

Elektromanyetik Radyasyonun İnsan Üzerindeki Etkilerinin Çok Katmanlı Küresel Kafa Modeli ve Eşdeğer Devre Modeli Yardımıyla İncelenmesi

Burcu Yeni, Gülbin Dural
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Çankaya, Ankara
burcu.yeni@metu.edu.tr, gulbin@metu.edu.tr,

Özet: Son yıllarda artan cep telefonu kullanımı, telefon anteninin oluşturduğu elektromanyetik alanların, insan kafası içerisinde yarattığı etkilerin incelenmesini ve insan sağlığına muhtemel zararlarının değerlendirilmesini gerektirmiştir. Bu çalışmada, insan kafası çok katmanlı küresel bir yapı olarak modellenmiş ve bu yapının Green fonksiyonları, eşdeğer 2-kapılı devre modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Eşdeğer 2-kapılı devre modeli, küresel katmanlı yapılarda Green fonksiyonu hesabı için karmaşık analitik hesaplamalara ve nümerik çözümlere kıyasla daha uygulanabilir ve işlem yükü hafif bir yöntemdir. Bu yöntemle hesaplanan Green fonksiyonları kullanılarak, cep telefonu antenlerinden yayılan elektromanyetik alanların insan kafası üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

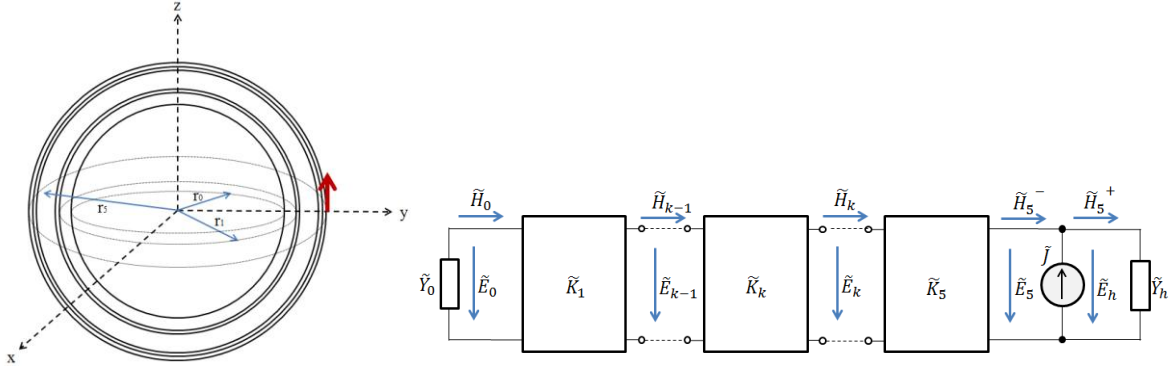
Abstract: The recent increase in mobile-phone usage has required the study of the effects of antenna radiation on human head. In this work, human head has been modeled as a multi-layered spherical structure and the associated Green's functions have been derived using a 2-port equivalent network model. This equivalent model is a simpler and more effective method to obtain Green's functions in multi-layered spherical media than complex analytical or numerical solutions with heavy workload. Employing the Green's functions derived with this method, effects of the antenna radiation on human head have been studied.

1. Giriş

Herhangi bir geometride elektromanyetik alan analizi yapabilmek için kaynak bilgisinin yanı sıra Green fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun nedeni, bir elektromanyetik dalga denkleminin Green fonksiyonunun, bu denklemin noktasal bir kaynak için çözümü olmasıdır. Elektromanyetik alan teorisindeki Green fonksiyonları, doğrusal zamanda değişmez sistem teorisindeki dürtü yanıtı fonksiyonlarına denktir. Yani, doğrusal dalga denkleminin noktasal bir kaynak için çözümü olan Green fonksiyonları bilinirse, herhangi genel bir kaynak için çözümü de doğrusal süperpozisyon prensibi kullanılarak bulunabilir [1], [2].

