

Yüksek-Frekanslı Yer Dönme Parametrelerinin IVS-CONT14 Kampanyasının Analizi ile Kestirimi ve IERS2010 Modeli ile Karşılaştırılması

Kamil Teke¹, Mehmet Fikret Öcal¹

⁽¹⁾Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

e-posta: kteke@hacettepe.edu.tr, fikret.ocal@hacettepe.edu.tr

Geliş Tarihi: 05.02.2017 ; Kabul Tarihi: 19.08.2017

Özet

Bu çalışmada, Uluslararası Çok Uzun Baz İnterferometri (VLBI) Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS) tarafından 6-21 Mayıs 2014 tarihleri arasında 6 kıtadaki 17 VLBI istasyonunun katılımıyla gerçekleştirilen 15 günlük sürekli VLBI oturumlarından (IVS-CONT14) elde edilen ölçülerin analiz edilmesi ile yüksek-frekanslı Yer dönme parametreleri kestirimi yapılmıştır. Kestirilen Yer dönme parametreleri ile Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS) 2010 konvansiyonlarında önerilen, günlük ve yarı-günlük (yüksek-frekanslı) okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme değişim modeli (IERS2010 modeli) değerleri, spektral analiz ve tanımlayıcı istatistik yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, IERS2010 okyanus gelgitleri kaynaklı yüksek frekanslı Yer dönme modelindeki başlıca gelgitlerin sinüs ve kosinüs genlikleri kestirilmiş, Yer dönme ekseninin ileri-giden (prograde) ve geri-giden (retrograde) kutup gezinmesi hareketlerine etkileri hem model hem de kestirilen parametreler için fazör gösterimi üzerinden yorumlanmıştır. IERS2010 modelinden hesaplanan ve IVS-CONT14 ölçülerinden kestirilen yüksek frekanslı Yer dönme parametrelerinin genliklerinin 12 saat periyodunda iyi uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler

VLBI; Yüksek-frekanslı Yer dönme parametreleri; Okyanus gelgitleri; IVS-CONT14 oturumları

Estimation of High-Frequency Earth Rotation Parameters from the Analysis of IVS-CONT14 Campaign and Comparison with IERS2010 Model

Abstract

In this study, high-frequency Earth rotation parameters were estimated by means of analysing the observations of the 15 days continuous Very Long Baseline Interferometry (VLBI) sessions, participating 17 VLBI stations located at 6 continents (IVS-CONT14), carried out from 6th to 21st of May 2014 by the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS). The estimated Earth rotation parameters were compared to the model values of the diurnal and semi-diurnal (high-frequency) Earth rotation variations caused by ocean tides (IERS2010 model), recommended by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) 2010 conventions, by means of spectral analysis and descriptive statistics. Moreover, sine and cosine amplitudes of the major tidal terms of the IERS2010 high-frequency Earth rotation model due to the ocean tides were estimated and their effects on prograde and retrograde polar motions of the Earth rotation axis were interpreted upon the phasor plots for both estimated and model values. It is inferred that the amplitudes of high-frequency Earth rotation parameters with 12 hours period computed from the IERS2010 model and those of estimated from the IVS-CONT14 observations are in a good agreement.

Keywords

VLBI; High-frequency Earth rotation parameters; Ocean tides; IVS-CONT14 sessions

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Yer merkezli, yer sabit, ekvatorial yersel referans sistemi (Terrestrial Reference System, TRS) ile yer

merkezli, uzay sabit, ekvatorial, göksel referans sistemi (Geocentric Celestial Reference System, GCRS) arasındaki kinematik ilişki Yer yönelim parametreleri (Earth orientation parameters, EOP)

ile açıklanır. Bu parametrelerden kutup gezinmesi koordinatları (x_p, y_p) ; göksel ara kutbun (Celestial Intermediate Pole, CIP) Yersel referans çatısı (Terrestrial Reference Frame, TRF) koordinatları, nutasyon ofsetleri (X, Y) ; göksel ara kutbun (CIP) göksel referans çatısı (Celestial Reference Frame, CRF) koordinatları ve $\Delta UT1 = UT1 - UTC$ (Evrensel Zaman); Yer'in uzaya göre günlük üçüncü eksen mutlak dönüklük faz açısı olarak tanımlanmaktadır.

Yer Yönelim Parametrelerinin (EOP) uzay tabanlı konum belirleme ve jeodezi bilim dalındaki önemine binaen geçmişten günümüze yapılan bir çok çalışma mevcuttur. Yer Yönelim parametreleri modelleme ve teorisi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar; örneğin: Wahr ve Bergen (1986), Moritz ve Mueller (1987), Chao vd. (1991), Ray vd. (1994), Herring (1996), Capitaine vd. (2002), Gross (2009) yanında GNSS ve VLBI uydu-uzay jeodezisi teknikleri ölçülerinden kestirime ilişkin yapılan çalışmalar; örneğin: Robertson vd. (1985), Rothacher vd. (1999), Sovers vd. (1998) ve Steigenberger vd. (2011) bu parametrelerin belirlenme hatalarını 100-150 mikro-açı-saniyeleri (10^{-6} açı saniyesi) ve 5-10 mikro-saniyeler (10^{-6} zaman saniyesi) düzeyine indirmiştir.

