

ESPRIT Algoritması ve Boyut Azaltma Teknikleri ile Gerçekleştirilen Bir Radar Hedef Sınıflandırmanın Analizi

Salih Poyraz, Mustafa Seçmen
Yaşar Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir

eee.salihpoyraz@hotmail.com, mustafa.secmen@yasar.edu.tr,

Özet: Bu çalışmada, radar hedeflerinden saçılan geniş bantlı sinyallerin işlenmesiyle, hızlı ve yeteri kadar görüş açısından bağımsız bir hedef sınıflandırma yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen yöntemde, rezonans bölgesindeki hedeflerin sınıflandırılması amacıyla esas olarak döngüsel değişmezlik teknikleri ile sinyal parametreleri tahmini (ESPRIT) algoritması kullanılmaktadır. Her hedef için bu algoritma kullanılarak elde edilen belli sayıdaki referans vektörleri, literatürdeki çeşitli boyut azaltma teknikleri ile bir vektöre indirgenmiş ve öznelilik vektörü olarak kullanılmıştır. Sınıflandırma aşaması, test sinyallerine ait ESPRIT vektörleri ile öznelilik vektörleri arasındaki en yüksek ilinti katsayılarına göre gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, tellerle modellenmiş küçük ölçekli uçaklara uygulanmış ve boyut azaltma tekniklerinin verdiği sonuçlar analiz edilmiştir.

1. Giriş

Radar hedeflerinin tespiti, başta savunma endüstrisinde olmak üzere birçok sivil ve askeri uygulama için önemli bir konudur. Radar sistemlerinde, kapsama alanı içindeki hedeflerin varlığını belirlemenin yanı sıra hedefe özgü ilave bilgilerin (konum, hız, hedef tipi, vb.) elde edilmesi amaçlanmaktadır ve çoğu uygulamada bir radar hedefinin tipinin doğru bir şekilde sınıflandırılması da gerekmektedir. Bu anlamda, radar hedef sınıflandırma, bu uygulamalara yönelik önemli ve karmaşık bir problemdir. Radar hedef sınıflandırma yöntemlerinde çoğunlukla amaç, bilinen hedeflere ait öznelilik bilgilerini test hedefine ait aynı öznelilik bilgileri ile kıyaslayarak ayırtmaktır. Bu öznelilik bilgileri, hedeflerden saçılan radar sinyallerin işlenmesiyle elde edilir. Fakat bir hedeften saçılan sinyaller, frekans, polarizasyon ve özellikle görüş açısına bağlıdır. Bu yüzden tasarlanan yöntemin görüş açısına bağımlılığı mümkün olduğu kadar az olmalıdır. Bir sınıflandırma yöntemindeki diğer bir önemli kriter ise karar verme hızı olup yöntemin gerçek zamanlı uygulamalar için hızlı olması gerekmektedir.

Elektromanyetik saçılım sinyallerinden hedef sınıflandırma konusunda kullanılan yöntemler, frekans bölgesine göre temel farklılıklar gösterir. Örneğin, hedefin boyutlarının dalgaboylarına yakın olduğu durumlarda saçılım sinyalleri genellikle geniş bantlı bir radar ile elde edilir ve bu ölçüm sinyalleri hedef sınıflandırma amacıyla kullanılır [1]. Görüş açısına hassasiyeti göreceli olarak daha az olan bu tür elektromanyetik sinyaller, Baum tarafından geliştirilen tekil açılım metodu ile doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem olarak modellenir [2]. Bu metoda göre, bu tür sinyallerin geç-zaman bölgesindeki kısımları, algılanan hedefin karmaşık kutup frekanslarında titreşen çok sayıda sönümlenen sinüs sinyalinin toplamından oluşmakta olup, denklem (1)'deki gibi ifade edilir.

$$h_{gec}(t, \Omega) = \sum_n b_n(\Omega) \exp(-\alpha_n t) \cos(2\pi f_n t + \delta_n) \quad (1)$$

Burada Ω polarizasyon ve görüş açısına bağımlılığı, $s_n = -\alpha_n \pm j2\pi f_n$ sistemin kutup frekansları ve $b_n(\Omega)$ ise n 'inci kutuba ait genliktir. Bu kutupların hedef sınıflandırma problemlerindeki en önemli özelliği, polarizasyon ve görüş açısından bağımsız olması ve sadece hedefin şekline, büyüklüğüne ve malzeme özelliklerine bağlı olmasıdır. Bu özellik, hedeflerin sistem kutupları yardımı ile karakterize edilebilmesini ve birbirinden ayrılmasını sağlar.

