

MIMO Radarlarda Doppler Kayması Kullanılarak Hedef Konumunun Bulunması

Yılmaz Kalkan¹

Buyurman Baykal²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

¹Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

¹e-posta: ykalkan@metu.edu.tr

²e-posta: buyurman@metu.edu.tr

Özetçe

MIMO radar için yeni bir hedef konumlama yöntemi önerilmiştir. MIMO radar için, sadece doppler kayması ve açı bilgisi kullanılarak hedef konumunun bulunması mümkündür. Bu doğrusal olmayan bir problemdir ve doğrusal olmayan problemin çözümü için ızgara arama algoritması önerilmiştir. Eğer alıcıların almış oldukları frekanslar, verici ile hedef ve hedef ile alıcı arasındaki açılar biliniyorsa, iki boyutlu uzayı istenilen (x,y) koordinatları için ızgara arama yöntemi ile tarayabilir ve hedef konumunu bulabiliriz.

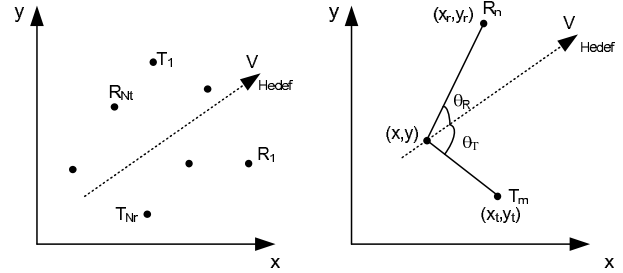
1. Giriş

Çoklu alıcı ve verici ünitelerinin kullanıldığı MIMO radar sistemleri son zamanlarda hayli popüler bir araştırma konusudur. Literatürde özellikle hedef tespiti konusunda birçok MIMO radar makalesi bulunmaktadır. [1] de gösterildiği gibi, MIMO radar kullanılmasıyla açılal yayılımdan dolayı hedef tespit performansı artmaktadır. MIMO radarın sahip olduğu, birbirinden yeterli uzaklıkta konumlandırılan alıcı- verici ünitelerinden kaynaklanan bu avantajı hedef izleme için de kullanabiliriz. Bir hedefi izlemeye başlayabilmek için öncelikle o hedefin konumunun mümkün olduğunca doğru şekilde kestirilmesi gerekmektedir. [2] de gösterildiği gibi, çoklu algılayıcının var olduğu bir ortamda doğrusal hareket eden, sabit hızlı bir hedef, sadece doppler kayması ölçümünden faydalanarak konumlandırılabilir.

[2] de N tane pasif çalışan su altı algılayıcısı, sabit frekanslı bir sinyal yayarak, doğrusal olarak hareket eden bir hedefin konumunu doppler bilgisinden yararlanarak konumlamaya çalışmaktadır. Bizim çalışmamızda [2] de verilen yöntem MIMO radar durumu için genişletilmiştir. Bir ton sinyali yayarak ilerleyen bir hedef yerine N_T adet verici ve N_R adet alıcı birimi içeren aktif MIMO radar sistemi düşünülmüştür. Burada alıcı ve verici birimlerinin tamamı birbirinden (farklı radar kesit alanları görmeye olanak sağlayacak yeterlikte) uzak olarak konumlanmıştır. Sistem tamamen bistatik çalışan radarlardan oluşmaktadır, yani her bir verici sadece sinyal göndermekle ilgilenip herhangi bir sinyali almamaktadır. Alıcılar ise her vericinin gönderdiği sinyalleri alabilmektedirler.

