

Levent Gürel

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Bilkent Üniversitesi
06533 Bilkent, Ankara

ÖZET

Hızlı ve düşük karmaşıklığa sahip çözüm teknikleri geliştirerek hem sayısal elektromanyetik bilimine katkıda bulunmayı, hem de savunma sanayimizin gereksinmesi olan ve gerçek yaşamda önem taşıyan, ancak büyüklükleri nedeniyle bugüne dek sayısal olarak çözümü gerçekleştirilememiş elektromanyetik uyumluluk (EMC) problemlerinin çözümünü hedefliyoruz. Bu bildiri, sayısal elektromanyetik biliminin elektromanyetik uyumluluk problemlerinin çözümünde nasıl kullanılabilirliği anlatılacaktır. Ayrıca, tipik elektromanyetik uyumluluk problemlerinin analizinde karşılaşılan sayısal problemlerin geleneksel metodlarla çözülemeyecek kadar büyük oldukları ve bu çeşit problemlerin çözülebilmesi için yeni geliştirilen hızlı çözüm tekniklerinin kullanımının gerektiği açıklanacaktır.

1. EMC Hakkında Genel Bilgiler

Elektromanyetik uyumluluk (*electromagnetic compatibility: EMC*), elektronik ve elektrikli aygıt, gereç ve sistemlerin içinde buldukları elektromanyetik (EM) ortamlarında, kendileri çok yüksek EM ışınımını yaratmamak koşuluyla, normal ve tatminkar çalışmalarını yerine getirebilmeleri, birbirleriyle uyum içinde yaşayabilmeleridir. Örneğin, aynı EM ortamında bulunan bir radardan, bir alıcı/verici telsizden ve bir uçağın savaş sistemlerini denetleyen mikroişlemci kartından çıkan EM dalgaların yüksekliklerinin ve sıklıklarının (frekanslarının), bu aygıtların birbirlerine zarar vermeden, uyum içinde çalışabilecekleri şekilde düzenlenmesi gerekiyor. Elektronik aletlerin ve özellikle sayısal (*digital*) sistemlerin hem sivil, hem de askeri ortamlarda günden güne çoğalması ve çeşitlenmesi, ve çalışma sıklıklarının yükselmesi,

bu uyumu bozuyor, elektromanyetik karışmayı (*electromagnetic interference: EMI*) git gide daha sık karşımıza çıkarıyor ve EMC konusunu daha önemli kılıyor.

EMC problemlerinin çözümü için pek çok yol olmasına karşın, en iyi yol, problemin daha ortaya çıkmadan önlenmesidir. Bunun için de, elektronik ve elektrikli aygıt, gereç ve sistemlerin tasarımlarının EM ışınımını azaltacak şekilde yapılması gerekiyor. EM ve özellikle sayısal EM alanlarında yapılan araştırmaların bu konuya önemli katkıları olabilir. Sayısal EM bilimi kullanılarak, tasarım aşamasındaki bir fiziksel sistem hakkında, henüz sistem üretilmeden, elektromanyetik çözümleme (*analysis*) ve benzetim (*simulation*) yoluyla önemli bilgiler elde edilebilir. Bu da zaman ve para tasarrufu anlamına gelir. Örneğin, bilgisayarların çalışma sıklıkları (*operating frequency*) günden güne yükseldiği için, bir bilgisayar kartının tasarımını artık sadece bir devre tasarımı programıyla yapmak olanaksız. Günümüzde, elemanların baskı devre kartı üzerinde yerleşimini yapmak devre tasarımını bitirmiyor. Sıklığın yüksekliği nedeniyle, bu kartın doğru çalıştığına ve elektromanyetik uyumluluk koşullarını sağladığına emin olmak için, artık devre tasarımının içine elektromanyetik çözümleme ve benzetimi de katmak şart.

