

MIMO Radarlarda Hedef Tespiti için Parametrik Olmayan Adaptif Tekniklerin Performans Değerlendirilmesi

Nefiye ERKAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi
Eti Mh., Yükseliş Sk., Maltepe, Ankara, TURKEY (*nefiyerkan@gmail.com*)

Nursel AKÇAM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi
Eti Mh., Yükseliş Sk., Maltepe, Ankara, TURKEY (*ynursel@gazi.edu.tr*)

Özet

Bu çalışmada, Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multiple Input Multiple Output - MIMO) radarlarda hedef tespit performansı çoklu verici-alıcı yapılarına, Capon, Genlik ve Faz Tahmini (Amplitude and Phase Estimation - APES) ve En Küçük Kareler (Least Square - LS) metodları uygulanarak değerlendirilmiştir. MIMO radarlarda anten sayısının değişiminin hedef tespitine etkileri incelenmiştir. Ayrıca antenler arasındaki uzaklığa bağlı olarak hedef tespit performansı incelenmiştir. MIMO radarda ortamda karıştırma sinyali olması durumunda, bu yöntemlerin tespit performansına etkisi incelenerek, MIMO radar sistemlerinin çoklu hedef tespit performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) radar, Capon metodu, Genlik ve Faz Tahmini (APES) metodu, En Küçük Kareler (LS) metodu.

1. Giriş

MIMO Radar, MIMO haberleşme gelişmeleri ile başlamıştır. MIMO radarlar diğer radarlara nazaran üstün performansa sahiptir. Bir MIMO radar dik (ortogonal) dalga biçimleri ilettiğinden, yansıyan dalga biçimleri birbirinden doğrusal (lineer) olarak bağımsız olur. Bu nedenle Capon, APES gibi adaptif alıcı filtreleri MIMO radar uygulamalarına doğrudan uygulanabilir.

MIMO Radarlar eş zamanlı olarak, lineer, bağımsız dalga biçimleri iletmek ve yansıyan sinyalleri almak için çok sayıda anten yapısı kullanırlar [1,2,3]. Pek çok MIMO Radar çalışmasında; hedef yansımaları [1], istenilen hüzme biçimini üretme [2] ya da yüksek çözünürlüklü konumsal spektrum kestirimi [3] sunulmaktadır. L. Xu, J. Li, P. Stoica [4]'ün çalışmalarında çoklu hedeflerle başa çıkmak için MIMO Radarın lineer bağımsız dalga biçimini kullanan Capon, APES gibi adaptif dizi algortimalarının hedef konumları ve yansıyan sinyal genliklerini tespit etme özelliği kullanmışlar. Bazı çalışmalarda ise Capon, APES, CAPES (combined Capon ve APES), CAML (combined Capon and approximate maximum likelihood) metodlarının hedef tespit ve parametre kestirim performans karşılaştırılması yapılmıştır [5,6]. Bu çalışmada, MIMO Radar sinyal modeli anlatılmış ve parametre tespit algoritmaları Capon, APES ve LS metodları kısaca açıklanmıştır. Bu algoritmalarının tespit performansı; farklı hedef sayıları, farklı Sinyal Gürültü Oranı (SNR) seviyeleri ve karıştırma varlığı durumları göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır.

2. Sinyal Modeli

M_t ve M_r , sırasıyla gönderme ve alma anten elemanları dizilerinden oluşan evre uyumlu MIMO Radar sistemi için, $x_m(n)$ m. antenden gönderilen ayrık zamanlı sinyali ifade etsin. θ , hedefin açısı ya da menzili gibi konum parametresi olsun. Eğer iletilen sinyal darband olursa, hedefin bulunduğu konumda, bütün iletilen sinyallerin toplamı aşağıdaki eşitlikle elde edilir [7, 8].

$$\sum_{m=1}^{M_t} e^{-j2\pi f_0 \tau_m(\theta)} x_m(n) \triangleq a^*(\theta)x(n) \quad n = 1, \dots, N \quad (1)$$

Burada f_0 radarın taşıyıcı frekansı, τ_m ise hedef ve m. verici anten arasındaki zaman gecikmesini ifade eder. $(.)^*$ eşlenik transpoze matrisi ve N gönderilen her bir sinyal darbesinin örnekleme sayısını gösterir. $M_t \times 1$ iletim doğrultma vektörü (steering vector) $a(\theta)$ ve iletilen sinyal vektörü $x(n)$ ise Eşitlik 2'de verildiği gibidir.