Düşünülen sistem geometrisi şekil 1 de gösterilmiştir. N_T verici ve N_R alıcı kullanarak toplamda $N = N_T \times N_R$ adet bistatik radar ünitesi elde edilmekte ve sonuç olarak elimizde N adet alınan sinyal bulunmaktadır. Bistatik radarlarda karşılaşılan en büyük sorunlardan bir tanesi alıcı ve verici ünitelerinin zaman eşlemelerinin yapılmasının zor olmasıdır. Varış zamanı (TOA) bilgisi kullanılarak hedef konumlaması yapılacağı durumlarda

zaman eşlemesinin yapılması gereklidir ve buda bistatik radarlarla hedef konumlama yapılmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 1: MIMO Radar geometrisi.

a) N_T verici ve N_R alıcı için, b) bir tek alıcı-verici çifti için

Bistatik radarlarla çalışırken genellikle, sinyallerin varış zamanlarını biliyorsak buna göre hedefin üzerinde bulunduğu bir elips çizebiliriz. Eğer birden fazla bistatik radar ünitemiz varsa, çizilen elipslerin kesişim noktası bize hedefin konumunu verecektir. Bu işlem hedef konumunda belirsizlik olmaması için en az 3 bistatik radar ünitesine ihtiyaç duymaktadır [3].

Önerdiğimiz yöntemde ise varış zamanı bilgisi kullanılmadığı için alıcı ve vericinin zaman eşlemelerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Tek ihtiyacımız olan, vericiler tarafından gönderilen sinyallerin alınması (frekanslarının ve doppler kaymasının bulunması) ve verici ile hedef, hedef ile alıcı arasındaki açılardır. Bu makalede, bu veriler kullanılarak MIMO radar için yeni bir hedef konumlama algoritması önerilmiştir. Hedef konumlamaktan kasıt verilen bir zaman için hedefin pozisyon bilgileri (x,y) ile hedef in hızını gösteren (x,y) bilgilerinden oluşan hedef parametrelerinin kestirilmesidir. Hedefin konumuna bağlı olarak bir maliyet fonksiyonu tanımlanmaktadır. Daha sonra verilen zamanda bu maliyet fonksiyonun en az olduğu (x,y) koordinatını bulabilmek için iki boyutlu uzay ızgara arama yöntemi ile taranmaktadır.

[4] de Doppler radarlardan oluşan bir radar ağı hedef izleme düşünülmüştür. Buradaki radarların tamamı monostatik durumda (her bir vericinin sadece kendi gönderdiği sinyali aldığı durum) çalışmaktadır ve bu yapı içinde hareket parametreleri üzerindeki frekans ve faz kestirimdeki yöntemlerden kaynaklanan hatalar için Cramer-Rao sınırı elde edilmiştir.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir: 2. bölümde problemin formüle edilmesi ve hedef modelleri verilmiştir. 3. bölümde bilgisayarlı benzetim sonuçları bulunabilir ve son olarak 4. bölümde sonuç kısmı yer almaktadır.

2. Problem Formülasyonu

Şekil 1a' da genel MIMO radar yapısı görülmektedir. N_T adet verici ve N_R adet alıcı olmak üzere toplam $N=N_R \times N_T$ adet bistatic radar çifti bulunmaktadır. Buradaki radarların tamamı yere konumlu ve sabit radarlardır. Sabit hıza (V) sahip, doğrusal olarak hareket eden bir hedef düşünülmüştür. N_T adet verici $f_1, f_2, \dots, f_{N_T}$ olmak üzere N_T adet değişik frekansta sinyal yaymaktadır, N_R adet alıcı ise bu frekansların hedefin hareketine bağlı olarak oluşan doppler kaymasına sahip halini almaktadır. Her bir alıcı yayılan N_T adet sinyali alabilmekte ve bu frekanslar alıcıda ayrıştırılabilmektedir. Başka bir deyişle hangi sinyalin hangi verici tarafından gönderildiği alıcılar tarafından bilinmektedir. i inci alıcı, j inci vericinin gönderdiği sinyalin frekansını doppler kaymasından dolayı şu şekilde alacaktır [3]:

$$f_{r,i} = f_j \left(1 + \frac{V}{C} (\cos \theta_{Tj} + \cos \theta_{Ri}) \right) \quad (1)$$

burada C ışık hızını, $f_{r,i}$ i inci alıcı tarafından alınan frekansı, f_j j inci vericinin frekansını, θ_{Tj} ve θ_{Ri} ise sırasıyla (şekil 1b de gösterildiği gibi) j inci verici ile hedefin hız vektörü arasındaki açıyı ve i inci alıcı ile hedefin hız vektörü arasındaki açıyı göstermektedirler. [2]' de dört adet pasif algılayıcı kullanarak, gönderilen frekansların ve doppler kaymalarının ölçülmesinin sinyal yayan bir hedefi konumlamak için yeterli olduğu gösterilmiştir. Doppler kayması iki yöntemle hesaplanabilir. Bunlardan birincisi; her bir ölçüm anındaki gönderilen sinyalin frekansı ile alınan sinyalin frekansı arasındaki farktan yararlanarak bulmaktır. İkinci yöntem ise; aynı alıcı için ardışık iki ölçümün farkından faydalanarak doppler kaymasını hesaplamaktır.

