

Uçak Transponder Sinyalleriyle Uçak Pozisyonunun Hiperbolik Konumlandırılması

Cengiz PAŞAOĞLU¹, Nursel AKÇAM²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
 cengiz.pasaoglu@dhmi.gov.tr, ynursel@gazi.edu.tr
 (Geliş/Received: 06.05.2011; Kabul/Accepted: 07.06.2011)

Özet— Günümüzde havacılık teknolojisi hızla gelişmektedir. Hava sahası gözetim sistemleri de havacılık teknolojilerinin en önemli elemanlarıdır. Hava sahası gözetim sistemlerinin kullanım amacı, bir Hava Trafik Kontrolörü'nün gerekli yer ayırma minimumunu sağlaması için hava/yer aracının pozisyonunu belirlemektir. Başta geleneksel birincil ve ikincil gözetleme radarları olmak üzere kurulumu ve bakımı maliyetli ve zor olan gözetim sistemleri yerine, yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Multilaterasyon, geliştirilmekte olan hava sahası gözetim sistemlerinden birisidir. Bu sistemler, uçak transponderinden yayılan sinyallerin üç ya da daha fazla anten tarafından alınarak, söz konusu sinyallerin antenlere ulaşım zamanına göre farkının hesaplanmasıyla, uçağın pozisyonunun bulunmasına dayanır. Bu çalışmada söz konusu Multilaterasyon sistemleri ayrıntılı olarak incelenmiş, ulaşım zamanı farkı tekniği kullanılarak bir uçağın pozisyonu iki ve üç boyutlu olarak üretilip çizdirilmiş ve en küçük kareler yöntemi yaklaşımıyla söz konusu uçağın pozisyonu kestirilip simüle edilmiştir.

Anahtar Kelimeler— Hiperbolik konumlandırma, ulaşım zamanı farkı, en küçük kareler yöntemi, transponder

Finding an Aircraft's Position with Aircraft Transponder Signals Using Multilateration

Abstract— The aviation technology has been developing rapidly in the world as well as in our country. Airspace surveillance systems are the key elements in aviation technology since they have the major role in identifying the aircraft's position to enable air traffic controller to make the necessary separation among the air traffic for flight safety. Today, particularly instead of primary and secondary radars which require more effort to install and much cost to maintain, new technologies, with much lower cost and easy maintenance, are being developed. Multilateration is one of the examples of these new generation surveillance technologies which are being developed. In Multilateration, signals emitted from the aircraft's transponder are received by at least three ground stations and Time Difference of Arrival technique is used to find the location of the aircraft. In this study, the Multilateration systems are examined in detail, the aircraft's location is generated and drawn in two and three dimensions by using time difference of arrival technique, the location of the aircraft is estimated and simulated with the least squares method.

Keywords— Multilateration, time difference of arrival, least squares method, transponder

1. GİRİŞ

Hava sahası gözetim sistemleri, dünyada özellikle sivil uçuşların her geçen gün giderek artma eğilimi göstermesiyle büyük önem kazanmıştır. Gözetim unsuru ilk olarak manuel kontrolle başlamış (sesli pozisyon raporları), radarların geliştirilmeye başlamasıyla ivme kazanmıştır. Günümüzde de MLAT (Multilaterasyon - Multilateration) ve ADS-B (Otomatik Bağımlı Gözetim Yayını - Automatic Dependent Surveillance Broadcast) gibi daha ucuz ve daha doğru pozisyon bilgisi elde edilebilen sistemler üzerine yapılan çalışmalarla devam etmektedir.

İlk MLAT fikri ise 1990'lı yılların ortalarında ortaya çıkmıştır [1]. Transponderlerden 1090MHz'de gelen sinyaller kullanılarak, belirli bir sahaya yerleştirilecek antenler ile uçak pozisyonunun, SSR'lere (Secondary Surveillance Radar) nazaran çok daha doğru bir şekilde kestirilebileceği fark edilmiştir [2-6]. Havacılıkta en önemli unsurun güvenlik olması nedeniyle, günümüze kadar MLAT ile ilgili çalışmalar devam etmiştir. Ayrıca maliyet açısından çok daha kazançlı olduğu için, radarların yerini bu ve benzeri sistemlerin alması beklenmektedir. MLAT sistemleri işbirlikçi (uçaklarda transpondere ihtiyaç olduğu için) ve bağımsız (pozisyon sistem tarafından hesaplanarak bulunduğu için) gözetim sistemleridirler.

Bununla birlikte MLAT sistemler, uçak transponderinden yayılan sinyallerin, en az 3 alıcı anten tarafından yakalanıp Ulaşım Zamanı Farkı (TDOA - Time Difference of Arrival) yöntemi kullanılarak uçak pozisyonunun bulunması temeliyle çalışan sistemlerdir.