2.Askeri Sistemlerde EMC

Sivil ortamlarda bile EMC problemleri rahatsız edici olabiliyorken, askeri ortamlarda EMC problemleri can kaybına ve diğer önemli stratejik kayıplara yol açabiliyor. Bu önem ve öncelik farkına ek olarak, askeri ve sivil uygulamalardaki EM ortam da çok farklıdır. Sivil uygulamalarda, EMC'nin sağlanabilmesi ve EMI'nin önlenmesi için bir takım kurallar konmuştur ve bütün elektronik sistemlerin bu kurallara uyması için yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bu kurallar, elektronik sistemlerin hangi frekans bantlarında çalışabileceklerini ve EM ışınımının en fazla ne kadar olabileceğini düzenlemektedir. Sivil sistemler bu düzenlemelere uyacak şekilde üretilmektedir. Ote yandan, askeri sistemlerin, bu kurallara barış zamanlarında uysalar bile, savaş zamanlarında herhangi bir kurala bağlı kalmaları beklenemez. Bu nedenle, askeri uygulamalarda (özellikle savaş zamanlarında) EM ortamı hiç beklenmedik ve hiç görülmedik derecede karmaşık ve düşmanca olabilir. Bu durumun önleminin çok önceden alınması için elektromanyetik senaryo simülasyonları yapılması gerekir.

Askeri EM ortamlarının sivil EM ortamlarından bir diğer farkı da, normal haberleşme uygulamalarına ek olarak, jamming ve yönlendirilmiş enerji silahlarının kullanılması gibi düşmanca uygulamaları içermesidir. Yani, dost ve düşman elektromanyetik sinyallerinin bizim elektronik sistemlerimizle istenmeden ve amaçlanmadan karışmasına ek olarak, bizim elektronik sistemlerimize ve alıcımıza bilekerek ve isteyerek yönlendirilmiş çok yüksek EM ışınımı söz konusudur. Özellikle yönlendirilmiş enerji silahları uygulamalarında amaç, düşmanca EMI operasyonlarının da ötesine geçerek, elektronik alıcı sistemlerimizin yüksek EM ışınımı altında yakılarak tamamen devre dışı bırakılmasıdır. Bu düşmanca uygulamalara karşı savunma olarak elektronik sistemlerimizin elektromanyetik hassasiyetlerinin (*electromagnetic susceptibility: EMS*) azaltılması gerekmektedir. Bu konu da bilgisayar simülasyonları yoluyla araştırılabilir ve askeri elektronik sistemlerimizin EMS'leri azaltılarak savunma özellikleri geliştirilebilir.

3. Dünyada EMC

Hemen hemen bütün gelişmiş ülkelerde elektromanyetik uyumluluk konusunda uyulması zorunlu yasal düzenlemeler bulunuyor. Örneğin, ABD'de *FCC*, Almanya'da *VDE*, İngiltere'de *BSI* ve Hollanda'da *NNI* tarafından hazırlanmış yönergeler yürürlükte. Avrupa Topluluğu'nun (AT) ürün güvenliği ve EM konusundaki düzenlemelerini ise CEN'in bir alt komitesi olan *CENELEC* yapıyor (1). Günden güne şekillenen AT'de hemen her konuda konulan yasa, kural ve yönetmelikler, gelişmiş ülkelere alındığı gibi, öncekilerin hatalarını yinelememek ve deneyimlerinden yararlanabilmek için titizlikle gözden geçirilip yeniden ve daha sıkı olarak yazılıyor. Bu ülkelerde ticaret yapmak isteyen firmalar EMC konusundaki yasal düzenlemelere uymak zorunda kalıyorlar. Bu da, bu ülkelerin sivil endüstrilerinde EMC konusunda büyük bir bilgi birikimi oluşmasına yol açıyor. Doğal olarak, bu bilgi birikiminin savunma endüstrisinde de kullanılması kendiliğinden gerçekleşiyor.

Gelişmiş ülkelerin (sivil ve askeri) elektronik şirketlerinde EMC bölümleri önemli bir yer tutuyor. Pek çok üniversitede EMC konusunda araştırma yapılıyor. EMC konusunda konferanslar düzenleniyor ve bilimsel dergiler basılıyor.

