



Teknik Not

Global Konum Belirlemede Hata Kaynakları

Saffet ERDOĞAN , Mevlüt GÜLLÜ, Tamer BAYBURA, İbrahim TİRYAKİOĞLU

Afyon Kocatepe Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü

ÖZET

En basit ifadeyle Global Konum Belirleme (GPS); herhangi bir kullanıcının, uydu sinyallerinden yararlanarak, herhangi bir yerde ve anda, her türlü hava koşulunda, ortak bir koordinat sisteminde, konum (enlem, boylam, yükseklik), hız ve zaman bilgilerini elde etmesine olanak veren uzay teknolojisine dayalı bir radyo seyrüsefer sistemidir. Günümüzde hızlı gelişen teknoloji ile beraber, GPS çok kısa sürede klasik ölçme tekniklerinin yerini almıştır. Bunun nedeni, sistemin ekonomik, hızlı ve yüksek doğrulukla konum belirleyebilmesidir. GPS, tüm dünyada şimdiye kadar geliştirilmiş en düşük maliyetli presizyonlu konum belirleme sistemi olsa da yine de içerisinde önemli hatalar barındırmaktadır. GPS' in Navigasyon için kullanımında bu hataların bir kısmı ihmal edilirken, yüksek presizyon isteyen çalışmalarda ayrıntılı olarak modellenmeleri gerekir. Bu makalede GPS ölçümlerine etki eden hata kaynakları hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

Anahtar Kelimeler: GPS, Uydu, Alıcı, Sapmalar

1. GİRİŞ

GPS ölçümleri esnasında diğer tüm sistemlerde olduğu gibi çeşitli sebeplerle elde edilen sonuçları etkileyen bazı rastlantısal ve sistematik hatalar (bias) oluşmakta ve bu hatalar ve sapmalar değerlendirme esnasında giderilmeye çalışılmaktadır. Bu hatalar başlıca;

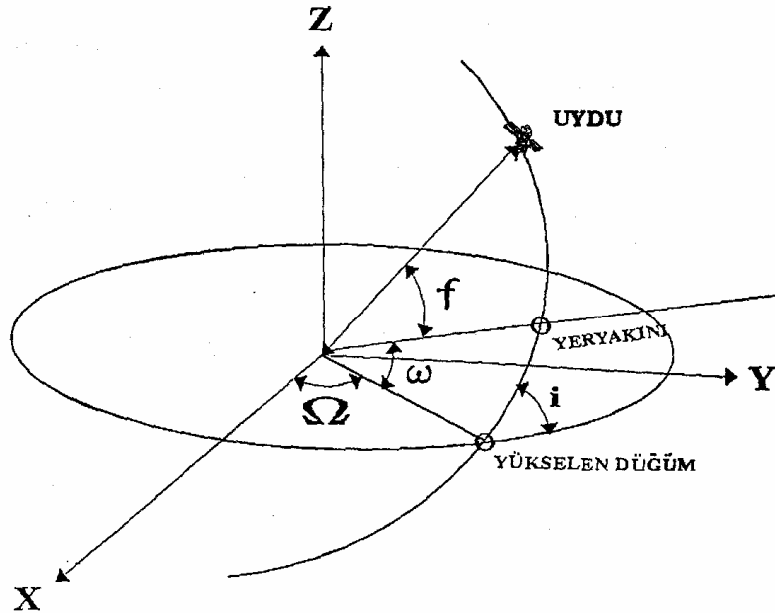
1. Uydulara Bağlı Hatalar
 - a. Yörünge modelleme sapmaları
 - b. Uydu saati modelleme sapmaları
2. Alıcıya Bağlı Hatalar
 - a. Alıcı saati sapmaları
 - b. Alıcı gürültüsü
3. Ölçülere Bağlı Hatalar
 - a. İyonosfer etkisi
 - b. Troposfer etkisi
 - c. Ambiguity
4. Diğer Hatalar
 - a. Sinyal yansımaları (Multipath)
 - b. Anten faz merkezi kayıklığı (Faz merkezi fiziksel bir yer değildir)
 - c. Faz sıçramaları (Cycle Slips)
 - d. Rastgele tesadüfi hatalar
 - e. İstasyon koordinatları hatalarıdır.