Rezonans saçılım bölgesindeki bir hedefe ait denklem (1)'deki gibi modellenmiş bir saçılım sinyaline Fourier dönüşümü (FD) uygulandığında hedefin radar kesit alanı veya saçılan elektrik alan, yaklaşık f_n frekanslarında yerel maksimumlar verir [1]. Fakat bu tepe frekans değerlerinin birbirine yakın olması durumunda düşük çözünürlük özelliğine sahip FD bu frekansları ayırtmada yetersiz kalabilir. Bu anlamda literatürde oldukça sık kullanılan ESPRIT, MUSIC gibi yüksek çözünürlük tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Bu teknikler, geç-zaman saçılım sinyalindeki gibi sönümlenen sinüsler içeren sinyallerin parametrelerini bulmaya yönelik araçlardır. Bu çalışmada ESPRIT kullanılmış olup bu teknik, diğer yüksek çözünürlük tekniklerine göre (MUSIC, vb.) daha az hesaplama yükü ve daha yüksek performansa sahiptir [4]. Önerilen hedef sınıflandırma yönteminde ESPRIT algoritması, bir saçılım sinyaline ait kutup değerlerinin direkt olarak hesaplanması yerine literatüre bir katkı olarak bu kutupların etkilerini dolaylı olarak gösteren bir spektrum vektörünün oluşturulması için kullanılır. Hedef sınıflandırma yöntemlerinde her hedef için daha fazla kutubun etkisini görmek amacıyla genellikle farklı görüş açılarından elde edilmiş referans saçılım sinyalleri işlenir. Buna bağlı olarak bu çalışmada ESPRIT algoritması kullanılarak her hedef için birçok spektrum vektörü elde edilir. Daha sonra yöntemin hem süre hem de bellek performansını iyileştirmek

amacıyla bu vektörlerin sayısı çeşitli boyut azaltma teknikleri (ortalama değer, ortak tahmin matrisi, temel bileşenler analizi) ile bire düşürülür ve bu tek vektör hedefin öznelik vektörü olarak atanır.

Test aşamasında, herhangi bir görüş açısından elde edilmiş bir saçılım sinyaline ESPRIT algoritması uygulanarak test hedefine ait ESPRIT spektrum vektörü çıkarılır. Test hedefinin hangi bilinen hedefe ait olduğu ile ilgili karar, test spektrum vektörü ile hedefler için oluşturulan öznelik vektörleri arasındaki en yüksek ilinti katsayısına göre verilir. Bu bildiride bahsedilen yöntem, düz, ince ve iletken tellerle modellenmiş küçük ölçekli uçaklara uygulanmıştır. Uygulamada, kullanılan farklı boyut azaltma tekniklerine ait doğruluk oranları elde edilmiş ve performanslar kıyaslanmıştır. Önerilen bu yöntem oldukça hızlı olup, az sayıda referans sinyali içermesine yüksek doğruluk oranları vermektedir.

2. ESPRIT Spektrum Vektörü

Geliştirilen yöntemde M farklı aday hedef ve her bir hedef için farklı görüş açılarından elde edilmiş K farklı sinyal yani toplamda $K \times M$ referans saçılım sinyali olsun. Bu referans sinyallerinden herhangi birinin geç-zaman kısmı, ayrık zaman bölgesinde denklem (2)'deki gibidir.

$$y(n) = \sum_{i=1}^{L/2} b_i \exp(-\alpha_i n \Delta t) \cos(2\pi f_i n \Delta t + \delta_i), \quad n=0, \dots, N \quad (2)$$

Burada Δt örnekleme periyodu, L ise karmaşık frekansların çiftler halinde olduğu düşünülürse hedefe özgü kutup sayısıdır. Denklem (2)'de verilen sinyal, durağan bir sinyal olmadığı için ESPRIT tekniğinde genellikle kullanılan kovaryans matrisi yerine $(N-m+1) \times (m+1)$ boyutlarında aşağıdaki gibi verilen bir tahmin matrisi kullanılır [5].

