dalga yayılımındaki engebeli arazinin etkileri SSPE algoritmasına (i) parça parça linear, (ii) konform dönüşüm ve (iii)

basamaklı ayrıklaştırma arazi modellemeleriyle uygulanmaktadır [1]. Bunun yanı sıra, ayrık karmaşık Fourier dönüşümü kullanılarak özellikle etkileri 100MHz altında önem kazanan mükemmel iletken olmayan yüzeyler üzerinde yer dalgası yayılımını modellemek de mümkündür [1].

2. İleri-Geri Spektral Hızlandırılmış Moment Metodu

Gelen elektromanyetik (EM) dalgaya bağlı olarak indüklenen yüzey akımları yardımıyla geniş ve engebeli yüzeylerden saçılan alan hesaplanabilmektedir. Bilinmeyen yüzey akımlarının bulunması için yatay polarizasyon durumunda elektrik alan integral denkleminin (EFIE), düşey polarizasyon için de manyetik alan integral denkleminin elde edilmesi gerekmektedir. EM dalganın zamana bağlılığı $e^{j\omega t}$ olarak alınır ve yüzeyde empedans sınır koşulu uygulanırsa yatay polarizasyon (TM_y) için $\rho = (x, z)$ noktasında

$$-E_y^{inc}(\rho) = -\eta_s(\rho)J_y(\rho) - j\omega\mu \int_C J_y(\rho')G(\rho, \rho')d\rho' + \int_C \eta_s(\rho')J_y(\rho') \frac{\partial}{\partial n'} G(\rho, \rho')d\rho' \quad (2)$$

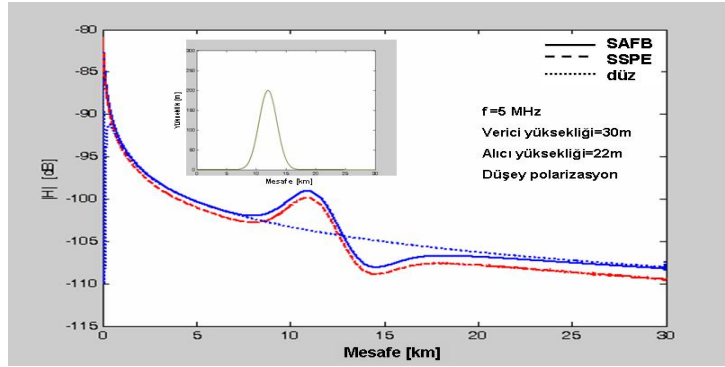
denklemini elde edilir. Burada sol taraf gelen alanı, η_s, J_y, ω, μ sırasıyla yüzey empedansını, yüzeyde indüklenen akımın genliğini, açısal frekansı ve ortamın manyetik geçirgenliğini göstermektedir ve integraller yüzey eğrisi üzerinde alınmaktadır. Aynı denklemde $G(\rho, \rho') = H_0^{(2)}(\rho, \rho')/4j$ iki boyutlu Green fonksiyonunu ve $\frac{\partial}{\partial n'} G(\rho, \rho')$ ise bu fonksiyonun yüzeyde ρ' kaynak noktasındaki normal doğrultudaki (n') türevini belirtmektedir. Düşey polarizasyon (TE_y) durumu için manyetik alan integral denklemini ise, teğetsel indüklenmiş J_t yüzey akımı cinsinden

$$-H_y^{inc}(\rho) = J_t(\rho) - \int_C J_t(\rho') \frac{\partial}{\partial n'} G(\rho, \rho')d\rho' + j\omega\epsilon \int_C \eta_s(\rho')J_t(\rho')G(\rho, \rho')d\rho' \quad (3)$$

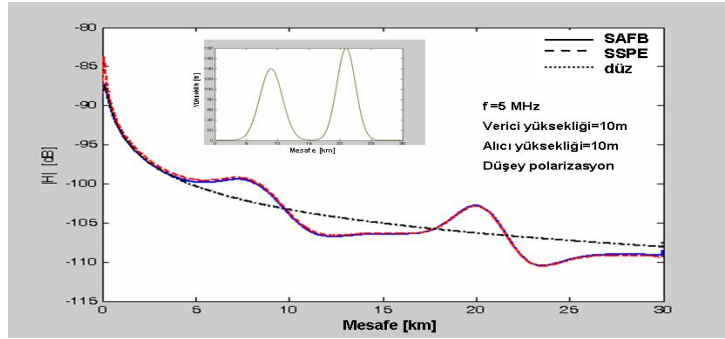
olarak ifade edilebilir. Burada ϵ ortamın dielektrik geçirgenliğini göstermektedir. (2) ve (3) denklemlerindeki integraller yüzey akımlarının sabit olduğu hücrelere ayrılacak olursa nokta uydurma moment metodu (MoM) yardımı ile $[V] = [\bar{Z}][I]$ şeklinde bir matris denklemini elde edilir. Burada $[I]$ bilinmeyen akım katsayılarını içerir; $[\bar{Z}]$ ve $[V]$ ise sırasıyla empedans uydurma noktalarında hesaplanan empedans matrisini ve gelen alanı ifade etmektedir. Bu matris denkleminin çözümü, ileri-geri spektral hızlandırılmış MoM ile (spectrally accelerated forward backward SAFB-MoM) hızlandırıldığında bu yöntem ile uzun mesafelerde yer dalgası yayılımını modellemek mümkün hale gelmektedir. [2,3,4,5].