Bunun yanı sıra son yıllarda bilimsel amaçlı kullanılan uydu tekniklerinde çok önemli gelişmelerin olmasıyla beraber uydu sistemlerindeki bir çok hata kaynağı hemen hemen giderilmiştir. Örneğin; uydu saati hataları başlangıçta, uydu gözlemlerinde önemli bir hata kaynağı oluşturmaktayken bugün özellikle GPS uydularında atomik saatlerin kullanılması ile bu hata kaynağı göz ardı edilebilecek kadar azaltılmıştır. Bir diğer hata kaynağı olan Seçimli Doğruluk Erişimi (Selective Availability – SA) yani yetkisiz kullanıcıların GPS'in sağladığı doğruluklara ulaşmasını engellemek amacıyla ABD tarafından kasıtlı olarak kötüleştirilmesi de 01/05/2000 tarihinden itibaren sonlandırılmıştır.

2. UYDULARA BAĞLI HATALAR

Uydular yörüngelerinde, başta yeryuvarı, Güneş ve Ay'ın çekimleri olmak üzere birçok kuvvetin oldukça karmaşık etkileri altında hareket ederler. Uydu yörüngelerinin modellendirilebilmesi için düşünsel olarak yeryuvarının yoğunluğu (kütle dağılımı) homojen bir küre olduğu, uydunun kütesinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu, uydunun boşlukta hareket ettiği ve öteki gök cisimlerinin çekim ve radyasyonundan etkilenmediği varsayımlarından hareketle “normal yörünge” tanımı yapılır. Normal yörünge; odaklarından birinde Dünyanın yer aldığı bir elips şeklinde olup, uydunun zamana bağlı koordinatlarını bilinen 6 Kepler elemanı ile tanımlamaya olanak verir. Normal yörünge kavramı, karmaşık yörünge modellendirmesinde anlatım kolaylığı sağlaması, kısa süreler için kaba yörünge hesaplarına yeterli oluşu (uydu görünürlük diyagramları ve planlamalar) ve duyarlı yörünge hesapları için başlangıç değerleri olarak alınması bakımından önem taşımaktadır.

Uydu yörüngesi, gök koordinat sisteminde tanımlanmış olup X eksenini ilkbahar noktası (ekliptik ve ekvator düzlemlerinin arakesiti), Z eksenini ise gök kutbu ile belirler. Uydunun ekvator düzleminde geçtiği andaki N noktasına “yükselen düğüm” noktası; yeryuvarına en yakın olduğu P noktasına “yerberi” (yeryakını, perigee) noktası; yere en uzak olduğu A noktasına “yeröte” (yeruzağı, apogee) noktası adı verilir (Şekil.1).



Şekil 1. Kepler Yörünge Elemanları

Yörünge elemanları,

a : yörüngenin büyük yarı eksenini (yörüngenin büyüklüğünü),

e : yörüngenin eksantrisitesi (yörüngenin şeklini),

i : yörünge düzleminin ekvator düzlemine göre eğimi,
 Ω : yükselen düğümün rektasansiyonu,
 ω : yeryakını noktasının argümanı,
 f : gerçek anomali (Perigee doğrultusundan uyduya kadar ölçülen açı)

olarak tanımlanır. Normal Yörüngeyi belirleyen bu 6 elemandan yalnızca gerçek anomali (f), zamana bağlı olup öteki 5 eleman sabittir. Yörünge'nin gök koordinat sistemindeki konumunun (Ω, i), uzaydaki konumunun (Ω, ω, i) elemanları ile; uydunun yörünge düzlemindeki konumunun ise (a, e, f) elemanları ile tanımlandığı kolayca görülebilir. Ancak, yeryuvarının çekim alanında, ağırlık merkezinden yaklaşık 26570 km uzaklıktaki hareketleri sırasında GPS uydularının yörüngelerinde;

