

# VLBI Ölçülerinden ve IERS2010 Modelinden elde edilen Yüksek Frekanslı Yer Dönme Parametrelerinin Karşılaştırılması

Mehmet Fikret Öcal\*, Kamil Teke

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Beytepe Kampüsü, Ankara.

## Özet

Bu çalışmada, 6-21 Mayıs 2014 tarihleri arasında Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS) tarafından gerçekleştirilen 15 günlük sürekli VLBI oturumlarından (IVS-CONT14) elde edilen ölçülerin Vienna VLBI yazılımı (VieVS) versiyon 2.3 ile analiz edilmesi sonucu yüksek frekanslı Yer dönme parametreleri ( $x_p, y_p, UT1-UTC$ ) kestirimi yapılmıştır. Kestirilen Yer dönme parametreleri ile Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS) 2010 konvansiyonlarında kullanılması önerilen, günlük ve yarım-günlük (yüksek frekanslı) okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli değerleri, spektral analiz ve betimsel istatistik yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişimi IERS2010 modelindeki başlıca gelgitlerin; Yer dönme ekseninin ileri-giden (prograde) ve geri-giden (retrograde) hareketleri üzerindeki etkileri fazör gösterimi üzerinden yorumlanmıştır. Günlük ve yarım-günlük okyanus gelgitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli ve IVS-CONT14 ölçülerinden kestirilen Yer dönme parametrelerinin genliklerinin 12 saat periyodunda iyi uyum gösterdiği belirlenmiştir.

## Anahtar Sözcükler

VLBI, yüksek frekanslı Yer dönme parametreleri, okyanus gelgitleri, CONT14 oturumları

## Abstract

In this study, high frequency Earth rotation parameters ( $x_p, y_p, UT1-UTC$ ) were estimated using Vienna VLBI software (VieVS) version 2.3 from the observations of the 15 days continuous VLBI sessions i.e. CONT14 campaign, 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 due to ocean tides, recommended by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) 2010 conventions, by means of spectral analysis and descriptive statistics. Moreover, the effects of the major tidal terms of the IERS2010 high frequency Earth rotation model caused by the ocean tides on prograde and retrograde polar motions were interpreted upon the phasor plots. It is inferred that the amplitudes of Earth rotation parameters with 12 hours period computed from the model and those of estimated from the IVS-CONT14 sessions are in a good agreement.

## Keywords

VLBI, high frequency Earth rotation parameters, ocean tides, CONT14 sessions

## 1. Giriş

IVS-CONT kampanyaları genellikle 3 yıl arayla (CONT02, CONT05, CONT08, CONT11 ve CONT14), Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS, Schuh ve Behrend, 2012) tarafından planlanan ve gerçekleştirilen oturumlardır. IVS-CONT14 oturumları küresel homojen dağılmış en güncel VLBI teknolojisini kullanan Şekil 1'de gösterilen 17 VLBI istasyonunun, 15 gün sürekli ölçü yapması ile elde edilmiş 24 saatlik oturumlardan oluşmaktadır. CONT14 ölçüleri, 6 Mayıs 2014, 0 UT ile 20 Mayıs 2014, 23:59:59 UT aralığında yapılmıştır. Yer dönme parametreleri; kutup gezinmesi ( $x_p, y_p$ ); göksel ara kutbun (Celestial Intermediate Pole, CIP) Yersel referans çatısı (TRF) koordinatları ve  $\Delta UT1 = UT1 - UTC$ ; Yer'in uzaya göre günlük üçüncü eksen mutlak dönüklük faz açısı olarak tanımlanmaktadır. VLBI ölçüleri  $\Delta UT1$ 'a duyarlı tek uzay jeodezisi tekniğidir ve VLBI'nın IVS-R1 ve -R4 24 saatlik oturumlarından  $\Delta UT1$  belirleme doğruluğu  $\pm 5 - 10 \mu s$  (mikro-saniye) dir (Nilsson vd. 2014). Aynı oturumlardan IVS analiz merkezlerince yüksek doğrulukta ( $\pm 50 - 150 \mu s$ ) kutup gezinmesi koordinatları da ( $x_p, y_p$ ) belirlenmekte ve IERS aracılığı ile kullanıma sunulmaktadır. Yer dönüklük parametrelerinin doğru kestirimi için küresel homojen dağılmış VLBI istasyonlardan ölçü yapılması gerekir (Malkin 2009).  $\Delta UT1$  parametresinin belirlenme doğruluğu istasyonların oluşturduğu global polihedron hacmi ile doğru orantılıdır. Yer dönüklük parametrelerinin günlük ve yarı-günlük periyotlu değişimleri büyük ölçüde (yaklaşık %90) okyanus gelgit yüklemesi kaynaklıdır (Nilsson vd. 2010).