Hedef konumlama için bilinmeyen parametreler iki boyutlu uzaydaki hedef konum bilgileri (x, y) ile hedefin hızıdır (V). Bu parametreler eldeki ölçümlerden faydalanarak bulunabilir ise, hedef konumlama işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır. Burada bilinmeyenler hedef koordinatları (x, y) cinsinden yazılabilirse, ızgara araştırma metodu ile hedefin bulunduğu konum bulunabilir. Bunun için öncelikle (1) de verilen ifadenin zamana göre türevini alarak başlayabiliriz,

$$\dot{f}_{r,i} = -f_j \frac{V}{C} \left(\dot{\theta}_{Tj} \sin \theta_{Tj} + \dot{\theta}_{Ri} \sin \theta_{Ri} \right) \quad (2)$$

açısal hızlar şu şekilde yazılabilir;

$$\dot{\theta}_{Tj} = \frac{V \sin \theta_{Tj}}{r_{Tj}}, \quad \dot{\theta}_{Ri} = \frac{V \sin \theta_{Ri}}{r_{Ri}} \quad (3)$$

burada r_{Tj} verici sırasıyla hedef ile j inci verici ve i inci alıcı arasındaki mesafeleri göstermektedirler. (3) de bulduğumuz ifadeyi (2) de verilen denklem içinde yerine yazarsak;

$$\dot{f}_{r,i} = -f_j \frac{V^2}{C} \left(\frac{\sin^2 \theta_{Tj}}{r_{Tj}} + \frac{\sin^2 \theta_{Ri}}{r_{Ri}} \right) \quad (4)$$

ifadesini elde etmiş oluruz. Bu ifadeyi düzenlersek (5) de gösterilen denklemi elde etmiş oluruz.

$$V^2 \left(\frac{\sin^2 \theta_{Tj}}{r_{Tj}} + \frac{\sin^2 \theta_{Ri}}{r_{Ri}} \right) = -C \frac{\dot{f}_{r,i}}{f_j} \quad (5)$$

(1) denkleminde aşağıdaki ifade kolaylıkla elde edilebilir;

$$V^2 (\cos \theta_{Tj} + \cos \theta_{Ri})^2 = \frac{C^2 (f_{r,i} - f_j)^2}{f_j^2} \quad (6)$$

denklem (5) ve (6) toplanırsa;

$$V^2 \mu_{i,j} = K_{i,j} + M_{i,j} \quad (7)$$

elde edilir. Burada;

$$\mu_{i,j} = (\cos \theta_{Tj} + \cos \theta_{Ri})^2 + \frac{\sin^2 \theta_{Tj}}{r_{Tj}} + \frac{\sin^2 \theta_{Ri}}{r_{Ri}} \quad (8)$$

ve

$$K_{i,j} = \frac{C^2 (f_{r,i} - f_j)^2}{f_j^2}, \quad M_{i,j} = -C \frac{\dot{f}_{r,i}}{f_j} \quad (9)$$

olarak verilir.

