



JEODEZİK VLBI ÇALIŞMALARININ IERS ÜRÜNLERİNE KATKISI VE KTÜ GEOD IVS ANALİZ MERKEZİNİN ÖNGÖRÜLEN FAALİYETLERİ

E. TANIR¹, K. TEKE^{2,3}, J. BÖHM³, H. SCHUH³

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü,
Jeodezi Anabilim Dalı, Trabzon, etanir@ktu.edu.tr

² Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü,
Jeodezi Anabilim Dalı, Ankara, kteke@mars.hg.tuwien.ac.at

³ Technische Universität Wien Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Höhere Geodäsie, Wien, Austria,
johannes.boehm@tuwien.ac.at, harald.schuh@tuwien.ac.at

Özet

Çok Uzun Baz Enterferometri (Very Long Baseline Interferometry, VLBI), göksel referans sistemi (Celestial Reference System, CRS), Yersel referans sistemi (Terrestrial Reference System, TRS) gerçekleştirmelerinde kullanılan ve Yer dönme parametrelerinin (Earth Orientation Parameters, EOP) tümünü belirleyen tek uzay tekniğidir. VLBI ağırları, Gök kitlelerinin (örn. Güneş, Ay) konumlarında, gravite potansiyelinde, hidrosferde, atmosferde ve Yer'in iç yapısında oluşan değişimlerin, Yer'in yüzeyinde ve Yer'in uzaydaki dönüklüklerinde meydana getirdiği periyodik ve episodik deformasyonları izler. VLBI temel ölçü modelinin bir bölümü de bu amaçla oluşturulmuş jeofizik modelleri kapsar. VLBI ölçülerinin analizi için birbirinden bağımsız olarak farklı gruplar tarafından değişik parametre kestirim analiz yazılımları geliştirilmiştir. Bu çalışmada, IERS 2003 konvansiyonlarını temel alan, yeni geliştirilmiş, güncel bir VLBI jeodezik ve jeofizik parametre kestirim yazılımı olan Viyana VLBI yazılımında (Vienna VLBI software, VieVS) kullanılan parametre kestirim modellerinin bir bölümü tanıtılmıştır. Ayrıca, bu makalede IERS (Uluslararası Yer dönme ve Referans sistemleri Servisi - International Earth rotation and Reference systems Service) tarafınca gerçekleştirilen ITRF (Uluslararası Yersel Referans Çatısı-International Terrestrial Reference Frame), ICRF (Uluslararası Göksel Referans Çatısı -International Celestial Reference Frame) ve EOP ürünlerinin uzay jeodezik tekniklerin kombinasyonundan elde edilmesindeki temel prensiplere değinilmiştir. Çalışmanın son bölümünde, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTU), Harita Mühendisliği Bölümünde yapılanan 'KTÜ GEOD' VLBI Analiz Merkezinin, IVS (International VLBI Service) tarafından öngörülen bilimsel faaliyetleri hakkında bilgiler verilmiştir.

CONTRIBUTION OF GEODETIC VLBI STUDIES TO IERS PRODUCTS AND FUNCTIONS OF KTÜ GEOD IVS ANALYSIS CENTER

Abstract

VLBI (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) is the space technique used for the realization of the Celestial Reference System (CRS), the Terrestrial Reference System (TRS), and it is unique for determining all Earth Orientation Parameters (EOP). VLBI networks monitor periodic and episodic deformations of the Earth's surface and rotation in space, caused by the celestial bodies (e.g. Sun, Moon), gravity potential, hydrosphere, atmosphere and inner Earth. Some parts of the basic observation model of VLBI contain the geophysical models dedicated for this aim. Different working groups and institutions developed their own parameter estimation software individually for VLBI analysis. In this study, some parts of the parameter estimation model used in VieVS (Vienna VLBI software) is introduced which is a new and currently developed VLBI analysis software for estimation of several geodetic and geophysical parameters following the IERS conventions 2003. In addition, some basic information related to determination of IERS (International Earth rotation and Reference systems Service) products basically



ITRF (International Terrestrial Reference Frame), ICRF (International Celestial Reference Frame) and EOP from the combination of space geodetic techniques is clarified. The last part of the study introduces 'KTU GEOD' IVS (International VLBI Service) Associate Analysis Center which is established at the Department of Geomatics, Karadeniz Technical University (KTU) and its foreseen scientific activities.