Okyanusların ve atmosferin açısız dönme momentindeki gel-gitsel periyotlarda (örneğin, gün içi, aylık, mevsimsel, yıllık) oluşan değişimler Yer dönme parametrelerinde aynı gel-gitsel periyotlarda değişimlere sebep olmaktadır. Bu gel-gitsel jeodinamik etkenlerden ötürü Yer dönme parametrelerinde oluşan gün-içi periyotlu genlik değişimlerinin en büyük sebebinin (yaklaşık %90'ının) okyanus gel-git yüklemesi olduğu bilinmektedir (Moritz ve Mueller, 1987). Kutup gezinmesi koordinatları (x_p, y_p) ve gün-uzunlukları (length of day, LOD) Küresel navigasyon ve uydu sistemleri (Global Navigation and satellite systems, GNSS), Uydu/Ay'a lazer uzaklık ölçme sistemi (Satellite/Lunar Laser Ranging, SLR/LLR), Doppler ölçüleri ile yörünge ve konum belirleme uydu sistemi (Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite, DORIS) ve çok uzun baz interferometrisi (Very Long Baseline

Interferometry, VLBI) gibi uydu-uzay tabanlı jeodezi teknikleri ile belirlenebilir. VLBI; kuazar (quasi-stellar radio source) adı verilen ve uzaydaki konumları (sağ açıklık ve yükselim açıları) zamana göre anlamlı bir değişim göstermeyen, diğer bir ifade ile uzay-sabit kabul edilen radyo kaynaklarından (galaksimize 5 ila 7 milyar ışık yılı uzaklıkta olan galaksilerin jet enerji akımlarından) gelen S (2.15-2.35 GHz) ve X (8.0-8.8 GHz) frekanslı radyo dalgalarının, dünya üzerinde farklı konumlardaki birden fazla radyo teleskobu ile algılanması ve bu sinyaller arasındaki zaman farkının elde edilmesi prensibine dayanır ve bu zaman farkları VLBI ölçülerini oluşturur (Schuh ve Behrend, 2012). Bu teknik, uluslararası Yersel referans çatısı (ITRF, Altamimi vd. 2016) gerçekleştirmelerinde diğer uydu-uzay jeodezisi teknikleri ile birlikte kullanılan bir uzay jeodezisi tekniği olmasının yanı sıra, uluslararası göksel referans çatısı (International Celestial Reference Frame, ICRF, Fey vd. 2009) gerçekleştirmelerinde kullanılan ve uzun dönemli $\Delta UT1$ ve nutasyon izleyebilen tek tekniktir (Schuh ve Behrend, 2012). Dolayısıyla, VLBI, 5 adet Yer yönelim parametresinin tümünü (Earth Orientation Parameters, EOP: $x_p, y_p, UT1-UTC, X, Y$) izleyebilen (ölçüleri Yer yönelim parametrelerine duyarlı) tek uzay tabanlı konum belirleme tekniğidir. GNSS tekniğinde ise $\Delta UT1$ ve nutasyon parametreleri, bu parametrelerin ölçü yapılan uyduların yörüngelerinin yükseliş düğümü ile olan yüksek korelasyonundan dolayı, parametre kestirimi aşamasında ayrıştırılmazlar (Rothacher vd. 1999). Fakat uydu tabanlı konum belirleme teknikleri ile (GNSS, SLR/LLR, DORIS) gün uzunluğu ve nutasyonun zamana göre değişimi diğer bir ifade ile $\Delta UT1$ ve nutasyonun zaman göre türevleri ölçülebilir. Öte yandan, kutup gezinmesi koordinatlarının belirlenmesinde, GNSS istasyonlarının homojen olarak dünya üzerinde konumlanmış olması ve çok sayıda GNSS istasyonunun (yaklaşık 400 GNSS istasyonu) oluşturduğu global polihedronun hacminin diğer tekniklere göre daha büyük olması doğruluğu artırmaktadır. Bu nedenlerle, GNSS tekniği ile, kutup gezinmesi koordinatları diğer uydu-uzay jeodezisi tekniklerine göre çok daha yüksek

doğruluklabelirler(Rothacher vd. 1999; Malkin 2009). $\Delta UT1$ parametresi iki veya daha fazla istasyon ölçüleriyle izlenebilir fakat bu parametrenin belirlenme doğruluğu istasyonlar arasındaki bazların uzunluklarının ekvatorial izdüşümü ile doğru orantılıdır (Nilsson vd. 2010).

Bu makale kapsamında IVS tarafından 6-21 Mayıs 2014 tarihleri arasında gerçekleştirilen 15 günlük sürekli VLBI oturumlarından (IVS-CONT14) elde edilen ölçülerin analiz edilmesi sonucu saatlik Yer dönme parametreleri $(x_p, y_p, UT1-UTC)$ kestirimi yapılmıştır. Kestirilen Yer dönme parametreleri günlük ve yarı-günlük (yüksek-frekanslı) okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli (IERS2010 modeli, Petit ve Luzum 2010; Ray vd. 1994) değerleri, spektral analiz ve tanımlayıcı istatistik yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

2. Yer Yönelim Parametrelerini (EOP) İzlemeye Yönelik VLBI Oturum Türleri ve IVS-CONT14 Oturumları

Operasyonel zorluklar sebebiyle, GNSS ve diğer uydu jeodezisi tekniklerinin aksine, VLBI tekniğinde önemli bir kısıt olarak sürekli ölçü yapılamamaktadır. Bu sebeple, Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS, Schuh ve Behrend, 2012) tarafından haftada iki kez 5 ila 10 istasyonun katılımıyla, 24 saatlik oturumlar gerçekleştirilmektedir. Bu oturumlardan genellikle Yer yönelim parametreleri (Earth Orientation