4. Türkiye'de Sivil EMC

Ülkemizde sivil EMC uygulamaları konusunda bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bunun nedeni, Türkiye'de EMC konusunda gerekli yasal düzenlemelerin yapılmamış olmasıdır. Bütün gelişmiş ülkelerde EMC konusunda uyulması zorunlu yasal düzenlemeler bulunuyor (1). Bu durum, bu ülkelerde EMC konusunda sivil kurumlardan başlayarak bir bilgi birikimi oluşmasına yol açmaktadır. Türkiye'de ise, sivil EMC uygulamaları konusundaki bilgi eksikliği askeri uygulamalara da ters bir şekilde yansımaktadır. Bu sorunun çözümü hükümetlerin gerekli yasal düzenlemeleri yapmasından geçmektedir. Bu nedenle, sivil uygulamalardaki EMC problemleri bir süre daha devam edecektir.

5. Türkiye'de Askeri EMC

Askeri uygulamalardaki EMC problemleri, Türkiye'deki sivil EMC uygulamaları alanında bilgi birikimi oluşmasını bekleyemeyecek kadar önemli, ciddi ve acildir. Bu nedenle, bu konuda hem teorik, hem de pratik bilgi birikimini oluşturmak için çalışmalar yapılması gerektiğini düşünmekteyiz.

Jamming ve yönlendirilmiş enerji silahları uygulamaları nedeniyle, EMI ve buna karşı savunma olarak EMS teknikleri stratejik bilgiler haline gelmiştir. Bu çeşit stratejik bilgiler Türkiye'ye en yakın müttefikleri tarafından bile verilmemektedir ve verilmesi de beklenmemelidir. Bu konuda dışa bağımlı kalmadan, kendi bilgilerimizi kendimiz üretmeliyiz.

Unutulmamalı ki, savaş ortamı barış ortamından çok farklı olabilir. Büyük özverilerle yurt dışından satın aldığımız çeşitli askeri elektronik sistemler, barış zamanlarında tam olarak çalışmasına rağmen, savaş sırasında bu sistemleri bize satanlar tarafından (jamming ile) etkisiz veya (yönlendirilmiş enerji silahlarıyla) tamamen

çalışamaz hale getirilebilir. Başka ülkelere olan bağımlılığımız nedeniyle, şu anda elimizde olduğunu sandığımız elektronik sistemler, aslında tam gerektiği zamanlarda elimizde olmayabilir. Bu senaryoya karşı, gelişmiş elektronik sistemleri yurt dışından alıyor olsak bile, bu sistemlerin EMS'lerinin nasıl azaltılacağı konusunda Türkiye'de çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar sonucunda, bu sistemlere küçük değişiklikler yaparak (örneğin, alıcı devrelerinin EMS özelliklerini iyileştirerek) bütün bir sistemi korumak mümkün olabilir.

6. Sayısal Elektromanyetik Bilimi ve EMC

Sayısal EM bilimi kullanılarak, tasarım aşamasındaki bir fiziksel sistem hakkında, henüz sistem üretilmeden, önemli bilgiler elde edilebilir. Bu da zaman ve para tasarrufu anlamına gelir. Örneğin, sistem ve altsistem kutularının tasarımı sırasında geometriye bağlı rezonanslar sayısal olarak incelenebilir. Kutu üretildikten sonra elektromanyetik uyumluluk problemleri doğurabilecek rezonansların önlenmesi için, sistem kutusunun şekli, altsistem kutularının sistem kutusu içindeki yerleri, havalandırma deliklerinin şekilleri, sayıları ve yerleri ve bunlara benzer daha pek çok değişken henüz tasarım aşamasında değiştirilebilir. Böylece, elektromanyetik uyumluluk problemleri daha oluşmadan önlenebilir ve üretimden sonra pahalı değişiklikler yapmaya gerek kalmaz.

