

GEÇ-ZAMANLI ELEKTROMANYETİK SAÇINIM VERİLERİNDEN PAGE VE WIGNER DAĞILIMLARI KULLANARAK HEDEF SİSTEM KUTUPLARININ ÇIKARIMI

Gönül Turhan-Sayan¹ ve Evren Ekmekçi^{1,2}

- (1) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
(2) Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye
gtsayan@metu.edu.tr, eekmekci@metu.edu.tr

Özet: Bu bildiri, doğrusal olmayan zaman-frekans gösterim teknikleri kategorisine giren Wigner ve Page dağılımlarının hedef sistem kutuplarının hesabında, birbirlerini tamamlayacak şekilde, kullanımını öngören yeni bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde kullanılan ham veritabanı, verilen hedefin bir veya birkaç değişik bakış açısında ölçülmüş veya hesaplanmış elektromanyetik saçınım sinyalleridir. Zaman uzayında ifade edilen ham verilerden yola çıkılarak, Page dağılımı (PD) hedef kutuplarının sanal kısımlarını (rezonans frekanslarını), Wigner dağılımı (WD) ise kutupların reel kısımlarını (sönümlenme katsayılarını) bulmak için kullanılmaktadır. Önerilen kutup çıkarma tekniği, mükemmel yalıtkan bir küreye uygulanmış, elde edilen sonuçlar analitik çözümlerle ve literatürdeki K-darbe yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur.

1. Giriş

Verilen bir cisim benzerlerinden çeşitli şartlar altında ayırt edebilmek için o hedefi yeterli hassasiyet ve detayda tanımlayan öznelik bilgilerine ihtiyaç vardır. Elektromanyetik sistemler yardımı ile cisimlerin otomatik olarak tanınması söz konusu olduğunda, eldeki ham veri tabanı seçilmiş bir frekans bandı üzerinde toplanmış elektromanyetik saçınım sinyallerinden oluşur. Bu sinyaller mikrodalga ve/veya optik frekans bantlarında çalışan verici/alıcı sistemlerle, tasarım sırasında belirlenen belli sayıda ve değerinde bakış açısı/polarizasyon kombinasyonunda toplanıp, hedef tanıyıcı veya sınıflandırıcı sistemin beyni görevini üstlenen bir bilgisayar işlemcisinde özel tasarlanmış bir algoritma çerçevesinde işlenirler. Bu işleme sırasında öncelikle, elektromanyetik sinyallerde gömülü, hedefe ait öznelik bilgileri açığa çıkarılır ve bir öznelik veri tabanı oluşturulur. Sonra da, bilinmeyen bir nesneyi tanıma aşamasında, o nesneden gelişigüzel bir bakış açısı/polarizasyon kombinasyonunda toplanan saçınım sinyallerinden elde edilen öznelikler, sınıflandırıcının veritabanı ile karşılaştırılarak hedefin tanınması gerçekleştirilir. Kısaca özetlenen hedef tanıma sistemi tasarım ve uygulama aşamalarından en kritik olanı, hiç kuşkusuz, hangi özneliklerin kullanılacağına karar verilmesi ve bunların mümkün olduğunca hatasız bir şekilde eldeki ham verilerden elde edilmesidir. Bir hedeften toplanan elektromanyetik saçınım sinyalleri sadece frekansa göre değil, verici ve alıcı sistemlerin hedefe göre pozisyonlarına (görüş açısı) ve bu sistemlerin polarizasyonlarına göre de değişirler. Polarizasyon bir tasarımda sabitlenebilecek bir parametredir ancak gerçek zamanlı hedef tanıma aşamasında görüş açısı değişimleri kontrol edilemeyeceği için, tasarımda kullanılacak özneliklerin açı değişimlerine olan hassasiyetinin minimumda tutulması, mümkünse tamamen yok edilmesi gerekir. Bu bağlamda, bir hedefin karmaşık değerlikli doğal rezonans frekansları (complex natural rezonans-CNR frequencies) mükemmel bir öznelik seti oluştururlar. Hedef, doğrusal ve zamana göre değişimsiz (LTI-linear and time invariant) bir sistem olarak modellendiğinde [1], hedefin sistem fonksiyonunun kutupları bize o hedefin CNR frekanslarını verirler. Karmaşık uzayda tanımlı bu frekansların her birinin sanal kısmı, o CNR frekansını ile ilişkili sinüs sinyalinin rezonans frekansını, reel kısmı ise bu sinüs sinyalinin zamanda sönümlenme katsayısını verir. CNR frekansları bir hedefin geometrik ve maddesel özelliklerinin tümünün fonksiyonu olarak değişirler ve verilen bir hedefe ait bütün CNR frekanslarının oluşturduğu öznelik kümesi o hedefi diğer bütün hedeflerden kesin olarak ayırt eder. Pratikte, hedef tanıyıcı sistemler sınırlı frekans bant genişliklerinde çalışırlar, o nedenle kullanılacak CNR frekans kümeleri eksik ama yine de tanıma probleminde çok yararlıdır. CNR frekanslarının öznelik olarak kullanılabilmesine yol açan ikinci önemli özellikleri de bu frekansların görüş açısı ve polarizasyondan tamamen bağımsız olmalarıdır. Diğer bir deyişle, bir hedefin kutupları o hedefi uyarılma ve algılanma şartlarından bağımsız olarak karakterize ederler.

