

GPS ile konum belirlemede stokastik modellerin etkileri

M. Tevfik ÖZLÜDEMİR^{*}, Tevfik AYAN

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

GPS ölçmelerindeki en önemli hata kaynakları multipath etkisi ve gecikme etkisidir. Son yıllarda bu hataları en aza indirme amacıyla yapılan araştırmalar ağırlıklı olarak, yeni troposferik gecikme modellerin üretilmesi, multipath etkisinin modellenmesi ve yeni stokastik modellerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada sinyal kalitesine dayalı bir stokastik model ve bu modelin nokta konumlarının belirlenmesi üzerindeki etkileri incelenmektedir. Temel sinyal kalitesi ölçütü olan sinyal-noise oranına dayalı olan bu model GPS ölçüleri üzerinde uygulanmış ve geleneksel eş-ağırlıklı değerlendirme modeli ile karşılaştırılabilir olarak analiz edilmiştir. Bu modelin uygulanmasıyla daha iyi koordinat çözümleri elde edilmiştir. Sonuçlar, ayrıca multipath etkisinin birbirini izleyen günlerdeki tekrarlanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: GPS, stokastik model, sigma- ϵ .

Effects of stochastic models in GPS positioning

Abstract

The most important error sources in GPS measurements are the multipath effect, taking place when the electromagnetic wave reflects from the reflecting surfaces around the receiver, and the delay effect that occurs during the propagation of the wave through the troposphere because of the refraction effect. In recent years, many scientists have been doing research for minimising the effects of these error sources. These researches mainly focus on the development of the mapping functions produced for modelling the tropospheric delay with respect to the meteorological data or mathematical methods, modelling of the multipath effect and development of new stochastic or weighting models, which enable us to process the low elevated GPS observations too. In this study a signal quality based stochastic model and its impact on the point positioning are investigated. This model is the Sigma- ϵ model, which is based on the signal-to-noise ratio, which is the basic signal quality measure. This model has been applied on some GPS measurements. It has been shown that through the application of this model better coordinate solutions are obtained. The results also show that this model characterises the day-to-day repeatability of the multipath effect.

Keywords: GPS, stochastic model, sigma- ϵ .

^{*}Yazışmaların yapılacağı yazar: M. Tevfik ÖZLÜDEMİR. tozlu@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 65 60.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Sinyal kalitesine dayalı stokastik modellerin GPS ile konum belirleme üzerindeki etkilerine ilişkin bir inceleme" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 16.10.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 25.12.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Bir navigasyon sistemi olarak kuruluşundan bu yana, Global Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System–GPS) uygulamalarında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. GPS, günümüzde trekking ya da dağcılık gibi günlük aktivitelerden, yerkabuğu hareketlerinin ya da mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesi gibi yüksek doğruluk gerektiren çalışmalara varana dek bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. GPS uygulamalarındaki hızlı gelişmeler GPS donanımında çeşitli performans gereksinimlerine yol açmıştır. Sonuç olarak, alıcı kalitelerindeki önemli artış ve bilgisayar teknolojisindeki olağanüstü ilerlemeye bağlı olarak gerçekleşen veri analizindeki ilerlemeler, GPS tekniğinin yüksek doğruluk gerektiren bir çok mühendislik ölçmesinde kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmelere örnek olarak, alıcı boyutlarının giderek daha da küçülmesi, bunun yanında veri kayıt ve güç kapasiteleri ile sağladıkları doğruluğun artması ve kinematik ya da hızlı statik ölçme modları gibi analitik tekniklerdeki yenilikler verilebilir. Bu ilerlemeler jeodezi alanındaki bir çok çalışmada GPS tekniğinin birincil teknik olarak kullanılması sonucunu doğurmuştur.

Bu gelişmelere koşut olarak, artan orandaki daha yüksek doğruluk talebi, GPS ile konum belirleme stratejileri, ilgili hata kaynakları ve bu hataların azaltılmasına ya da elimine edilmesine yönelik geliştirilen yöntemlerin yoğunluğuna anlaşılması ihtiyacını ortaya çıkartmıştır. Uygun değerlendirme algoritmalarının, yüksek kaliteli alıcı ve antenlerin kullanılması ve ölçme sürelerinin uzun tutulmasıyla doğruluğu yüksek sonuçlar elde edilebilmektedir. Günümüzde GPS tekniği ile konum belirlemede santimetrenin altındaki bir düzeyde doğruluk sağlanabilmektedir. Konum belirleme doğruluğunun artışına yol açan bir başka etmen ise Selective Availability (SA) uygulamasının 1 Mayıs 2000 tarihinde iptal edilmesidir.

Bununla birlikte, kimi zaman ulaşılan doğruluk tatmin edici olamayabilmektedir. Değerlendirmelerin sonuçları ortak hata

kaynaklarından etkilenmektedir. Mutlak konum belirlemede elde edilen doğruluğun SA uygulamasının kaldırılması sonrasında arttığı bilinen bir gerçektir. Bağıl konum belirleme açısından doğruluk olgusunu ele aldığımızda, uydu yörünge hataları, uydu saat hataları gibi bilinen hataların pek çoğunun neredeyse tamamen elimine edildiğini ve bir referans noktasına göre çok yüksek doğruluklu konum ve hız bilgisinin elde edilebildiğini söyleyebiliriz. Böylece, sonuçları en çok etkileyen hata kaynaklarının troposferik gecikme etkisi, multipath ve sinyal difraksiyonu etkileri olduğu vurgulanabilir.