Keywords: VLBI, ITRF, ICRF, EOP, Combination, Analysis Center

1. Giriş

Çok Uzun Baz Enterferometrisi (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) tekniği (Cohen ve Shaffer, 1971) galaksi içi ve çoğunlukla galaksi dışı uzay objelerinden (quasi-stellar radio source, quasar (kuazar)) dünyaya ulaşan radyo dalgalarının, dünyanın farklı konumlarındaki iki veya daha fazla radyo teleskobu tarafından algılanarak, bu sinyallerin atomik saatler veya hidrojenmaserlar ile zaman etiketlenmesi yapıldıktan sonra korelasyona tabi tutulması sonucu elde edilen sinyal varışlarında oluşan zaman farkını (VLBI temel ölçüsü, τ) temel alan bir uzay tabanlı jeodezik parametre belirleme sistemidir. Kuazarlardan gelen zaman etiketli radyo sinyalleri (dalga boyları 13 ve 3.5 cm, frekansları 2.3 GHz (S-bandı) ve 8.4 GHz (X-bandı)) hard disklere kaydedilerek uçaklar ile veya internet yolu ile korelatörlere aktarılır. Korelatörlerce yapılan sinyal eşleştirmesi ve iyonosfer sinyal gecikme etkisi düzeltilmesi sonucu elde edilen zaman gecikmeleri (ölçüler), kovaryans bilgisi ile birlikte ASCII yapıda ölçü dosyalarına (NGS) kaydedilerek analiz merkezlerinin kullanımına sunulur. Ölçü dosyaları veri tabanı sadece analiz merkezlerine değil tüm ilgilienlere açıktır. Genellikle üniversiteler bünyesinde faaliyet gösteren VLBI analiz merkezlerince, Uluslararası VLBI Servisi (International VLBI Service, IVS) ve Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi'nin (International Earth rotation and Reference Systems Service, IERS) gereksinim duyduğu jeodezik ve jeofizik parametrelerin kestirimi ve analizine yönelik görevler ile birlikte yazılım, veri tabanı ve model geliştirilmesine ilişkin araştırma çalışmaları da yürütülmektedir.

VLBI kestirim parametrelerinin bir bölümü, atomik saat hataları (zamansal çözünürlük: 20 - 60 dakika), troposferik sinyal zenit ıslak gecikmesi (10 - 60 dakika), troposferik sinyal zenit kuru gecikmesi (10 - 60 dakika), troposferik kuzey ve doğu gradyanları (10 - 60 dakika), radyo teleskopları TRF koordinatları (60 dakika, 1 gün, yıllar), kuazar CRF koordinatları (yıllar), Yer dönme parametreleri (kutup gezinmeleri ve yerin dönüş zamanı (60 dakika - 1 gün), nutasyon açıları (1 gün)), Güneş ve Ayın bozucu gravite potansiyelinden ötürü Yer'de oluşan elastik (gel-git, harmonik, tidal) deformasyonların (katı Yer gel-gitlerinin) radyal bileşeni (zenit doğrultusu) olan Love katsayısı ve yatay bileşeni olan Shida katsayısına getirilen düzeltmeler (yıllar), Yer sabit istasyonlarının hız vektörleridir (yıl - yıllar). Bu parametrelerin kestirimi yanında VLBI ile, jeofizik modeller kullanılarak karasal gel-gitler (solid Earth tides), okyanus gel-git yüklemeleri (ocean tidal loading), atmosfer basınç gel-git yüklemeleri (atmosphere pressure tidal loading), tektonik plakaların hareketleri (plate tectonics) izlenmektedir. Bilinmeyenlerin belirlenmesine ilişkin IERS 2003 konvansiyonları resmi tanımlamaları olmasına rağmen (McCarthy ve Petit, 2004) bilinmeyenlerin belirlenmesi ve modelleme amaca yönelik olarak kullanıcıdan kullanıcıya değişebilmektedir. İki radyo enterferometresi arasındaki zaman gecikmesinin (τ_{obs}) modellendiği VLBI temel eşitliği,

