

# ÇGÇÇ RADARLA HAREKETLİ HEDEF TESPİTİ

## MOVING TARGET DETECTION WITH MIMO RADAR

Şafak Bilgi Akdemir<sup>1</sup>, Çağatay Candan<sup>2</sup>

1. TÜBİTAK BİLGEM UEKAE /  
İLTAREN  
safak.akdemir@iltaren.tubitak.gov.tr

2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
ccandan@metu.edu.tr

### ÖZETÇE

*Dalga biçimi çeşitliliğinin ve açısal çeşitliliğin kullanılması Çok Girdili Çok Çıktılı (ÇGÇÇ) radarın performansında geleneksel radarlara ve faz dizili radarlara göre önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu iyileştirme alanlarından biri de hareketli hedeflerin tespit başarımıdır. Bu bildiri de uzay zaman kodlu işaretlerin kullanıldığı ÇGÇÇ radarlarının hareketli hedefleri tespit performansı incelenmiştir.*

### ABSTRACT

*The use of waveform diversity and angular diversity provides significant improvements in the performance of Multi Input Multi Output (MIMO) radar compared to the conventional radars and the phased array radar systems. One of these improvement areas is the success of moving target detection. In this paper, the moving target detection performance of a MIMO radar with a Neyman-Pearson detector which includes space time codes explicitly is investigated.*

### 1. GİRİŞ

Literatürde birçok radar tipi Çok Girdili Çok Çıktılı (ÇGÇÇ) radar olarak adlandırılmaktadır. Tüm bu farklı radar tiplerinin ortak özelliği birden fazla alıcı ve verici eleman bulundurmalarıdır. Bir diğer ortak özellikleri ise verici elemanların birbirine dik ya da en azından doğrusal olarak birbirinden bağımsız işaretler göndermeleridir. Bu özellik dalga biçimi çeşitliliği olarak adlandırılmaktadır [1].

Alıcı ve verici elemanların aralarındaki uzaklıklara göre ÇGÇÇ radarlar Evre Uyumlu ÇGÇÇ radar ve İstatistiksel ÇGÇÇ radar olmak üzere iki tipe ayrılmaktadır. Evre uyumlu ÇGÇÇ radarda alıcı ve verici elemanlar arasındaki mesafe hedefin antenlere olan uzaklığıyla karşılaştırıldığında oldukça azdır ve elemanların bir dizi halinde yerleştikleri düşünülebilir [2]. Bu haliyle Evre Uyumlu ÇGÇÇ radar faz dizili radarları anımsatmaktadır. Fakat ÇGÇÇ radarın dalga biçimi çeşitliliğini kullanıyor olması onu faz dizili radarlardan ayırmakta ve ÇGÇÇ radarın birçok alanda faz dizili radardan daha üstün özellikler göstermesini sağlamaktadır [1]. Evre uyumlu ÇGÇÇ radarların açısal çözünürlüğünün faz dizili radarlardan daha iyi olduğu ve bunun sonucunda birbirinden tamamen ayrıştırılabilen hedef sayısının en kötü durumda bile faz dizili radarların ayrıştırabildiği hedef sayısının en az iki katı olduğu literatürde gösterilmiştir [2], [3].

İstatistiksel ÇGÇÇ radarda ise alıcı ve verici elemanlar arasındaki mesafe her bir vericiden her bir alıcıya gelen işaretin istatistiksel olarak birbirinden bağımsız kabul edilebileceği ölçüde büyüktür. Bu şekilde alınan işaretlerin birbirinden bağımsız olma durumu literatürde Açısal veya Uzaysal Çeşitlilik olarak adlandırılmaktadır [4], [5]. Çoklu-durağan radar sistemlerinin de aralarında zaman ve faz senkronizasyonu sağlandığında ve alıcılardan alınan veriler ortak olarak işlendiğinde açısal çeşitliliğin avantajlarından yararlandığı bilinmektedir [6]. Bu nedenle literatürde istatistiksel ÇGÇÇ radarın yeni bir kavram olmadığı, bir çeşit çoklu-durağan radar tipi olarak kabul edilmesi gerektiği konusunda tartışmalar sürmektedir [7].