Troposferik gecikme, refraksiyon etkisi nedeniyle dalganın troposferden geçişi sırasında gerçekleşir. GPS ölçmelerinde, bir çok uygulamada hidrostatik ve ıslak bileşenlerine ayrılarak ele alınan troposferik yayılma gecikmesi, tahmini atmosfer profillerine dayanan uygun troposferik modellerin kullanılmasıyla belirlenebilir. Multipath, elektromanyetik dalganın, konumu belirlenecek noktaya kurulu alıcının çevresindeki yansıtıcı yüzeylerden yansması sonucunda gerçekleşir. Multipath özellikle de kısa mesafeli statik uygulamalarda ciddi bir problemdir. Çünkü bu uygulamalarda noktalar birbirlerine yakın oldukları için aynı çevresel koşullardan etkilenmektedirler. Multipath etkisini elimine etmenin bir yolu, multipath azaltma tekniklerinin geliştirilmesidir. Sinyal difraksiyonu etkisi ise, GPS uydusu ve anten arasındaki görüş çizgisinde, sinyalin alıcıya ulaşmasını tamamen engellemeyen, ancak sinyal gücünü azaltan bir engel bulunması durumunda gerçekleşir. Multipath ve sinyal difraksiyonu etkileri uygun stokastik modellerin GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde kullanılmasıyla en aza indirilebilir.

Bütün bunların sonucunda, son dönemde yapılan GPS konulu araştırmalar ağırlıklı olarak yukarıda sözü edilen hataların en aza indirilmesini ve dolayısıyla konum belirleme doğruluğunu artırmayı sağlayan farklı algoritmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Yukarıda da vurgulandığı gibi, bu araştırmalar üç grup

halinde sınıflandırılabilir: troposferik modellerin (tropospheric mapping function), bazı stokastik modellerin ve multipath azaltma tekniklerinin geliştirilmesi.

Atmosferik etkilerin modellenmesine yönelik araştırma çalışmalarının başlangıcı 20. Yüzyılın ortalarına dek uzanır. GPS ölçmelerinde Hopfield ve Saastamoinen modelleri, sistemin devreye girmesinden bu yana ana atmosferik modeller olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda, çoğu Marini atmosferik modeline dayalı olarak bazı yeni atmosferik modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin bir çoğu VLBI (Very Long Baseline Interferometry–Çok Uzun Bazlı Enterferometri) verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olsalar da, GPS değerlendirme algoritmalarına da başarıyla uyarlanmışlardır. Bu modeller çok miktarda atmosferik verinin kullanılmasıyla üretildikleri, dolayısıyla atmosferi daha iyi ifade edebildikleri için geleneksel atmosferik modellere göre, özellikle de düşük eğim açılı ölçüler için daha kullanışlıdır. Janes ve diğerleri (1991), MacMillan ve Ma (1994), Mendes ve Langley (1994), Niell (1996) ve Bisnath ve diğerleri (1997) troposferik gecikme etkisini modelleyen bu atmosferik modelleri kapsamlı olarak analiz etmişlerdir. Bu modeller bir çok uygulamada da kullanılmıştır. Örneğin, Rothacher ve diğerleri (1998) bu modellerden birini (Niell, 1996) bölgesel bir ağda toplanan GPS verileri üzerinde kullanmış ve daha iyi koordinat çözümü elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu tür atmosferik modellerin kullanımı, özellikle de uzun bazlar için oldukça önemlidir.

GPS kapsamındaki araştırmalarda yaygın olarak üzerinde yoğunlaşılan bir başka konu ise, düşük eğim açılı ölçülerin de değerlendirilebilmesine olanak sağlayan stokastik modeller ya da ağırlık modellerinin geliştirilmesidir. Böylece, minimum eğim açısının 15° 'den 5° 'ye düşürüldüğünü varsayarsak, değerlendirmede kullanılan ölçü sayısı yaklaşık %13 oranında artırılmış olmaktadır. Geleneksel olarak, GPS ölçmeleri dengeleme işlemi eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmektedir. Uygun olarak seçilen bir ağırlık algoritması ile, troposferik

gecikme etkisi ve multipath gibi hatalardan daha fazla etkilenen düşük eğim açılı veriler de değerlendirilmede kullanılabilir. Bu ağırlık algoritmaları, uydu eğim açısı ya da bazı sinyal kalite ölçütlerine dayanmaktadır. Günümüzde GPS ölçülerinin stokastik modellendirilmesi yönündeki çalışmalar başlangıç aşamasında kabul edilse bile, geçtiğimiz yıllarda bu konuda son derece değerli katkı sağlayan çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Jin ve de Jong (1996) ölçmelerin varyans değerlerinin eğim açısına bağımlılığını irdelediler. Teunissen ve diğ. (1998), Tiberius (1999), ve Tiberius ve Kenselaar (2000) gerek kod, gerekse de taşıyıcı faz ölçülerinin zaman korelasyonları ve çapraz korelasyonlarına dayanan stokastik modeller geliştirmişlerdir. Bu konudaki bir diğer yaklaşım ise, stokastik model algoritmalarının geliştirilmesinde sinyal kalite ölçütlerinin kullanılmasıdır. Hartinger ve Brunner (1998a, 1998b), Wang ve diğerleri (1998), Brunner ve diğerleri (1999), Lau ve Mok (1999), Satirapod ve diğerleri (2001) tarafından yapılan çalışmalar bu yaklaşıma verilebilecek örneklerdir. Bu çalışmalar GPS verilerinin değerlendirilmesine yönelik uygun ağırlık algoritmalarının uygulanabilirliğini ve gerekliliğini ortaya koymuştur.

GPS çalışmalarındaki bir diğer sıcak konu olan multipath azaltma tekniklerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalara örnek olarak, Ge ve diğerleri (2000) ve Han ve Rizos (2000) tarafından sürekli GPS istasyonlarında yapılan ölçmelerde kullanılmak üzere, bazı filtreleme algoritmalarına dayalı olarak geliştirilen teknikler verilebilir. Bir diğer örnek, Ray (2000) tarafından gerçekleştirilen GPS kod ve taşıyıcı faz üzerindeki multipath etkisinin bir çoklu anten sistemi kullanılması yoluyla azaltılması konulu çalışmadır. Bu tekniklerin kullanımı, özellikle de sabit GPS izleme istasyonları açısından önem taşıyor. Ayrıca bu tekniklerin, uygun atmosferik model ve stokastik modellerle birlikte kullanımının konum belirleme doğruluğunu artıracığı ise açıktır.