Parameters, EOP: $x_p, y_p, UT1-UTC, X, Y$) belirlemede kullanılanlardan; haftada iki kez olmak üzere, pazartesi günleri gerçekleştirilenleri IVS-R1 oturumları ve perşembe günleri gerçekleştirilenleri IVS-R4 oturumları şeklinde adlandırılırlar. Bu oturumların bir başka özelliği ise IVS tarafından alınan kararla ölçü dosyalarının hızlı bir şekilde (genelde 15 günden daha kısa süre içinde) analiz merkezlerine servis edilmesidir. IVS-R1 ve -R4 24 saatlik oturumlarının $\Delta UT1$ belirleme doğruluğu $\pm 5 - 10 \mu s$ (mikro-saniye) dir. Aynı oturumlardan kutup gezinmesi koordinatları da (x_p, y_p) yüksek doğrulukla ($\pm 50 - 150 \mu as$) kestirilebilmektedir (Nilsson vd. 2014). Bu oturumların dışında, IVS-R1 ve -R4 oturumlarına kıyasla çok daha fazla VLBI istasyonun katılımı ile, VLBI'nin ulaşabildiği en yüksek parametre kestirim doğruluğunun ne kadar olduğunu test etmeye yönelik gerçekleştirilen, özellikle Yer yönelim parametrelerinin belirlenmesinde ulaşılan doğruluğun saptanmasını öngören, Küresel homojen dağılmış en güncel VLBI teknolojisini kullanan VLBI istasyonları tarafından gerçekleştirilen, yaklaşık 15 gün boyunca kesintisiz ölçü yapılarak elde edilen IVS-CONT kampanyaları, 3 yıl arayla gerçekleştirilmektedir. En güncel olanı ve bu çalışma kapsamındaki analizlerde kullanılan veri setini oluşturan IVS-CONT14 kampanyası, 6 Mayıs 2014, 0 UT ile 20 Mayıs 2014, 23:59:59 UT aralığında, 17 VLBI istasyonu (Şekil 1) katılımı ile gerçekleştirilmiştir. IVS-CONT14'den önceki kampanyalar IVS-CONT02, CONT05, CONT08 ve CONT11 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 1. IVS-CONT14 oturumlarında (kampanyasında) ölçü yapan VLBI istasyonları

3. Yüksek-Frekanslı Yer Dönme Parametrelerinin IVS-CONT14 Oturumları Ölçülerinden Kestirimi ve IERS2010 Modeli ile Karşılaştırılması

Yer dönme parametrelerinin (ERP) kestirimi, Viyana Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen, Vienna VLBI Software (VieVS) (Böhm vd. 2009) kullanılarak klasik Gauss Markov en-küçük-kareler (EKK) parametre kestirimi yöntemi ile yapılmıştır. Birer günlük 15 oturumun tamamı ayrı ayrı analiz edilmiş böylece Yer dönme parametrelerinin (ERP) saatlik parçalı lineer ofset, PLO (Piece-wise linear offset, PWLO, Teke vd. 2009) serileri elde edilmiştir. Nutasyon ofsetleri kestirimi yapılmamış ve öncül değerleri Uluslararası Astronomi Birliği (IAU) 2006 presesyon-nutasyon model (Petit ve Luzum 2010) değerlerine IERS C04 08 serisi (Bizouard ve Gambis, 2009) model düzeltmeleri eklenerek elde edilmiş ve öncül değerlerine sabit alınmıştır. Oturumlara katılan istasyonlarda bulunan ve ölçülere zaman etiketi konulurken referans alınan atomik saatlerden biri hatasız kabul edilmiştir. Oturuma katılan diğer saat okumaları ile sabit alınan saat okumaları arasındaki farklar (senkronizasyon hataları) her saat için kuadratik bir polinomun katsayıları ve 30 dakika aralıklı PLO'lar şeklinde modellenmiş, bir ön dengeleme ile kestirilerek ölçülerden parametre kestirimi öncesi indirgenmiştir. Troposfer sinyal gecikme modeli olarak tüm uydu-uzay jeodezisi teknikleri ölçülerinin analizinde de kullanılan Davis vd. (1985; 1993) modeli kullanılmıştır. Her bir VLBI istasyonunda ölçülen toplam yüzey basıncı değerlerinden ve istasyonun enleminden başucu yönündeki troposfer hidrostatik (kuru) sinyal gecikmeleri hesaplanmış (Saastamoinen 1972) ve öncül olarak ölçülerden indirgenmiştir. Başucu troposfer ıslak sinyal gecikmeleri kestiriminde ise ölçü denklemlerinin ilgili katsayılar matrisini troposfer ıslak izdüşüm fonksiyonu değerleri oluşturacak şekilde 30 dakika aralıklı PLO'lar kestirilmiştir. Ölçü doğrultusundaki troposfer gecikmelerini elde edebilmek için, Vienna Mapping Functions 1 (VMF1, Boehm vd. 2006) kullanılmıştır. Öncül TRF kataloğu, VieTRF13b (Krásná vd. 2014) olarak seçilmiş, No Net Translation (NNT) ve No Net Rotation (NNR) TRF datum koşul denklemleri (tüm

iz minimum koşulu) normal denklem sistemine uygulanarak kestirilen TRF'in öncül TRF ile arasındaki dönüklük ve ötelemeler sınırlanmıştır. Kuazar öncül koordinatları ICRF2 (Fey vd. 2009) kataloğuna sabit alınmıştır. VLBI istasyonlarında oluşan jeodinamik kaynaklı yer değiştirmeler Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS) 2010 konvansiyonlarına (Petit ve Luzum 2010) uygun modeller ile hesaplanarak parametre kestirimi öncesi anten koordinatlarına düzeltme olarak getirilmiştir. Bunlar: katı Yer gelgitleri (IERS2010 konvansiyonları, Petit ve Luzum 2010), okyanus gelgit yüklemeleri (FES2004, Lyard vd. 2006), atmosfer basıncı yüklemeleri (Petrov ve Boy 2004) ve kutup gelgitleridir (IERS2010 konvansiyonları, Petit ve Luzum 2010).