3. Sayısal Uygulamalar

Her ne kadar SSPE yöntemi yerdalgası yayılımında uzun bir süredir kullanılmakta olsa da, özellikle yüzey empedansı etkisinin önem kazandığı HF frekanslarında, uygulamada karşılaşılan sorunlar nedeniyle kullanımı yaygın değildir. Bunun yanı sıra yerdalgası yayılımında SSPE yöntemi kullanılarak engebeli arazi ve empedans değişimi etkilerini birarada gözönüne almak son derece zordur; ancak MoM bu tip problemlerin çözümü için idealdir. SAFB-MoM ile yerdalgası yayılımının ne derece doğru olarak modellendiğini ve yöntemin geçerliliğini göstermek için elde edilen sonuçlar SSPE ile karşılaştırılmıştır. Şekil 1 ve Şekil 2'de düşey polarizasyon durumu için 5MHz'de mükemmel iletken engebeli arazi üzerinde manyetik alanın değişimi mesafe ile çizdirilmiştir. Burada çizgisel kaynak ile manyetik alanın H_y bileşeni uyarılmaktadır. Verici ve alıcı anten yükseklikleri ile arazinin mesafeye göre değişimi şekillerde gösterilmiştir. İlk şekilde Gauss şeklinde bir tepe, ikinci şekilde ise ardışıl iki tepe üzerinde alan şiddetinin değişimi hem SSPE hem SAFB ile hesaplanarak gösterilmiştir. Karşılaştırma amacı ile düz ve mükemmel iletken arazi üzerinde dalga yayılımının nasıl olacağı da grafiklerde verilmiştir. Beklenildiği gibi, tepelerin ardında alan genlikleri düz arazi üzerindeki değerlere oranla azalmaktadır.



Şekil 1. Gauss şeklinde bir tepe üzerinde çizgisel kaynak durumunda manyetik alan genliğinin değişimi



Şekil 2. Gauss şeklinde ardışıl iki tepe üzerinde çizgisel kaynak durumunda manyetik alan genliğinin değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada ileri geri spektral hızlandırılmış moment yöntemi ile engebeli arazi üzerinde dalga yayılımına ilişkin elde edilen değerler SSPE kullanılarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve mükemmel bir uyum gözlenmiştir. Bunun yanı sıra özellikle HF frekanslarında düşey polarizasyon durumunda önem kazanan kara-deniz geçişlerinin olduğu değişken empedanslı engebelsiz yüzeylerde de ileri-geri spektral hızlandırılmış MOM yönteminin literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Değişken empedanslı engebeli araziler üzerinde dalga yayılımının SSPE kullanılarak çözümü çok zor olmasına karşın ileri-geri spektral hızlandırılmış MOM yönteminin bu tip karmaşık ve düz olmayan yüzeyler üzerinde de uygulanabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1]. Levy, M., 2000. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Propagation, IEE, Institution of Electrical Engineers, London
- [4]. Chou H-T. ve Johnson J. T., "A novel acceleration for the computation of scattering from rough surfaces with the forward-backward method," Radio Sci., 33, s. 1277–1287, June 1998.
- [2] Tunç C.A., 2003, Application of spectral acceleration forward-backward method for propagation over terrain, The Institute of Engineering and Sciences of Bilkent University, MSc. Thesis, Ankara
- [3]. Tunc C. A., Altıntaş A. ve Ertürk V.B. "Examination of Existing Propagation Models over Large Inhomogeneous Terrain Profiles Using Fast Integral Equation Solution", IEEE Transactions on Antennas and Propagat, V-53, no. 9, s.3080–3083, Sep 2005
- [5] Tunç C. A., Ertürk V.B., Akleman F., Altıntaş A. ve Sevgi L., "Fast Integral Equation Solutions: Application to Mixed-path Terrain Profiles and comparisons with Parabolic Equation Method", Complex Computing Networks, Springer in Physics Series, 104, s. 55-64, Jan 2006