Bucher ve Mısra [7], üç boyutlu hiperbolik pozisyonlama sistem algoritması için VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu çalışmada 4 tane sabit alıcı istasyonu ile bir mobil telefonun pozisyonunu elde etmişlerdir. Brown, Hardiman ve Carter [8], MLAT pozisyonlama için Lineer olmayan kestirim teknikleri konusunda çalışmalar yapmışlardır. İnsansız sistemlerin kendi pozisyonlarını hesaplamaları ve GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi; Global Positioning System) benzeri hizmet verebilmeleri için geliştirdikleri bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Trofimova [9], MLAT konusunda hata araştırmaları ve sınıflandırmaları yapmıştır. Hata kestirimi çalışmalarını gerçekleştirmiştir.

2. MLAT SİSTEMLER VE UYGULAMA ALANLARI

MLAT son yıllarda çok kullanılan bir teknolojidir. Başlangıçta, askeri amaçlı olarak bir uçağın yerini, (birçoğu görünmek istemez) TDOA tekniğini kullanarak tespit etmek için geliştirilmiştir [3,10]. MLAT sistemlerde bir hava alanını, onun terminal sahasını ya da daha geniş alanlı hava sahalarını kapsamak için birçok yer istasyonu kullanılır.

MLAT, yer istasyonlarında bütün transponderi olan uçaklardan gelen (radar ve ADS-B aviyonikleri dahil) cevap sinyallerini alarak TDOA tekniğine dayalı olarak uçakların pozisyonlarını hesaplarlar.

Aslında sistem terslenmiş GPS sistemi olarak da düşünülebilir. Uçak uydu olarak düşünülürse antenler de hedef olabilirler [1,3].

Bir MLAT sistemi şu elemanlardan oluşur [3].

- Sorgu mesajlarını içeren iletici alt sistem, iletim fonksiyonu,
- Hedeften iletilen sinyalleri yakalayan alıcı anten dizisi,
- MLAT izlerini hesaplayıp üreten merkezi işlemci.

Eğer sistem, elemanları içerisinde uçak transponderlerini aktif hale getirmek için 1030 MHz'de sorgulayıcı bir alt sistem kullanılıyorsa sistem aktif MLAT, kullanılmıyorsa pasif MLAT olur. Dünyada MLAT sistemleri çeşitli amaçlarla kullanılırlar.

Bunlar:

- Havaalanı yüzeyi,
- Terminal alan,
- Geniş alan (Wide Area MLAT-WAM),
- Hassas pist gözetimi,
- Yükseklik gözetim birimi,

- Çevresel yönetim,
- Havaalanı operasyonları ve işletmesidir. [7-9].

MLAT uygulamaları, ülkelerdeki seyrüsefer sağlayıcı kurumların hava sahalarını kapsama alanı olarak güncellerken, genişletirken ya da yeni sahalar oluştururken tamamen yeni bir şekilde düşüncelerini sağlamıştır. Çünkü SSR radarlarla kıyaslandığında kapsamaların gerçekten çok zor, çetin ve maliyetli olabileceği hava sahalarında bu tür sistemler, hem daha ucuz, hem de daha kesin bilgiler verirler. Hatta radar kapsamalarında oluşabilecek boşluklar da bu sistemler sayesinde giderilebilir. Böylece uçaklar da daha rahat manevra yapabilirler [3-6].

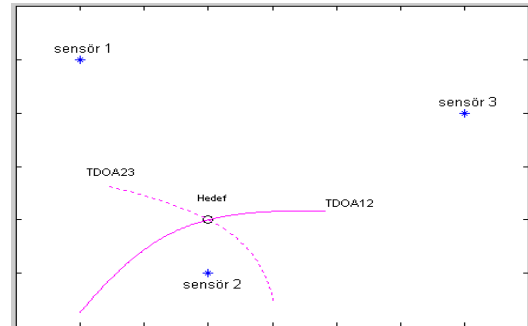
MLAT sistemler, sadece hava sahası kullanımını ve operasyonel verimliliği artıran sistemler olarak değil, aynı zamanda gözle görülür şekilde ekonomik fayda ve esneklik sağlayan sistemler olarak görülmelidirler.

3. ULAŞIM ZAMANI FARKI

Bu çalışmada TDOA tekniği, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak ele alınmış ve simüle edilmiştir.

3.1. İki Boyutlu Sistem

Hedef verici en az üç sensör tarafından alınabilecek sinyalleri gönderir. Her bir sensör gelen sinyalin ulaşım zamanını (TOA; Time of Arrival) kaydeder.