Çok katmanlı düzlemsel ya da küresel yapılarda Green fonksiyonları çeşitli analitik ya da nümerik yöntemlerle hesaplanabilmektedir [3]-[8]. Özellikle düzlemsel ya da küresel mikro-şerit anten yapıları için Green fonksiyon hesaplamalarında, tam-dalga spektral-alan yöntemi [3], kovuk yöntemi [4], genelleştirilmiş iletim hattı yöntemi [5] ve spektral-alan immitans yaklaşımı (spectral-domain immitance approach) [6] kullanılmıştır. Eşdeğer 2-kapılı devre modeli, çok katmanlı düzlemsel yapılarda spektral-alanda diyadik Green fonksiyonların çıkarımı için karmaşık analitik hesaplamalara ve nümerik çözümlere kıyasla daha uygulanabilir ve işlem yükü hafif bir yöntem olarak yukarıda belirtilen çözümlere alternatif olarak önerilmiştir [9]. Eşdeğer 2-kapılı devre modeli yöntemi, kapalı (tam-küresel), yarım-küresel, sektör gibi küresel yapılarda diyadik Green fonksiyonlarının hesaplanması için genel bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemle çözümü yapılabilen bazı küresel çok katmanlı yapılar radyal dalga kılavuzları, dielektrik rezonatörler, küresel mikro-şerit antenler ve dielektrik rezonatör antenlerdir [10].

Bu bildiride, eşdeğer 2-kapılı devre modeli kullanılarak çok katmanlı küresel bir yapı olarak modellenen insan kafasının Green fonksiyonları hesaplanmış ve bu Green fonksiyonları kullanılarak insan kafasında anten radyasyonu kaynaklı oluşan elektromanyetik alanların incelenebileceği gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) 6-katmanlı küresel kafa modeli ve noktasal kaynak, (b) Eşdeğer 2-kapılı devre modeli

2. Analiz

2-kapılı eşdeğer devre modeli kullanılarak Green fonksiyonları hesaplanacak insan kafası, Şekil 1.a'da gösterildiği gibi deri, yağ, kemik, dura, BOS (beyin-omurilik sıvısı) ve beyin dokularından oluşan 6-katmanlı küresel bir yapı olarak modellenmiştir [11]. Green fonksiyonu hesaplaması için kullanılacak noktasal kaynak da bu şekilde gösterilmiştir. Şekil 1.a'da görülen herhangi bir k katmanını içerisindeki manyetik ve elektrik vektör potansiyeli çözümleri aşağıdaki gibi bulunmaktadır (manyetik potansiyel (F_{rk}) için de ifade aynı olmaktadır):

$$A_{rk} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|v_i|}^{\infty} (A_k \tilde{H}_{n,k}^{(1)} + B_k \tilde{H}_{n,k}^{(2)}) P_n^{|v_i|} e^{jv_i \varphi} \quad (1)$$

Yukarıdaki ifadede A_{rk} elektrik vektör potansiyeli, $H_{n,k}^{(1)}$ ve $H_{n,k}^{(2)}$ sırasıyla 1. ve 2. tip küresel Hankel fonksiyonlarını, P_n^m 1. tip asosiy Legendre fonksiyonunu, A_k ile B_k ise ilgili katsayıları göstermektedir. Elektrik ve manyetik alanların teğetsel bileşenlerinin bu vektör potansiyeller cinsinden ifade edilebildiği bilinmektedir. İnceleme konusu olan küresel yapının elektrik alan teğetsel bileşenleri (E) aşağıda kalın yazı tipi ile gösterildiği gibi matris olarak ifade edilebilir (manyetik alan (H) için de ifade aynı olmaktadır) [12]:

$$E(r, \theta, \varphi) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|v_i|}^{\infty} \bar{L}_c(n, v_i, \theta) \cdot \tilde{E}(r, n) e^{jv_i \varphi} \quad (2)$$

Bu ifade, teğetsel alan vektörlerini uzay-alanından spektral-alana dönüştürmek için kullanılan Vektör-Legendre Dönüşümü'nü ortaya koymaktadır. $E(r, \theta, \varphi)$ uzay-alanındaki elektrik alan vektörünü, $\tilde{E}(r, n)$ ise spektral-alandaki elektrik alan vektörünü göstermektedir. $\bar{L}_c$ dönüşüm matrisinin tanımı ve açık ifadesi [10]'da verilmiştir.

