

Homojen Olmayan Ana Manyetik Alanda Manyetik Rezonans Görüntüleme için Rf Sargısı Tasarımı

A.O. Yılmaz, B.M. Eyüboğlu
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
06531, Ankara, Türkiye

ayilmaz@eee.metu.edu.tr, bme@eee.metu.edu.tr,

Özet: Bu çalışmada, homojen olmayan ana manyetik alanlarda kullanılmak üzere RF sargısı geometrileri tasarlanmıştır. İstenen RF manyetik alan karakterini oluşturabilecek akım yoğunluğu dağılımı, önceden tanımlanmış yüzeylerde elde edilmiş, hesaplanan akım yoğunluğunu oluşturabilecek iletken şekli belirlenmiştir. Belirlenen akım yoğunluğu dağılımının oluşturduğu manyetik alan hesaplanmış, hesaplanan alan ile oluşturulmak istenen alan arasındaki hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Hata yüzdeleri ve iletken şekillerinin hayata geçirilebilme kolaylığı göz önünde bulundurularak; silindirik, kübik ve düzlemsel yüzeyler üzerine yerleştirilmek üzere optimum iletken şekilleri belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen teknikler kullanılarak homojen olmayan bir ana manyetik alanda kullanılacak RF sargıları, önceden tanımlanmış yüzeyler üzerinde tasarlanıp hayata geçirilebilir.

1. Giriş

Manyetik Rezonans Görüntüleme için istenen bir manyetik alanı yaratabilecek akım yoğunluğu dağılımını hesaplamayı sağlayan ters yaklaşım metodu gradient sargılarının tasarlanmasında kullanılmış [1], bu metod “quasi-static” [2] ve “time-harmonic” [3] yaklaşımlarla silindirik radyo frekans sargıları tasarlamak üzere uygulanmıştır. Yaygın bir RF sargısı türü olan kuş kafesi sargılarındaki sıfır akım noktalarındaki iki uç halkanın kırılmasıyla, yarım kuş kafesi sargıları oluşturulmuş [4-5], tasarlanan U-şekilli sargılar farklı uygulamalar için incelenmiştir [6]. Ayrıca, görüntülenen hacmin üzerini kaplamak üzere kubbe şekilli RF sargıları ağ konfigürasyonu yardımıyla tasarlanmıştır [7-8]. Bu çalışmada, time-harmonic ters yaklaşım metodu kullanılarak RF sargı tasarımları geliştirilmiştir. Matris denklemlerinin çözümünde düzenleme teknikleri kullanılmış, hesaplanan akım yoğunluğunu oluşturabilecek iletken şeklini belirlemek için ise akı fonksiyonları kullanılmıştır.

2. Teori

Momentler yöntemi kullanılarak, alan problemleri matris denklemlerine dönüştürülüp, bulunmak istenen nicelik bu denklemlerin çözümüyle elde edilebilir. Bu çalışmada, momentler yöntemi kullanarak elde edilen eşitliklerin temelini Helmholtz denklemi oluşturmaktadır. B manyetik alanı, vector potansiyeli A cinsinden,

$$B = \nabla \times A \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. J_s hacim akım yoğunluğu tarafından yaratılan,

$$\nabla^2 A + k^2 A = -\mu J_s \quad (2)$$

şeklindeki Helmholtz denklemi ile ifade edilen her A vektör alanı,

$$A(r) = \int_V J_s(r') \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} dr' \quad (3)$$

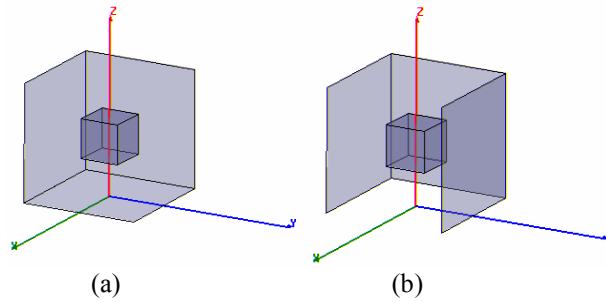
ile ifade edilen bir çözüme sahiptir. Bu çözümde, r , hedef alan noktası vektörü, r' , kaynak alan noktası vektörü ve $k^2 = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$ dir. Momentler yöntemini problemin amacına uygun olarak kullanmak için (3) deki ifade (1) deki ifade içerisine yerleştirilerek çözülür ve çözülmek istenen fonksiyonunun taban fonksiyonları kullanılarak yaklaşık olarak ifade edilmesiyle (4) yapısındaki denklem elde edilir. Bu ifade için, $f(x')$, bilinmeyen fonksiyonun yaklaşık ifade edilmesinde kullanılan taban fonksiyonu; α_j , bu fonksiyonun j 'inci kaynak noktadaki katsayısı; $K(\cdot, \cdot)$, integral denkleminin çekirdek fonksiyonu ve $g(\cdot)$ bilinen ya da verilmiş olan fonksiyon değeridir. Eşitlik (4)'teki ifade, $Ax = b$ yapısındaki bir matris denklemi ile ifade edilebilir ve böylece; problem, bilinmeyen fonksiyonun katsayılarının bulunması haline gelir.