Şekil 1. Hedef, Alıcı Sensörler ve Hiperboller

İki sensör arasındaki ulaşım zamanı farkının oluşturduğu hiperbol üzerindeki herhangi bir noktada sinyali gönderen söz konusu verici bulunur (Şekil 1). TDOA tekniğinin temeli iki nokta arasındaki uzaklık formülüdür.

$$d = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (1)$$

Burada, x ve y birinci (bilinmeyen) noktamızın koordinatları x_1 ve y_1 ise ikinci (bilinen) noktamızın koordinatlarıdır.

Bilinmeyen bir yerde (x,y) ; bir vericinin olduğu, bilinen 3 noktada (x_1,y_1) MLAT alıcıların olduğunu düşünülün. Merkez M , sol L ve sağ R konumlar olarak ifade edilirse, vericiden yayılan sinyallerin her bir alıcı konumuna

ulaşma zamanı mesafenin sinyal yayılım hızı c 'ye (c genellikle ışık hızıdır) bölümüdür:

$$T_L = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_L)^2 + (y-y_L)^2}) \quad (2)$$

$$T_R = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2}) \quad (3)$$

$$T_M = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_M)^2 + (y-y_M)^2}) \quad (4)$$

M konumu koordinat sisteminin orijini kabul edildiğinden T_M

$$T_M = \frac{1}{c}(\sqrt{x^2 + y^2}) \quad (5)$$

biçiminde yazılır. Merkez konuma direkt ulaşan ve kenar konumlardan gelen sinyallerin ulaşım zamanı farkı τ sol ve sağ konumlar için,

$$\tau_L = T_L - T_M \quad (6)$$

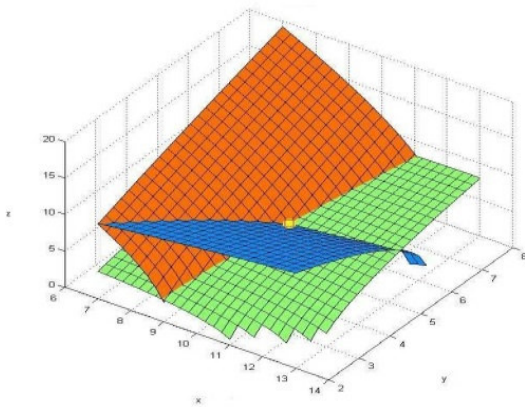
$$\tau_R = T_R - T_M \quad (7)$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki eşitliklerde; (x_L, y_L) sol alıcı konumunu, (x_R, y_R) sağ alıcı konumunu gösteren bu eşitliklerin her biri farklı bir hiperbolu ifade eder [1,7].

3.2. Üç boyutlu sistem

Üç boyutlu sistemde, iki boyuta ek olarak üçüncü boyut olan z boyutunu da düşünmek gerekir. Bu durumda vericiden yayılan sinyallerin oluşturduğu zaman farkı artık hiperbol değil hiperboloid şeklinde olur (Şekil 2) [2].

Bilinmeyen ve bulmak istenilen bir konumda (x,y,z) verici olduğu düşünülür. Ayrıca dört alıcıdan oluşan ve koordinatları bilinen bir MLAT sistemi düşünülür (merkez, sol, sağ ve yükseklik).



Şekil 2. Hiperboloidler ve Kesişimi

Yayılan sinyallerin her bir alıcı konumuna ulaşma zamanı

$$T_L = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_L)^2 + (y-y_L)^2 + (z-z_L)^2}) \quad (8)$$

$$T_R = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2 + (z-z_R)^2}) \quad (9)$$

$$T_Q = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_Q)^2 + (y-y_Q)^2 + (z-z_Q)^2}) \quad (10)$$

$$T_M = \frac{1}{c}(\sqrt{(x-x_M)^2 + (y-y_M)^2 + (z-z_M)^2}) \quad (11)$$

olarak elde edilir. Burada (x_L, y_L, z_L) sol alıcı konumunu, (x_R, y_R, z_R) sağ alıcı konumunu, (x_Q, y_Q, z_Q) 'de diğer bir alıcı konumunu göstermektedir. Her bir eşitlik farklı bir hiperboloidi gösterir [1]. Koordinat sisteminin orijini,

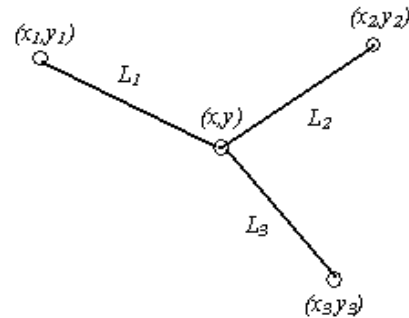
$$T_M = \frac{1}{c}(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \quad (12)$$

eşitliği ile elde edilir. Merkez konuma direkt ulaşan ve kenar konumlardan gelen sinyallerin ulaşım zamanı farkı ise; Eş. 6, Eş. 7 ve $\tau_Q = T_Q - T_M$ olarak bulunur.