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(m) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(m+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-m) & y(N-m+1) & \dots & y(N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada m ifadesi ESPRIT parametresi olup en iyi performans için genellikle $N/2$ olarak alınır [5]. Daha sonra bu matris, $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H$ şeklindeki tekil değer ayrışımı ile üç farklı matrise ayrıştırılır. Bu ifadede \mathbf{U} ve \mathbf{V} matrisleri, \mathbf{R} matrisinin sağ ve sol birimcil matrislerdir. Matris \mathbf{D} ise köşegen öğeleri \mathbf{R} matrisinin özdeğerlerini barındıran bir matristir. Bu özdeğerlerin büyükten küçüğe sıralanmış hali $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L \geq \lambda_{L+1} \geq \dots \geq \lambda_m$ şeklinde verilsin ve \mathbf{e}_i vektörü (\mathbf{V} matrisinin i 'inci sütun vektörü), λ_1 özdeğerine karşılık gelen özvektör olsun. Bu durumda $i = 1, \dots, L$ indekslerine karşılık gelen ve sinyal alt uzayını kapsayan özvektörlerden oluşan matris, denklem (4)'teki gibi ifade edilir. Daha sonra bu denklemdeki matris kullanılarak denklem (5)'teki iki farklı matris oluşturulur.

$$\mathbf{S} = [\mathbf{e}_1 \quad \dots \quad \mathbf{e}_L] \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_1 = [\mathbf{I}_{m \times m} \quad \mathbf{0}] \mathbf{S}, \quad \mathbf{S}_2 = [\mathbf{0} \quad \mathbf{I}_{m \times m}] \mathbf{S} \quad (5)$$

Burada, $\mathbf{I}_{m \times m}$ matrisi boyutları $m \times m$ olan birim matrisler, $\mathbf{0}$ vektörü ise m tane elemanı sıfır olan sütun vektörüdür. ESPRIT algoritmasına göre denklem (6)'daki Ψ matrisinin özdeğerlerinin argümanları, karmaşık s_i değerleridir [3].

$$\Psi = (\mathbf{S}_1^H \mathbf{S}_1)^{-1} \mathbf{S}_1^H \mathbf{S}_2 \quad (6)$$

Bu matrisin $z_i = \exp(s_i)$ şeklinde ifade edilen özdeğerlerinin oluşturduğu determinant fonksiyonu şöyle verilsin.

$$F(z) = \det(z\mathbf{I}_{L \times L} - \Psi) = \prod_{i=1}^{L/2} (z - z_i)(z - z_i^*) = z^L + a_1 z^{L-1} + \dots + a_{L-1} z + a_L \quad (7)$$

Bahsedilen spektrum vektörünün oluşturulması aşamasında tek boyutlu düzlemde (gerçek frekans düzleminde) bir fonksiyon çıkartılmış olup bu durum, yöntemin hızını önemli ölçüde artırmıştır. Bu anlamda denklem (7)'deki a_i değerleri kullanılarak oluşturulan frekans düzlemindeki spektrum fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$P(f) = \frac{1}{|\mathbf{a}_{esp} \mathbf{e}(f)|^2}, \quad \mathbf{a}_{esp} = [1 \quad a_1 \quad \dots \quad a_{L-1} \quad a_L], \quad \mathbf{e}(f) = [1 \quad e^{-j2\pi f \Delta t} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f L \Delta t}]^T \quad (8)$$

Oluşturulan bu sözde güç spektrumunun yaklaşık $f = f_i$ değerlerinde yerel maksimumlar vermesi beklenmektedir. Son basamakta denklem (2)'deki saçılım sinyaline ait ESPRIT spektrum vektörü, $P(f)$ fonksiyonunun f_1, f_2, \dots, f_C olarak verilen C tane ayırık frekans noktasında örneklenmesi sonucu denklem (9)'daki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{P} = [P(f_1) \ P(f_2) \ \dots \ P(f_C)] \quad (9)$$