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j \int_{\Omega_j} f(x'_j) K(x_i, x'_j) dx' = g(x_i), \quad x \in \Omega_j \quad (4)$$

Bu çalışmada elde edilen A matrisi kötü konumlanmış yapıda olduğundan, matris denkleminin çözümü için TSVD [9], Rutisbauer [10], Tikhonov [10], [6] ve CGLS [11] düzenleme yöntemleri kullanılmıştır.

3. Uygulama

Akım yoğunluğu dağılımını hesaplamak için belirlenmesi gereken RF manyetik alanı; y-z düzlemine yerleştirilen bir kare sargının oluşturduğu ana manyetik alan temel alınarak ve RF manyetik alanının, hedef alandaki her noktada eş büyüklükte ve bu ana manyetik alana dik yönde olması kriterleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Önerilen çözüm, RF sargısı şeklinin üzerlerine yerleştirilmesi amaçlanan dört farklı geometrik yüzey seçimi için uygulanmıştır. Bu yüzeyler: silindirik, düzlemsel, üç parçalı düzlemsel ve dik üç parçalı düzlemsel yüzeyler olarak belirlenmiştir. Üç parçalı düzlemsel ve dik üç parçalı düzlemsel yüzeyler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. (a) Dik üç parçalı düzlemsel ve (b) Üç parçalı düzlemsel yüzey modelleri ve hedef hacim seçimleri.

Kaynak yüzeydeki her bir alt alan için akım yoğunluğu vektörleri taban fonksiyonları kullanılarak Fourier serileri ile,

$$J_\alpha = \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{mnpq} \cos\left(k_n \alpha + \frac{q\pi}{2}\right) \cos\left(k_m \beta + \frac{p\pi}{2}\right) \hat{a}_\alpha \quad (5)$$

$$J_\beta = \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{mnpq} \sin\left(k_n \alpha + \frac{q\pi}{2}\right) \sin\left(k_m \beta + \frac{p\pi}{2}\right) \hat{a}_\beta, \quad k_n = \frac{n\pi}{L}, k_m = \frac{m\pi}{W}$$

ifade edilebilir. α ve β değişkenleri seçilen yüzey geometrisine ve koordinat sistemine bağlı olarak akım yoğunluğu vektörlerinin yönlerine göre belirlenir. m ve n taban fonksiyonlarının sırasıyla α ve β bağımlılıklarını belirleyen Fourier harmoniklerini ifade eder. L ve W , seçilen yüzeyin sırasıyla α ve β yönlerindeki büyüklüğüne denk gelir. p ve q değerleri, yüzeydeki akım yoğunluğu dağılımının simetri koşullarını belirler; böylece kosinüs ve sinüs fonksiyonları tek periyod içinde tutulmuş olur. $\hat{a}_\alpha \perp \hat{a}_\beta$ olduğundan, akım yoğunluğu vektörü skalar fonksiyonlar cinsinden

$$\vec{J} = \hat{a}_\rho \times \nabla \chi + \nabla \psi, \quad \hat{a}_\rho \perp \hat{a}_\alpha \wedge \hat{a}_\rho \perp \hat{a}_\beta \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eğer sargının büyüklüğü dalga boyuna göre çok küçük ise, akım yoğunluğu J' nin iraksayımı sıfırdır ve iletken tel şekli akı fonksiyonu, χ' in kontür çizgilerine denk gelir [3].

4. Sonuç

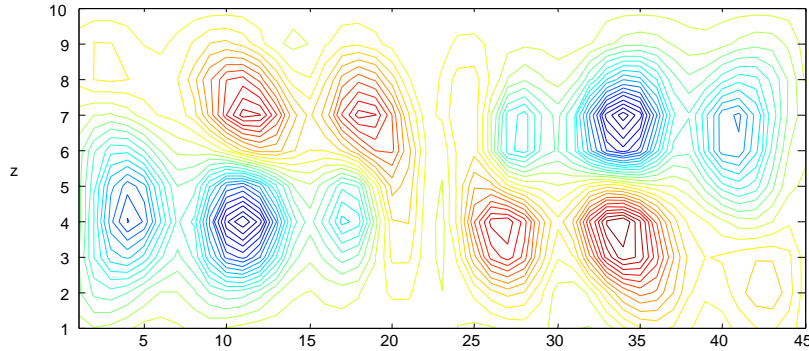
Hesaplanan manyetik alan ile istenen manyetik alan arasındaki minimum hata yüzdeleri, her yüzey seçimi için; düzenleme parametrelerini belirli bir aralık içinde değiştirerek, her düzenleme metodu için, (7) kullanılarak hesaplanmıştır. Hayata geçirilebilir iletken şekilleri elde etmek amacıyla, optimum hata yüzdelerini belirlemek için, L-Eğrisi Metodu [10] kullanılmıştır. Tablo 1'de elde edilen hata yüzdeleri gösterilmektedir.

$$hata \% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (B_{istenen,i} - B_{hesaplanan,i})^2}{B_{istenen,i}^2}} \times 100 \quad (7)$$

Tablo 1. Yüzeylerde uygulanan düzenleme yöntemlerinde elde edilen optimum (sol kolon) ve minimum (sağ kolon) ortalama hata yüzdeleri (%).