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta)} \\ e^{j2\pi f_0 \tau_2(\theta)} \\ \vdots \\ e^{j2\pi f_0 \tau_{M_t}(\theta)} \end{bmatrix}, \quad x(n) = \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_{M_t}(n) \end{bmatrix} \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

$M_r \times 1$ alıcı doğrultma vektörü $b(\theta')$ ve alınan sinyal vektörü $y(n)$ olmak üzere;

$$b(\theta') = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_{r_1}(\theta')} \\ e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_{r_2}(\theta')} \\ M_t \text{ ve } M_r, \dots \\ \vdots \\ e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_{M_r}(\theta')} \end{bmatrix}, \quad y(n) = \begin{bmatrix} y_1(n) \\ y_2(n) \\ \vdots \\ y_{M_r}(n) \end{bmatrix} \quad n = 1, \dots, N \quad (3)$$

ile ifade edilir. Eşitlik 3'te yer alan $\tilde{\tau}_M(\theta')$, θ konumundan yansıyan sinyalin m. alıcı antene ulaşması için geçen zamanı gösterir. İfade nokta hedef yaklaşımı ile daha basit hale getirilirse, alınan veri vektörü [4, 9]

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \beta_k b^c(\theta_k) a^*(\theta_k) x(n) + w(n), \quad n = 1, \dots, N \quad (4)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 4'te yer alan K , radar alıcısına ulaşan (yansıyan) hedeflerin sayısıdır. β_k bu hedeflerin radar kesit alanı ile orantılı karmaşık genliklerini, θ_k hedeflerin konum parametresini, $w(n)$ girişim ile gürültü terimini ve $(.)^c$ karmaşık eşleniği (kompleks konjugeyi) gösterir.

3. Parametre Tespit için Adaptif Yaklaşım Metodları

Bu çalışmada alıcı dizileri ve verici dizileri, dolayısıyla alıcı-verici doğrultma vektörleri aynı kabul edilmiştir.

3.1 En Küçük Kareler (Least Square- LS)

En küçük kareler metodu, ölçümler ile gözlemlenen fonksiyonun parametreleri arasındaki farkın karesinin toplamını minimize ederek parametre kestirimi yapar. Yöntem, doğru olma olasılığı en yüksek olan bir dizi parametreyi değerlendirmek için uygundur.

Basit şekilde $\beta(\theta)$ 'nin LS metodu ile kestirimi [6]'da yer aldığı haliyle,

$$\beta_{LS}(\theta) = \frac{b^*(\theta)YX^*a(\theta)}{N\|b(\theta)\|^2[a^*(\theta)\check{R}_{xx}a(\theta)]} \quad (5)$$

olarak ifade edilir. Burada $\| \cdot \|$ ifadesi Euclidean biçimidir ve N her bir iletilen sinyal darbesinin örnekleme sayısı (snapshot number) ve \check{R}_{xx} orantılı birim matristir.

3.2. Capon

Capon hüzme biçimlendirme aşağıdaki gibi formülize edilir,

$$\text{Min}_w w^* \check{R}_{yy} w \quad (w^* b^c(\theta) = 1 \text{ olduğu durumda}) \quad (6)$$

Burada $w \in C^{M_r \times 1}$, istenen sinyali bozmadan gürültü, girişim ve karıştırma bastırma ağırlık vektörü ve \check{R}_{yy} , gözlemlenen veri örneklerinin örnek kovaryans matrisidir.