4. EN KÜÇÜK KARELER METODU

En küçük kareler yöntemi, birbirine bağlı olarak değişen iki fiziksel büyüklük arasındaki matematiksel bağlantıyı, mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir denklem olarak yazmak için kullanılan, standart bir regresyon yöntemidir. Bir başka deyişle bu yöntem, ölçüm sonucu elde edilmiş veri noktalarına "mümkün olduğu kadar yakın" geçecek bir fonksiyon eğrisi bulmaya yarar (Şekil 3) [11].

Şekil 3'te görüldüğü gibi ölçülen üç adet uzaklık, $\bar{L} = (\bar{L}_1, \bar{L}_2, \bar{L}_3)$ olmak üzere üç adet vektör verir.



Şekil 3. En Küçük Kareler Metodu Problemi

\bar{X} pozisyon değişkenlerini içeren vektör, \bar{L} yapılan ölçümleri içeren vektör olmak üzere,

$$A\bar{X} = \bar{L} \quad (13)$$

biçiminde bir eşitlik yazılabilir [11]. Burada A, ölçümleri elde etmek için \bar{X} vektöründe kullanılan tasarım matrisidir. Ölçüm cihazlarının hassaslığındaki sınırlamalardan dolayı gereğinden fazla yapılan fiziksel ölçümler tutarsız sonuçlara yol açar. Bu da tek bir sonuç olmadığını gösterir, buradaki amaç tek bir sonuca yaklaştırmaya çalışmaktır ve kullanılacak metot ise en küçük kareler yöntemidir.

Sonuç vektörüne ilk yaklaşım \bar{X}_0 olarak ifade edilirse, \bar{X} vektörü,

$$\bar{X} = \bar{X}_0 + \bar{X} \quad (14)$$

gibi yazılabilir. Bütün ölçümler temel olarak kesin olmadığı için, ölçüm değerleri olan L uzunlukları kararsız sonuçlar verir. Dolayısıyla kararsızlıkları gidermek için ölçümlere artan vektörü \bar{V} eklenir [10]. Böylece Eş.13'teki \bar{L} , Eş.15'deki gibi yazılabilir.

$$\bar{L} = \bar{L} + \bar{V} \quad (15)$$

En küçük kareler yöntemi, en iyi \bar{X} yaklaşımının, kararsızlıkların toplamının karesini minimize eden yaklaşım olduğunu gösterir ($\bar{V}^T \bar{V}$ 'yi minimize eden yaklaşım gibi).

4.1. Ağırlık Matrisi

Ölçümlerin her biri (L elemanlarından oluşan) aynı doğruluğa sahip olmaz. Bu durum, her bir ölçüme bilinen bir ağırlık matrisi verilerek açıklanabilir. P elemanları bu ağırlıklar olan matristir [11]. Bu durumda en küçük kareler ölçütü,

$$\bar{V}^T P \bar{V} = \text{minimum} \quad (16)$$

olarak ifade edilir.

4.2. Doğrusallaştırma

$F(\bar{X}) = \bar{L}$ olup ve F'nin A matrisi tarafından temsil edilen \bar{X} 'in bir fonksiyonudur (Eş.13). Bu eşitlik:

$$F(\bar{X}_0 + \bar{X}) = \bar{L} + \bar{V} \quad (17)$$

olarak yazılabilir. Toplam ölçülen vektörler ve sonuç vektörleri (\bar{L} ve \bar{X}) arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel modeller,

$$F(\bar{X}, \bar{L}) = 0 \quad (18)$$

gibi genel forma sahiptir. Bu modelleri doğrusallaştırma, doğrusal olmayan F fonksiyonlarını kendi Taylor serisi doğrusal yaklaşımlarıyla değiştirerek, yani çözüm vektörüne ilk yaklaşım noktasını (\bar{X}_0) ve ölçüm

vektörünün (\bar{L}) ölçülmüş değerlerini genişleterek yazılabilir [11].

$$F(\bar{X}, \bar{L}) = F(\bar{X}_0, \bar{L}) + \frac{\partial F(\bar{X} = \bar{X}_0, \bar{L} = \bar{L})}{\partial \bar{X}} \bar{X} + \frac{\partial F(\bar{X} = \bar{X}_0, \bar{L} = \bar{L})}{\partial \bar{L}} \bar{V} = 0 \quad (19)$$

Eş.19, aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\bar{W} + A\bar{X} + B\bar{V} = 0 \quad (20)$$

Burada $\bar{W} = F(\bar{X}_0 - \bar{L})$ ve

$$A = \frac{\partial F(\bar{X} - \bar{X}_0)}{\partial \bar{X}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \frac{\partial F_1}{\partial X_2} & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_1} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \text{ 'dir.}$$

X bastırılmaya bağlı olan:

$$\bar{W} + A\bar{X} - \bar{V} = 0 \quad (21)$$

olur [11]. Bu bastırılmayı gerçekleştirmek için Lagranj çarpanları kullanılır.