Yüksek-frekanslı Yer dönme parametreleri kestirimi yapıldığında, nutasyon ofsetleri ve kutup gezinmesi koordinatlarının birlikte kestirilmesi, bu iki parametre seti arasındaki gün içi periyotlarda oluşan yüksek korelasyondan dolayı mümkün değildir (Thaller vd. 2007). Konvansiyon gereği -48 ila -16 saat arası periyottaki geri-giden kutup gezinmesi hareketleri nutasyon hareketlerine dahil edilmelidir. Bu konuda daha önceki çalışmalarda izlenen başlıca yöntemlerden ilki, nutasyon ofsetlerini iyi belirlenmiş öncül değerlere sabit almaktır (Artz vd. 2010). Diğer bir yöntem ise kısıtlayıcı denklemler altında belirli frekansları bastırmak suretiyle nutasyon değerlerinin kutup gezinmesi parametresine yayılmasını önlemektir (Hefty vd. 2000). Bu iki yöntemin yanı sıra, kutup gezinmesi koordinatlarının ve nutasyon ofsetlerinin Fourier serilerine açılması ve ardından Fourier katsayılarının kısıtlayıcılar altında kestirilmesi ile kutup gezinmesi ve nutasyon hareketinin (parametrelerinin) ilintisizleştirilmesi de (dekorelasyonu) yapılabilmektedir (Nilsson vd. 2010).

Bu çalışma kapsamında yüksek-frekanslı okyanus gelgitlerinin yer dönme parametreleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlandığı için, kutup gezinmesi koordinatları ve $\Delta UT1$ parametrelerinin öncül değerlerine, yüksek-frekanslı okyanus gelgitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli (Petit ve Luzum, 2010; Ray vd. 1994)

düzeltilme olarak getirilmemiş ve PLO fonksiyonları ile koşul ve kısıt denklemleri kullanılmaksızın birer saat aralıklarla kestirilmiştir.

IERS'in yüksek-frekanslı okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli,

$$x_p(t) = \sum_{k=1}^{71} A_k \cos(\xi_k(t)) + B_k \sin(\xi_k(t)) \quad (1)$$

$$y_p(t) = \sum_{k=1}^{71} A'_k \cos(\xi_k(t)) + B'_k \sin(\xi_k(t)) \quad (2)$$

$$\Delta UT1(t) = \sum_{k=1}^{71} A''_k \cos(\xi_k(t)) + B''_k \sin(\xi_k(t)) \quad (3)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Model hesaplanırken kullanılan t zamanı, J2000(01.01.2000, 12 UT) epogundan itibaren geçen Yersel Zaman sistemindeki (Terrestrial Time, TT) Julyen yüzyılı olmak üzere, A_k , B_k , A'_k , B'_k , A''_k ve B''_k , k gelgitinin eş-fazlı(kosinüs) ve faz-dışı (sinüs) genliklerini; $\xi_k(t)$ delaunay argümanlarından güneş ve Ay'ın ilgili epoktaki astronomik konumlarına göre hesaplanan k gelgitinin faz açısını göstermektedir. Gelgitsel hareketin, günlük ve yarı-günlük hareketlerde farklı genlikli bileşenleri vardır. Model, 41 adeti günlük periyotta, 30'u yarı-günlük periyotta olmak üzere; toplam 71 adet gelgitin; periyot, faz ve genlik değerleri ile oluşturulmuştur (Petit ve Luzum, 2010; Ray vd. 1994). En büyük genlikli 8 gelgit, genlikleri diğerlerine oranla çok çok büyük olduğu için, literatürde karşılaştırmalarda kullanılmaktadır ve ana gelgitler (main tides, principle tides) olarak isimlendirilirler. Bu ana gelgitler; günlük (24 saatlik) periyotta olanları: O_1 , P_1 , Q_1 , K_1 ve yarı-günlük (12 saatlik) periyotta olanları: N_2 , S_2 , M_2 , K_2 olarak adlandırılmaktadır. Ray vd. (1994), bu 8 ana gelgitin eş-fazlı (kosinüs) ve faz-dışı (sinüs) genliklerini, gelgitsel okyanus akıntılarının oluşturduğu global okyanus gelgit yükseklikleri modelini (Schwiderski, 1980) kullanarak Laplace momentum denklemlerinden hesaplamıştır. Ray vd. (1994) elde ettikleri model (tahmin) UT1 değerleri ile Temmuz 1992 sonlarında gerçekleştirilen 4 günlük VLBI oturumlarının analizlerinden kestirdikleri gün-içi

çözünürlükte UT1 kestirimleri arasındaki uyuşumun $2 \mu s$ dolaylarında olduğunu bildirmiştir.