\* Sorumlu Yazar E-posta: elmfo09@hacettepe.edu.tr (Mehmet Fikret Öcal)



Şekil 1: CONT14 oturumlarında ölçü yapan VLBI istasyonları

## 2. Analiz

CONT14 oturumlarının analizleri Vienna VLBI Software (VieVS) (Boehm vd. 2009) versiyon 2.3 ile gerçekleştirilmiştir. Nutasyon ofsetleri Uluslararası Astronomi Birliği (IAU) 2006 presesyon-nutasyon model değerleri artı IERS C04 08 serisi (Bizouard ve Gambis, 2009) düzeltme değerlerine sabit alınmıştır.  $x_p$ ,  $y_p$  ve  $\Delta UT1$  değerleri Evrensel Zaman (UT) tam saatleri (0, 1, ..., 23 UT) kestirim epoklarında parçalı lineer ofset fonksiyonları ile mutlak veya bağıl herhangi bir kısıtlayıcı kullanılmadan kestirilmiştir. Yer dönme parametreleri (Earth rotation parameters, ERP:  $x_p$ ,  $y_p$  ve  $\Delta UT1$ ) öncül değerleri IERS C04 08 kombinasyon serilerinin Lagrange enterpolasyonu ile elde edilmiş ve bu Yer dönme parametreleri değerlerine günlük ve yarım-günlük (yüksek frekanslı) okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli (Petit ve Luzum, 2010; Ray vd., 1994) öncül düzeltmeleri uygulanmamıştır. 5 derece yükselim açısının altında herhangi bir ölçü dikkate alınmamış ve ölçülerin ağırlıkları yükselim açısına bağlı olarak düşürülmemiştir. Her oturum için bir atomik saatin okumaları hatasız kabul edilerek (sabit alınarak), bu saate göre diğer saatlerin senkronizasyon (ofset ve trend) hataları, kuadratik bir polinomun katsayılarına ek olarak 30 dakikalık parçalı lineer ofsetler kestirilerek ölçülerden indirgenmiştir. Başucu hidrostatik (kuru) gecikmeleri toplam yüzey basıncı ölçümlerine göre hesaplanmış (Saastamoinen 1972) ve öncül olarak ölçülerden indirgenmiştir. Başucu ıslak gecikmeleri ise 30 dakikalık parçalı lineer ofset fonksiyonları kullanılarak, troposfer sinyal gecikme modelinin (Davis vd. 1985, 1993) kısmi türevleri olan troposfer ıslak izdüşüm fonksiyonu değerleri dizayn (ölçü denklemlerinin ilgili katsayıları) matrisini oluşturacak şekilde kestirilmiştir. Hidrostatik ve ıslak gecikmeler için Vienna Mapping Functions 1 (VMF1, Böhm vd. 2006) kullanılmıştır. Günlük istasyon koordinatları, No-Net-Translation (NNT) ve No-Net-Rotation (NNR) TRF datum koşul denklemleri normal denklem sistemlerine uygulanarak elde edilmiştir. Böylece, öncül TRF kataloğu, VieTRF13b (Krasna vd. 2014) ile kestirilen TRF arasındaki dönüklük ve ötelemeler sıfırlanmıştır. Kuazar (quasi-stellar radio source) koordinatları ICRF2 kataloğuna sabit alınmıştır (Fey vd. 2009). 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 öncül anten koordinatlarına düzeltme olarak getirilmiştir. Bunlar: katı Yer gelgitleri (IERS2010 konvansiyonları, Petit ve Luzum 2010), okyanus gelgitsel yüklemeleri (FES2004, Lyard vd. 2006), atmosfer basıncı yüklemeleri (Petrov ve Boy 2004) ve kutup gelgitleridir (IERS2010 konvansiyonları, Petit ve Luzum 2010). IERS'in yüksek frekanslı okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modeli,