$$\check{R}_{yy} = \frac{1}{N} Y Y^* \quad (7)$$

Eş. (6) kullanılarak Capon hüzme biçimlendirme ağırlık vektörü,

$$\hat{w}_{Capon} = \frac{\check{R}_{yy}^{-1} b^c(\theta)}{b^T(\theta) \check{R}_{yy}^{-1} b^c(\theta)} \quad (8)$$

elde edilir. Bu durumda $\beta(\theta)$ 'nin Capon kestirimi;

$$\beta_{Capon}(\theta) = \frac{b^T(\theta) \check{R}_{yy}^{-1} Y X^* a(\theta)}{N [b^T(\theta) \check{R}_{yy}^{-1} b^c(\theta)] [a^*(\theta) \check{R}_{xx} a(\theta)]} \quad (9)$$

olarak elde edilmiş olur. Burada $\check{R}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)x(n)^*$ olarak ifade edilmektedir [6].

3.3. APES (Amplitude and Phase Estimation)

APES metodu aşağıdaki gibi formülize edilir.

$$\text{min}_w w^* \hat{Q} w \quad (w^* b^c(\theta) = 1 \text{ olduğu durumda}) \quad (10)$$

$$\hat{Q} = \check{R}_{yy} - \frac{Y X^* a(\theta) a^*(\theta) X Y^*}{N^2 a^*(\theta) \check{R}_{xx} a(\theta)} \quad (11)$$

Eşitlik (10)'da optimizasyon problemini çözerek APES hüzme biçimlendirme ağırlık vektörü,

$$\hat{w}_{APES} = \frac{\hat{Q}^{-1} b^c(\theta)}{b^T(\theta) \hat{Q}^{-1} b^c(\theta)} \quad (12)$$

ve $\beta(\theta)$ 'nin APES kestirimi elde edilir [6].

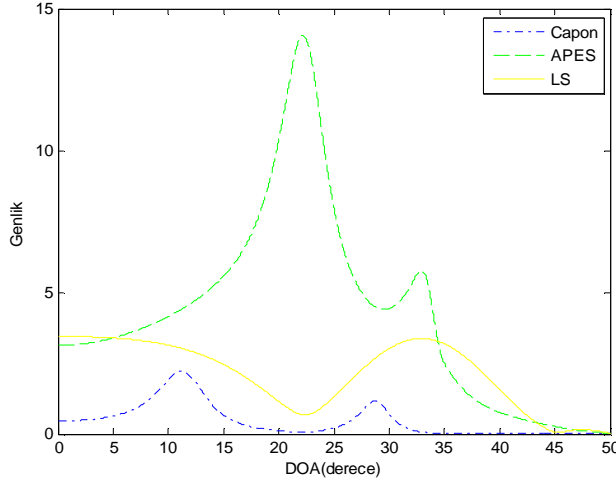
$$\beta_{APES}(\theta) = \frac{b^T(\theta) \hat{Q}^{-1} Y X^* a(\theta)}{N [b^T(\theta) \hat{Q}^{-1} b^c(\theta)] [a^*(\theta) \check{R}_{xx} a(\theta)]} \quad (13)$$

4. Simülasyon Sonuçları

Simülasyonlarda verici ve alıcı antenlerin aynı dizi üzerinde ve aynı RKA değerini görmekte oldukları kabul edilmiştir.

İlk simülasyonda verici ve alıcı sayıları eşit, $M_t = M_r = 10$, olan anten dizisi seçilmiştir. SNR seviyesi 10 dB olarak belirlenmiştir. $\theta_1 = 10^\circ$ ve $\theta_2 = 30^\circ$ açılarında iki hedef bulunduğu kabul edilmiştir. 0° - 50° aralığı 5000 örnekleme ile taranmaktadır.

Önce karıştırma kaynağı olmadığı durumda, daha sonra karıştırma kaynağı ilave edilerek değerlendirme yapılmıştır.