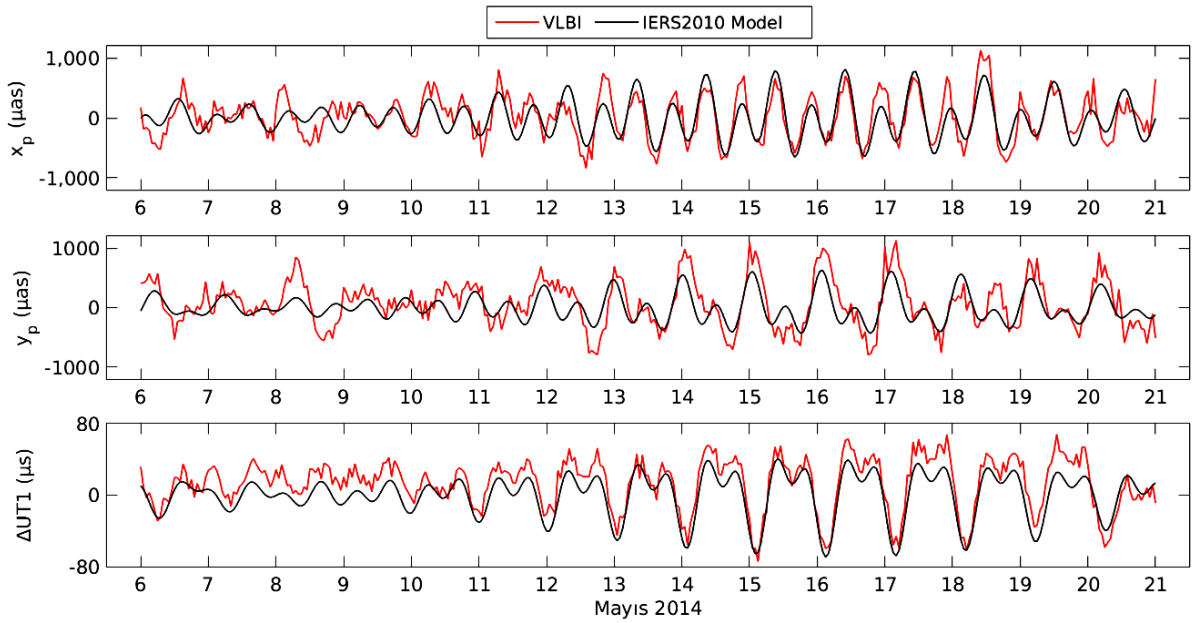
UT saat başlarında (0, 1, 2, ..., 23 UT) kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatları ve $\Delta UT1$ kestirim değerleri ile günlük ve yarı-günlük (yüksek-frekanslı) okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim model değerleri zaman serileri Şekil 2 ve Fourier spektrası Şekil 3'de görülmektedir. Kutup gezinmesi koordinatları birbirlerine dik olan iki bileşenden, x_p, y_p oluşmuştur. Fourier spektrası ise toplam kutup gezinmesi hareketi üzerinden $(x_p - iy_p)$ hesaplanmıştır. IERS2010 Model ve VLBI kestirim değerlerinin uyumuna ilişkin güvenilirliği yüksek bir tanımlayıcı istatistik ölçütü olarak farkların ağırlıklı ortalaması (weighted mean, WM) ve farkların ağırlıklı karesel ortalama hatası (weighted root mean square, WRMS)(Nilsson vd. 2014; Uunila 2016) hesaplanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. IVS-CONT14 oturumları boyunca, Yer dönme parametreleri (ERP) UT saat başı epokları için, IERS2010 Model değerlerinin VLBI kestirim değerlerinden farklarının ağırlıklı ortalamaları (WM) ve ağırlıklı karesel ortalama hataları (WRMS). Tablo'da parantez içine yazılan değerler ilgili parametrelerin en-küçük-kareler yöntemi ile kestirilen karesel ortalama hatalarının (formal errors) medyanıdır.

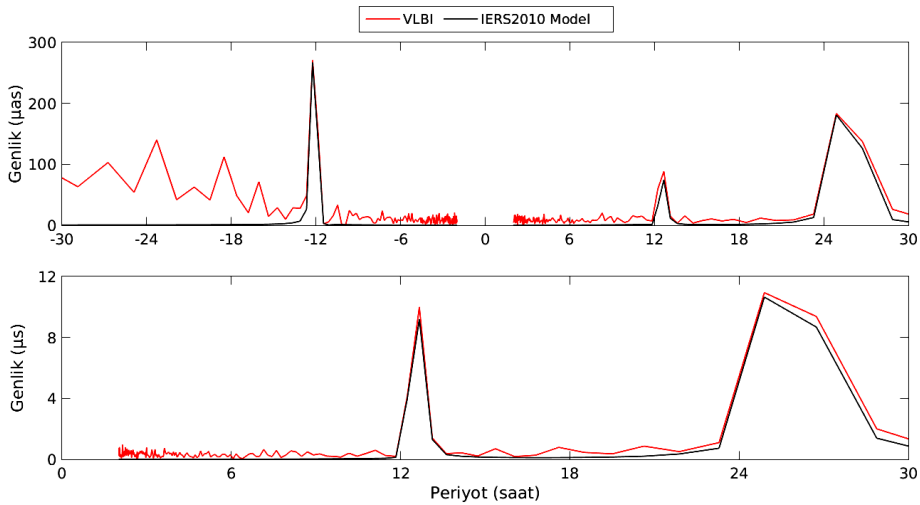
Yer dönme parametreleri	VLBI kestirim – IERS Model değerleri farklarının WM ve WRMS değerleri
x_p	$25 \pm 224 \mu s$ (181 μs)
y_p	$64 \pm 250 \mu s$ (180 μs)
$\Delta UT1$	$13 \pm 11 \mu s$ (12 μs)