Elektrik ve manyetik alanların teğetsel bileşenlerinin sağlanması gereken sınır koşulları, spektral-alanda eşdeğer 2-kapılı bir devre modeli kullanılarak gerilimler (elektrik alan) ve akımlar (manyetik alan) için devre teorisi yardımıyla yazılan denklemlerle ifade edilebilmektedir. Buna göre oluşturulan 6-katmanlı küresel kafa modelinin eşdeğer devresi Şekil 1.b'deki gibi olmaktadır.

Bu model kullanılarak herhangi bir katman k 'nin iki tarafındaki teğetsel alanlar, 2-kapılı bir devrenin giriş-çıkış akım ve gerilimleri olarak ifade edilebilmektedir. Dolayısıyla k katmanının iki ucundaki teğetsel alanlar aşağıdaki gibi bir hibrid matris ile birbirleriyle ilişkilendirilebilir [10]:

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_{k-1} \\ \tilde{H}_{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_k & \tilde{Z}_k \\ \tilde{Y}_k & \tilde{B}_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{E}_k \\ \tilde{H}_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\tilde{E}_{k-1}$ $k-1$ katmanındaki elektrik alanı, $\tilde{E}_k$ ise k katmanındaki elektrik alanı göstermektedir. $\tilde{V}_k, \tilde{Z}_k, \tilde{Y}_k, \tilde{B}_k$ altmatrislerini içeren matris ise k katmanının tanımlayan parametrelerden oluşmaktadır. İki kapılı devreler arasında herhangi bir akım kaynağı olmadığı durumda bu hibrid matrisler çarpılarak kaskadlanabilir. Şekil 1.b'deki devre modelinden çıkarılan ve sınır koşullarını tanımlayan diğer denklemler ise aşağıdaki gibidir:

$$\tilde{H}_0 = -\tilde{Y}_0 \cdot \tilde{E}_0 \quad \tilde{H}_5^+ = \tilde{Y}_h \cdot \tilde{E}_h \quad \tilde{E}_5 = \tilde{E}_h \quad \tilde{H}_5^+ = \tilde{J} + \tilde{H}_5^- \quad \tilde{E} = \tilde{G} \cdot \tilde{J} \quad (4)$$

Bu denklem setinde $\tilde{\mathbf{J}}$ akım kaynağını, $\tilde{\mathbf{Y}}_0$ en içteki katmanın modellenen admitansını ve $\tilde{\mathbf{Y}}_h$ de en dıştaki katman olan havanın admitansını göstermektedir. $\tilde{\mathbf{V}}_k$, $\tilde{\mathbf{Z}}_k$, $\tilde{\mathbf{Y}}_k$, $\tilde{\mathbf{B}}_k$, $\tilde{\mathbf{Y}}_0$ ve $\tilde{\mathbf{Y}}_h$ altmatrisleri, bir takım cebirsel işlemler sonucunda bulunabilmektedir. Bu altmatrislerin açık ifadeleri [12]'de verilmiştir. Yukarıdaki denklem seti kullanılarak kaynak akımlar ve elektrik alanlar arasında aşağıdaki ilişki elde edilebilir:

$$\tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\mathbf{G}} \cdot \tilde{\mathbf{J}}$$

(5) ifadesindeki $\tilde{\mathbf{G}}$, spektral-alan Green fonksiyonudur. 6-katmanlı küresel kafa modeli için spektral-alan Green fonksiyonu ifadesi, yukarıdaki denklemler ile yapılan hesaplamalar sonucunda aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\tilde{\mathbf{G}} = (\tilde{\mathbf{Y}}_0 \cdot \tilde{\mathbf{V}}_{bl} + \tilde{\mathbf{Y}}_0 \cdot \tilde{\mathbf{Z}}_{bl} \cdot \tilde{\mathbf{Y}}_h + \tilde{\mathbf{Y}}_{bl} + \tilde{\mathbf{B}}_{bl} \cdot \tilde{\mathbf{Y}}_h)^{-1} \cdot (\tilde{\mathbf{B}}_{bl} + \tilde{\mathbf{Y}}_0 \cdot \tilde{\mathbf{Z}}_{bl}) \quad (6)$$

Yukarıdaki ifadedeki $\tilde{\mathbf{V}}_{bl}$, $\tilde{\mathbf{Z}}_{bl}$, $\tilde{\mathbf{Y}}_{bl}$ ve $\tilde{\mathbf{B}}_{bl}$ altmatrisleri, 6 katmanın altmatrislerinin kaskadlanmasıyla oluşturulan bileşke hibrid matris $\tilde{\mathbf{K}}_{bl}$ 'nin altmatrisleridir.