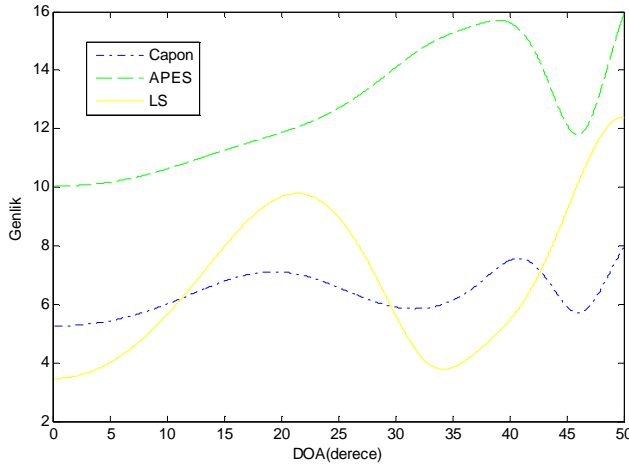


Şekil 1. $M_t = M_r = 10$, ve SNR 10 dB için LS, Capon ve APES

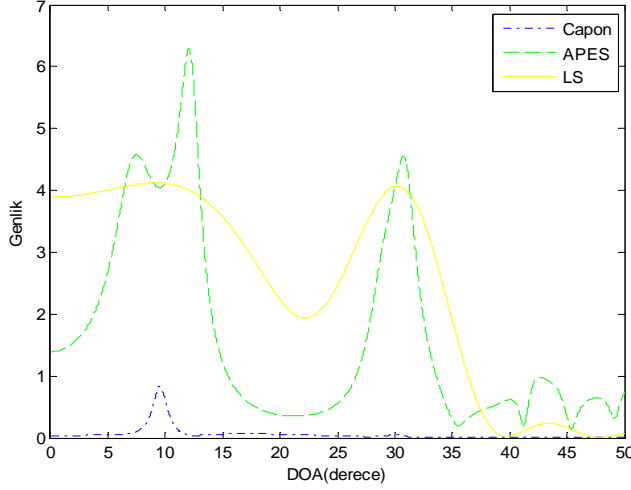
Şekil 1'de görüldüğü üzere Capon yöntemi hedefin bulunduğu konumları daha doğru tespit etmiştir. LS yöntemi hedefi iyi tespit edememiştir ve daha geniş açı aralığı göstermiştir. APES yöntemi daha yüksek genlikle pik değerleri vermiştir, ancak açısal çözünürlük kötüdür.

MIMO radar performansı için, ikinci simülasyonda ortama güçlü karıştırma kaynağı eklenmiştir. Bu durumda her üç yöntemle de hedefin bulunduğu konumlar tespit edilememiş ve ortamda var olmayan farklı ekolar algılanmıştır (Şekil 2).

Üçüncü simülasyonda alıcı ve verici anten sayıları $M_t = M_r = 20$ seçilmiş ve yine hedefler $\theta_1 = 10^\circ$ ve $\theta_2 = 30^\circ$ de alınmıştır.



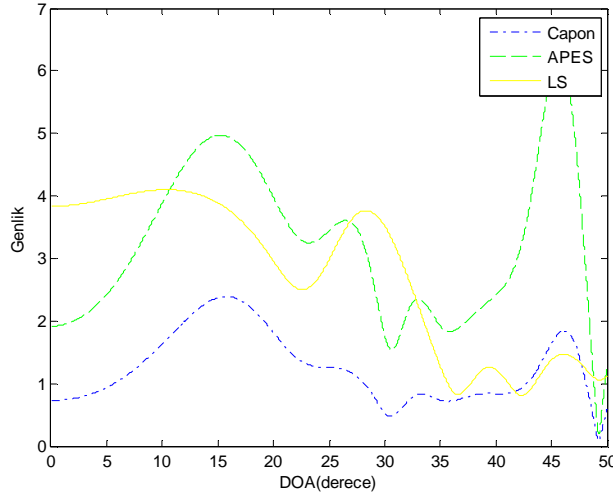
Şekil 2. $M_t = M_r = 10$, ve güçlü karıştırma kaynağı varlığında LS, Capon ve APES.