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

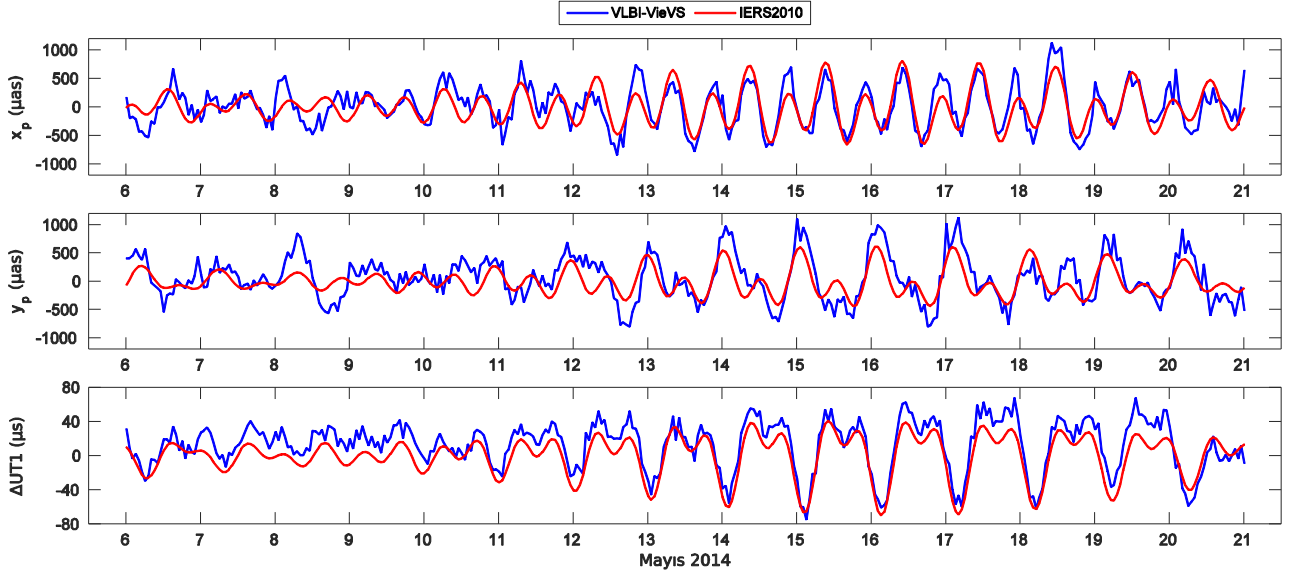
$$y_p(t) = \sum_{k=1}^{71} A'_k \cos(\xi_k(t)) + B'_k \sin(\xi_k(t)) \quad (2)$$