Alıcılar gönderilen frekansları ($f_1, f_2, \dots, f_{N_T}$) bilmektedirler, bu sebeple her bir alıcı, bir sinyali aldığı anda onun gerçek değerini hatasız olarak bulabilir, yani hangi verici tarafından gönderildiğini tam olarak belirleyebilir. Doppler kaymasını ölçebileceğimiz için, (9) numaralı denklemde bilinmeyen bir değişken yoktur. (7) numaralı denklemde bilinmeyenler ise; V , θ_{Tj} , θ_{Ri} , r_{Tj} ve r_{Ri} dir. Mesafe bilgisi hedefin ve alıcı -verici ünitelerinin konumlarına bağlı olarak şu şekilde bulunabilir:

$$r_{Tj} = \sqrt{(x - x_{Tj})^2 + (y - y_{Tj})^2} \quad ; j = 1, 2, \dots, N_T \quad (10)$$

$$r_{Ri} = \sqrt{(x - x_{Ri})^2 + (y - y_{Ri})^2} \quad ; i = 1, 2, \dots, N_R \quad (11)$$

burada; (x, y), (x_{Tj}, y_{Tj}) ve (x_{Ri}, y_{Ri}) sırası ile hedefin, i ' inci vericinin ve j ' inci alıcının ölçüm anındaki koordinatlarını göstermektedirler. Alıcı ve vericilerin yerleri bilindiği için, (10) ve (11) deki tek bilinmeyen hedefin konum bilgisidir.

[2] de pasif konumlama problemi incelenmiştir. Bu çalışmada sadece alıcı üniteleri olduğu için denklemlerde sadece alıcı ile hedef arasındaki açı görülmektedir. Cebirsel işlemlerle denklemlerin açı bağımlılığından kurtarılması mümkündür. Fakat MIMO radar durumunda alıcı ile hedef arasındaki açıya ek olarak hedef ile verici ünitesi arasındaki açı da denklemlere girmiş ve bu da bu denklemlerin açıdan bağımsız olarak düzenlenmesine olanak vermemiştir. Eğer bu açıları (θ_{Tj} , θ_{Ri}) biliyorsak, (7) de tek bilinmeyen olarak hedefin hızı (V) kalır. [2] de böyle bir denklemin çözümü için gösterilen yöntem ızgara araştırma yöntemidir. Bu yöntemde iki boyutlu uzay her (x, y) koordinatları için taranarak, tanımlanmış bir maliyet fonksiyonunu en az yapacak (x, y) koordinatı bulunmaya çalışılır. Burada ızgara arama algoritması içine hedefin hızı (V) bilgisini sokmaya gerek yoktur çünkü (7)' den de görüldüğü gibi V diğer değişkenler cinsinden şu şekilde yazılabilmektedir;

$$V^2 = \frac{K_{i,j} + M_{i,j}}{\mu_{i,j}} \quad (12)$$

burada her i ve j için V 'nin sabit olduğu unutulmamalıdır. İzgara araştırması için maliyet fonksiyonumuzu şu şekilde tanımlayalım:

$$J = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} \left(V^2 - \frac{K_{i,j} + M_{i,j}}{\mu_{i,j}} \right)^2 \quad (13)$$

bu maliyet fonksiyonunu bilinmeyen V^2 için çözmek için, J 'nin V^2 ye göre türevini alarak sonucu sıfıra eşitlememiz gerekir. Bu işlem bize şu sonucu verir;

$$V^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} \left(\frac{K_{i,j} + M_{i,j}}{\mu_{i,j}} \right) \quad (14)$$

burada N toplam bistatik radar sayısını ($N = N_R \times N_T$) göstermektedir. (14) denklemini (13) içine yerleştirildiğinde, maliyet fonksiyonumuz (J);

$$J = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{N_T} \left(\frac{K_{n,m} + M_{n,m}}{\mu_{n,m}} \right) - \frac{K_{i,j} + M_{i,j}}{\mu_{i,j}} \right)^2 \quad (15)$$

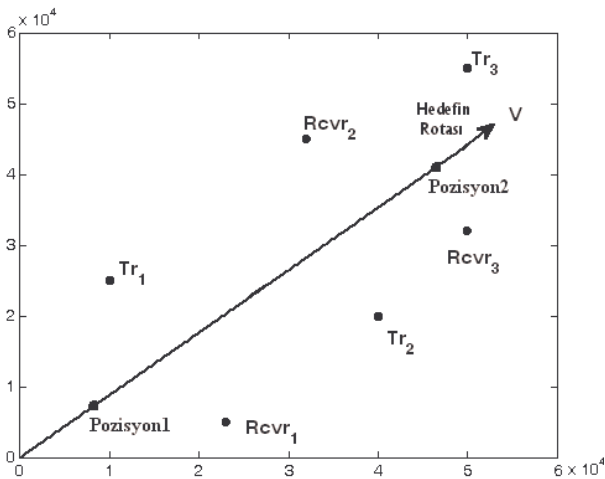
şeklinde elde edilir. (15) deki her bir terimi normalize edersek, maliyet fonksiyonumuz;