x_p , y_p ve $\Delta UT1$ parametrelerin kestirilen karesel ortalama hatalarının medyanı sırası ile 181 μs , 180 μs ve 12 μs olarak elde edilmiştir. Kutup gezinmesi koordinatlarının kestirim ve model değerleri farklarının WRMS'leri, parametrelerin kestirilen karesel ortalama hatalarının medyanlarından (Tablo 1) oldukça büyüktür. Bu durumun, IERS2010 modelinin kutup gezinmesi

koordinatlarını tahmin etme yetersizliği sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 2. IVS-CONT14 oturumlarından saatlik epoklarda kestirilen ve IERS2010 yüksek-frekanslı okyanus gel-gitleri Yer dönme parametreleri değişim modelinden aynı epoklar için hesaplanan Yer dönme parametreleri (ERP: x_p , y_p ve $\Delta UT1$) zaman serileri.



Şekil 3. IVS-CONT14 oturumlarından saatlik epoklarda kestirilen ve aynı epoklarda IERS2010 yüksek-frekanslı okyanus gel-gitleri Yer dönme parametreleri değişim modelinden hesaplanan kutup gezinmesi ($x_p - iy_p$) (üstte) ve $\Delta UT1$ (altta) Fourier spektrası.

Dünyanın dönüş yönüyle aynı yönde (batıdan doğuya doğru) olan kutup gezinmesi hareketi, ileri-giden hareket (prograde motion of CIP in TRF); tersi yöndeki hareket ise geri-giden (retrograde motion of CIP in TRF) harekettir. Kutup gezinmesi yüksek-frekanslı, gelgitsel harmonik ileri- ve geri-giden hareketleri, makalede daha önce de belirtildiği üzere okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli (Petit ve Luzum 2010; Ray vd. 1994) değerleri üzerinden

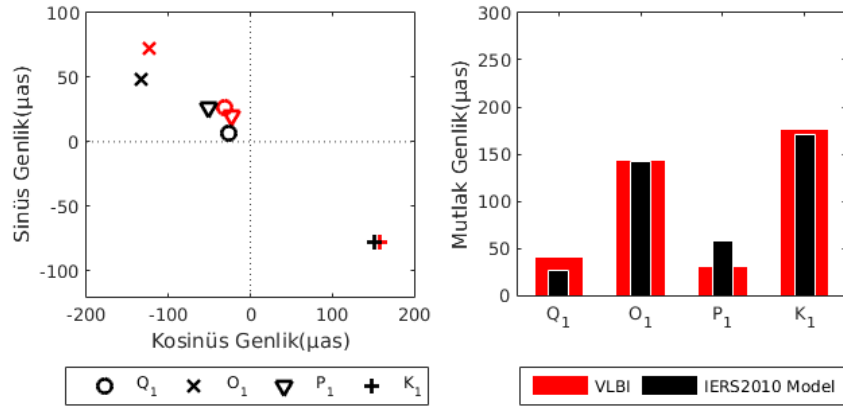
yaklaşık %90 oranında açıklanabilmektedir. Bu çalışmada ayrıca günlük ve yarı-günlük periyotlu gelgitsel kutup gezinmesinin, geri-giden ve ileri-giden hareketleri incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak kutup gezinmesi koordinatları (x_p , y_p) ile kompleks sayılar şeklinde ($x_p - iy_p$) ifade edilen Göksel Ara Kutbun (CIP) TRF (kabuk-sabit) koordinat çatısındaki konumu Leonhard Euler açılımı kullanılarak,

$$A_k \cos(\xi_k(t)) = A_k \frac{e^{i\xi_k(t)} + e^{-i\xi_k(t)}}{2} \quad (4)$$

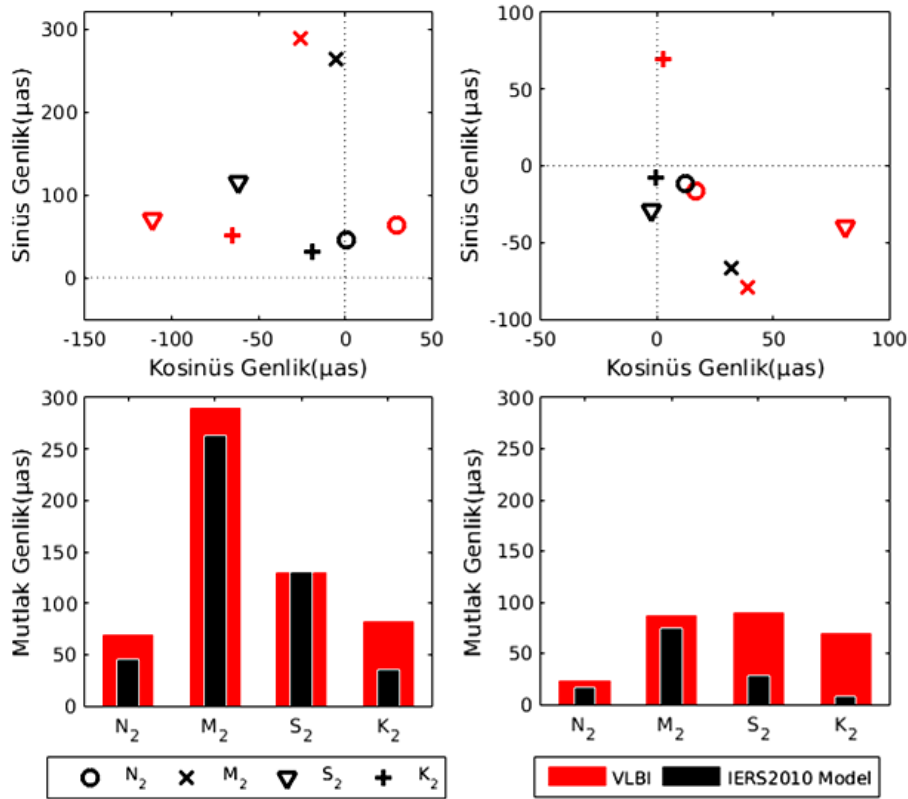
$$B_k \sin(\xi_k(t)) = B_k \frac{e^{i\xi_k(t)} - e^{-i\xi_k(t)}}{2i} \quad (5)$$