Bu çalışmada, sinyal kalitesine dayalı olan ve çift fark GPS taşıyıcı faz ölçüleri için geliştirilmiş bir stokastik model kısa baz

uzunluklarında toplanmış GPS verisi üzerinde değerlendirilmiştir. Bu modelin ve veri değerlendirme stratejisinin uygulanma amacı daha önce belirtildiği gibi multipath ve troposferik gecikme etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin azaltılmasıdır. Buradaki temel amaçsa, elde edilen çözümlerin tekrar edilebilirliğinin ve geleneksel eş ağırlıklı değerlendirme yaklaşımı ile ölçülerin ağırlıklandırıldığı modellerin karşılaştırılması yoluyla irdelenmesidir.

Stokastik model

GPS ölçülerinin stokastik özellikleri

Yüksek presizyonlu tüm jeodezik uygulamalardaki GPS veri değerlendirme algoritmalarında taşıyıcı faz ölçüleri kullanılmaktadır. Bu algoritmalar genellikle en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Optimal GPS değerlendirmesinde iki aşama söz konusudur, ilki fonksiyonel modelin oluşturulması, ikincisi ise ilgili stokastik modelin kurulmasıdır. Fonksiyonel model GPS ölçüleri ve bilinmeyen parametreler arasındaki matematiksel ilişkileri tanımlar. Stokastik model ise GPS ölçülerinin istatistiksel özelliklerini ortaya koyar (Leick, 1995).

Fonksiyonel model kod ya da taşıyıcı faz ölçüleri ile atmosferik gecikmeler, saat hataları ve taşıyıcı faz tamsayı çevrim belirsizlikleri gibi bilinmeyen parametreler arasındaki ilişki üzerine kuruludur. Rastlantısal noise hatası hem kod, hem de taşıyıcı faz ölçülerini etkilediği için, hatalardan etkilenmiş ölçülerden arzu edilen sonucun elde edilebilmesi için dikkate alınmalıdır (Tiberius v. diğ., 1999). Bu nedenle, değerlendirmeyi bu ilke çerçevesinde gerçekleştirebilmek için noise karakteristiklerini tanımlayan bir stokastik modelin kullanılması; bunun içinse GPS ölçüleri için uygun değerlendirme modellerinin ve ağırlık algoritmalarının tanımlanması gerekir.

Bir ağırlık matrisi içerisinde toplanmış ölçü ağırlıkları, her bir ölçünün elde edilen tüm çözüme ne kadar katkıda bulunduğunun tanımlanmasına olanak verir. Örneğin noise etkisinden daha az etkilenmiş olan ölçülere daha

büyük ağırlık verilmesi, daha çok etkilenmiş ölçülere ise daha düşük ağırlık verilmesi akla uygun olacaktır. (Teunissen v. diğ., 1998). Ağırlıkların seçimi, ağırlık matrisi ölçülerin varyans kovaryans matrisinin tersine eşit olduğunda optimaldir. Bu durumda ağırlıkların birbirleri arasındaki denge, hesaplanan çözüme en iyi olası presizyonu sağlayacak şekilde kurulur. Varyans kovaryans matrisini yeterli düzeyde ifade edebilmek için gerçek verilerin stokastik özelliklerinin bilinmesi gereklidir (Tiberius, 1999).

Sinyal kalite ölçütleri

Bir GPS sinyalinin temel kalite ölçütü gücüdür. GPS sinyallerinin gücünün ifadesinde kullanılan temel ölçüt ise sinyal-noise oranıdır (SNR). SNR, bir noktada arzu edilen sinyal genliğinin noise sinyal genliğine oranıdır. Genellikle bir GPS ölçüsünü bozan noise düzeyini ifade eden bir ölçüt olarak kullanılan SNR, desibel (dB) biriminde ve impulse noise zirve noktası ve rastlantısal noise değerlerinin karekökleri açısından ifade edilir. SNR değeri büyüdükçe sinyal gücü de artmaktadır. SNR genellikle, taşıyıcı-noise oranı (C/N_0) değeri ile temsil edilir. C/N_0 , 1 Hz'lik bant genişliğinde sinyal taşıyıcının güç düzeyinin noise düzeyine oranı olarak tanımlanır. SNR ile karşılaştırıldığında C/N_0 sinyalin güç düzeyini tanımlar ve bu özelliğiyle GPS alıcılarının performans değerlendirmelerinde anahtar parametre durumundadır. C/N_0 alıcı kod uzunluğu ve taşıyıcı faz ölçülerinin presizyonunu doğrudan doğruya etkiler (Langley, 1997).

Tek bir C/N_0 değeri alınan sinyal kalitesinin bir fonksiyonudur. Örneğin eğer anten yüksek multipath etkisine maruz kalan bir nokta üzerine kurularsa, C/N_0 değeri genellikle beklenen değer civarında bir değişim gösterecektir. Taşıyıcı faz varyansını C/N_0 değerinin bir fonksiyonu olarak ifade eden eşitlik aşağıdaki gibi verilmiştir (Cohen, 1996; Langley, 1997; Braasch ve Van Dierendonck, 1999):

$$\sigma_{\phi_i}(m) = \sqrt{\frac{B}{c/n_0}} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

Burada i alt indisi L_i sinyali (L_1 ya da L_2), B taşıyıcı izleme lupunun noise bant genişliğini (Hz), λ taşıyıcı dalga boyunu (m) ve c/n_0 , $10^{\frac{C/N_0}{10}}$ değerini ifade etmektedir. Bu eşitlik L_1 frekansında 0.2 mm taşıyıcı faz noise değeri, 2 Hz bant genişliği lupu ve 45 dB-Hz C/N_0 değeri için nominal değeri vermektedir. Bu hata genel olarak multipath ve sinyal difraksiyonunun ağırlıklı etkisiyle ortaya çıkar ve tipik izleme parametreleri için bir milimetreden daha azdır (Cohen, 1996).