- Güneş, Ay ve diğer gök cisimlerinin çekim etkileri,
- Güneş radyasyon basıncı
- Yeryuvarının radyasyon etkisi (albedo),
- Yeryuvarının basıncının dolaylı etkisi,
- Katı yer kabuğu, okyanus ve atmosferik gel-git etkileri,
- Atmosferik sürtünme,
- Rölativite etkileri,
- Kutup gezinmesi,
- Rezonans hızlanması
- Yer gravite alanının merkezsiz terimi

gibi bozucu kuvvetler nedeniyle anlık hızlanmalar (değişimler) olur. Uydulara etki eden bu kuvvetler, genellikle normal yörüngeden sapmalar olarak modellenirler. “gravite alanının merkezsiz terimi” dışındaki diğerleri mutlak anlamda oldukça küçüktür.

3. ÖLÇÜLERE BAĞLI HATALAR

GPS uydularından yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki boşlukta ilerlerler. Bu sinyaller atmosfere girdiğinde içinden geçtikleri ilk tabaka iyonosferdir. İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkisi Toplam Elektron Yoğunluğu (TEC) ile ifade edilmektedir. Diğer bir deyişle, atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı, elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çok olmaktadır. İyonosferik değişimi ifade eden TEC zamana ve konuma bağlı olarak değişim göstermektedir. TEC, uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca m^2 deki toplam elektron sayısı (elektron/ m^2) olarak da ifade edilebilir. TEC genel eğilimini belirlemek için birçok araştırma yapılmış olup günümüzde bu parametrelerin davranışı özellikle Türkiye'nin de içinde bulunduğu orta enlem bölgelerinde oldukça iyi bir şekilde bilinmektedir. Ancak, Ekvator'da ve gerekse yüksek enlem bölgelerinde bu bilgiler henüz tam değildir.

Genel olarak dünyanın büyük bölümünde TEC değeri yerel zamanla yaklaşık olarak saat 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır. Diğer taraftan TEC ile doğru orantılı olan iyonosferik etki yerel zamana göre gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Bu ise, gündüz oluşan etkinin yaklaşık %10-20'si kadardır. Gece süresince olan ortalama iyonosferik etki ~3 m, gündüz ise ~15 m kadardır. Uydu-alıcı arasındaki uzaklığa iyonosfer nedeniyle getirilecek olan düzeltme kısmı ve ekinoks aylarında (Mart, Nisan, Eylül, Ekim) maksimum olup yaz aylarında ise minimum değere ulaşmaktadır. Ayrıca, jeomanyetik konuma bağlı olarak ekvatorun ± 15 derece enlemlerinde TEC değeri maksimum değere ulaşmakta olup ekvatordaki iyonosferik etkiler orta enlem bölgelerine göre iki kat daha fazladır.

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçülerine olan etkileri farklıdır. Diğer bir ifadeyle kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) söz konusu iken faz ölçüleri için faz hızlanması (phase advance) söz konusudur. İyonosfer, radyo dalgalarını dağıtıcı (dispersive) bir özelliğe sahip olup bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına bağlı olarak değişim gösterir. Dolayısıyla bu etkiler

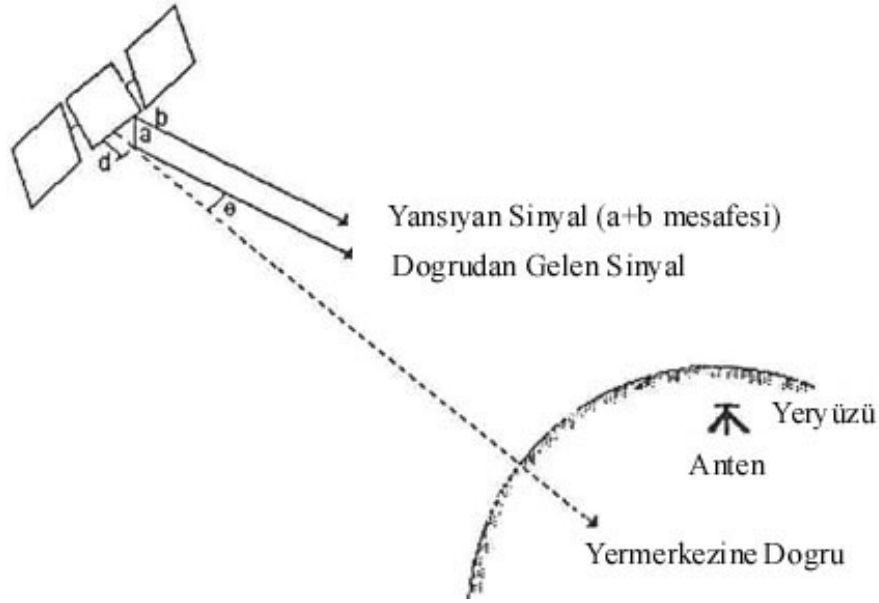
modellendirilirken öncelikle iyonosferin kırılma indisinin belirlenmesi ve daha sonra da uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca integral alınarak ölçülere getirilecek olan düzeltmenin bulunması gerekmektedir.