Açısal çeşitliliğin kullanılması yön bulma uygulamalarında istatistiksel ÇGÇÇ radara avantajlar sağlamaktadır. Yön bulma uygulamaları için, verici elemanlar arasındaki mesafe açısal çeşitliliği sağlayacak kadar fazla, alıcı elemanlar arasındaki mesafe ise açıda karmaşıklığa yol açmayacak kadar az olmalıdır. Anten elemanları bu şekilde yerleştirildiğinde alıcı antenlere gelen işaretler belli bir seviyeye kadar ilintili bile olsa istatistiksel ÇGÇÇ radarın yön kestirimi başarımının arttığı gösterilmiştir [8].

Açısal çeşitlilik sayesinde, hedefin bir yönünden görülen Radar Kesit Alanı (RKA) değeri çok düşük olsa bile, diğer yönlerden görülen RKA değerleri yüksek olabilir. Böylece alıcılara gelen işaretler evre uyumsuz olarak işlenerek enerji kaybı azaltılır ve hedef tespit olasılığı artırılabilir. Bu kavram çeşitlilik kazancı olarak adlandırılmaktadır [9], [10]. Açısal çeşitlilik sonucu alıcı ve verici elemanların farklı RKA'lar görmesinin hedef tespit başarımını arttırmasına benzer biçimde bu elemanların farklı radyal hızları görmesi ayrıca istatistiksel ÇGÇÇ radar sisteminin doppler işleme performansını ve sonuç olarak hareketli hedef tespiti başarımını da arttırmaktadır [4].

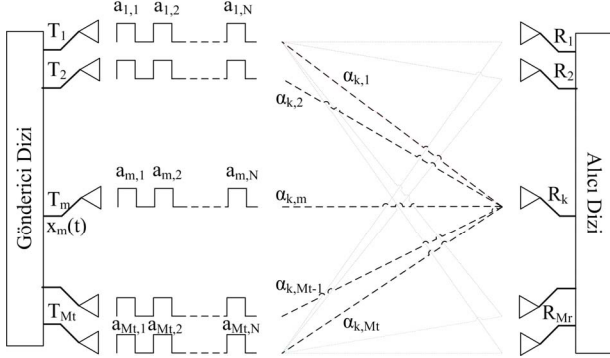
Literatürde ÇGÇÇ radarlarda kullanılmak üzere sabit ve hareketli hedeflerin tespiti için değişik kargaşa ortamlarında kullanılabilecek hedef bulucular bulunmaktadır. Bu hedef buluculardan bir tanesi de [1, Bölüm 10]'da ve [11]'de verilen, uzay-zaman kodlarını harici olarak içeren ve sabit hedeflerin tespitinde kullanılmak üzere tasarlanmış hedef bulucudur.

Bu bildiri de bu hedef bulucu hareketli hedef tespitinde kullanılabilecek şekilde geliştirilecektir. Bu amaçla öncelikle [11]'de bulunan işaret modeli Bölüm 2'de özetlenecektir. Bölüm 3'te hedef bulucunun hareketli hedef tespitinde kullanılabilmesi için yapılması gereken değişiklikler özetlenecektir. Bölüm 4'te yapılan simülasyon sonuçları sunulacaktır. Bölüm 5'te ise sonuçlar özetlenecektir.

Bu bildiri TÜBİTAK 1007 Programı 109A001 nolu proje kapsamında kısmen desteklenmiştir.