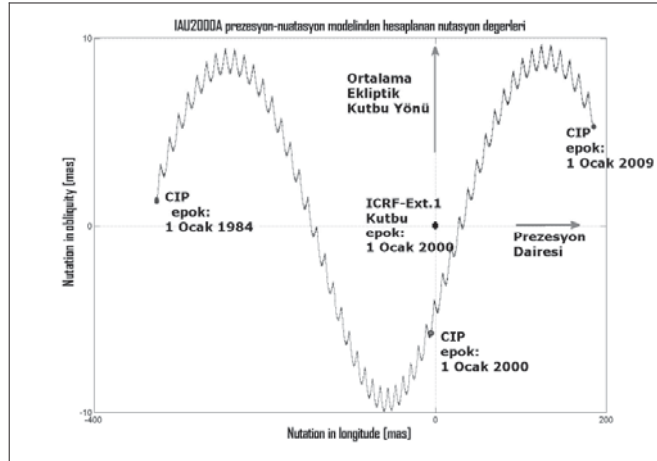
$$\tau_{obs} = -\frac{1}{c} \cdot b \cdot \Phi \cdot R \cdot W \cdot k + \tau_{corrections}$$

$$\tau_{obs} = -\frac{1}{c} \cdot \begin{pmatrix} X_A - X_B \\ Y_A - Y_B \\ Z_A - Z_B \end{pmatrix} \cdot \Phi \cdot R \cdot W \cdot \begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos h(t) \\ \cos \delta \cdot \sin h(t) \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$+ \tau_{j-abb.} + \tau_{t-abb.} + \tau_{Rel.} + \tau_{Tid.} + \tau_{Load.}$$

$$+ \tau_{Instr.} + \tau_{Clock} + \tau_{Ion.} + \tau_{Atm_h} + \tau_{Atm_w}$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik (1)'de, c radyo dalgasının hızını (vakum ortamda ışık hızını), b Yer ağırlık merkezli Yer sabit (Earth Centered Earth Fixed, ECEF) bir referans çerçevesinde (örn. ITRF 2005) tanımlı baz vektörünü, k Gök sabit (Güneş ağırlık merkezli, Barycentric Celestial Reference System (BCRS) veya Yer ağırlık merkezli, Geocentric Celestial Reference System, (GCRS)) Ekvator düzlemini esas alan bir referans çerçevesinde, (örn. ICRF-Ext.1) tanımlı kuasar birim vektörünü göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbunun (Celestial Intermediate Pole, CIP), ekvator düzlemini esas alan göksel bir referans çerçevesine (örn. ICRF2) bağlı hareketi (Nutasyon)

İki farklı sistem arasındaki nutasyon dönüşümü, Φ prezesyon-nutasyon dönüklükleri matrisleri çarpımı ile elde edilir. R Yer'in dönme ekseninin göksel bir referans çerçevesine bağlı dönüklük matrisini göstermektedir. W ise kutup gezinmeleri dönüklükleri matrislerinin (2 adet) çarpımları ile elde edilir. Eşitlik (1) deki bu dönüklük matrislerini oluşturan Yer dönme parametreleri:

- Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbunun (Celestial Intermediate Pole, CIP) kabuk üzerindeki konumu (TRF'de tanımlı koordinatları) olan kutup gezinmeleri (x_p, y_p),
- Yer'in dönme ekseninin göksel bir referans çerçevesine bağlı dönüklüğü ($dUT1=UT1-UTC$),
- CIP'nin CRF'deki konumu diğer bir ifade ile nutasyon açıları ($d\Psi, d\varepsilon$) ve prezesyon açılarıdır (ξ_A, Θ_A) (Şekil 1).