4.3. Lagranj çarpanları

$f_2(x, y) = 0$ bastırılmasına bağlı olan $f_1(x, y)$ fonksiyonunu minimize etmek istenilirse üç aşamadan oluşan Lagranj metodu kullanılır [1].

1) Değişim fonksiyonu oluşturulur.

$$\phi = f_1(x, y) + kf_2(x, y) \quad (22)$$

Burada k Lagrange çarpanı olarak bilinen belirsiz sabittir.

2) Değişim fonksiyonunun türevleri sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (23)$$

3) Bu üç denklem çözülür.

$$f_2(x, y) = 0, \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

Böylece değişim fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\phi = \bar{V}^T P \bar{V} + 2\bar{K}^T (A\bar{X} - \bar{V} + \bar{W}) \quad (24)$$

Burada \bar{K} Lagranj çarpanlarının kolon vektörüdür ve uyum için 2 ile çarpılmıştır. Türevler sonucunda

$$P\bar{V} - \bar{K} = 0 \quad (25)$$

ve

$$A^T \bar{K} = 0 \quad (26)$$

elde edilir [11]. Eş. 24, Eş. 30 ve Eş.32 tek bir hipermatris şeklinde yazılabilirler (hipermatrislerin kendi elemanları da birer matristirler).

$$\begin{pmatrix} P & -1 & 0 \\ -1 & 0 & A \\ 0 & A^T & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{K} \\ \bar{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{W} \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (27)$$

Burada hipermatrisler,

$$\bar{X} = -(A^T P A)^{-1} A^T P \bar{W} \quad (28)$$

$$\bar{K} = P(A \bar{X} + \bar{W}) \quad (29)$$

$$\bar{V} = P^{-1} \bar{K} = A \bar{X} + \bar{W} \quad (30)$$

olur. A , P matrisleri ve \bar{W} vektörü bilinirse \bar{X} de çözülebilir.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Simülasyon çalışmaları iki boyutlu ve üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu olan (simulation2) programda, öncelikle kullanıcıdan sırasıyla alıcıların (x,y) koordinatlarının girilmesi istenir. İlgili koordinatlar girildikten sonra program kullanıcıdan, her bir ölçüm için yüzdelik hataları girmesini ister (gerçek hayattaki ölçümlerde de mutlaka bir hata payı vardır).

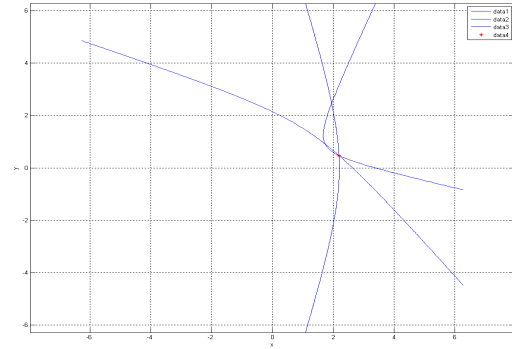
Üç boyutlu simülasyon çalışması için farklı çizdirim ve yer kestirim fonksiyonları hazırlanmıştır. Ayrıca alıcı anten sayısı üçten dörde çıkartılmıştır. Dört adet alıcı istenildiği için dört adet x,y,z koordinatı ve dört adet de hata oranı girilmesi istenir. Üç boyutlu simülasyon çalışmasında uçaktan, elde edilen z bilgisi de (yükseklik bilgisidir) kullanılmıştır.

5.1. İki Boyutlu Örnek

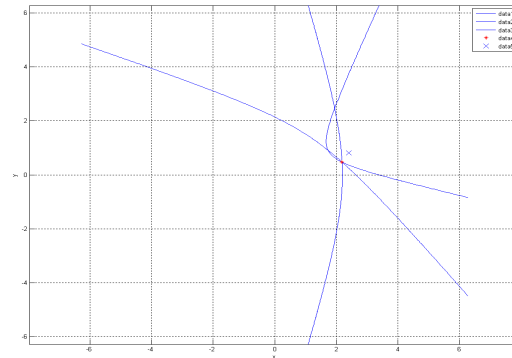
İki boyutlu simulation için, üç alıcının koordinatları sırasıyla (2,1), (6,0), (3,4) olarak girildiğinde, Şekil 4'de görülen Uçak pozisyonu ve Hiperbollerin kesişimi elde edilir.