3. Boyut Azaltma Teknikleri ve Test Aşaması

Bölüm 2'de anlatılan tek bir saçılım sinyaline ait ESPRIT vektörü elde etme yöntemi, bir hedefin K tane farklı referans sinyali için tekrarlanır ve K tane birbirinden farklı ESPRIT vektörü elde edilir. Bu vektörlerin maksimum değer veren frekans noktaları yaklaşık aynıdır fakat maksimum değerler farklı olabilir. Bu K tane farklı vektör, hedefe ait öznelik vektörleri olarak kaydedilip yöntemin test aşamasında kullanılırsa, önemli zaman kaybı ve bellek fazlalığı oluşacaktır. Bu yüzden bütün bu referans saçılım sinyallerinin etkilerini kaynaştıran tek bir öznelik vektörü seçmek hem zaman kaybını hem de depolanan belleği önemli ölçüde azaltacaktır. Bu kaynaştırma amacıyla bu çalışmada üç farklı boyut azaltma tekniği kullanılmış ve tekniklerin performansları kıyaslanmıştır.

İlk teknik, klasik “ortalama değer” olarak tanımlanabilir ve bir hedefin K farklı sinyaline ait ESPRIT vektörlerinin önce normalize edilip sonra her frekans noktasında ortalama değerinin alınmasına dayanmaktadır. İkinci teknik, “ortak tahmin matrisi” olarak tanımlanabilir ve K farklı sinyal için denklem (2)'deki tahmin matrislerini her seferinde yeni baştan oluşturmak yerine bütün referans saçılım sinyalleri içeren bir ortak matris yaratılır [6]. Bu ortak matris denklem (10)'da verilmiş olup daha sonraki basamaklarda denklem (4)'ten (9)'a kadarki kısımlar gerçekleştirilerek hedefe ait öznelik ESPRIT vektörü tek koşuturumda hesaplanır. Üçüncü teknik ise, literatürde oldukça iyi bilinen temel bileşen analizi (TBA) olup bu teknikte bir hedef için elde edilen K tane farklı ESPRIT vektörüne uyumlu olan tek bir vektör bulunmaya çalışılır. Bu teknik ile ilgili detaylar [7]'deki çalışmada mevcuttur.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} y_1(0) & y_1(1) & \dots & y_1(N-m) & y_2(0) & y_2(1) & \dots & y_2(N-m) & \dots & y_K(0) & y_K(1) & \dots & y_K(N-m) \\ y_1(1) & y_1(2) & \dots & y_1(N-m+1) & y_2(1) & y_2(2) & \dots & y_2(N-m+1) & \dots & y_K(1) & y_K(2) & \dots & y_K(N-m+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1(m) & y_1(m+1) & \dots & y_1(N) & y_2(m) & y_2(m+1) & \dots & y_2(N) & \dots & y_K(m) & y_K(m+1) & \dots & y_K(N) \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

Önerilen yöntemin test aşamasında, mevcut olan bir test saçılım sinyaline denklem (3)'ten (9)'a kadar olan basamaklar uygulanarak test ESPRIT vektörü elde edilir. Test hedefi, aslında bilinen hedeflerden biri olduğu için test vektöründeki, P_{test} , tepe frekanslarının yeri, tekil açılım metoduna göre uyumlu hedefin tepe frekanslarına yakın olmalıdır. Aynı yaklaşımla diğer hedeflerin tepe frekanslarından farklı olmalıdır. Böylelikle test ESPRIT vektörü ile uyumlu hedef arasındaki ilinti yüksek, diğer hedeflerle düşük olması beklenir. Bu amaçla, test vektörü ve hedeflere ait öznelik vektörleri, basit bir ilinti katsayısı ile aşağıdaki gibi kıyaslanır.

$$r(i) = \mathbf{P}_{test} \mathbf{F}_i^T / (|\mathbf{P}_{test}| |\mathbf{F}_i|) \quad (11)$$

Burada \mathbf{F}_i , i 'inci bilinen hedefe ait öznelik vektörü, $r(i)$ ise ilinti katsayısıdır. Son olarak önerilen hedef sınıflandırma yönteminde test hedefi, denklem (11)'de en yüksek ilinti katsayısını veren hedef olarak sınıflandırılır.