Hedef kutuplarının öznelik olarak kullanımında iki pratik zorluk söz konusudur: Öncelikle, hedef kutupları değil ama SEM metodunun formülasyonunda da açıkça belirtildiği gibi [2], bu kutuplarla ilişkili açılım katsayıları (residues) görüş açıları ve polarizasyonla değişir. Verilen bir hedef kutbu her açıda eşit kuvvette uyarılmaz, bazı açılarda güçlü bir şekilde uyarılırken diğer bir açıda küçük açılım katsayısı nedeniyle çok zayıf olarak uyarılıp, saçınım verisinde etkisi hemen hemen hiç görülmeyebilir. Bu durumda yapılacak şey, saçınım verilerinden kutup çıkarma işleminin bir kaç değişik görüş açısında gerçekleştirilip, bir açıda elde edilemeyen bilgilerin bir başka açıda yakalanmasıdır. Geometrik yapısı ve materyal özellikleri karmaşık biçimde değişen hedeflerde bu konu önem taşır. Yukarıda sözü edilen zorluklardan ikincisi de, saçınım verilerinden yola çıkarak yüksek bir doğrulukla kutup değerleri hesaplanmasının zorluğudur. Bilinen bütün kutup hesaplama yöntemleri gürlüğe hassastır [3], ayrıca

verilen bir frekans bandında çok sayıda kutup olması da problemi zorlaştırır. Özellikle, kutupların sönümlenme katsayılarının doğru hesaplanmasında güçlükler yaşanırken, karmaşık frekans uzayında yoğun bir biçimde dağılmış kutupların hesaplanması zor bir problem olarak karşımıza çıkar [4]. Bu bildiride, Page dağılımı (PD) ve Wigner dağılımı (WD) kullanarak saçınım verilerinden hedef kutuplarının hesaplanmasını amaçlayan yeni bir yöntem önerilmiştir.