Şekil 3. $M_t = M_r = 20$, ve SNR 10 dB iken LS, Capon ve APES

Şekil 3'de görüldüğü gibi CAPON metodunda anten sayısının artması ile hedefin bulunduğu konumda, az da olsa çözünürlükte artış sağlanmıştır, ancak hedef ekosü gürültü seviyesinde tespit edilmiştir. LS metodundan hedeflerin iyi olmayan çözünürlükte ve yaklaşık olarak doğru açıda tespit edildiği görülmektedir. APES metodu ile hedefler tespit edilirken bir miktar açı sapması görülmektedir, fakat bu sapma verici ve alıcı antenlerin sayısının $N=M=10$ olduğu simülasyonda uygulanan APES metodu sonucundan daha azdır. Ancak çözünürlük CAPON metodu ile karşılaştırıldığında daha kötü sonuç vermektedir. Ayrıca farklı noktalardan da hedef ekosuna benzer ekolar tespit edilmiştir.

Üçüncü simülasyona güçlü karıştırma kaynağı eklendiği durumda, yöntemlerin performansları Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. $M_t = M_r = 20$ ve güçlü karıştırma kaynağı olması durumunda LS, Capon, APES

Güçlü karıştırma kaynağı olması durumunda (Şekil 4.) hedefin çözünürlük ve açısal konum tespitlerinde önemli derecede kötüleşme gözlenmiştir. Ayrıca hedefin bulunduğu konumdan başka konumlarda da karıştırma sinyalinden kaynaklı olarak artan sinyal genlikleri tespit edilmiştir. Her üç yöntem karşılaştırıldığında yüksek güçlü karıştırma sinyali varlığında, yöntemlerin hepsinde sinyal seviyesinde önemli

ölçüde bozulmalar tespit edilmiştir. Diğer taraftan LS metodunda daha az yanlış hedef ekosu gözlemlenmiştir.

Özetlemek gerekirse, ortamda iki hedef olması durumunda, 10 dB sinyal seviyesinde Capon metodu, LS ve APES metotlarından daha yüksek çözünürlükle sonuç vermektedir. LS metodu çözünürlüğü kötü ve hedefin bulunduğu açıda sapmalarla hedefi tespit etmiştir. APES metodunda hedefler yüksek açısal sapma göstermiştir.

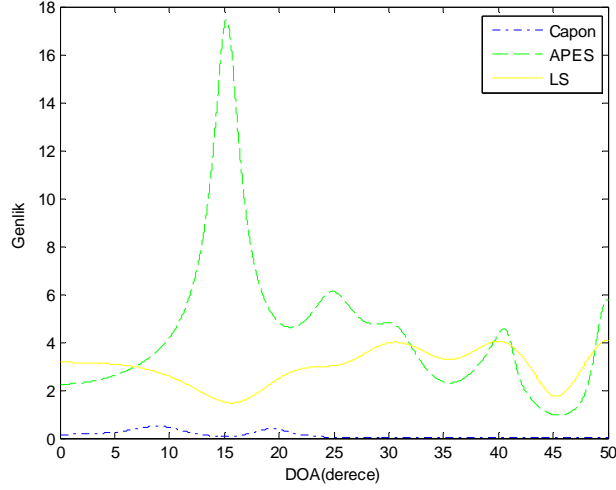
$M_t = M_r = 20$ olduğu durumda APES metodu çok iyi açısal konumda ve iyi çözünürlükle tespit gerçekleştirmiştir. Ancak tespit genliği düşmüştür. LS metodu ile iki hedef doğru açısal konumda, ancak iyi olmayan çözünürlükle tespit edilmiştir. Capon metodunda anten sayısı artırıldığında hedefler daha düşük ekolarla tespit edilmiştir.

Dördüncü simülasyonda alıcı verici anten sayıları $M_t = M_r = 20$ olarak ve SNR seviyesi 20 dB belirlenmiştir. Bu simülasyonda hedef sayısı artırılarak, hedefler $\theta_1 = 5^\circ, \theta_2 = 20^\circ, \theta_3 = 30^\circ, \theta_4 = 40^\circ$ ve $\theta_5 = 50^\circ$ konumlarına yerleştirilmiştir.