4. Uygulama ve Sonuçlar

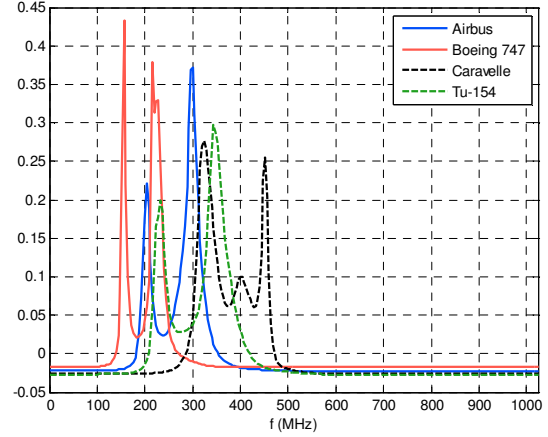
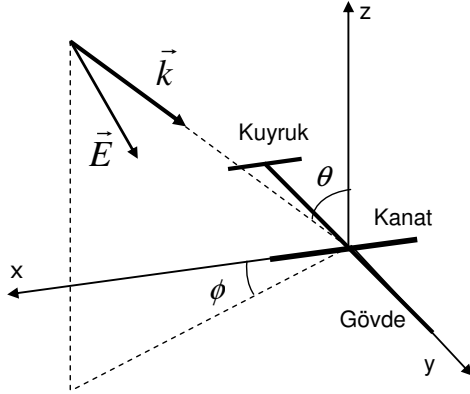
Bu çalışmada sunulan hedef sınıflandırma yöntemi, iletken, ince ve düz tellerle modellenmiş küçük ölçekli (1/100 oranında) 4 uçak (Airbus, Boeing 747, Caravelle ve Tu-154) için uygulanmıştır. Tablo 1'de boyutları verilen uçaklara ait geometrik yapıları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu şekile uygun olarak uçak hedeflerine ait geri saçılım frekans tepkileri, CST Microwave Studio benzetim programı kullanılarak sabit θ açısı ($\theta=60^\circ$) ve $\phi=0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, \dots, 87.5^\circ, 90^\circ$ (toplam 37 açı) açıları için elde edilmiştir. Frekans bandı 4-1024 MHz olup, çözünürlük $\Delta f=4$ MHz'dir. Frekans tepkileri, alçak geçiren Gauss penceresi ve ters FD kullanılarak zaman sinyallerine çevrilmiştir.

Tablo 1. Uygulamadaki uçakların boyutları.

	Airbus	Boeing 747	Caravelle	Tu-154
Gövde (m)	0.5408	0.7066	0.3200	0.4790
Kanat (m)	0.4484	0.5964	0.3440	0.3755
Kuyruk (m)	0.1626	0.2217	0.1092	0.1340

Öznelik vektörlerinin oluşturulması aşamasında her hedefe ait 37 sinyalden 5 tanesi ($\phi=5^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 85^\circ$) referans olarak seçilmiştir. Sinyallerin geç-zaman bölgesi olarak geç-zaman başlangıç anı ve sonraki ilk $N = 64$ zaman örneği alınmıştır. Buna bağlı olarak ESPRIT parametresi $m = N/2 = 32$ olarak seçilmiştir ve çeşitli L değerleri

için bahsedilen boyut azaltma teknikleri kullanılarak öznitelik vektörleri elde edilmiştir. Örnek olarak Şekil 1’de TBA boyut azaltma tekniği ve $L = 6$ değeri için hesaplanan öznitelik vektörleri verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere her uçak hedefine ait rezonans frekansları ayrıntı şeklinde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 1. Uygulamaya ait geometrik yapılandırma ve TBA ($L = 6$ için) ile elde edilen hedeflere ait öznitelik vektörleri.