Eşitlik (1)'de X_i, Y_i, Z_i radyo teleskoplarının TRF'de tanımlı (örn. ITRF2000) koordinatlarını, $h(t)$ radyo kaynağının (kuazarın) CRF'de tanımlı (örn. ICRF-Ext.1) Greenwich saat açısını (rektanzasyon), δ radyo kaynağının (kuazarın) yükselim açısını (deklınasyonunu) göstermektedir. Eşitlik (1)'de $\tau_{j-abb.}$, yıllık aberasyon (Yer'in CRS'de hareketi sonucu oluşan radyo dalgası kırılması etkisi) sinyal gecikmesi; $\tau_{i-abb.}$, günlük aberasyon (Yer'in kendi eksenı etrafındaki hareketi sonucu oluşan radyo dalgası kırılma etkisi) sinyal gecikmesi; $\tau_{Rel.}$, relativistik etkiler sinyal gecikmesi; $\tau_{Tid.}$, karasal gel-gitler (solid tides) ve okyanus gel-gitleri (ocean tides) sonucu yerin açısıl momentumunda oluşan değişimlerin meydana getirdiği deformasyonların sinyal gecikmesi; $\tau_{Load.}$, okyanus gel-git ve atmosferik basınç gel-git yüklemeleri değişimleri deformasyonlarının sinyal gecikmesi; $\tau_{lon.}$, iyonosfer sinyal gecikmesi; $\tau_{Instr.}$, aletsel deformasyonlar (örn. VLBI radyo teleskobunun gravitasyonel ve sıcaklık deformasyonları) sinyal gecikmesi; τ_{Atm_h} , troposfer hidrostatik (kuru) sinyal gecikmesi, τ_{Atm_w} , troposfer ıslak sinyal gecikmesini, ve τ_{Clock} , saat senkronizasyon ve frekans tutarsızlıkları hataları sinyal gecikmesidir (Sovers, vd., 1998; Campbell, 1979; Schuh, 1987; Nothnagel, 1991; ve Takahashi, 1994).

2. Vienna VLBI Software (VieVS) Yazılımında Parameter Kestirimi

Viyana VLBI yazılımı (Vienna VLBI software, VieVS), IERS 2003 konvansiyonlarını temel alan ve MATLAB dilinde yazılmış yeni geliştirilmiş güncel bir VLBI jeodezik ve jeofizik parametre kestirim yazılımıdır. Yazılım, verileri alan ve format uyusumunu sağlayan 'vie_init' modülü, jeodezik ve jeofizik modellerden öncül yaklaşık değerleri ve kısmi türevleri hesaplayan 'vie_mod' modülü ve En Küçük Kareler (EKK) parametre kestirimini yapan 'vie_lsm' modülü olmak üzere toplam 3 modülden oluşmaktadır. Her ana modül MATLAB hazır fonksiyonları haricinde yazılan 30 ila 50 civarında fonksiyon içermektedir. Gelecekte Kalman filtreleme yöntemi ile kestirim yapan bir modül ve global çözümleri yapan bir modül daha eklenmesi planlanmaktadır. Bu bölümde VieVS yazılımı 'vie_lsm' modülünde gerçekleştirilen çalışmalara yer verilecektir. VLBI parametreleri Gauss-Markof modeline uygun EKK kestirim yöntemi ile elde edilmiştir. Fonksiyonel ve stokastik modeller

$$\begin{bmatrix} v \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ H \end{bmatrix} dx - \begin{bmatrix} l \\ h \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_c \end{bmatrix}$$

şeklinde oluşturulmuştur. (2) eşitliğinde l indirgenmiş ölçüler vektörünü, H sahte-ölçüler (pseudo-ölçüler) denklemleri (kısıtlayıcılar) dizayn matrisini, P ölçülerin ağırlıklarını, P_c kısıtlayıcı denklemlerin ağırlıklarını, h pseudo-ölçüler vektörünü, dx bilinmeyen parametreler

vektörünü, v ölçü düzeltmeleri ve v_c pseudo-ölçü düzeltmeleri vektörünü göstermektedir. Eşitlik (2) ile verilen gerçek ölçülerin dizayn matrisi (A)