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

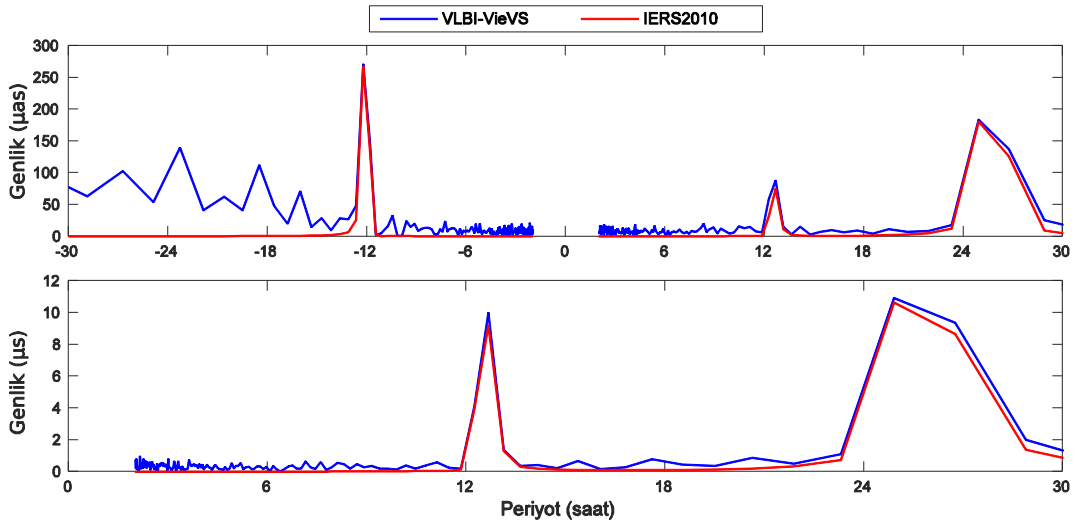
eşitliklerinden hesaplanır. Yukarıdaki (1, 2 ve 3) eşitliklerde verilen harmonik fonksiyonlarda  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $A'_k$ ,  $B'_k$ ,  $A''_k$  ve  $B''_k$  her bir  $k$  gelgitinin eş-fazlı ve faz-dışı genliklerini,  $t$  1 Ocak 2000, 12 UT'den itibaren ilgili epoğa kadar geçen Yersel Zaman (Terrestrial Time, TT) sisteminde tanımlı ve birimi Julyen yüzyılı olan zaman aralığı olmak üzere;  $\xi_k(t)$  güneş ve Ay'ın ilgili epoktaki astronomik konum bileşenlerinden (Delaunay (Astronomical) arguments) hesaplanan  $k$  gelgitinin faz açısını göstermektedir. 71 adet gelgitin periyot, faz ve genlik değerleri belirlenerek oluşturulmuştur (Petit ve Luzum, 2010; Ray vd., 1994). Gelgitsel hareketin en büyük genlikli 8 tanesi; günlük (24 saatlik) periyotta

olanları: O1, P1, Q1, K1 ve yarı günlük (12 saatlik) periyotta olanları: N2, S2, M2, K2 ana gelgitler olarak adlandırılmaktadır.

UT saat tam başlarında (0, 1, 2, ..., 23 UT) kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatları ve  $\Delta UT1$  kestirim değerleri ile günlük ve yarım-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 ( $x_p - i y_p$ ) hesaplanmıştır. Model ve kestirim değerlerinin uyuşumunun belirlenmesi amacıyla 3 parametre için farkların ağırlıklı ortalaması (weighted mean difference) ve farkların ağırlıklı standart sapması (weighted root mean square difference) hesaplanmıştır. Bu değerler;  $x_p(VLBI - model)$ :  $25 \pm 224 \mu\text{as}$ ,  $y_p(VLBI - model)$ :  $64 \pm 250 \mu\text{as}$  ve  $\Delta UT1(VLBI - model)$ :  $13 \pm 11 \mu\text{s}$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 2: CONT14 oturumlarından saatlik epoklarda kestirilen ve IERS2010 yüksek frekanslı okyanus gel-gitleri Yer dönme parametreleri değişim modelinden aynı epoklar için hesaplanan Yer dönme parametreleri ( $x_p, y_p$  ve  $\Delta UT1$ ) zaman serileri.  $x_p, y_p$  ve  $\Delta UT1$  parametrelerin kestirilen standart hatalarının medyanı sırası ile 181  $\mu\text{as}$ , 180  $\mu\text{as}$  ve 12  $\mu\text{s}$  olarak elde edilmiştir.