Bu uygulamanın sınıflandırma aşamasında, referans sinyalleri dahil toplam $37 \times 4 = 148$ saçılım sinyali test amacıyla kullanılmıştır. Bu sinyaller için öznitelik çıkarım aşamasındaki aynı geç-zaman bölgesi ve aynı ESPRIT parametre değerleri (N , m ve L) kullanılmış ve ilgili test spektrum vektörleri çıkartılmıştır. Daha sonra bu test vektörleri, öznitelik vektörleri ile tek tek kıyaslanmış ve sınıflandırma işi, denklem (11)’de verilmiş ilinti katsayısının en büyük değerine göre yapılmıştır. Örnek olarak, TBA kullanılarak elde edilen Şekil 1’deki öznitelik vektörleri düşünüldüğünde, Airbus uçağı ve $\phi = 30^\circ$ ’ye ait test saçılım sinyali için denklem (11) kullanılarak hesaplanan ilinti katsayıları; Airbus, Boeing 747, P-7 ve Tu-154 uçakları için sırasıyla 0.9430, 0.2056, 0.0628 ve 0.1019 olarak bulunmuştur. Böylece test hedefi doğru bir şekilde Airbus olarak sınıflandırılmıştır. Bu uygulamadaki tüm saçılım sinyalleri ele alındığında bahsedilen üç boyut azaltma tekniği için en yüksek doğruluk oranları; TBA ve ortak tahmin matrisi için $L = 6$ değerinde sırasıyla yüzde 100 ve 87.83 olup, ortalama değer tekniği için $L = 8$ değerinde yüzde 99.32’dir. Böylece, TBA tekniğinin çok az daha yüksek doğruluk oranı vermesi ile beraber, hem TBA hem ortalama değer teknikleri başarılı performanslar vermiştir. Öte yandan iyi bir hedef sınıflandırma için yüzde 95 üstü bir doğruluk oranı düşünüldüğünde [1] ortak tahmin matrisi ile yetersiz sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak bir test hedefi için karar verme hızı ele alındığında, yöntemin koşturum süresi MATLAB ortamında Intel Core i5 2.53 GHz işlemcili bir bilgisayar ile ortalama 11 ms olarak bulunmuştur ki bu süre gerçek zamanlı uygulamalar için yeterlidir.

5. Vargı

Bu bildiride, ESPRIT algoritması ve çeşitli boyut azaltma teknikleri kullanan hızlı bir radar hedef sınıflandırma yöntemi anlatılmıştır. Yöntemde, geç-zaman saçılım sinyalleri işlenerek ESPRIT spektrum vektörleri elde edilmiştir ve bu vektörler kullanılarak boyut azaltma teknikleri ile her hedefe ait tek bir öznitelik vektörü çıkarılmıştır. Sınıflandırma işi ise, test hedefine ait test ESPRIT vektörünün bu öznitelik vektörleri ile kıyaslanması ile olur. Önerilen yöntem, küçük ölçekli, tel ile modellenmiş uçaklara uygulanmış ve çeşitli boyut azaltma teknikleri için performans analizi yapılmıştır. Uygulamadaki testler sonucunda düşük koşturum süresine rağmen TBA ve ortalama değer teknikleri için sırasıyla yüzde 100 ve 99.32 gibi yüksek doğruluk oranları bulunmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 111E064 no’lu proje kapsamında desteklenmektedir.

Kaynaklar

- [1]. Skolnik M., I., Introduction to Radar Systems, Mc Graw-Hill, New York, A.B.D., 2001.
- [2]. Baum C. E., Rothwell E. J., Chen K. M. ve Nyquist D. P., “The singularity expansion method and its applications to target identification”, Proc. IEEE, 79(10), s.1481-1492, 1991.
- [3]. Stoica P. ve Moses R., Spectral Analysis of Signals, Pearson, Upper Saddle River, New Jersey, A.B.D., 2005.
- [4]. Badeu R., Richared G. ve David B., “Performance of ESPRIT for estimating mixtures of complex exponentials modulated by polynomials”, IEEE Trans. Signal Processing, 56(2), s.492-504, 2008.
- [5]. Li Y., Razavilar J., Liu K. J. R., “A high-resolution technique for multidimensional NMR spectroscopy”, IEEE Trans. Biomedical Engineering, 45(1), s.78-86, 1998.
- [6]. Secmen M., “Extraction of electromagnetic target poles from multiple scattered fields with damped Min-norm method”, Int. Journal of Electronics and Communication (AEÜ), 66(10), s.860-863, 2012.
- [7]. Secmen M., “Radar target classification method with high accuracy and decision speed performance using MUSIC spectrum vectors and PCA projection”, Radio Science, 46, RS015, 2011.