2. Teori ve Yöntem

Verilen sonlu büyüklükteki bir hedefin, simgesel olarak Ω ile gösterilen bir görüş açısında ölçülmüş/hesaplanmış, zaman uzayında ifade edilen saçınım sinyali $y(t, \Omega) = y_1(t, \Omega) + y_2(t, \Omega)$ olsun. Buradaki ilk terim uyarıcı sinyal hedefin üzerinden geçerken, yani hedef ile sinyal doğrudan etkileşim halindeyken oluşan ve sonlu bir "erken-zaman" aralığı, $0 \leq t \leq t_0$, üzerinde varolan "zorlanmış (forced)" hedef saçınım tepkesidir. İkinci sinyal bileşeni ise, uyarıcı sinyal hedefin üzerinden tamamen geçip gittikten sonra bile varolan ve hedefi modelleyen LTI sistemin kutuplarının uyarılmasından dolayı ortaya çıkan ve zamanda sonsuza uzanan sönümlü sinüs dalgalarının toplamından oluşan "doğal (natural)" hedef saçınım tepkesidir. Verilen bir frekans bandı üzerinde hedefin uyarılabilen N tane karmaşık eşlenikli kutup çifti olsun. Bu durumda, hedefin zaman uzayındaki doğal saçınım tepkesi N tane sönümlü sinüsün doğrusal kombinasyonu olarak yazılabilir:

$$y_2(t, \Omega) = \sum_{n=1}^N a_n(\Omega) e^{\sigma_n t} \cos(2\pi f_n t + \phi_n(\Omega)), \quad t_0 \leq t < \infty \quad (1)$$

Bu ifadede a_n (hangi modun ne şiddette uyarıldığını gösteren ağırlık katsayıları) ve ϕ_n (faz) terimleri genelde görüş açısı ile değişirler, $s_n = \sigma_n \pm j2\pi f_n$, ($\sigma_n \leq 0$), $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ise hedefin görüş açısından bağımsız sistem kutuplarını (CNR frekanslarını) göstermektedir. Hedefin kutupları, göreceli olarak geç zamanlarda tek başına etkili olan bu ikinci sinyal bileşeninin işlenmesi ile elde edilir. Sönümlü sinüs bileşenlerinin toplamından oluşan y_2 sinyalinin toplam enerjisinin iki boyutlu zaman-frekans uzayında ne şekilde dağıldığı, matematiksel tanımları 2 no.lu ifadede verilen PD ve 3 no.lu ifadede verilen WD gibi doğrusal olmayan zaman-frekans dönüşüm (ZFD) teknikleri ile yaklaşık bir şekilde elde edilebilir. Herhangi bir $x(t)$ sinyali için,

$$PD_x(t, f) = \frac{d}{dt} \left| \int_{-\infty}^t x(t') e^{-j2\pi f t'} dt' \right|^2 \quad (2)$$

$$WD_x(t, f) = \int_{\tau} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

olup, bu dönüşümlerin zaman-frekans uzayındaki örneklenmiş çıktıları birer matris formundadır. Bu tür ikinci dereceden (quadratic) dönüşümlerin kullanımında ortaya çıkan en önemli problem etkileşim terimlerinin varlığıdır. Bu istenmeyen terimler, dönüşüm sonucu ortaya çıkan esas sinyal terimlerini perdeleyebilir veya bunların doğru yorumlanmasını engelleyebilirler. WD ve PD çıktılarındaki etkileşim terimlerinin yapısı çok farklıdır [5]; örneğin, f_1 ve f_2 frekanslarındaki iki sinüsün toplamından oluşan bir sinyalin WD etkileşim terimleri, bu frekansların aritmetik ortalaması olan $f = (f_1 + f_2)/2$ frekansında ortaya çıkarken, PD etkileşim terimleri, eğer $f_2 > f_1$ ise, $f = f_2$ frekansında ortaya çıkıp, bu frekanstaki esas terime eklenir. Bu nedenlerle, özellikle çok sayıda sinüs bileşeninden oluşan bir sinyalin işlenmesi sırasında, WD kullanımının dezavantajı, çok sayıda etkileşim terim bileşeninin varlığı nedeniyle esas frekans terimlerinin hangileri olduğunun bilinmemesidir. PD çıktısında ise, fazladan frekans seviyelerinde aktivasyon görülmez, bu nedenle, sinyaldeki tüm sinüs bileşenlerinin rezonans frekansları (f_n değerleri) doğru olarak saptanabilir. Ancak, PD kullanımının dezavantajı da şudur: İlk frekans seviyesi haricinde, tüm diğer aktivasyon görülen frekans seviyelerinde, esas sinyal bileşenlerinin enerjileri ile etkileşim sinyal bileşenlerinin enerjileri ayırt edilemez biçimde toplamış durumdadır. Bu nedenle f_n değerlerinde, sadece zamandaki çıktı değişimlerine bakılarak, ilgili sinüs bileşeninin sönümlenme katsayısını (σ_n değeri) tayin etmek mümkün değildir. Bu katsayıyı hesaplayabilmek için, PD çıktısından elde edilen f_n değerlerinde, WD çıktı matris sıralarındaki zamana göre değişim incelenmeli, zamana göre eksponansiyel azalan (Bkz. Denklem 1) bu dizinin logaritması doğrusal bir değişim göstereceği için, bu doğrunun eğiminden de ilişkili σ_n değeri hesaplanmalıdır. Görüldüğü gibi, etkileşim terim yapılarının farklılığından dolayı, WD ve PD tipi ZFD'lerin birbirlerini destekleyecek şekilde kullanılması ile saçınım sinyalindeki geç-zamanlı sinüs bileşenlerinin parametreleri, yani hedef kutupları, hesaplanabilir.