Ancak, gerçek yaşamdaki elektromanyetik uyumluluk problemlerinin sayısal formülasyonları yapıldığında karşımıza çok büyük problemler çıkıyor. Problemdaki bilinmeyen sayısı N ise, geleneksel yöntemler, çözüm için $O(N^3)$ işlem ve $O(N^2)$ bellek kullanımı gerektiriyor ve büyük N durumlarında çözümü olanaksız kılıyor.

Elektromanyetik problemler integral veya diferansiyel denklemleri kullanılarak formüle edilebilir. Integral denklemlerinin sayısal çözümlerinde, moment metodunda (*method of moments: MOM*) olduğu gibi, problemi bir matris denklemine dönüştürüp, doğrusal sistem çözümü yapmak alışılmış ve iyi bilinen bir tekniktir. Sayısal problemde bilinmeyenlerin sayısı N ise, $N \times N$ matris denkleminin doğrudan çözümü bilgisayarda $O(N^3)$ FLOPs (*floating-point operations*) ve $O(N^2)$ bellek kullanımı gerektirir. $N \times N$ matris denkleminin iteratif çözümü ise, her iterasyonda bir ya da birkaç matris-vektör çarpımı gerektirdiğinden, her iterasyon için $O(N^2)$ FLOPs gerektirir. Toplam iterasyon sayısı da bilinmeyenlerin sayısı N 'e doğru orantılı olarak bağlıysa, iteratif çözümün de karmaşıklığı (*complexity*) $O(N^3)$ olur. Iteratif çözümlerde de, doğrudan çözümlerde olduğu gibi, $O(N^2)$ bellek kullanımı gerekir.

7. Hızlı Çözüm Teknikleri

Geleneksel metodların $O(N^3)$ işlem ve $O(N^2)$ bellek karmaşıklığı, büyük problemlerin çözülmesini engelleyen nedendir. Çünkü, problemin büyüklüğü N yükseldikçe, gereken işlem sayısı N 'in kübüne, gereken bellek kapasitesi de N 'in karesine bağlı olarak artar. Örneğin, problemin büyüklüğü iki katına çıkarıldığında, çözüm zamanı 8, gereken bellek kapasitesi de 4 katına çıkar. Böylece eldeki bilgisayar

olanakları kısa sürede tükenir ve istenilen problem büyüklüğüne hiçbir zaman ulaşamaz. Gerçek yaşamda önemi olan büyük elektromanyetik problemlerin çözümü için, işlem karmaşıklığı $O(N^3)$ 'den ve bellek karmaşıklığı $O(N^2)$ 'den düşük hızlı algoritmalar geliştirilmesi tek çıkar yol olarak görülmektedir.

Bu amaçla, düşük karmaşıklığa sahip hızlı çokkutup yöntemi (*fast multipole method: FMM*) (2-5) ve özyineli T-matris yöntemi (*recursive T-matrix method: RTMA*) (6-9) gibi hızlı yöntemler üzerinde çalışmaktayız. Integral denkleminin FMM ile çözümü, matris denklemi çözümüne eşdeğer olmakla birlikte, FMM çözümünde matris denklemi hiçbir zaman açık olarak kurulmaz. Böylece, matrisin doldurulup saklanması gerektirdiği $O(N^2)$ bellek zorunluğundan ve matrisin çözümünde gereken $O(N^3)$ işlem yükünden kurtulmak için bir olanak doğmuş olur. Matris denklemi kurmak yerine, geometrik olarak birbirine yakın bilinmeyenler gruplar halinde toplanır (*clustering*), bunların elektromanyetik alanları harmonikler cinsinden ifade edilir, tek tek bilinmeyenlerin harmonikleri ile hesaplama yapmak yerine grupların harmonikleri ile çalışılır ve grupların birbirleriyle etkileşimlerini hesaplamak için harmoniklerin bir noktadan diğerine taşınması "toplama kuralları" (*addition theorems for harmonics*) kullanılarak yapılır. Bütün bunlar iteratif bir metodun içinde akıllıca yapıldığında, her iterasyon için $O(N^{1.5})$ bellek kullanımı ve işlem gerektirdiği görülür.