eşitliklerinden ileri-giden ($e^{i\xi_k(t)}$ katsayılı terimler) ve geri-giden ($e^{-i\xi_k(t)}$ katsayılı terimler) hareketlere ayrıştırılmıştır (fazör gösterimleri, Şekil 4).Eşitliklerdeki A_k, B_k terimleri her bir k gelgiti için parametre kestirimi sonrası elde edilen kutup gezinmesi koordinatlarından (x_p, y_p) EKK yöntemi

ile herhangi bir mutlak ve/veya bağıl kısıtlayıcı kullanılmadan ayrı ayrı kestirilmiştir. x_p ve y_p parametrelerine ait her bir gelgitin eş fazlı ve fazdışı bileşenlerine ait genlikler Euler açılımı ile ayrıştırılmıştır. Konvansiyon gereği periyodu -12 saatten büyük geri-giden hareketler nutasyon hareketine dahil edilmektedir. Günlük periyotlu kutup gezinmesi hareketisadece ileri-giden hareket olarak ortaya çıkmaktadır.Yarı-günlük periyotlu olanlar ise hem ileri-giden hem de geri-giden hareketler şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4. Günlük periyotlu ileri-giden hareket fazör gösterimleri (solda) ve mutlak genlikleri (sağda).



Şekil 5. Yarı-günlük periyotlu ileri-giden hareket (sağda) ve yarı-günlük periyotlu geri-giden hareketlere (solda) ait fazör gösterimleri (üstte) ve mutlak genlikleri (altta).

4. Sonuç

Bu çalışmada, Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS) tarafından planlanmış ve gerçekleştirilmiş 15 günlük IVS-CONT14 oturumlarının analizi yapılmıştır. VLBI analizleri sonucunda UT tam saatlerinde kestirilen x_p , y_p ve $\Delta UT1$ değerleri, aynı epoklar için IERS yüksek-frekanslı okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli (IERS2010 modeli) ile hesaplanan yer dönme parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Kutup gezinmesi hareketinin Fourier spektrumu incelendiğinde, 12 saatten büyük periyotlu geri-giden hareketlerde VLBI kestirim değerleri ile model değerleri arasında 50 ila 150 μ s aralığında sapmalar görülmüştür. Fazör gösterimler ve mutlak genlikler üzerinden yorumlandığında, günlük periyotta kutup gezinmesinin ileri-giden 24 saatlik periyotlu ve geri-giden 12 saatlik periyotlu hareketlerin büyük ölçüde model değerleri ile uyumlu olduğu, fakat ileri-giden 12 saatlik hareketin, Fourier spektrumunda model ve kestirim değerleri uyumlu olduğu halde, S_2 ve K_2 gelgitlerin hem faz hemde genlik açısından model değerleri ile uyumlarının düşük olduğu gözlenmiştir. Fazörlerde görülen model ve kestirim değerleri arasındaki faz ve genlik farklarının önemli bir sebebi nutasyon ofsetlerinin öncül değerlerindeki hataların, parametrenin öncül değerlerine sabit alınmasından dolayı en-küçük-kareler (EKK) kestiriminde, yüksek korelasyonlu olduğu kutup gezinmesi koordinatlarının yayılmasıdır. VLBI kestirim ve IERS2010 model değerleri farklarının WRMS'i, parametrelerin kestirilen karesel ortalama hatalarından oldukça büyüktür. Bu durumun oluşma nedenlerinden birinin de, 20 yılı aşkın bir süredir kullanılan IERS2010 modelinin yetersizliği olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y244 no'lu bilimsel araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Makalenin yazarları, Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisine (IVS, Schuh ve Behrend 2012) sağladığı verilerden ötürü, bilinmeyen

hakemlere yapıcı ve değerleri katkılarından ötürü teşekkür eder.

Kaynaklar

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Xavier, C., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **121**, 6109–6131.
- Artz, T., Bockmann, S., Nothnagel, A., Steigenberger, P., 2010. Sub-diurnal variations in the Earth's rotation from continuous VLBI campaigns, *Journal of Geophysical Research*, **115**, B05404.
- Bizouard, C., Gambis, D., 2009. The combined solution CO4 for Earth orientation parameters consistent with international terrestrial reference frame, In: Drewes, H., (Ed.), *Geodetic Reference Frames*, IAG Symp, **134**, 265–270.
- Boehm, J., Werl, B., Schuh, H., 2006. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from european centre for medium-range weather forecast operational analysis data, *Journal of Geophysical Research*, **111**, (B02):406.
- Böhm, J., Spicakova, H., Plank, L., Teke, K., Pany, A., Wresnik, J., Englich, S., Nilsson, T., Schuh, H., Hobiger, T., Ichikawa, R., Koyama, Y., Gotoh, T., Kubooka, T., Otsubo, T., 2009. Plans for the Vienna VLBI software VieVS, *Proc 19:th Working Meeting European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 161-164, Bordeaux, France.
- Capitaine, N., Gambis, D., McCarthy, D., Petit, G., Ray, J., Richter, B., Rothacher, M., Standish, M., Vondrak, J., 2002. *IERS Technical Note 29*, Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Chao, B., Dong, D., Liu, H., Herring, T., 1991. Libration in the Earth's rotation, *Geophysical Research Letters*, **18** (11), 2007–2010.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., Elgered, G., 1985. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Science*, **20**, 1593–1607.