3. Uygulama ve Sonuçlar

Elektromanyetik dalgalar dielektrik cisimlerin içine girebildikleri ve cisim sınırlarındaki sonsuz sayıda yansımalarından dolayı cisim içinde çok sayıda baskın rezonatif sinyal bileşeni olduğu için, böyle cisimler çok sayıda ve birbirine yakın değerlikli kutba sahiptirler. Bu nedenle, simetrik bir geometriye sahip olmasına rağmen, kayıpsız dielektrikten yapılmış bir küre kutuplarının hesaplanması açısından oldukça zor bir problemdir ve bu bildiride örnek hedef olarak kullanılmıştır. Örnek kürenin yarıçapı $a=1m$ ve göreceli dielektrik sabiti $\epsilon_r = 5$ olarak alınmıştır. Hedefin gerisaçınım sinyali 955 MHz'e kadar, 512 örnekleme noktasında, analitik seri çözümlerinin hesaplanması yolu ile elde edilmiş ve pencerelendikten sonra IFFT algoritması ile zaman uzayına dönüştürülmüştür. Önce, elde edilen zaman sinyalinin PD çıktısı hesaplanmış, 512X256 boyutlu (zaman X frekans) çıktı matrisinde 21, 29, 37, 41, 45, 51, 54, 58, 64, 71, 78, 81, 86, 92, indeksli frekans örnekleme seviyelerinde rezonans göstergesi olan (zamanda sönümlenmeyle birlikte bir süreklilik gösteren) enerji yoğunlukları görülmüştür. Örnekler arasındaki frekans adımlarının 1.869 MHz olduğu göz önünde tutularak, 78. ve 64. indekslerde gözlenen çok güçlü aktivitelerden, en baskın iki küre kutbunun 143.9 MHz ve 117.7 MHz değerlerinde yer aldığı bulunmuştur. İkinci etapta, aynı saçınım sinyalinin WD çıktısı hesaplandığında, bu frekans değerlerine karşılık gelen matris sıralarındaki dizinlerin doğal logaritmaları hesaplanarak çizdirilmiş ve ortaya çıkan doğruların eğimlerinden yukarıda sözü edilen karmaşık değerlikli hedef kutuplarının reel kısımları hesaplanmıştır. Örneğin, 143.9 Mhz de salınan sinüs bileşeninin sönümlenme katsayısı bu yöntemle $\sigma = -9.96 \times 10^6 \text{ neper/s}$ olarak hesaplanmıştır. Aynı işlemler, zamanda sürekli enerji yoğunluğu görülen bütün frekans seviyeleri için PD/WD çıktı matrisleri işlenerek tekrarlanmış ve bulunan sonuçlar Tablo 1 de $\bar{s} = (\sigma \pm j2\pi f)a/c$ normalize edilmiş karmaşık frekans uzayında listelenmiştir. Bu tabloda, hedefin analitik olarak hesaplanmış gerçek normalize kutup değerleri ile, [4] numaralı referansta K-darbe yöntemiyle elde edilen normalize kutup değerleri de karşılaştırma amacıyla listelenmiş ve önerilen yeni yöntemin oldukça iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Tablo 1. Kayıpsız yalıtkan kürenin ($a = 1m$, $\epsilon_r = 5$) gerisaçınım sinyalinden hesaplanan normalize kutup değerleri, $\bar{s} = s a / c$, ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) ve kaynak [4] de verilen gerçek ve hesaplanmış sonuçlarla karşılaştırılması.