$$A = [A_1 \ A_1 \ \dots \ A_{15}] \quad (3)$$

şeklinde 15 farklı modelden meydana gelmektedir. Dizayn matrisleri, modellerin kısmi türev değerlerinin, Parçalı Lineer (PL) ofset fonksiyonlarının kısmi türevlerinde yerlerine koyulması ile oluşturulmuştur. A_1 atomik saatlerin senkronizasyon ve frekans hatalarının PL ofset modelini, A_2 atomik saat hatalarının ikinci derece polinomlarının trend ve kuadratik terimlerini, A_3 troposferik ıslak zenit gecikmeleri PL ofset modelini, A_4 ve A_5 troposferik kuzey ve doğu gradyanları PL ofset modelini, $A_6 - A_{10}$ Yer dönme parametreleri PL ofset modelini, A_{11} kuazar rektezansiyon, A_{12} kuazar deklinasyon koordinatları PL ofset modelini (NNR koşul denklemleri seçime bağlı olarak ICRF-Ext.1, ICRF-Ext.2 veya ICRF2 kataloglarında tanımlı kuazar koordinatları ile oluşturulur.), A_{13} , A_{14} , A_{15} sırası ile radyo teleskoplarının TRF koordinatları PL ofset modelini (NNT/NNR koşul denklemleri seçime bağlı olarak ITRF 2000, ITRF 2005 veya VTRF 2005 kataloglarında tanımlı istasyon koordinatları ile oluşturulur) içerir. PL ofsetlerin kestirim aralığı beş dakikadan, bir güne kadar istenilen aralıkta seçilebilir. Tüm ofsetlerin kestirim epokları UTC saat başları veya kesirli saat başlarıdır (örn: 18 UTC, 18:20 UTC, 0.05 UTC). Böylece tüm kestirim değerlerinin epoklarının tek anlamlılığı sağlanmıştır. PL ofset fonksiyonu ölçü denklemi

$$L(t) = x_{i,j} + \frac{t - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} (x_{i,j+1} - x_{i,j}) \quad (4)$$

şeklinde oluşturulmuştur. (4) eşitliğinde $x_{i,j}$, i . istasyon için kestirilen j . PL ofset kestirimini, $t_n - t_{n-1}$, $x_{i,j}$ ve $x_{i,j+1}$ ofset değerinin kestirim aralığını, t ise L ölçüsünün (tarama, scan) yapıldığı zamanı (UTC zaman sisteminde) gösterir. Bu fonksiyonun dizayn matrislerinde kullanılan kısmi türevleri ise

$$\begin{aligned} \frac{dL^k}{dx_{i,j}} &= \left(1 - \frac{t - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right) dy(k)_{\text{model}(s)} & s = 1, 2, \dots, 15 \\ \frac{dL^k}{dx_{i,j+1}} &= \left(\frac{t - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right) dy(k)_{\text{model}(s)} & s = 1, 2, \dots, 15 \end{aligned} \quad (5)$$

şeklindedir. (5) Eşitliğinde k ölçünün sırasını ve $dy(k)_{\text{model}(s)}$ ise s . modelin, k . ölçüye ilişkin kısmi türev değerini ifade eder. Üç radyo teleskobunun, bir kuasara yaptığı taramadan elde edilen üç ölçüyü içeren, tek kestirim aralıklı dizayn matrisi



$$\begin{bmatrix} \frac{dL^1}{dx_{1,1}} & \frac{dL^1}{dx_{1,2}} & \frac{-dL^1}{dx_{2,1}} & \frac{-dL^1}{dx_{2,2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dL^2}{dx_{2,1}} & \frac{dL^2}{dx_{2,2}} & \frac{-dL^2}{dx_{3,1}} & \frac{-dL^2}{dx_{3,2}} \\ \frac{dL^3}{dx_{1,1}} & \frac{dL^3}{dx_{1,2}} & 0 & 0 & \frac{-dL^3}{dx_{3,1}} & \frac{-dL^3}{dx_{3,2}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

şekindedir. (2) eşitliği ile verilen pseudo-ölçü denklemleri (kısıtlayıcı denklemler) iki ofset arasındaki fark sıfıra eşitlenerek

$$x_{i,j+1} - x_{i,j} = 0 \pm m_{\Delta x} \quad (7)$$

oluşturulmuştur. Kısıtlayıcı denklemler, küçük kestirim aralıkları (örn. 5 - 10 dakika) seçildiğinde bu kestirim aralıklarından bir kısmına ölçü rastlamadığı durumda dizayn matrisinde meydana gelecek rank bozukluğunu (singüler-tekil yapıyı) ortadan kaldırmak için kullanılır. Yukarıdaki kısıtlayıcı denkleme atanan standart sapma değeri $m_{\Delta x}$ büyük olduğunda (kısıtlayıcının ağırlığı küçüleceğinden) kestirime konu olan offset parametrelerinin gevşekleştirilmesi (loosely constrained) sağlanır. Böylece kestirim aralıklarından bir kısmına ölçü rastlamadığında dahi regüler yapı sağlanmış olmakla birlikte kısıtlayıcıların gevşekleştirilmesi sayesinde kestirim parametreleri üzerindeki kısıtlayıcı denklemlerin etkisi ortadan kaldırılır. (2) eşitliği ile verilen H matrisi

$$H_i = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & H_{15} \end{bmatrix} \quad (8)$$