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

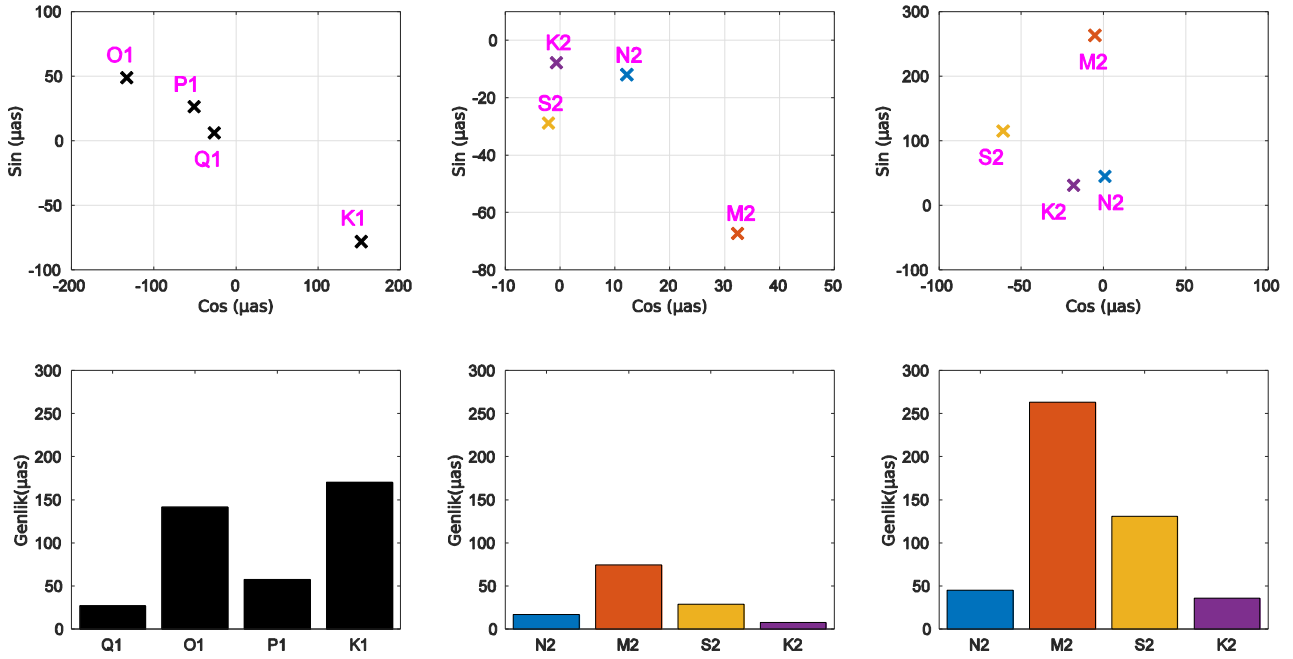
Dünyanın dönüş yönüyle aynı yönde (batıdan doğuya doğru) olan kutup gezinmesi hareketi, ileri-giden hareket (prograde motion of CIP in TRF); tersi yöndeki hareket ise geri-giden (retrograde motion of CIP in TRF) harekettir. Kutup gezinmesi yüksek frekanslı, gelgitsel harmonik ileri- ve geri-giden hareketleri, 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 (Celestial Intermediate Pole, 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). Elde edilen sonuçlarda, günlük periyotlu gelgitlerin sadece ileri-giden harekete sebep olduğu fakat yarı günlük periyotlu olanların ise hem ileri-giden hem de geri-giden hareketlere sebep olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4: Günlük periyotlu ileri-giden hareket (solda), yarı günlük periyotlu ileri-giden hareket (ortada) ve yarı günlük periyotlu geri-giden hareket (sağda) fazör gösterimleri (üstte) ve mutlak genlikleri (altta).