$$J = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} \left(1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{N_T} \left(\frac{K_{n,m} + M_{n,m}}{\mu_{n,m}} \right)}{\frac{K_{i,j} + M_{i,j}}{\mu_{i,j}}} \right)^2 \quad (16)$$

olarak bulunur.

3. Benzetim Sonuçları

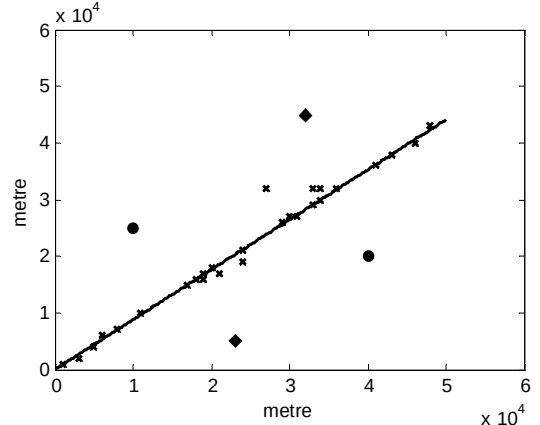
3.1. Benzetim



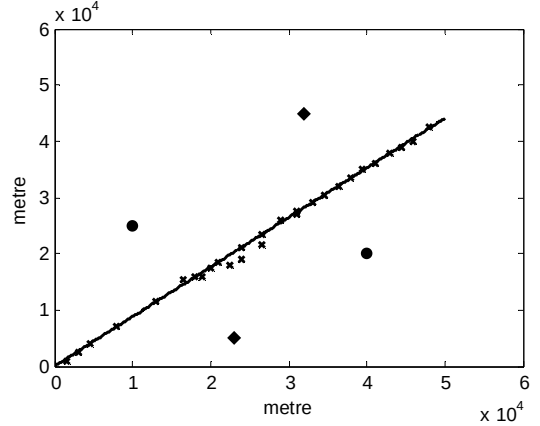
Şekil 2: MIMO Radar benzetim geometrisi

Bilgisayarda yapılan benzetimlerde sabit hızlı (V) ve doğrusal olarak hareket eden bir hedef incelenmiştir. Farklı sayıda alıcı ve verici birimleri içeren MIMO radar geometrileri için sonuçlar elde edilmiştir. (2×2 , 2×3 ve 3×3 MIMO radar yapıları incelenmiştir, burada; $N_T \times N_R$ MIMO, N_T adet verici ve N_R adet alıcısı olan MIMO radar yapısını göstermektedir.) 2×2 MIMO radar için Tr_1 ve Tr_2 verici üniteleri olarak, $Rcvr_1$ ve $Rcvr_2$ ise alıcı üniteleri olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde, 2×3 MIMO için $Rcvr_3$ bu modele dâhil edilmiş ve son olarak 3×3 MIMO için de Tr_3 dâhil edilmiştir. Her bir verici radar ünitesi farklı frekanslarda sürekli dalga sinyali yaymaktadırlar, vericiler için kullanılan frekanslar 20GHz, 50GHz ve 80GHz olarak seçilmiştir. Hedefin takip ettiği doğrusal yol, şekil 2 de sürekli olarak gösterilmiştir. Hata analizi kısmında, hata hesaplamaları için hedefin şekil 2 de $\bullet$ sembolü ile gösterilen 1 ve 2 numaralı pozisyonlarda olduğu düşünülmüştür. Toplam arama alanı $60 \times 60 \text{ km}^2$ lik bir alan olarak öngörülmüş ve bu alan ızgara arama yöntemi ile taranmıştır. Benzetimlerde kullanılan ızgara boyutları ise 250m ve 1000m dir.