Şekil 5'te ise ilk iterasyon sonucu gösterilmektedir. Şekilde, program ilk iterasyonu (pozisyon bilgisi), mavi renkte "x" işaretiyle çizdirmektedir.

İstenirse, sırasıyla bütün iterasyonlara bakabilir (Şekil 5 – Şekil 6), ya da sonuca geçebilir (Şekil 7).



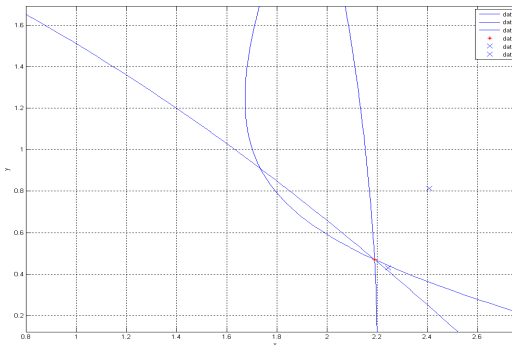
Şekil 4. Uçak Pozisyonu ve Hiperbollerin Kesişimi



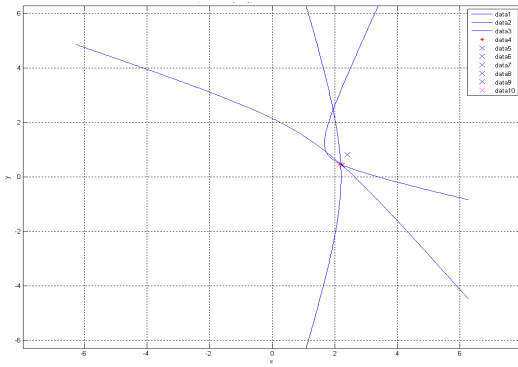
Şekil 5. İlk İterasyon Sonucu

Ayrıca uçağın gerçek pozisyonu, program tarafından hesaplanan pozisyon ve iterasyon sayısı da Matlab ana penceresinde yazdırılmaktadır.

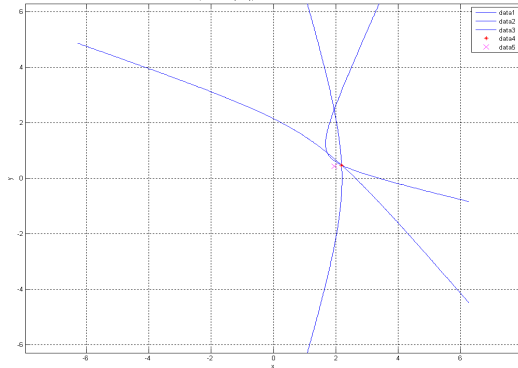
Şekil 7'de gerçek pozisyon kırmızı "x" ile (2,1896; 0,4704) olarak üretilmiştir. Ancak, girilen hatalar ile yapılan yaklaşımlar sonucunda, (2,1688;0,4650) değeri 5 iterasyon sonucunda hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi hata oranları düşük tutulduğu için, çok yakın bir değer elde edilebilmiştir. Aynı örnekte hatalar %10 seviyelerine çekilerek artırılır ve yaklaşım yapılırsa Şekil 8'de görülen sonuçlar elde edilir.



Şekil 6. İkinci İterasyon Sonucu



Şekil 7. Sonuçta Hesaplanan Pozisyon



Şekil 8. %10'luk Hata Oranları Sonucu Elde Edilen Pozisyon Grafiği

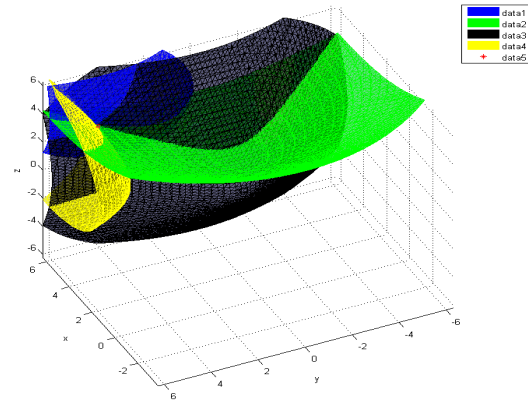
Şekil 8'den görüldüğü gibi, Şekil 7'ye nazaran daha hatalı sonuçlar elde edilmiştir. (2,1896; 0,4704) gerçek değerine karşılık program tarafından gerçekleştirilen yedi iterasyondan sonra elde edilen sonuç (1,9567; 0,4369)'dur. Bu sonuç, hata oranlarının artmasıyla uçağın pozisyonundan giderek uzaklaştığını göstermektedir.