İyonosferik etki giderildikten sonra sıra Troposferik etkinin giderilmesine gelmiştir. Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda ~8 km, ekvatorunda ~18 km'dir. Troposferdeki hata 1.9 m ile 2.5 m arasındadır. Troposfer uydu sinyallerinde gecikmeye neden olur. Troposfer 30 Ghz'in altındaki radyo frekansları için saçıcı olmayan bir özelliğe sahiptir. Yani troposferden geçen uydu sinyalleri frekansa bağımlı değildir. L1 ve L2 gibi iki farklı uydu sinyalinin kombinasyonu ile troposferik gecikme etkisini gidermek mümkün olmaz. Bu nedenle troposferik gecikmeyi belirlemek için troposferik modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden bazıları Saastamoinen (1973), Hopfield (1977) ve Goad Goodman (1974)'dür. Bu modeller yardımıyla troposferik gecikme etkisi giderilebilmektedir. Troposferik gecikme elde edilen faz uzaklığından çıkarılır. Troposferik gecikmenin (kırılmanın) yaklaşık %90'ı kuru bileşen ve geri kalan %10'luk kısmı ise ıslak bileşenden oluşmaktadır. Yerel zenit doğrultusundaki kuru bileşen, hidrostatik denge ve ideal gaz kanununa uyduğu kabul edilerek, yalnızca basınç ölçü değeri kullanılarak yeterli doğrulukta belirlenebilmektedir. Ancak aynı durum ıslak bileşen için söz konusu değildir. Çünkü, atmosferdeki su buharı dağılımı yeterli doğrulukta belirlenmemektedir. Su buharı basıncı dağılımı çok değişken olup bu değişimler kuru bileşene göre yaklaşık üç kat daha fazladır. Ayrıca, ıslak bileşen ile arazide yapılan meteorolojik ölçüler arasında çok az korelasyon olduğu için arazide yapılan bu ölçülerle gerçeğe yakın sonuçlar elde edilememektedir. Islak bileşenin modellendirilmesindeki bu zorluklardan dolayı halen yoğun çalışmalar devam etmektedir.