- Davis, J.L., Elgered, G., Niell, A.E., Kuehn, C.E., 1993. Ground-based measurements of gradients in the “wet” radio refractivity of air, *Radio Science*, **28**, 1003–1018.
- Fey, A., Gordon, D., Jacobs, C.S.(eds), 2009. The second realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry, *IERS Technical Note 35*, Verlag des BundesamtsfürKartographie und Geodesie, Frankfurt am Main.
- Gross, R.S., 2009. Ocean tidal effects on Earth rotation, *Journal of Geodynamics*, **48**, 219-225.
- Hefty, J., Rothacher, M., Springer, T., Weber, R., Beutler, G., 2000. Analysis of the first year of Earth rotation parameters with a sub-daily resolution gained at the code processing center of the IGS, *Journal of Geodesy*, **74**, (6), 479–487.
- Herring, T.A., 1996. The IERS 1996 theory of precession/nutation. Editör: McCarthy, D.D., IERS Conventions 1996, *IERS Technical Note 21*, Observatoire de Paris, 25-32.
- Krásná, H., Boehm, J., Plank, L., Nilsson, T., Schuh, H., 2014. Atmospheric effects on VLBI-derived terrestrial and celestial reference frames, *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet Proceedings of the IAG General Assembly*, Melbourne, Australia, June 28–July 2, 2011, In: Chris Rizos, Pascal Willis (Eds.), Series: International Association of Geodesy Symposia, **139**, 203–208.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: Modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, **56**, 394-415.
- Malkin, Z., 2009. On comparison of the Earth orientation parameters obtained from different VLBI networks and observing programs, *Journal of Geodesy*, **83**, 557-556.
- Moritz, H., Mueller, I., 1987. *Earth Rotation Theory and Observation*, 370 Lexington Avenue, New York, NY 10017: The UngarPublishing Company.
- Nilsson, T., Boehm, J., Schuh, H., 2010. Sub-diurnal Earth rotation variations observed by VLBI, *Artificial Satellites* **45**, 49-55.
- Nilsson, T., Heinkelmann, R., Karbon, M., Raposo-Pulido, V., Soja, B., Schuh, H., 2014. Earth orientation parameters estimated from VLBI during the CONT11 campaign, *Journal of Geodesy*, **88**, 491-502.
- Petit, G., Luzum, B., 2010. IERS conventions 2010, *IERS Technical Note 36*, Verlag des BundesamtsfürKartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Petrov, L., Boy, J.P., 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in Very Long Baseline Interferometry observations, *Journal of Geophysical Research*, 109 (B3), B03405.
- Ray, R.D., Steinberg, D.J., Chao, B.F., Cartwright D.E., 1994. Diurnal and semidiurnal variations in the Earth’s rotation rate induced by ocean tides, *Science*, **264**, 830-832.
- Robertson, D.S., Carter, W.E., Campbell, J., Schuh, H. 1985. Daily Earth rotation determinations from IRIS Very Long Baseline Interferometry, *Nature*, **316**, 424-427.
- Rothacher, M., Beutler, G., Herring, T.A., Weber, R. 1999. Estimation of nutation using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 4835-4859.
- Saastamoinen, J., 1972. Introduction to practical computation of astronomical refraction, *Bulletin Geodesique*, **46**, 383-397.
- Schuh, H., Behrend, D., 2012. VLBI: a fascinating technique for geodesy and astrometry, *Journal of Geodynamics*. **61**, 68–80.
- Schwiderski, E.W., 1980. On charting global ocean tides, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **18** (1), 243-268.
- Sovers, O., Fenselow, J., Jacobs, C., 1998. Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results, *Reviews of Modern Physics*, **70** (4), 1393–1453.
- Steigenberger, P., Hugentobler, U., Lutz, S., Dach, R. 2011. CODE contribution to the IGS reprocessing, *Technical Report*, InstitutfürAstronomische und PhysikalischeGeodäsie, TU München.
- Teke, K., Boehm, J., Tanır, E., Schuh, H., 2009. Piecewise Linear Offsets for VLBI Parameter Estimation, *Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*, edited by G.

Bourda, P. Charlot, A. Collioud, Université Bordeaux1-CNRS, Bordeaux, France, 63-67.

Thaller, D., Krügel, M., Rothacher, M., Temer, V., Schmid, R., Angermann, D., 2007. Combined earth orientation parameters based on homogeneous and continuous VLBI and GPS data, *Journal of Geodesy*, **81**, 529-541.

Uunila, M., Baver, K., Gipson, J., Nilsson, T., Krásná, H., 2016. Comparison of VieVS and Solve UT1 results from VLBI measurements, *Journal of Geodesy and Geoinformation*, **3(1)**, 1-8.

Wahr, J., Bergen, Z., 1986. The effects of mantle anelasticity on nutations, Earth tides, and tidal variations in rotation rate, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **87**, 633-668.