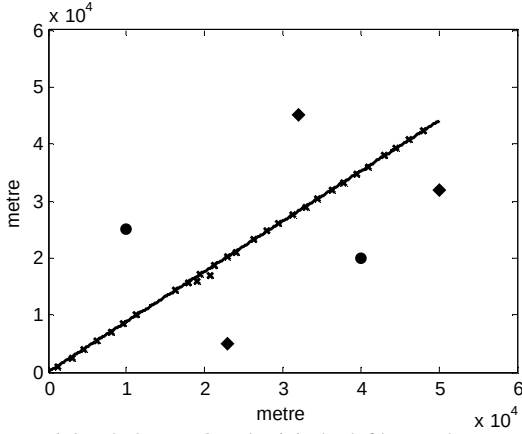
Takip eden şekillerde, hedefin izlediği yol 29 örnek noktasında değerlendirilmiş ve bu 29 örnek noktaya karşılık sistem tarafından bulunan hedef konumları şekillerde “x” sembolü ile gösterilmiştir. Şekil 3 ve şekil 4 den görüleceği gibi, kullanılan ızgaranın boyutunu azaltmak hedef konumlamada yapılan hatanın da azalmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde kullanılan alıcı ve/veya vericilerin sayısını arttırmak da hedef konumlama performansını arttırmaktadır. Bu durum şekil 4, 5 ve 6 da görülmektedir



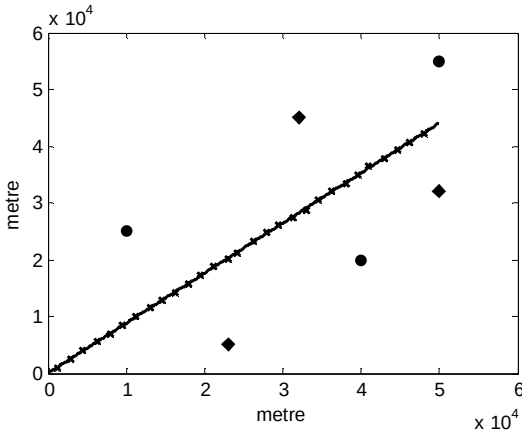
Şekil 3: 2x2 MIMO radar için hedef konumlama. İzgara boyutu = 1000m



Şekil 4: 2x2 MIMO radar için hedef konumlama. İzgara boyutu = 250m



Şekil 5: 2x3 MIMO radar için hedef konumlama. İzgara boyutu = 250m



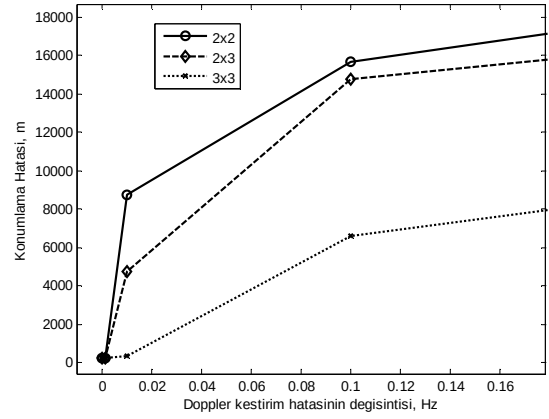
Şekil 6: 3x3 MIMO radar için hedef konumlama. İzgara boyutu = 250m

3.2. Hata Analizi

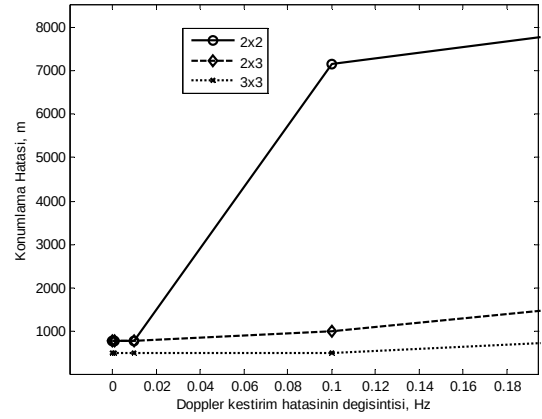
Doppler kestiriminde hata yapıldığı zaman, önerilen sistemin performansı dramatik bir biçimde düşmektedir. Hata analizi yapılabilmesi için, sıfır ortalamalı, normal dağılıma sahip değişken sapmalı bir rastlantısal değişken gerçek doppler frekansı üzerine eklenerek incelenmiştir. Pozisyon hatası; hedefin gerçek pozisyonu ile kestirilen pozisyonu arasındaki mesafe olarak tanımlanmıştır. Pozisyon hatası;

$$\mathcal{E}_d = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2} \quad (17)$$