Gerçek yaşamdaki sayısal elektromanyetik problemlerin tipik büyüklüklerini anlayabilmek için yalın bir örnek vermek istiyoruz. 20 cm x 40 cm x 50 cm boyutlarındaki küçük sayılabilecek bir metal kutuyu ele alalım. Dikdörtgenler prizması şeklindeki bu metal kutunun, bir elektronik sistem veya altsistem kutusu olduğunu düşünelim. Bu kutunun yüzeyini küçük karelere bölelim ve her küçük karenin üstünde iki tane bilinmeyen tanımlayalım. Bu karelerin kenar uzunluğu genellikle verilen frekanstaki dalga boyunun onda birinden küçük olacak şekilde seçilir. Örneğin, frekansın 5 GHz, dalga boyunun 6 cm olduğu durumda, karelerin boyutlarını 0.5 x 0.5 cm² olarak seçelim. Hentüz hiçbir detayın katılmadığı bu sade kutu modeli için toplam bilinmeyen sayısı 60,000'i geçer. Frekansın 20 GHz olduğu durumda, bilinmeyen sayısı 16 kat artarak bir milyonu bulur! Bu örneği, gerçek yaşamdaki sayısal elektromanyetik problemlerinin ne kadar büyük olduğunu göstermek ve daha hızlı çözüm tekniklerine gerek olduğunu ve her zaman olacağını vurgulamak için verdik.

8. Sonuç

Elektromanyetik uyumluluk konusu hem askeri, hem de sivil uygulamalar için önemlidir ve sayısal elektromanyetik biliminin sağladığı çözüm teknikleri, özellikle son zamanlarda geliştirilen hızlı çözüm teknikleri, EMC problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu çeşit elektromanyetik modelleme ve çözüm teknikleri sayesinde, pek çok değişik senaryo simülasyonları kolaylıkla ve insan, zaman ve para kaynaklarından tasarruf ederek yapılabilir. Bu çalışmalardan elde edilen bilgiler, gerçek elektronik sistemlerin elektromanyetik hassasiyetlerinin (EMS) azaltılması ve yönlendirilmiş enerji silahlarına karşı korunması için kullanılabilir. Bu da, ülkemizin bu konudaki dışa bağımlılığının azaltılması için çok önemlidir.

Kaynakça

1. L. Gürel, "Sayısal Elektromanyetik Bilimi, Elektromanyetik Uyumluluk ve Avrupa Topluluğu," 6. Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongresi, Bursa, Eylül 1995.
2. V. Rokhlin, "Rapid solution of integral equations of scattering theory in two dimensions," *J. Comput. Phys.*, vol. 86, pp. 414-439, Feb.1990
3. R. Coifman, V. Rokhlin, and S. Wandzura, "The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 35, no. 3, pp. 7-12, June 1993.
4. C. C. Lu and W. C. Chew, "Fast algorithm for solving hybrid integral equations," *Proc. IEE*, vol.140, Part H, pp. 455-460, Dec.1993.
5. L. Gürel, "Fast RCS computation via the fast multipole method," NATO AGARD SPP Symposium on Radar Signature Analysis and Imaging of Military Targets, Ankara, Turkey, Oct.1996. (Bilkent University Research Report BILUN-EEELG-9602, Oct.1996.)
6. L. Gürel and W. C. Chew, "Scattering solution of three-dimensional array of patches using the recursive T-matrix algorithms," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 2, pp.182-184, May 1992.
7. L. Gürel and W. C. Chew, "Recursive T-matrix algorithms with reduced complexities for scattering from three-dimensional patch geometries," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-41, pp. 91-99, Jan.1993.
8. L. Gürel and W. C. Chew, "A recursive T-matrix algorithm for strips and patches," *Radio Sci.*, vol. 27, pp. 387-401, May-June 1992.
9. L. Gürel, "Recursive algorithms for computational electromagnetics," Ph.D. dissertation, University of Illinois, Champaign-Urbana, IL,1991.