5.2. Üç Boyutlu Örnek

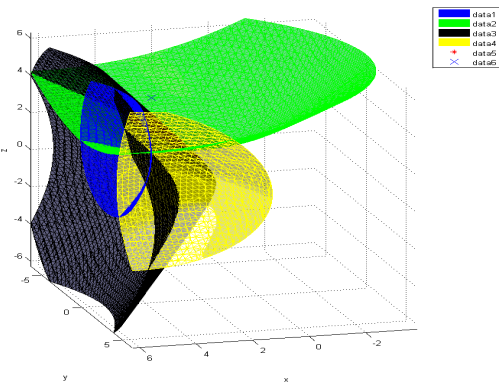
Üç boyutlu simulation için, alıcı koordinatlarının (z koordinatı dahil) üç boyutlu olarak girilmesi gerekir. Alıcı koordinatları sırasıyla (6,2,2), (1,0,3), (2,0,0) ve (3,5,1) olarak girildiğinde, Şekil 9'da görülen Uçak pozisyonu ve Hiperboloidlerin kesişimi elde edilir. Bu değerler ile ilk üretilen gerçek pozisyon bulunur. Şekil 10'da ilk iterasyon, Şekil 11'de ikinci iterasyon sonucu elde edilen kesişimler gösterilmektedir.

İterasyonlara devam edildiğinde sonuçta hesaplanan pozisyon ise Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu bölümde elde edilen bütün grafiklerin sağ üst köşesinde veri alanı yer almaktadır. Bu alanda şekillerde net olarak görülemeyen bilgiler açıkça görülmektedir.

Buna göre (5,1291; 4,6048; 3,5284) olan gerçek pozisyon 5 adet iterasyon sonucunda (5,1344; 4,6363; 3,5083) olarak elde edilmiştir.

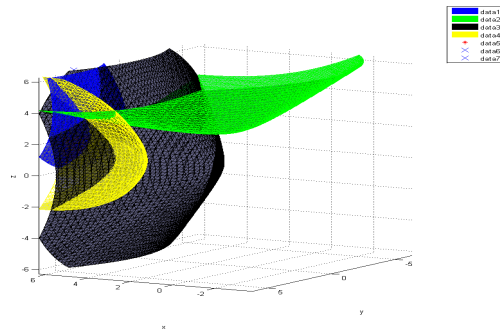


Şekil 9. Uçak Pozisyonu ve Hiperboloidlerin Kesişimi

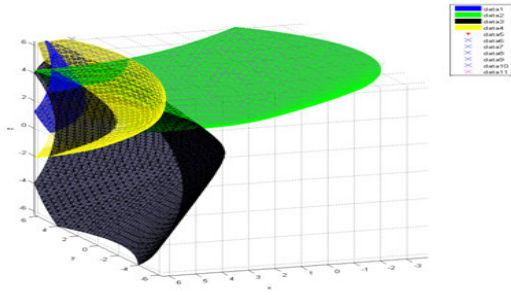


Şekil 10. İlk İterasyon Sonucu

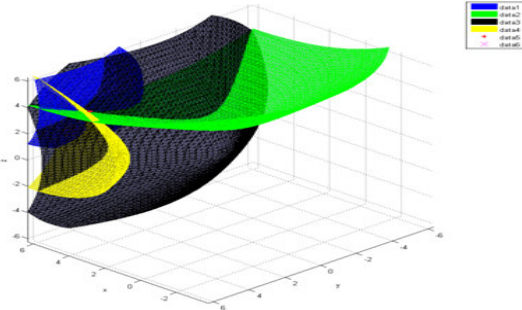
Aynı problem için, hatalar sırasıyla (10,15,5,10) alınıp yapıldığında Şekil 13'deki pozisyon elde edilir. Şekilden de görüldüğü gibi ilgili hata oranlarından dolayı 6 iterasyon neticesinde (5,4193; 5,1155; 3,3652) sonucu elde edilmiştir. Hata oranlarının artmasıyla gerçek değere olan yaklaşımdan gittikçe uzaklaşmaktadır [12].