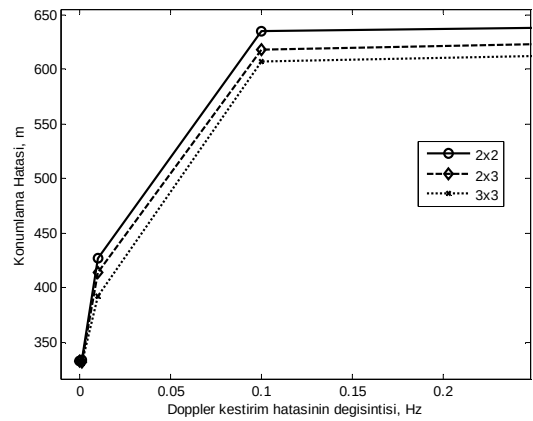
olarak verilir. Burada (x, y) hedefin gerçek pozisyonunu, (x_m, y_m) ise hedefin sistem tarafından bulunan pozisyonunu göstermektedir. Hata analizi için, Monte-Carlo metodu kullanılmış ve 1000 ölçüm sonucunun ortalaması alınmıştır. Şekil 7 ve 8 de, farklı konumdaki hedef için doppler kayması ölçümünde yapılan hatanın sistem performansı üzerine etkisi gösterilmiştir. İzgara boyutu olarak 1000m seçildiğinde hata çok büyük olmaktadır fakat ızgara boyunun düşürülmesiyle hata da giderek azalmaktadır.



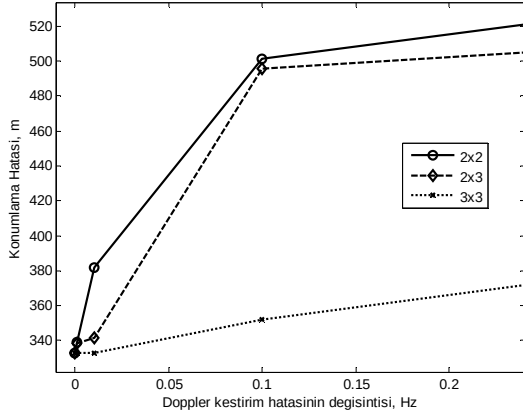
Şekil 7.a: Doppler kestirim hatasının hedef konumlama hatasına etkisi. İzgara boyutu = 1000m. Hedef pozisyon 1' de.



Şekil 7.b: Doppler kestirim hatasının hedef konumlama hatasına etkisi. İzgara boyutu = 1000m. Hedef pozisyon 2' de.

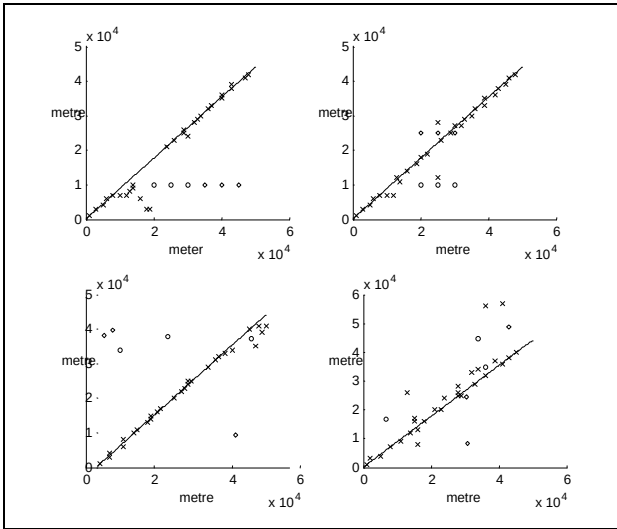


Şekil 8.a: Doppler kestirim hatasının hedef konumlama hatasına etkisi. İzgara boyutu = 250m. Hedef pozisyon 1' de.