6-katmanlı küresel bir yapı olarak modellenen insan kafasının Green fonksiyonları Tablo 1'deki parametreler kullanılarak (6) olarak bulunduktan sonra herhangi bir kaynak $\tilde{\mathbf{J}}$ 'nin yapı içerisinde oluşturduğu elektrik alan (5) denklemi ile hesaplanabilir.

Tablo 1. 6-katmanlı küresel kafa modeli için kullanılan parametreler [11]

Biyolojik Dokular	Yarıçap (cm)	ϵ_r (@1900MHz)
Deri	9.00	37.21
Yağ	8.90	9.38
Kemik	8.76	16.40
Dura	8.35	37.21
BOS	8.30	77.30
Beyin	8.10	43.22

Spektral-alanda hesaplanan elektrik alandan uzay alanına geçiş için Vektör-Legendre Dönüşümü (2) kullanılmaktadır.

3. Sonuç

Bu bildiride aktarılan çalışma kapsamında, insan kafası çok katmanlı küresel bir yapı olarak modellenmiş ve bu yapının Green fonksiyonları, eşdeğer 2-kapılı devre modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Eşdeğer 2-kapılı devre modeli, küresel katmanlı yapılarda Green fonksiyonu hesabı için genellikle oldukça karmaşık analitik hesaplamalara ve nümerik çözümlere alternatif olarak geliştirilmiş, daha uygulanabilir ve işlem yükü hafif bir yöntemdir. Bu yöntemle hesaplanan Green fonksiyonları kullanılarak, cep telefonu anteni gibi çeşitli radyasyon kaynakları nedeniyle insan kafasında oluşan elektromanyetik alanlar incelenebilmektedir.

Kaynaklar

- [1]. Chew, Weng Cho. *Waves and fields in inhomogeneous media*. Vol. 522. New York: IEEE press, 1995.
- [2]. Kong, J. A. *Electromagnetic Wave Theory*. Ed.. New York: Wiley, 1990.
- [3]. W. Y. Tam ve K. M. Luk, "Resonance in spherical circular microstrip structures," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, cilt. 39, no. 4, s.700-704, Apr. 1991.
- [4]. K. M. Luk ve W. Y. Tam, "Patch antennas on spherical body," *Proc.Inst. Elect. Eng.*, pt. H, cilt. 138, s. 103-108, Feb. 1991.
- [5]. A. A. Kishk, "Analysis of spherical annular microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 3, s. 338-343, Mar. 1993.
- [6]. Itoh, Tatsuo. "Spectral domain immittance approach for dispersion characteristics of generalized printed transmission lines." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 28.7 (1980): 733-736.
- [7]. Michalski, Krzysztof A., ve Juan R. Mosig. "Multilayered media Green's functions in integral equation formulations." *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 45.3 (1997): 508-519.
- [8]. Fallahi, Arya, ve Benedikt Oswald. "On the computation of electromagnetic dyadic Green's function in spherically multilayered media." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 59.6 (2011): 1433-1440.
- [9]. Dreher, Achim. "A new approach to dyadic Green's function in spectral domain." *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 43.11 (1995): 1297-1302.
- [10]. Giang, Truong Vu Bang, Michael Thiel, ve Achim Dreher. "A unified approach to the analysis of radial waveguides, dielectric resonators, and microstrip antennas on spherical multilayer structures." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 53.1 (2005): 404-409.
- [11]. Khodabakhshi, Hamid, ve Ahmad Cheldavi. "Irradiation of a six-layered spherical model of human head in the near field of a half-wave dipole antenna." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 58.3 (2010): 680-690.
- [12]. Giang, T. V. B., M. Thiel, ve A. Dreher. "Dyadic Green's function of multilayer spherical sector structures." *Proc. 3rd Eur. Conformal Antennas Workshop*.