## 2. İŞARET MODELİ

$M_t$  tane verici ve  $M_r$  tane alıcı elemandan oluşan bir ÇGÇÇ radar sisteminin şeması Şekil 1'de sunulmaktadır. Bu sistemde alıcı ve verici elemanlar arasındaki mesafenin açışal çeşitliliği sağlayacak ölçüde fazla olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 1: Uzak Zaman Kodlu İşaretler Gönderen İstatistiksel MIMO Radar Gösterimi [1, Bölüm 10]

Her bir verici antenin N tane kodlu darbe gönderdiği varsayıldığında,  $m$ . verici anten tarafından gönderilen işaret temel bantta (1)'de olduğu gibi gösterilebilir.

$$x_m(t) = \sum_{j=1}^N a_{m,j} p(t - (j-1)T_p) \quad m = 1, \dots, M_t \quad (1)$$

(1)'de  $p(t)$  birim enerjiye sahip  $\tau_p$  genişliğindeki darbeyi,  $T_p$  darbe tekrarlama aralığını,  $a_{m,j}$  ise  $m$ . verici antenin  $j$ . darbesini göstermektedir.  $a_{m,j}$  darbenin hem genliğini hem de fazını değiştiren karmaşık bir sayıdır.  $k$ . alıcı anten tarafından alınan işaret ise (2)'deki gibi yazılabilir.

$$y_k(t) = \sum_{m=1}^{M_t} \alpha_{k,m} x(t - \tau_{k,m}) + w_k(t) \quad k = 1, \dots, M_r \quad (2)$$

(2)'de  $\alpha_{k,m}$  işaretlerin yayıldığı kanalın etkilerini ve hedefin geri yansıtma özelliğini modellemek için kullanılan karmaşık bir sayıyı  $\tau_{k,m}$  alıcıya  $m$ . verici antenden gelen işarettaki gecikme miktarını,  $w_k(t)$  alıcıdaki gürültüyü göstermektedir. Kargaşa etkileri ve karıştırma işaretlerinin etkileri de bu parametreyle modellenebilir. İşlem kolaylığı sağlaması açısından alıcıya tüm vericilerden gelen darbelerin aynı gecikme miktarına sahip olduğu kabul edilebilir. Alıcıdaki uyumlu filtre çıktıları örneklenmesinden sonra elde edilen işaret (3)'teki eşitlikle gösterilebilir.

$$y_k = \sum_{m=1}^{M_t} \alpha_{k,m} a_{m,j} + w_k \quad (3)$$

Vericilerden çıkan darbelerin kodlarından oluşan  $N \times M_t$  boyutundaki  $A$  matrisini ve  $k$ . alıcı antenle verici antenler

arasındaki kanal katsayılarından oluşan  $M_t \times 1$  'lik  $\alpha_k$  vektörünü (4)'te olduğu şekliyle tanımlarsak

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \dots & a_{M_t,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \dots & a_{M_t,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,N} & a_{2,N} & \dots & a_{M_t,N} \end{bmatrix}, \quad \alpha_k = \begin{bmatrix} \alpha_{k,1} \\ \alpha_{k,2} \\ \vdots \\ \alpha_{k,M_t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3)'te verilen eşitlik matris formuna dönüştürüldüğünde (5)'teki eşitlik elde edilir [11].

$$y_k = A\alpha_k + w_k \quad k = 1, \dots, M_r \quad (5)$$

ÇGÇÇ radar hedef tespiti için gelen tüm işaretleri ortak olarak işlediğinden her bir alıcıdaki uyumlu filtre çıktıları birleştirilerek  $NM_r \times 1$  'lık daha büyük bir veri vektörü halinde hedef bulucuya gönderilir.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Hedef bulucudaki ikili hipotez testi (7)'deki gibi yazılabilir.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : y = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{M_r} \end{bmatrix} \\ H_1 : y = \begin{bmatrix} A\alpha_1 + w_1 \\ A\alpha_2 + w_2 \\ \vdots \\ A\alpha_{M_r} + w_{M_r} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (7)$$