Ağırlık modeli

Mühendislik ölçmelerinde istenilen doğruluğa ulaşabilmek için çift fark (DD) GPS taşıyıcı faz ölçüleri kullanılır. Bu nedenle GPS değerlendirme yazılımlarının bir çoğu DD taşıyıcı faz verilerini kullanarak çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. DD taşıyıcı faz ölçülerinin presizyonu eğim açısına ve sinyal kalitesine bağlı olarak değişim gösterir. Bu olgunun ışığında ağırlıklandırma algoritmaları genellikle sinyal gücünün uydu görüş çizgisinin ufka yaklaştığında azaldığı gerçeğine dayalı olarak geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, GPS ölçülerinin stokastik modellenmesi için kullanılan yöntem, SNR değerlerine dayalı bir ağırlık fonksiyonunun kullanımınıdır. Ward (1996) milimetre birimindeki taşıyıcı faz varyansını (σ_i^2), C/N_0 değerlerinin bir fonksiyonu olarak veren aşağıdaki formülü oluşturmuştur:

$$\sigma_{\phi_{\varepsilon_i}}^2 = C_i 10^{-(C/N_{0measured})/10} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliğin kurulmasında taşıyıcı faz varyansları üzerindeki osilatör stabilitesi etkisi ihmal edilebilir olarak kabul edilmiştir. C_i faktörü taşıyıcı lup noise bant genişliği ve L_i dalga boyunu da içeren çevrim²,den mm^2 'ye dönüşümü sağlayan bir terimden oluşmaktadır. Bu eşitlik, fark alınmaksızın bir istasyondan bir uyduya yapılan orijinal taşıyıcı faz ölçülerinin varyans tahmininde kullanılabilir (Brunner v. diğ., 1999). Bu çalışmada uygulanan ve Eşitlik 2 üzerine kurulu Sigma-ε ağırlık algoritmasında,

ölçülen C/N_0 değerleri DD taşıyıcı faz ölçülerinin varyanslarının hesabında kullanılır. Her epok için C/N_0 varyansları ile DD varyansları hesaplanır.

Bu modelin sağladığı temel avantaj, taşıyıcı faz ölçüsü kalitesini yansıtan C/N_0 değerlerinin kullanımıyla, GPS ölçülerinin artık eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmiyor olmasıdır. Ek olarak, GPS sinyallerinin eğim açısına bağlı olarak kalite değişiminin de modellenabiliyor olması ve böylece herhangi bir matematiksel modelin uygulanmasına gerek duyulmaması da bir diğer avantajdır. Ayrıca yüksek eğim açıları söz konusu olduğunda ortaya çıkabilecek kötü uydu geometrisi sorununun da üstesinden gelinmesine olanak sağlamaktadır. C/N_0 varyans değerleri sıfır fark düzeyinde tahmin edildikleri için Sigma-ε modeli, her bir GPS istasyonundaki farklı anten karakteristiklerine ve çevresel koşullara karşı duyarlıdır (Hartinger ve Brunner, 1998b). Bu çalışmada Sigma-ε ağırlık algoritması, GPS DD taşıyıcı faz ölçülerinin değerlendirilmesinde C_i faktörü için Brunner ve diğerleri (1999) tarafından önerilen ($1.61 \cdot 10^{-4} mm^2$) değeri kullanılarak uygulanmıştır. Bu model ile kısa baz kenarları çözülmüştür.

Sayısal uygulama

GPS ölçüleri

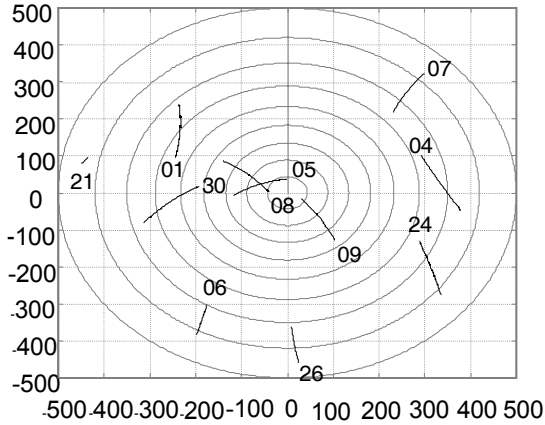
Çalışma kapsamında, iki ardışık günde gerçekleştirilen oturumlarda 3 noktada GPS ölçmeleri yapılmıştır. Ölçmeler, özellikle de Uluslararası GPS Servisi (International GPS Service-IGS) istasyonlarında olduğu gibi yüksek presizyonlu ölçmelerde yaygın olarak kullanılan Ashtech Dorne Morgolin Choke Ring antenlerine bağlı üç Leica SR399 GPS alıcısı ile gerçekleştirilmiştir. Antenler yerden yaklaşık 2 metre yükseklikte olacak şekilde alet sehpaları üzerine kurulmuştur. İstasyonlar HEI1, HEI2 ve HEI3 olarak adlandırılmıştır. HEI2 noktası, HEI1 noktasına 119.81 m, HEI3 noktasına ise 514.19 m uzaklıktadır.

Ölçmelerde uygulanan ölçme modu “sampling” modudur. Ölçülen verinin her 1/10 saniyede alınan ve daha sonra filtrelenerek 1 saniyelik zaman dilimi için birleştirilen ham uydu verisi

olduğu “compacted” ölçme modunun tersine, “sampled” veriler, ölçme öncesi tanımlanan kayıt aralığında toplanır ve herhangi bir filtreleme ya da yumuşatma (smoothing) işlemine tabi tutulmaz.

Ölçmeler için minimum eğim açısı 5° ve ölçme aralığı ise 1 saniye olarak alınmıştır. Ölçmelerde kullanılan Leica SR 399 alıcıları, 32 dB-Hz ve 51 dB-Hz arasındaki C/N_0 değerine sahip GPS sinyallerini kabul etmektedir. C/N_0 değerlerinin kontrolü sonucunda signifikant bir distorsiyon belirlenmemiştir. Ancak tüm istasyonlar için birinci oturumdaki L_1 fazı C/N_0 değerleri, ikinci oturumdaki değerlerden daha iyidir. Sinyal kalitesinin farklı değerlerde olması, oturumlardaki hava koşullarının aynı olmamasından kaynaklanabilir.