Şekil 8.b: Doppler kestirim hatasının hedef konumlama hatasına etkisi. Izgara boyutu = 250m. Hedef pozisyon 2' de.

3.3. Farklı MIMO Radar Geometrileri



Şekil 9: Hedef konumlama için farklı 3x3 MIMO Radar geometrileri.

MIMO radar için önerilen yöntemin hedef konumlama performansı değişik geometriler için incelenmiştir. Bu karşılaştırmanın yapılmasında 3x3 MIMO radar esas alınmıştır ve ızgara boyutu olarak da 1000m seçilmiştir. Şekil 9 da bu geometriler görülmektedir. Bu şekillerde “●” ve “◆” sırasıyla vericilerin ve alıcıların konumlarını göstermektedirler. Hedef için bulunan konumlar ise “x” ile gösterilmiştir.

Şekil 9’ dan da görüleceği gibi sistem performansı alıcı ve vericilerin yerleştirildiği konumlara yani sistem geometrisine yüksek oranda bağlıdır. Alıcı ve verici birimlerinin birbirinden daha uzak konumlandırıldığı geometrilerin performansları daha iyidir. Bu durumda açılal yayılımdan dolayı performansın artması beklenen bir sonuçtur. Bu sebeple, daha yüksek hedef konumlama performansı elde etmek için alıcı ve verici sayısı artırılmalı ayrıca bu birimler birbirinden uzak konumlandırılmalıdır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, pasif bir radar sistemi için önerilen hedef konumlama yöntemi MIMO radar durumu için genişletilmiştir. Farklı MIMO radar geometrileri için hedef konumlama performansları incelenmiştir. Sadece alıcılar tarafından alınan sinyallerin frekansları ve alıcı ile hedef ve hedef ile verici arasındaki açı kullanılarak, hedefin konum bilgisinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

Hedefin konumu ızgara arama yöntemi ile bulunmaktadır, bu sebeple sistem performansı sistem geometrisinin yanında seçilen ızgara boyutuna da doğrudan bağlıdır. Izgara boyutunun azaltılmasıyla sistem performansının arttığı gösterilmiştir ancak unutulmamalıdır ki, ızgara boyutunu azaltmak arama zamanını da o oranda arttıracaktır. Hedef izleme uygulamasında, hedefin konumu bulunduğundan sonra hedefin bir sonraki konumunun tahmin edilmesiyle arama alanı ve buna bağlı olarak seçilen ızgara boyutu azaltılabilir. Böylelikle bir sonraki adımda oluşacak hatalarda azaltılmış olur. Sonuç olarak hedef izleme algoritmalarının performansları da artırılmış olur.

Önerilen hedef konumlama yöntemi özellikle doppler kaymasında meydana gelen ölçüm hatalarından çok etkilenmektedir. Doppler kaymasında yapılan 10^{-1} Hz mertebesindeki küçük hatalar çok büyük hedef konum hatalarına neden olmaktadır. Alıcı ve/veya verici sayısının artırılması ya da seçilen ızgara boyutunun düşürülmesi, doppler ölçümünde yapılan hataların sistem performansına olumsuz etkilerini azaltmaktadır.

Bu yöntemi kullanarak hedef izleme yapılması bundan sonraki çalışmamız olacaktır.

5. Kaynakça

- [1] E. Fishler, A. Haimovich, R. S. Blum, L. J. Cimini, D. Chizhik, and R. A. Valenzuela, "Spatial diversity in radars – models and detection performance", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 54, pp. 823-838, Mar. 2006
- [2] Y. T. Chan and F. L. Jardine, "Target localization and tracking from doppler-shift measurements", *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 15, pp. 251-257, July 1990
- [3] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1983.
- [4] B. Armstrong and B. S. Holeman, "Target tracking with a network of doppler radars", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, pp. 33-47, Jan. 1998