$w_k$  'lerin birbirinden bağımsız olduğu ve her bir vektörün  $w_k \sim CN(0, I)$  şeklinde dağılım gösterdiği varsayılırsa  $y$  vektörünün  $H_0$  ve  $H_1$  hipotezleri altındaki dağılımları sırasıyla

$$p(y | H_0, I) = \frac{1}{\pi^{NM_r}} \exp\left[-\sum_{k=1}^{M_r} y_k^H y_k\right] \quad (8)$$

$$p(y | H_1, I) = \frac{1}{\pi^{NM_r}} \exp\left[-\sum_{k=1}^{M_r} (y_k - A\alpha_k)^H (y_k - A\alpha_k)\right]$$

şeklinde yazılabilir.  $\alpha_k$  'ların değerleri ya da dağılımları bilinmediği için, bu durumda kullanılabilecek bir hedef bulucu Neyman-Pearson kriteri altında genelleştirilmiş

olasılık oranı testidir (GLRT).  $N \geq M_t$  olduğunda bu hedef bulucunun formülü [1, Bölüm 10]'da ve [11]'de

$$\sum_{k=1}^{M_r} \mathbf{y}_k^H \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{y}_k \underset{<}{>} T \quad (9)$$

şeklinde verilmektedir.

### 3. HAREKETLİ HEDEF TESPİTİ

Hedefin hareketli olduğu, hedef hızının her alıcı verici çiftine göre aynı olduğu ve N tane darbe boyunca sabit kaldığı varsayıldığında,  $k$ . alıcıdaki veri vektörü (6)'daki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{D}_\varphi \mathbf{A} \boldsymbol{\alpha}_k + \mathbf{w}_k = \mathbf{A}_d \boldsymbol{\alpha}_k + \mathbf{w}_k \quad k = 1, \dots, M_r \quad (10)$$

(10)'da  $\mathbf{D}_\varphi$  doppler matrisidir ve (11)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\mathbf{D}_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j2\pi\varphi} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j2\pi(N-1)\varphi} \end{bmatrix}, \quad \varphi = f_d T_p \quad (11)$$

Bu durumda genelleştirilmiş olasılık oranı testini kullanabilmek için  $\boldsymbol{\alpha}_k$ 'ların değerlerinin yanında hedefin hızını da kestirmek gerekmektedir. Bunun için en düşük noktasının bulunması gereken maliyet fonksiyonu (12)'deki gibi yazılabilir.

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}} \left( \min_{\varphi} J(\boldsymbol{\alpha}, \varphi) \right) = \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left( \min_{\varphi} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_d \boldsymbol{\alpha}_k\|^2 \right) \quad (12)$$

(12)'de maliyet fonksiyonunu en küçükleyen  $\boldsymbol{\alpha}_k$  değeri (13)'teki gibi yazılabilir.

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k = \left( \mathbf{A}_d^H \mathbf{A}_d \right)^{-1} \mathbf{A}_d^H \mathbf{y}_k \quad (13)$$

(13)'teki eşitlik (12)'deki denkleme konup oluşan ifade düzenlendiğinde (14)'teki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left( \min_{\varphi} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_d \hat{\boldsymbol{\alpha}}_k\|^2 \right) \\ = \min_{\varphi} \left\| \mathbf{y}_k - \mathbf{D}_\varphi \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^H \mathbf{D}_\varphi^H \mathbf{D}_\varphi \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{D}_\varphi^H \mathbf{y}_k \right\|^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$\mathbf{D}_\varphi$  matrisinin elemanları karmaşık birim çember üzerinde olduğundan (15)'teki eşitliği sağlamaktadır.

$$\mathbf{D}_\varphi^H \mathbf{D}_\varphi = \mathbf{D}_\varphi \mathbf{D}_\varphi^H = \mathbf{I} \quad (15)$$