Ölçüler üzerindeki bilinen etkilerin araştırılması için, ikinci oturumdaki ölçmeler gerçek zaman gecikmesi (actual time lag) kadar, yani 236 saniye kaydırılmıştır. Şekil 1’de, değerlendirilen bir saatlik ölçümler sırasında, HEI2 noktasındaki uydu dağılımı gösterilmektedir. Her iki oturumda da birbirine yakın olan noktalarda özdeş uydu dağılımı söz konusudur.

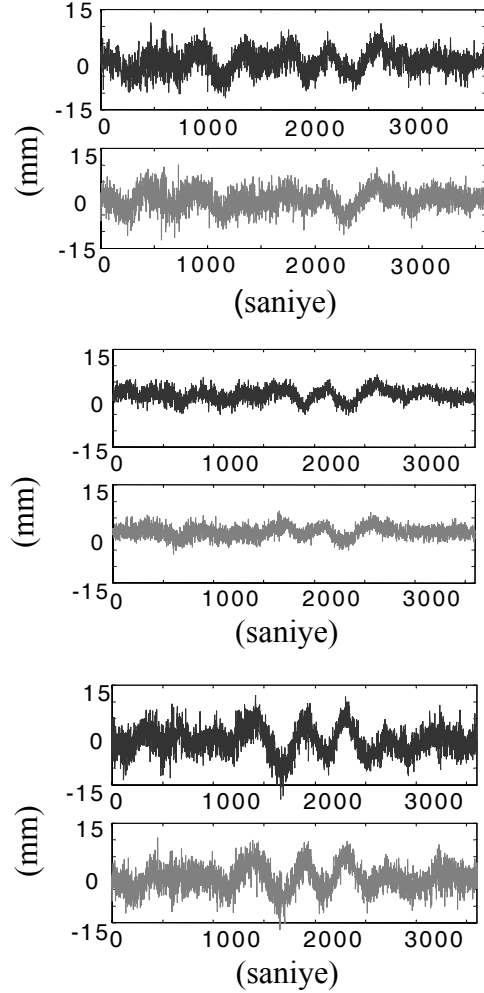


Şekil 1. HEI2 noktasındaki uydu dağılımı

Ölçülerin değerlendirilmesi

Şekil 2’de, HEI1 referans istasyonuna göre hesaplanan HEI2 noktasının koordinat bileşeni çözümleri verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, her bir epokun karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlar, koordinat bileşenlerine ait

salınımların her iki oturumda da aynı şekilde olduğunu gösteriyor. Ancak, bazı bölümlerde sonuçların tekrar edilebilirliğinin (repeatability) diğer kesitlere göre daha kötü olduğu gözle çarpılmaktadır.

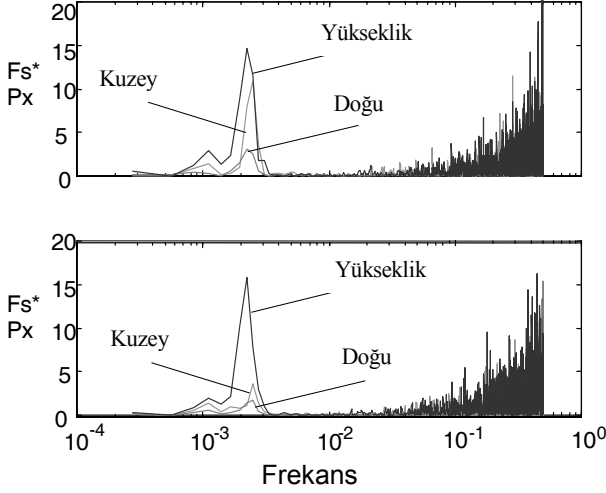


Şekil 2: HEI2 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşenleri, birinci oturum (koyu) ve ikinci oturum (açık)

Koordinat bileşenlerinin güç spektral yoğunluk tahminlerine (power spectral density estimates) ilişkin yarı logaritmik ölçek çizimleri Şekil 3’de gösterilmektedir. Bu çizimlerde, frekans çarpımı (F_s) ve güç spektral yoğunluk çarpımı (P_x), F_s ’nin yarı logaritmik ölçek değerine karşı gösterilmiştir.

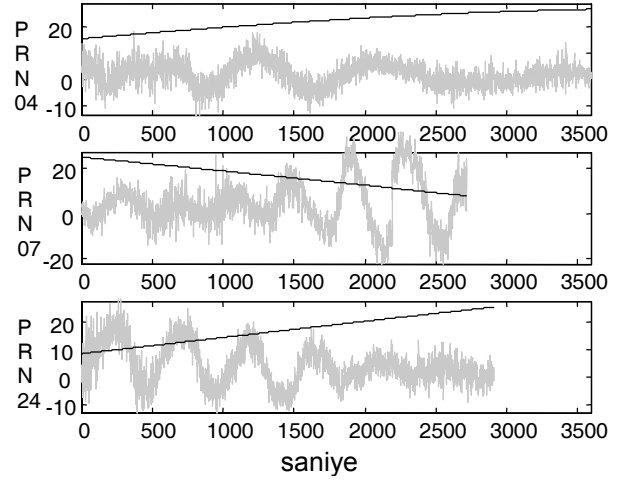
($F_s \cdot P_x$) eğrisinin altında kalan alan, sinyalin varyans değerine olan katkısı ile orantılıdır. Şekilde de görüldüğü gibi, tüm koordinat

bileşenleri için yaklaşık olarak 0.001 Hz ($16^{\text{dk}} 40^{\text{sn}}$) ve 0.002 Hz ($8^{\text{dk}} 20^{\text{sn}}$) frekanslarında iki açık periyodik sinyal görülmektedir. Her iki oturumda da aynı kalan yüksekliğe karşılık gelen sinyal dışında, diğer bileşenler için ikinci oturumdaki sinyallerin büyüklükleri daha düşük düzeydedir.