Şekil 11. İkinci İterasyon Sonucu



Şekil 12. Sonuçta Hesaplanan Pozisyon



Şekil 13. % (10, 15, 5, 10)'luk Hata Oranları Sonucu Elde Edilen Pozisyon

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, son yıllarda havacılık sektöründe, özellikle gözetim amaçlı kullanılmaya başlayan ve ileride mevcut radarların yerini alması muhtemel olan MLAT sistemler incelenmiş, TDOA yöntemiyle uçak pozisyonu çizdirilmiş ve en küçük kareler metodu ile (iterasyonlarla) söz konusu pozisyona yaklaşım yapılarak pozisyon kestirilmeye çalışılmıştır. Simülasyonların sonunda uçak pozisyonu grafiksel olarak gösterilmiş, ayrıca aşama aşama yaklaşımlar çizdirilmiştir. Bununla birlikte sayısal olarak da gerçek uçak pozisyonu ve hesaplanan uçak pozisyonu, yapılan iterasyon sayısı ile birlikte çıktı olarak elde edilmiştir.

Çalışmada, göz ardı edilmemesi gereken önemli verilerden birisi, ölçüm hatalarıdır. Çünkü gerçek hayatta yapılan ölçümler, hatasız değildir. Bu nedenle, çalışmadaki simülasyonlarda kullanıcının kendi girebileceği yüzdeler hata oranları tanımlanmış ve bunlar rastgele olarak verilere dağıtılmıştır. Hata oranları artırılarak kıyaslama yapılmıştır. Hata oranları arttıkça gerçek pozisyondan gittikçe uzaklaşıldığı görülmüştür. Bu da hata dağılımlarının doğru yapıldığının bir göstergesidir.

Bu çalışmada kullanılan yaklaşım yöntemi en küçük kareler yöntemidir. Aynı şekilde uzatılmış Kalman Filtresi, Bias Regresyon yöntemi gibi yöntemler kullanılarak pozisyon bulma çalışmaları yapılabilir.

Dünyada birçok havaalanında/geniş alanlarda kullanımı, özellikle az maliyet oranları (radarlara göre beşte bir

oranda daha az bir fiyata mal olmakta), ve yüksek doğruluk değerlerinden dolayı yaygınlaşan MLAT sistemler üzerine yapılan çalışmalar da her geçen gün artmaktadır. Hali hazırda dünyada birçok havaalanında A-SMGCS (Geliştirilmiş Yer Hareketleri Rehber ve Kontrol Sistemi - Advance Surface Movement and Ground Control System); sistemlerinin bir parçası olarak kullanılmakta olan bu sistemler, artık geniş alanlarda (WAM) da yaygın olarak kullanılmaya başlanacaktır. Bu çalışmanın MLAT sistemler konusunda temel bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] W. Langhans, "Multilateration takes off in Europe", *Skyway The Eurocontrol Magazine*, 9(38), 32-34, 2005.
- [2] W. H. L. Neven, T. J. Quilter, R. Weeden, R. A. Hogendoorn, **Wide Area Multilateration Study**, Nationaal Lucht- Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Brussels, 2005.
- [3] Internet: Creativerge, Multilateration & ADS-B Executive Reference Guide, <http://www.multilateration.com>, 2011.
- [4] Y. T. Chan, K. C. Ho, "A Simple and Efficient Estimator For Hyperbolic Location", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(8), 1905-1915, 1994.
- [5] D. Ford, T. J. Quilter, M. Viggiano, "Multilateration: The Challenge Ahead", *Air Traffic Management*, 2(2), 26-29 2007.
- [6] A. Smith, R. Hulstorm, "Multilateration Technology is Well Suited to a Wide Range of Applications", *ICAO Journal*, 62(3), 12-14, 32-33 2007.
- [7] R. Bucher, D. Misra, "A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-dimensional Hyperbolic Positioning System", *VLSI Design*, 15(2), 507-513, 2002.
- [8] A. S. Brown, D. F. Hardiman, D. R. Carter, "Nonlinear Estimation Techniques for Positioning Using Multilateration", **18th International Technical Meeting of the Satellite Division**, Long Beach CA, 553-559, 2005.
- [9] Y. Trofimova, "Multilateration Error Investigation and Classification. Error Estimation", *Transport and Telecommunication*, 8(2), 28-37, 2007.
- [10] S. Arjun, M. Jibin, R. M. N. Mihun, M. S. Navin, R. Rajeev, **Tracking and Positioning System Main Project Design Report**, Amrita Institute of Technology&Science, Amritapuri, 1-12, 2007.
- [11] D. E. Wells, E. J. Krakiwsky, **Least Squares Point Estimators: Nonlinear Mathematical Models**, University of New Brunswick, Kanada, 101-116, 1997.
- [12] C. Paşaoğlu, **Uçak Transponder Sinyalleriyle Uçak Pozisyonunun Hiperbolik Konumlandırılması**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 2010.