$\mathbf{D}_\varphi$  matrisi bu özelliğinden dolayı birlikte işleme girdiği vektörlerin boyunu etkilememekte sadece vektörlerin yön değiştirmesine neden olmaktadır. Bu özellik ve (15)'teki eşitlik kullanılarak (14)'teki ifade yeniden düzenlenirse (16)'daki eşitlik elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left( \min_{\varphi} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_d \hat{\boldsymbol{\alpha}}_k\|^2 \right) \\ = \min_{\varphi} \left( \left\| \left( \mathbf{I} - \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^H \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^H \right) \mathbf{D}_\varphi^H \mathbf{y}_k \right\|^2 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$\mathbf{P}_a^c$  ve  $\mathbf{P}_a$  matrisleri (17)'deki gibi tanımlandığında

$$\mathbf{P}_a^c = \mathbf{I} - \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^H \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^H, \quad \mathbf{P}_a = \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^H \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^H \quad (17)$$

(16)'daki en küçükleme probleminin (18)'deki en büyükleme problemine dönüştüğü görülmektedir [12].

$$\min_{\varphi} \left\| \mathbf{P}_a^c \mathbf{D}_\varphi^H \mathbf{y}_k \right\|^2 = \max_{\varphi} \left\| \mathbf{P}_a \mathbf{D}_\varphi^H \mathbf{y}_k \right\|^2 \quad (18)$$

(18)'deki en büyükleme probleminin çözümü sayısal yollar kullanılarak bulunabilir. Bu problemin çözümüyle her bir alıcıdaki doppler kayması miktarı kestirilmiş olur. Bu kestirilen değer alınış işaretten çıkarılmasından sonra elde edilen işaretten (9)'daki hedef bulucu kullanılarak hedef tespiti yapılabilir.

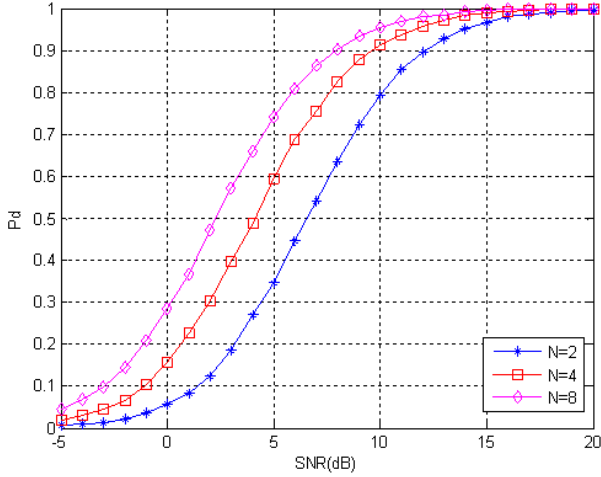
### 4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde  $1 \times 10^{-3}$  s'lik darbe tekrarlaması aralığı bulunan, RF frekansı 3 GHz olan ve tek alıcı elemanı bulunan bir ÇGÇÇ radar için 10 m/s hızıyla giden bir hedefin varlığında değişik işaret-gürültü oranı değerlerinde hedef tespit olasılığını hesaplamak için Monte Carlo benzetimi yoluyla yapılan analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Benzetimlerde öncelikle (18)'deki eşitliği en büyükleyen hız değerleri kestirilmiş daha sonra bu hız değerlerinin neden olduğu faz kaymaları alınış işaretten çıkarılarak işaret (9)'da verilen hedef bulucuya sokulmuştur. Benzetim sırasında gönderilen toplam güç verici eleman sayısına göre normalize edilmektedir. Benzetimlerde kullanılan İşaret Gürültü Oranı (SNR) değeri (19)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$SNR = \frac{NE_t}{\sigma_w^2} \quad (19)$$

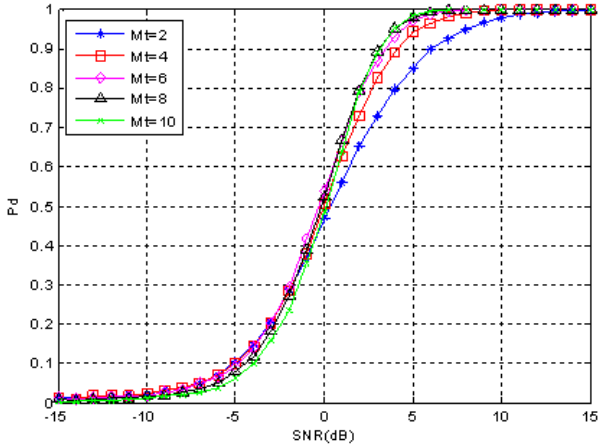
(19)'da  $\sigma_w^2$  her bir alıcıdaki gürültünün varyansını  $E_t$  ise her bir darbenin enerjisini göstermektedir.