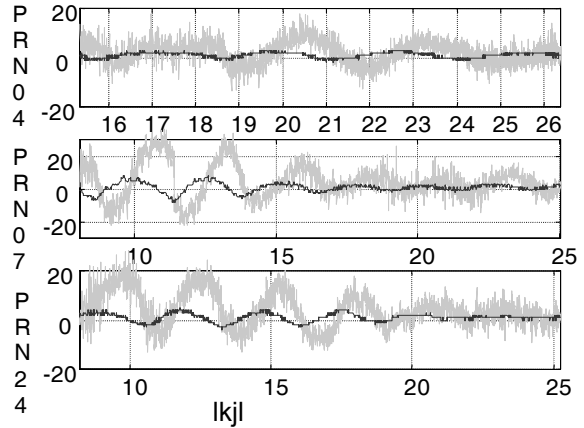
Şekil 3. HEI2 koordinatları için spektral güç yoğunlukları, birinci (üst) ve ikinci oturum (alt)

Epok-epok koordinatların frekans salınımlarının incelenmesi amacıyla, değerlendirilen 1 saatlik veri seti için DD düzeltmeleri hesaplanmıştır. İlkesel olarak, taşıyıcı faz düzeltmeleri, GPS ölçmelerinin bilinen istasyon koordinatlarının zorlanmasıyla hesaplanabilir. Böylece tamsayı çevrim belirsizliği ilk epoktan hesaplanabilir ve taşıyıcı faz hataları ortaya çıkar. Ancak, saat hatalarını elimine edebilmek için hataların farklarının alınmasına yol açan DD farkları oluşturulmak zorundadır. DD düzeltmeleri, ölçme düzeyinde tüm taşıyıcı fazların farkları alınmış hatalarının etkisini gösterir. 1 saatlik ölçme periyodu için DD düzeltmelerinin hesaplanmasında PRN09 uydusu, 54° ve 82° arasındaki yüksek uydu eğim açısı nedeniyle referans olarak alınmıştır. Bu prosedür her iki oturum için de uygulanmıştır. Şekil 4'te PRN04, PRN07 ve PRN24 uyduları için ilk oturumda hesaplanan DD düzeltmeleri ve eğim açıları gösterilmektedir. Şekilde de açıkça görüldüğü gibi, eğim açısı azaldıkça salınımların büyüklüğü artmaktadır.



Şekil 4. PRN04, PRN07 ve PRN24 için ilk oturumdaki DD düzeltmeleri (mm, açık) ve eğim açıları (derece, koyu)

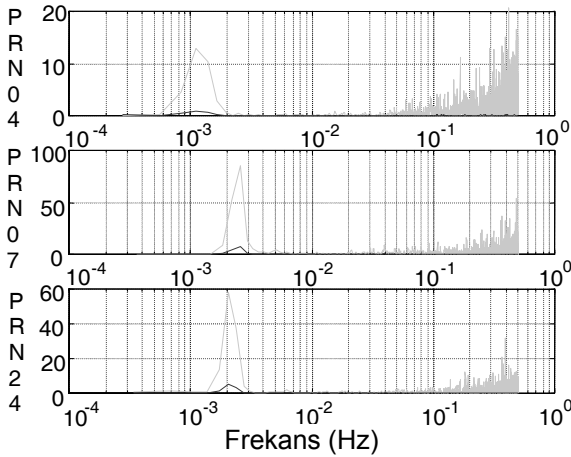
DD-C/N₀ değerleri göz önüne alındığında, bu değerlerin de tıpkı DD düzeltmeleri gibi düşük frekanslı salınımına sahip oldukları açıkça görülmektedir. Bu durumu ele almak için, hesaplanan C/N₀ farkları ve DD düzeltmeleri uydu eğim açısına göre Şekil 5'te grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5. DD düzeltmeleri (mm, koyu), C/N₀ farkları (dB-Hz, açık) eğim açısına (der.) karşı

Şekilde, PRN04, PRN07 ve PRN24 uyduları için DD düzeltmeleri ve C/N₀ farkları gösterilmektedir. Şekil 6'da ise PRN04, PRN07 ve PRN24 uyduları için C/N₀ farklarının ve DD düzeltmelerinin yarı logaritmik ölçekli PSD fonksiyonları gösterilmektedir. PRN04 için çizilen grafikte, yaklaşık 0.001 frekansında periyodik bir sinyal görülmektedir. PRN07 ve

PRN24 için yaklaşık 0.002 frekansında da daha büyük genlikte bir periyodik sinyal bulunmaktadır. PRN04 için çizilen grafikte, yaklaşık 0.001 frekansında periyodik bir sinyal görülmektedir. PRN07 ve PRN24 için yaklaşık 0.002 frekansında da daha büyük genlikte bir periyodik sinyal bulunmaktadır. Daha önce de vurgulandığı gibi, koordinat bileşenlerinin epok-epok değerlendirmelerinde de aynı frekans değerlerinde benzer periyodik sıçramalar bulgulanmıştır.