4. MULTIPATH

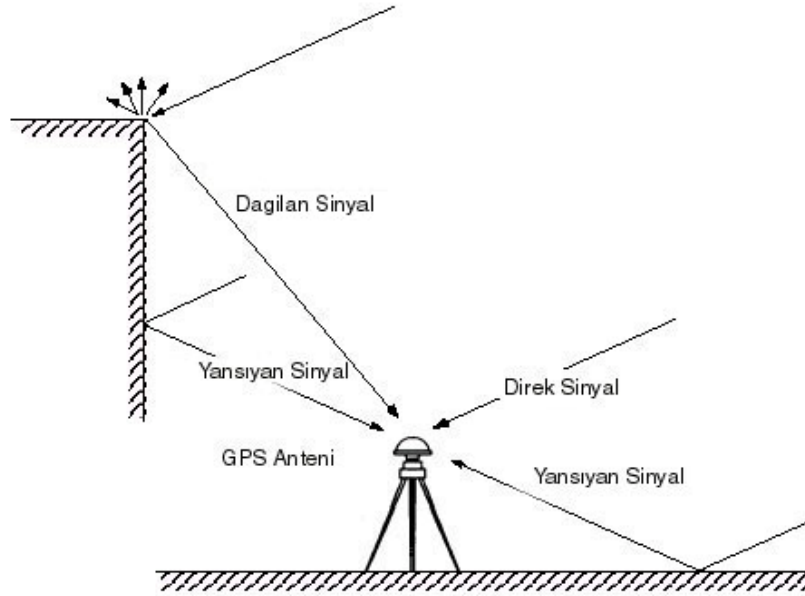
Multipath, yüksek hassasiyet isteyen GPS uygulamalarında etkin bir hata kaynağı olmuştur. Diferansiyel tekniğin kullanımı ile bilinen pek çok hata kaynağı giderilebilir ancak multipath kaynaklı hatanın giderilmesinin o kadar da kolay olmadığı kanıtlanmıştır. Çevresel nesnelere, antene gelmeden önce sinyallerin yansıma ve yayılmasına yol açması multipath'e neden olur. Orijinal, normalde gitmesi gereken yoldan antene ulaşan sinyallerle birlikte multipath ile sapmış sinyaller alıcının korelasyon fonksiyonunda yanlışlığa ve mesafe ölçümlerinde hataya yol açabilir.

Sinyal yansıması uydu ve antenin her ikisi için de söz konusudur. Başka bir deyişle sinyal yansımalarını, uyduların neden olduğu yansımalar (satellite multipath) ve alıcı antenin çevresindeki yüzeylerin neden olduğu yansımalar (antenna multipath) diye ikiye ayırmak mümkündür. Bunlardan uyduların neden olduğu etkiler (Şekil.2.) özellikle yerel ağlardaki orta uzunluklu bazlarda (~100-200 km) bazın her iki ucundaki anten için de aynı büyüklüğe sahip olacağından göreceli konumlandırma yöntemi kullanıldığında büyük ölçüde elimine olacaktır.



Şekil 2. Uyduların Neden Olduğu Yansımalar

Anten çevresinin neden olduğu yansımaların olası kaynakları ise yapılar, araçlar, su yüzeyleri (deniz, göl) ve diğer yansıtıcı yüzeylerdir (Şekil.3). Bu sinyal yansımaları faz ve/veya kod (pseudo-range) gözlemlerini, geçiş anındaki uydu-alıcı geometrisine bağlı olarak sistematik, zamana bağlı sinüzoidal sinyaller şeklinde bozarlar. Sinyal yansıma etkisinin büyüklüğü dalga boyu ile orantılı olup bu etkinin neden olduğu hata P-kod (Precise/Protected-Code) için taşıyıcı dalga fazına göre yaklaşık yüz kat daha fazladır.



Şekil 3 Anten Çevresinin Neden Olduğu Yansımalar

Bu etkinin kod (pseudorange) ve faz gözlemlerindeki büyüklüğü için birçok araştırma yapılmış, normal yansıtma ortamında ~1 m ve yüksek yansıtma ortamlarında ise ~5 m.lik değişimler gözlenmiştir. Tüm bu sonuçlar ise multipath etkisinin kod gözlemleri için daha büyük olduğunu göstermektedir. Çok kötü çevre koşullarında multipath, kod gözlemlerinde kesikliklere neden olabilmektedir. Bu ise özellikle faz başlangıcı bilinmeyenlerinin çözümünde kod/faz kombinasyonu kullanılması durumunda (örneğin fotogrametrik amaçlı GPS gözlemlerinde) daha da önem kazanmaktadır.

5. ANTEN FAZ MERKEZİ KAYIKLIĞI

Bir faz ölçüsünün doğruluğu uydu anteni faz merkeziyle de ilgilidir. Uydunun gövdesine çarpan Güneş ışınlarının bir kısmı emilir, bir kısmı ise yansıtılır. Emilen ve yansıtılan ışınlar “Güneş’in Radyasyon Basıncı (GRB)” adı verilen bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvetin büyüklüğü ışınların yoğunluğu ve uydu yüzeyine bağlıdır. GPS uyduları oldukça yüksek yörüngeli olduklarından GRB’den diğer bozucu etkilere göre oldukça fazla etkilenirler. Uydu sinyalinin yayınlandığı nokta (uydu anten faz merkezi) uydunun gövdesine göre tanımlanan bir koordinat sisteminde, uydu fırlatılmadan önce, duyarlı olarak belirlenir.