	CGLS	Rutisbauer	TSVD	Tikhonov								
				L= birim			L= 1. türev			L=2. türev		
Düzlemsel	26,0	25,7	35,0	26,0	29,0	25,2	30,6	25,1	30,7	25,2	26,6	24,8
3 Parça Düz.	4,3	3,8	9,5	4,1	5,0	3,8	6,6	3,8	8,4	3,7	4,2	3,8
Dik 3 Parça Düz.	12,1	11,2	29,9	12,0	3,2	2,5	3,7	2,5	4,6	2,4	6,1	2,2
Silindirik	4,7	3,8	7,5	3,9	5,3	3,9	4,6	3,9	9,2	3,9	9,3	3,8

Her bir yüzey seçimine uygulanan düzenleme yöntemleri ile elde edilen hata yüzdeleri ve oluşturulan sargı şekillerinin karmaşıklık derecesi incelendiğinde, üç parça düzlemsel ve dik üç parça düzlemsel yüzeylere uygulanan Tikhonov ve TSVD yöntemleri ile düşük hata yüzdeleri elde edilmesine karşın, sargının hayata geçirilebilme kolaylığı açısından en uygun sonuçlar Rutisbauer düzenleme yöntemi ile elde edilmiştir. Düşük hata yüzdesi ve hayata geçirilebilme kolaylığı göz önüne alındığında en uygun yöntem silindirik yüzeye Rutisbauer metodunun uygulanması olarak belirlenmiştir. İletken şeklini oluşturmada kullanılmak üzere elde edilen akı fonksiyonu kontür çizgileri silindirin yan yüzeyi açıldığında Şekil 2’deki gibi görünmektedir.



Şekil 2. Rutisbauer düzenleme yöntemi kullanılarak silindirik yüzeyde elde edilen akı kontür çizgileri.

Teşekkür

Bu çalışma ODTÜ Araştırma Fonu Projesi BAP-2005-07-02-00-34 tarafından desteklenmektedir. Bu çalışma B.M. Eyüboğlu’nun danışmanlığını yaptığı, A.O. Yılmaz tarafından hazırlanan yüksek lisans çalışmasının bir parçasıdır.

Kaynaklar

- [1]. M. A. Martens, L. S. Petropoulos, R.W. Brown ve J. H. Andrews, Insertable biplanar gradient coils for magnetic resonance imaging, Rev. Sci. Instrum., 62, s. 2639–2645, 1991.
- [2]. H. Fujita, L. S. Petropoulos, M. A. Morich, S. M. Shvartsman ve R. W. Brown, A hybrid inverse approach applied to the design of lumped-element RF coils, IEEE T-BME, 46, s. 353–361, 1999.
- [3]. B. G. Lawrence, S. Crozier, D. Yau ve D. Doddrell, A time-harmonic inverse methodology for the design of RF coils in MRI, IEEE T-BME, s. 64–71, 2002.
- [4]. J. Jin, Electromagnetic Analysis and Design in Magnetic Resonance Imaging. Boca Raton, FL: CRC, 1999.
- [5]. D. Ballon, M. C. Graham, S. Miodownik, and J. A.Koutcher, A 64 MHz half-birdcage resonator for clinical imaging, J. Magn. Reson., 90, pp. 131–140, 1990.
- [6]. J. Gasson, I. R. Summers, M. E. Fry ve W.Vennart, Modified birdcage coils for target imaging, Mag. Reson. Imag., 13, s. 1003–1012, 1995.
- [7]. K. L. Zakian, J. A. Koutcher, ve D. Ballon, A dual-tuned resonator for proton-decoupled phosphorus-31 chemical shift imaging of the brain, Magn. Reson. Med., 41, s.809–815, 1999.
- [8]. K. L. Meyer, K. Kim, T. Li, P. K. Tulipano, K. M. Lee, R. DeLaPaz, J. Hirsch ve D. Ballon, Sensitivity-enhanced echo-planar MRI at 1.5 T using a 5x5 mesh dome resonator, Magn. Reson. Med., 36, s. 606–612, 1996.
- [9]. Ole Christian Lingjearde, Nils Christophersen, Regularization Principles Solving Ill-Posed Inverse Problems, 1998.
- [10]. Per Christian Hansen, Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems, SIAM, 1997
- [11]. Gene H. Golub, Per Christian Hansen, Dianne P. O’Leary, Tikhonov Regularization and Total Least Squares, SIAM F. Matrix Anal. Appl. 21, s. 185-194.