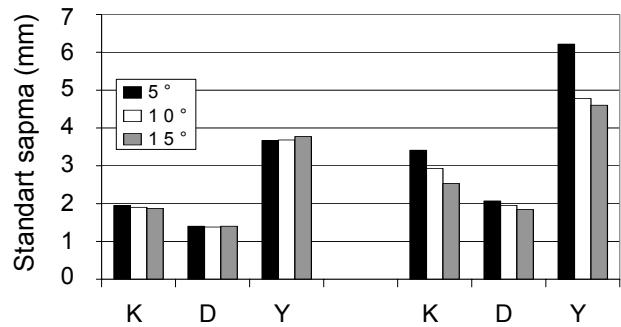
Şekil 6. C/N_0 farkları (koyu) ve DD düzeltmeleri (açık) için yarı log. ölçekli PSD fonksiyonu

Buradan da anlaşıldığı gibi bu olgu, C/N_0 değerleri ile DD düzeltmeleri ya da koordinat çözümleri arasındaki ilişkiyi gözler önüne sermektedir. Elde edilen sonuçlar, birbirini izleyen günlerde elde edilen koordinat çözümlerinin birbirine çok yakın olduklarını, dolayısıyla büyük oranda tekrar edilebilir olduklarını göstermektedir. C/N_0 değerlerine dayalı bir stokastik model olan Sigma- ϵ ağırlık algoritmasının kullanılmasıyla düşük eğim açılı uydulardan alınan ve difraksiyon etkisine maruz kalması olası ölçüler düşük ağırlıklarla işleme sokulmakta ve böylece uydu geometrisinin yaratabileceği sorunların önüne geçilebilmektedir.

Konum çözümleri

Yapılan GPS ölçmeleri, 5° , 10° ve 15° minimum eğim açıları ile hem Sigma- ϵ modeli ve hem de eş-ağırlık modeli ile değerlendirilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. HEI1-HEI2 baz çözümü ile elde edilen koordinat değerlerinin

standart sapmaları Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, Sigma- ϵ modeli tüm minimum eğim açısı değerleri için hemen hemen aynı sonucu vermektedir. Ancak eş-ağırlık modeli ile düşük eğim açılı değerlendirmelerde daha kötü sonuçlar elde edilmektedir. Bunun nedeniyse, daha önce de vurgulandığı gibi düşük eğim açılı sinyaller üzerinde troposferik gecikme ve multipath etkisinin yüksek olmasıdır. Sigma- ϵ modelinde, ağırlıklandırmada kullanılan ölçüt sinyal kalitesidir, yani ölçüler C/N_0 değerlerine göre ağırlıklandırılır ve böylece düşük eğim açılı ölçülerin düşük ağırlıklarla dengelemeye sokulması mümkün hale gelir. Böylece daha iyi uydu geometrisi sağlanır ve çözüm presizyonu artırılmış olur. Bu durum özellikle de yükseklik bileşeni açısından önemlidir. Uydu geometrisi ne kadar iyi olursa yükseklik bileşeninin doğruluğu da o oranda iyileşir. Yükseklik bileşeni çözümü, troposferik gecikme, zayıf uydu geometrisi ve multipath etkilerinden büyük oranda etkilendiği için, elde edilen doğruluk yatay konum bileşenlerinin doğruluğuna göre daha kötüdür. Eş-ağırlık modelinde ise ölçüler birbirlerine göre ağırlıklandırılmaz ve bu da düşük eğim açılı sinyallerin yanlış yorumlanmasına yol açar.



Şekil 7. Birinci oturumdaki Kuzey (K), Doğu (D) ve Yükseklik (Y) koordinat çözümlerinin standart sapmaları, Sigma- ϵ (sol) ve eş-ağırlıklı (sağ) model ile çözüm

Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada ölçülerin noise değerleri ile ölçüler üzerindeki etkiler arasındaki ilişki, sinyal kalite ölçütleri ile stokastik model

oluşturma yoluyla kurulmuş ve kısa baz kenarı çözümlerinde uygulanmıştır.

Bu çalışmada ele alınan ve kısa baz kenarı çözümlerinde kullanılan stokastik model, doğrudan GPS taşıyıcı faz ölçülerinin kalitesini yansıtan SNR değerlerine dayalıdır. GPS sinyalinin taşıyıcı faz varyansının modellenmesi için SNR bilgileri kullanılmış ve böylece aynı ölçme sürecinde ve GPS ölçülerinin yapıldığı aynı zaman diliminde hazır olarak elde edilebilen bu bilgilerin kullanımının sağladığı avantajlar ortaya konmuştur. Ayrıca geleneksel olarak uygulanan, tüm ölçülerin eş ağırlıklı olarak dengelemeye sokulduğu yaklaşım da değerlendirme kapsamına alınmıştır. Kısa baz kenarı çözümlerinde elde edilen sonuçlar, sinyal kalitesine dayalı stokastik modellerin kullanımının daha önce vurgulanan multipath ve troposferik gecikme etkilerine olan duyarlılıkları nedeniyle daha avantajlı oldukları savını doğrulamaktadır.

Uygulanan stokastik modelde, taşıyıcı faz ölçülerinin varyans değerleri, orijinal veri dosyalarında kaydedilen C/N_0 ölçüsü değerleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Her alıcının kendine özgü sinyal kalite ölçütü vardır. Ancak, genel olarak alıcıların ölçtüğü sinyal kalite ölçütü olan SNR bilgilerinin nasıl elde edildiği tam olarak bilinmemektedir. Halihazırda alıcı üreten firmaların SNR (ya da C/N_0) bilgisi sağlama zorunlulukları yoktur ve bu bilgileri sağlayanlar bu değerleri çoğunlukla indirgenmiş bir formatta rapor etmektedirler. Bu duruma yol açan etmenlerden biri, günümüzde yaygın olarak kullanılan RINEX 2.0 (Receiver Independent Exchange Format–Alıcılardan Bağımsız Dönüşüm Formatı) format yapısının C/N_0 değerleri için gerekli tanımlamaları içermemesidir. Yapılan tartışmalar sonucunda, RINEX formatının 2.1 versiyonunda SNR değerleri, gerekli dönüşüm algoritmalarının varlığına bağlı olarak yer almıştır. Bir taraftan, RINEX 2.1 formatının kullanımının benimsenmesi SNR bilgilerinin daha rahat kullanımını sağlayacaktır. Diğer taraftan, alıcı üreticisi firmaların ölçü dosyasında yer alan SNR değerlerinin nasıl elde edildiği konusunda

yeterli bilgi vermemeleri sorununun aşılmasıyla, GPS kullanıcıları ham veri akışı içerisinde alıcı tarafından üretilmiş değerleri, üzerinde uzlaşılan SNR ya da C/N_0 değerlerine kolaylıkla dönüştürme olanağına sahip olacaklardır.