Uydular günde iki kez yaklaşık bir saate varan bir süre boyunca yeryuvarının gölgesinde kalırlar. Bu sürede uydu antenin yeryuvarına doğru yöneltiminde ve Güneş panellerinin Güneş’e döndürülmesinde bazı belirsizlikler ortaya çıkar. Uydunun Güneş ışınlarından yeryuvarının gölgesine giriş ve çıkışına kadar sürekli biçimde değişen ısı ve çekim alanı değerleri modellendirilebilir. Gölgede iken hareketsiz ve kontrolsüz kalan Güneş panellerinin çıktıktan sonra Güneş’e yöneltimi en az 20 dakika sürer.

GPS antenlerinde sinyalin kaydedildiği elektronik merkez “ortalama faz merkezi” olarak tanımlanır. Bu merkez, firmalar tarafından anten üzerinde geometrik olarak belirlenirse de pratikte (ölçme anında) bu nokta, “anten faz merkezi kayıklığı” denen değişimler gösterir. Uydu hareket ettikçe hem sinyalin algılandığı nokta (anlık faz merkezi) ortalama faz merkezine göre yer değiştirmekte, hem de antende ölçülen faz değerinde değişim olmaktadır. Fazdaki değişim, anten geometrik merkezi ile uydu ekseninde görünen bir yer değiştirme anlamında olup büyüklüğü anten-uydu ekseninin, antenin düşeyi ile yaptığı açığa bağlıdır. Ölçü sırasında uyduların sayı ve geometrik dağılımları ne kadar çok ve rastlantısal ise anlık faz değişimlerinin büyüklük ve yönleri o kadar az bozucu etki yapacağından ölçü süresinin uzatılması yararlı olacaktır.

Yukarıda anlatılan hataların dışında; gözlenen uyduların yüksekliğinin de iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır. Örneğin, düşük yükseklik açılarında iyonosferik etki gündüz ve gece için verilen değerlerin yaklaşık üç katı kadardır. Yani gündüz ~10 m, gece ise ~50 saniyeye kadar çıkmaktadır. Yine İyonosferin GPS ölçülerinde neden olduğu sorunlardan, özellikle uydudan yayınlanan sinyallerin alıcı (receiver) tarafından alınması sırasında oluşan sinyal kesiklikleridir. Bu ise ölçülen taşıyıcı dalga fazının sürekliliğini engellediğinden faz kesikliklerine (Cycle Slips) neden olmaktadır. Bu da GPS ölçülerinin değerlendirilmesi (postprocessing) aşamasında oldukça yorucu ve zaman alıcı işlemler gerektirmektedir. Eğer ölçüler tek-frekanslı (single-frequency) alıcılar kullanarak yapılmışsa sorun daha da karmaşık hale gelmektedir. Dolayısıyla, yüksek doğruluk isteyen jeodezik ve jeodinamik amaçlı GPS ölçülerinde iyonosferik etkinin dikkate alınması daha büyük bir önem kazanmaktadır.

5. SONUÇLAR

Tüm diğer ölçü sistemlerinde olduğu gibi, GPS ile konum belirlemede de elde edilen büyüklüklerin doğruluğunu sınırlayan birçok sistematik ve rastlantısal hatalar vardır. Görelî konumlama yöntemi kullanılması durumunda bile bu hataların bir kısmı (troposferik ve iyonosferik etki, sinyal yansıma etkisi, anten faz merkezindeki değişimler, sabit olarak alınan nokta koordinatlarındaki hatalar vb.) giderilememektedir. Dolayısıyla, bu sistematik ve rastlantısal hataların GPS ile gözlenen büyüklükler üzerindeki etkileri iyi bilinmelidir.

KAYNAKLAR

B.,Hannah ve B.Eng., “Modelling and Simulation of GPS Multipath Propagation”, PhD. Queensland University of Technology, 2001.