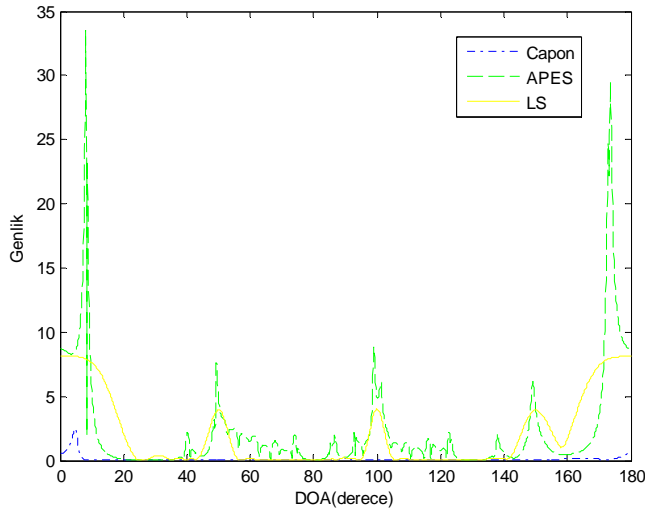
Şekil 5'de görüldüğü üzere LS metodunda hedefin bulunduğu 30, 40 ve 50 derece konumlarında hedef ekosu yüksek olarak algılanmıştır. 5 ve 20 derecede bulunan hedefler oldukça kötü çözünürlükle görülmektedir. Capon metodunda hedefin bulunduğu 5 ve 20 derece konumlarında hedef ekosu yüksek olarak algılanmıştır. İki hedef tespiti gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan 30, 40 ve 50 derece konumlarında bulunan hedefler oldukça kötü çözünürlükle ve çok düşük genlik seviyesinde bulunmaktadır. Bu yüzden bu hedeflerin tespit edilemeyeceği değerlendirilmiştir. APES Metodu hedefleri arası açıların yatayda 5, 20, 30, 40, 50 derece olduğu durumda şekilde görüldüğü üzere tespit performansında kötü sonuçlar göstermiştir. Hedefin bulunduğu açılar bir miktar açı sapması ile ancak yüksek genlikle hedef tespiti gerçekleştirilmiştir.

Hedefler $\theta_1 = 5^\circ, \theta_2 = 50^\circ, \theta_3 = 100^\circ, \theta_4 = 150^\circ$ ve $\theta_5 = 180^\circ$ konumlarına yerleştirilerek hedefler arası uzaklıklar arttırılmıştır (Şekil 6). Hedefler arası uzaklığın arttırılmasının hedef tespiti konusunda çok fazla iyileştirme etkisi görülmemiştir.

LS metodunda hedefler arasındaki mesafe arttıkça radar antenlerinin hedefi tespit performansı açı çözünürlüğünde oldukça düzelmiştir. Ayrıca hedef ekoları daha yüksek genliklerde alınmıştır. Capon metodunda hedefler arası uzaklıkların arttırılması tespit performansında önemli ölçüde azalmaya sebep olmuştur. Hedef ekoları oldukça düşük genlikli tespit edilmiştir, özellikle 50, 100 ve 150 derece konumlarında gürültü seviyesinde gözlenmiştir. Hedefler arası uzaklık arttırıldığında APES metodu daha iyi çözünürlükle hedef tespiti gerçekleştirmiştir. Hedeflerin bulunduğu konumlardaki açı sapmaları oldukça düşük seviyede bulunmaktadır. Hedefler yüksek genliklerle tespit edilmiştir. Ayrıca açısal çözünürlük de oldukça iyi seviyededir.



Şekil 5. $M_t = M_r = 20$, SNR 20dB ve 5 hedef olduğu durumda LS, Capon, APES.



Şekil 6. $M_t = M_r = 20$, SNR 20dB ve birbirinden uzakta 5 hedef olduğu durumda LS, Capon, APES.