PD/WD Metodu ile hesaplanan kutuplar	K-Darbe metodu ile hesaplanan kutuplar [4]	Gerçek Kutup Değerleri (analitik sonuçlar) [4]	Kutup Tipi
-	-0.1160 ± j 1.2399	-0.1479 ± j 1.2968	TE ₁₁
-0.0580 ± j 1.8980	-0.0949 ± j 1.9071	-0.0947 ± j 1.8740	TE ₂₁
-0.0498 ± j 2.4660	-0.0488 ± j 2.4873	-0.0571 ± j 2.4400	TE ₃₁
-0.0332 ± j 3.0140	-0.0292 ± j 2.8333	-0.0325 ± j 2.9952	TE ₄₁
-0.0915 ± j 3.5230	-0.1721 ± j 3.4384	-0.2369 ± j 3.4510	TM ₁₂
-0.1150 ± j 3.9144	-0.2351 ± j 4.0548	-0.2728 ± j 4.0560	TM ₂₂
-0.0980 ± j 4.5800	-0.2744 ± j 4.6656	-0.3294 ± j 4.6313	TM ₃₂
-0.0680 ± j 5.4800	-0.3023 ± j 5.2728	-0.1791 ± j 5.4044	TE ₃₃
-0.1290 ± j 5.1280		-0.4333 ± j 5.1642	TM ₄₂
-0.1340 ± j 5.3240		-0.4349 ± j 5.3818	TM ₅₁
-0.0430 ± j 6.0280	-0.3234 ± j 5.8762	-0.1626 ± j 5.9983	TE ₄₃

Bu bildiride, önerilen hedef kutbu bulmayla ilgili yeni yöntemin fizibilite çalışması başarı ile sunulmuş olup, yöntemin doğruluğunun artırılması, gürültü performansının incelenmesi ve hedef tanıma problemlerine uygulamaları gelecekteki çalışmalarımıza konu teşkil edecektir.

Kaynaklar

1. E.M. Kennaugh, D.L. Moffatt, "Transient and Impulse Response Approximations," *Proceedings of the IEEE*, vol.53, no.8, 1965, pp.893-901.
2. C.E. Baum, "Toward an engineering theory of electromagnetic scattering: The singularity and eigenmode expansion method," Chapter 15 in *Transient Electromagnetic Fields*, edited by P.L.E. Uslenghi, Academic Press, New York, 1978.
3. C.W. Chuang, D.L. Moffatt, "Natural resonances of radar targets via Prony's method and target discrimination," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 12, no.5, September 1976.
4. G.Turhan-Sayan, M. Kuzuoğlu, "Pole estimation for arbitrary-shaped dielectric targets using genetic algorithm-based resonance annihilation technique," *Electronics Letters*, vol.37, no.6, March 2001, pp. 380-381.
5. F. Hlawatsch, G.F. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representations," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.9, no.2, 1992, pp.21-67.