Yapılan uygulamada, kullanılan stokastik modelin uygun bir şekilde GPS taşıyıcı faz ölçülerinin değerlendirilişinde kullanılabilceği ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar C/N_0 değerlerinin istasyonların konumuna bağlı olarak farklılaştığını ortaya koymaktadır. Bu durumsa multipath, ve troposferik gecikme etkilerinin karmaşık yapısından kaynaklanmaktadır.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi, kullanılan stokastik model, koordinat çözümlerinin tekrar edilebilirliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sonuçlar, kısa baz kenarı çözümlerinde birbirini takip eden günlerde benzer multipath etkisini yansıtmaktadır. Bu nedenle bu modellerin multipath iyileştirme algoritmalarının geliştirilmesinde de kullanılabilmesi olasıdır. Dolayısıyla sinyal kalitesi ölçütlerine dayalı stokastik modeller ile multipath iyileştirme algoritmalarının geliştirilmesi konusu ayrı bir çalışma başlığı olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada uygulanan stokastik modelin GPS ölçülerinin ölçme sonrası değerlendirme aşamasında kullanıldıklarını vurgulamalıyız. Bu modeller, özellikle sabit izleme istasyonlarında yapılan gerçek zamanlı (real-time) ölçmelerde uygun olarak kullanılabilirler. Multipath iyileştirme algoritmaları ile bütünleşik olarak kullanılmaları durumunda ise bu alanda önemli bir ilerleme sağlayacakları açıktır.

Kaynaklar

- Bisnath, S. B., Mendes, V. B. ve Langley, R. B. (1997). Effects of tropospheric mapping functions on space geodetic data, 1997 IGS Analysis Center Workshop, Pasadena, CA..
- Braasch, M. S. ve Van Dierendonck, A. J. (1999). GPS receiver architectures and measurements, *Proceedings of the IEEE*, **87**, 1, 48-64.
- Brunner, F. K., Hartinger, H. ve Troyer, L. (1999). GPS signal diffraction modelling: the stochastic

- SIGMA- Δ model, *Journal of Geodesy*, **73**, 259-267.
- Cohen, C. E. (1996). *Attitude determination*, in Parkinson, B. W. Ve Spilker Jr., J. J., eds., *Global Positioning System: Theory and Applications - 2*, 519-538, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Ge, L., Han, S., ve Rizos, C. (2000). Multipath mitigation of continuous GPS measurements using an adaptive filter, *GPS Solutions*, **4**, 2, 19-30.
- Han, S. ve Rizos, C. (2000). GPS multipath mitigation using FIR filters, *Survey Review*, **35**, 487-498.
- Hartinger, H. ve Brunner, F. K. (1998a). Experimental detection of deformations using GPS, *Proceedings, Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, 145-152, Eisenstadt, Austria.
- Hartinger, H. ve Brunner, F. K. (1998b). Attainable accuracy of GPS measurements in engineering surveying, *Proceedings, FIG Congress XXI - Commission 6*, 18-31, Brighton UK.
- Janes, H. W., Langley, R. B. ve Newby, S. P. (1991). Analysis of tropospheric delay prediction models: Comparisons with ray tracing and implications for GPS relative positioning, *Bulletin Géodésique*, **65**, 151-161.
- Jin, X.X. ve de Jong, C.D. (1996). Relationship between satellite elevation and precision of GPS code observations, *The Journal of Navigation*, **49**, 2, 253-265.
- Langley, R. B. (1997). GPS receiver system noise, *GPS World*, **8**, 6, 40-45.
- Lau, L. ve Mok, E. (1999). Improvement of GPS relative positioning accuracy by using SNR, *Journal of Surveying Engineering*, **125**, 4, 185-202.
- Leick, A. (1995). *GPS satellite surveying-second edition*, 560pp, John Wiley&Sons, New York.
- MacMillan, D. S. ve Ma, C. (1994). Evaluation of very long baseline interferometry atmospheric modeling improvements, *Journal of Geophysical Research*, **99**, B1, 637-651.
- Mendes, V. B. ve Langley, R. B. (1994). A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data, *Proceedings, International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, - KIS94*, 87-98, Banff, Alberta, Canada.
- Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, **101**, B2, 3227-3246.
- Ray, J. K. (2000). Mitigation of GPS code and carrier phase multipath effects using a multi-antenna system, *PhD Thesis*, 286pp, University of Calgary.
- Rothacher, M., Springer, T. A., Schaer, S. ve Beutler, G. (1998). Processing strategies for regional GPS networks, *Proceedings, IAG General Assembly 1997*, 93-100, Rio de Janeiro, Brazil.
- Satirapod, C., Wang, J. ve Rizos, C. (2001). A new stochastic modelling procedure for precise static GPS positioning, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **126**, 6, 365-373.
- Teunissen, P. J. G., Jonkman, N. F. ve Tiberius, C.C.J.M. (1998). Weighting GPS dual frequency observations: bearing the cross of cross-correlation, *GPS Solutions*, **2**, 2, 28-37.
- Tiberius, C.C.J.M. (1999). The GPS data weight matrix: what are the issues?, *Proceedings, ION 1999 National Technical Meeting "Vision 2010: Present and Future"*, 219-227, San Diego, California.
- Tiberius, C.C.J.M., Jonkman, N. ve Kenselaar, F. (1999). The stochastics of GPS observables, *GPS World*, **10**, 2, 49-54.
- Tiberius, C.C.J.M. ve Kenselaar, F. (2000). Estimation of the stochastic model for GPS code and phase observables, *Survey Review*, **35**, 277, 441-454.
- Wang, J., Stewart, M. P. ve Tsakiri, M. (1998). Stochastic modeling for static GPS baseline data processing, *Journal of Surveying Engineering*, **124**, 4, 171-181.
- Ward, P. (1996). GPS satellite signal characteristics, in Kaplan, ed., *Understanding GPS Principles and Applications*, 83-117, Artech House Publishers.