5. Sonuçlar

Evre uyumlu MIMO radarlarda antenler oldukça yakın yerleştirilmiştir. Bu yüzden her bir alıcı verici çifti hedefin RKA'nını aynı görmektedir. Daha iyi tespit ve parametre kestirim performansı, veri bağımlı adaptif dizi teknikleri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Hedeflerden yansıyan MIMO sinyaller birbirinden lineer olarak bağımsızdır. Bu yüzden adaptif tekniklerin MIMO radar sistemi için uygulanması mümkün olmuştur. Yapılan simülasyonlarda elde edilen sonuçlarda RKA çeşitliliği değil, MIMO radar yapısından kaynaklanan iletilen dalga biçimi çeşitliliğinin tespit performansına etkisinden yararlanılmıştır.

Hedef sayısı artırıldığında hedef tespiti değerlendirmesine göre; LS metodunda hedefler arasındaki uzaklık daha yakın seçildiğinde hedefleri ayırmakta zorlandığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan hedefler arası uzaklık artırıldığında LS metodu hedefleri daha iyi ayırtmaktadır. Hedefler daha iyi açısal çözünürlükle ve yüksek genliklerle tespit edilmiştir. Hedef sayısı artırıldığında Capon metodunun performansı oldukça kötü gözlenmiştir. Hedefler arası uzaklığın artırılmasının

iyileşme konusunda etkisi fazla görülmemiştir. APES metodunda hedef sayısı artırıldığında, hedefler arası uzaklık yakın iken tespit performansı düşmüştür. Ancak hedefler arası uzaklık artırıldığında, hedeflerin çok daha iyi açısal çözünürlükle ve yüksek genlikle tespit edildikleri gözlemlenmiştir.

Simülasyonlarda güçlü karıştırma sinyali varlığı LS, Capon ve APES metodlarının performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Güçlü karıştırma sinyallerinin varlığında LS kestirim yöntemi düzgün çalışmamaktadır. Capon ve APES yöntemleri düşük SNR seviyesinin bulunduğu ortamlarda daha iyi sonuç vermektedir. Capon metodu ile hedefin bulunduğu konumdaki pikler daha dar, çözünürlük daha iyidir. Ancak daha fazla hedef var olduğu durumda Capon metodu uygun bir çözüm değildir. Diğer taraftan APES kestirimi hedef konumunun bulunduğu yerlerde daha doğru genlik değeri vermektedir. Ancak çözünürlüğü Capon'dan az miktarda daha kötüdür. Hedef sayısı artırıldığında hedefler arasında yeterince uzaklık bulunması durumunda APES metodu en iyi çözümdür.

6. Referanslar

- [1]E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. J. Cimini, D. Chizhik and R. Valenzuela, "Spatial Diversity in Radars – Models and Detection Performance", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 54, no. 3, pp. 823-838, Mar. 2006
- [2]D.R. Fuhrman and G.S. Antonio, "Transmit Beamforming For MIMO Radar Systems Using Partial Signal Correlation", Proc. 38th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput., vol. 1, pp. 295-299, Nov.2004
- [3]F.C. Robey, S. Coumts, D. Weikle, J.C. McHarg, K. Cuomo, "MIMO Radar Theory And Experimental Results", Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 1, pp. 300-304, Nov.2004
- [4]L. Xu, J. Li, P. Stoica, "Radar Imaging via Adaptive MIMO Techniques", Proceedings of 14th European Signal Processing Conference, Sep. 2006
- [5] J. Li, and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing* John Wiley & Sons, 2008
- [6]P. Stoica, H. Li, J. Li, "A New Derivation of the APES Filter" IEEE Signal Process. Letter,6(8),205-206,August 1999
- [7]J. Li, P. Stoica, "On probing signal design for MIMO techniques," in *Proc.40th Asimolar Conf. Signals, Sys. Comput.* (invited), Pacific Grove, CA, pp.31-35, Oct.2006
- [8]L.Xu, P.Stocia, and J.Li, "A diagonal growth curve model and some signal processing applications," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 54, pp.3363-3371, Sept.2006
- [9] J.Li, p.Stocia, "MIMO radar with colocated antennas" IEEE siganl Processing Magazine, Sept.2007.