Şekil 2'de verici eleman sayısı 2 iken gönderilen darbe sayısı değiştirildiğinde elde edilen grafik sunulmaktadır. Grafikte gönderilen darbe sayısı arttıkça gönderilen toplam gücün artmasına bağlı olarak hedef tespit olasılığının da arttığı görülmektedir.



Şekil 2: ÇGÇÇ Radarın Değişik Darbe Sayılarında Hedef Tespit Olasılığı

Şekil 3'te  $N = 12$  iken verici eleman sayısı değiştirildiğinde elde edilen grafik sunulmaktadır. Grafikte verici eleman sayısı arttıkça çeşitliliğin artmasına bağlı olarak yüksek işaret-gürültü oranı değerlerinde hedef bulucu performansının iyileştiği görülmektedir. Açılal çeşitliliği kullanan çokludurağan radar sistemlerinde de benzer iyileşmeler görülmektedir [6], [7].



Şekil 3: ÇGÇÇ Radarın Değişik Verici Eleman Sayılarında Hedef Tespit Olasılığı

## 5. SONUÇLAR

ÇGÇÇ radarın birçok alanda geleneksel radarlara göre daha iyi performans sağladığı literatürde gösterilmiştir. Bu alanların biri de hareketli hedef tespittir. Bu bildiriye literatürde durağan hedefler için geliştirilmiş bir hedef bulucunun hedef hareketli olduğunda nasıl kullanılabileceği konusu incelenmiştir. Hedef tespit performansının ÇGÇÇ radarın eleman sayısı arttıkça iyileştiği gösterilmiştir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] J. Li, P. Stoica, "MIMO Radar Signal Processing", Wiley, 2009
- [2] J. Li, P. Stoica, "MIMO Radar With Colocated Antennas", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 106-114, Sep. 2007
- [3] J. Li, P. Stoica, L. Xu, W. Roberts, "On Parameter Identifiability Of MIMO Radar", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 968-971, Dec. 2007
- [4] A. M. Haimovich, R. S. Blum and L. J. Cimini, "MIMO Radar with Widely Separated Antennas", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 1, pp. 116-129, Jan. 2008
- [5] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik and R. Valenzuela, "Performance of MIMO Radar Systems: Advantages of Angular Diversity", *Proceedings of 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 1, pp. 305-309, Nov. 2004
- [6] V.S. Chernyak, "Fundamentals of Multisite Radar Systems : Multistatic Radars and Multiradar Systems", *Gordon and Breach Science Publishers*, 1998
- [7] V. Chernyak, "On the Concept of MIMO Radar", *IEEE Radar Conference 2010*
- [8] N.H. Lehman, E. Fishler, A.M. Haimovich, R.S. Blum, D. Chizhik, L.J. Cimini, R. Valenzuela, "Evaluation Of Transmit Diversity In MIMO-Radar Direction Finding", *IEEE Transactions On Signal Processing*, vol. 55, no. 5, pp. 2215-2225, May 2007
- [9] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik and R. Valenzuela, "Performance of MIMO Radar Systems: Advantages of Angular Diversity", *Proceedings of 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 1, pp. 305-309, Nov. 2004
- [10] 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
- [11] A. De Maio and M. Lops, "Design Principles Of MIMO Radar Detectors", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 3, pp. 886-898, Jul. 2007
- [12] Ş.B. Akdemir, "An Overview Of Detection In MIMO Radar", *Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 2010*