#### 4. Sonuçlar

Kutup gezinmesinin gelgitsel harmonik ileri-giden 12 ve 24 saat periyotlu hareketleri, geri-giden 12 saat periyotlu hareketi ve  $\Delta UT1$  esas alındığında, IERS'in yüksek frekanslı okyanus gel-gitleri kaynaklı Yer dönme parametreleri değişim modelinden hesaplanan değerleri, VLBI ölçülerinden elde edilen kestirim değerleri ile büyük ölçüde uyumludur. Fakat, VLBI kestirim değerleri, 12 saatten büyük periyotlu geri-giden hareketlerde model değerlerinden 50 ila 150 μas aralığında sapmalar göstermektedir. IERS konvansiyonları gereği 24 saatten büyük periyottaki ileri-giden ve geri-giden kutup gezinmesinin tüm gelgitsel harmonik hareketleri nutasyon hareketlerine dahil edilmelidir. Kutup gezinmesinin 12 saatten büyük periyotlu geri-giden hareketlerinin kestirim değerlerinde görülmesinin başlıca nedeni nutasyon ofsetleri ile yüksek korelasyona sahip olmasıdır. Bunun yanı sıra, model değerleri ile kestirim değerleri arasındaki ağırlıklı standart sapmaların VLBI ölçülerinden kestirilen standart hatalarından çok daha yüksek olması Yer dönme parametreleri değişim modelinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, model ve kestirim değerleri farklarının bir diğer nedeninin analizlerimizde öncül olarak ölçülerden indirgemediğimiz gelgitsel olmayan okyanus yüklemelerinin olabileceği düşünülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y244 no'lu bilimsel araştırma projesinin bir bölümü kapsamında gerçekleştirilmiştir. Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisine sağladığı verilerden ötürü teşekkür ederiz

## Kaynaklar

- Bizouard, C., Gambis, D., (2009), *The combined solution C04 for Earth orientation parameters consistent with international terrestrial reference frame*, In: Drewes, H., (Ed.), *Geodetic Reference Frames*, IAG Symp, vol. 134. pp. 265–270. doi: 10.1007/978-3-642-00860-3\_41.
- 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*, J Geophys Res., 111(B02):406. doi:10.1029/2005JB003629.
- 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*, Prooc 19:th Working Meeting European VLBI for Geodesy and Astrometry, 161-164, Bordeaux, France.
- 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 Sci., 20(6):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 Sci., 28(6):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*, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodesie, Frankfurt am Main, IERS Technical Note 35.
- Krasna 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, vol. 139. pp. 203–208. doi: 10.1007/978-3-642-37222-3\_26.
- Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O., (2006), *Modelling the global ocean tides: Modern insight from FES2004*, Ocean Dyn., 56-394-415, doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- Malkin Z., (2009), *On comparison of the Earth orientation parameters obtained from different VLBI networks and observing programs*, 83(6):557-556. doi: 10.1007/s00190-008-0265-2.
- Nilsson T., Boehm J., Schuh H., (2010), *Sub-diurnal Earth rotation variations observed by VLBI*, Artif Satellites 45(2):49-55, doi: 10.2478/v10018-010-005-8.
- 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, doi:10.1007/s00190-014-0700-5.
- Petit G., Luzum B., (2010), *IERS conventions 2010*, IERS Technical Note; 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, ISBN 3-89888-989-6.
- Petrov L., Boy J.P., (2004), *Study of the atmospheric pressure loading signal in Very Long Baseline Interferometry observations*, J. Geophys. Res., 109 (B3), B03405, doi: 10.1029/2003JB002500.
- 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, Vol.264, No.5160, 830-832.
- Saastamoinen J., (1972), *Introduction to practical computation of astronomical refraction*, Bulletin Geodesique, doi: 10.1007/BF02522047.
- Schuh H., Behrend D., (2012), *VLBI: a fascinating technique for geodesy and astrometry*, J. Geodyn. 61, 68–80.