şeklinde her model için oluşturulmuştur ve blok diagonal şekilde birleştirilmiştir. VLBI ağı datumunun belirlenmesinde ağı öteleme, dönüklük ve ölçek faktörü olmak üzere 7 dış koşula ihtiyaç vardır. Bu nedenle en az 3 VLBI istasyonu sabit alınabileceği gibi tüm istasyonlar TRF'e sabit de (örn. ITRF 2005) alınabilir. Bunlardan farklı olarak 'No Net Translation (NNT)' ve 'No Net Rotation (NNR)' koşul denklemleri normal denklemlerin katsayıları matrisine eklenerek tüm iz minimum veya kısmi iz minimum koşullarını sağlayacak şekilde TRF'e Helmert benzerlik dönüşümü de yapılabilir. Normal denklem sistemine tek bir istasyon için eklenecek NNT/NNR koşulu



$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -z_i'' & -y_i'' \\ z_i'' & 0 & -x_i'' \\ -y_i'' & x_i'' & 0 \\ x_i'' & y_i'' & z_i'' \end{bmatrix} \quad (9)$$

şekindedir. Yukarıdaki eşitlikte x_i'' , y_i'' , z_i'' NNT/NNR koşul denklemlerine dahil edilen istasyonların TRF koordinatlarıdır (ilgili istasyonların geometrik merkezine göre normlandırılmış değerler). Ölçü denklemleri matrisine eklenen kısıtlayıcı denklemleri ve normal denklemlerin katsayıları matrisine eklenen ağa datum veren koşul denklemlerini içeren dengeleme modeli

$$N_{toplam} = \begin{bmatrix} A^T P A + H^T P_c H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad b_{total} = \begin{bmatrix} A^T P l + H^T P_c h \\ b_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

çözümü

$$dx_{toplam} = \begin{bmatrix} dx \\ x_c \end{bmatrix} = N_{toplam}^{-1} b_{toplam} \quad (11)$$

sonucu bilinmeyenler dx elde edilir. (11) eşitliğinde b_c koşul denklemlerine ait normal denklem sabitlerini gösterir. Soncul varyans

$$m_o = (v^T P v + v_c^T P_c v_c) / dof \quad (12)$$

şeklinde elde edilir. (12) eşitliğinde serbestlik derecesi

$$dof = n_{ölçü} + n_{koşul} - n_{bilinmeyenler} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır ve n sayısı ile ölçü sayısı, koşul sayısı ve bilinmeyen parametre sayısını gösterir. Regüler çözümün yapılabilmesi için:

- Oturuma katılan herhangi bir atomik saatin ofset, trend ve kuadratik terimi sabit alınır diğer bir ifade ile dizayn matrisinden ilgili parametrelere ilişkin sütunlar silinir veya saatler için NNT koşul denklemleri normal denklemlere eklenir,
- Eğer istasyon koordinatları kestirimi yapılacak ise oturuma katılan herhangi en az 3 radyo teleskobunun koordinatları TRF'e (örn. ITRF2000 veya VTRF2005) sabitlenir. Diğer bir ifade ile dizayn matrisinde sabit alınmak istenen istasyonların ilgili sütunları silinir veya NNT/NNR koşulları uygulanır. VLBI baz duyarlığı çok yüksek olduğundan NNT/NNR koşul denklemlerinden ölççek faktörü için oluşturulan koşul denklemleri kullanılmaz (her istasyon için 3



öteleme ve 3 dönüklük yeterlidir). Bunun nedeni VLBI'in oluşturduğu polihedronun baz duyarlılığının ITRF'e dayandırılarak oluşturulan baz duyarlılığına göre çok daha yüksek olmasıdır.

- Eğer kuazar koordinatlarının (Greenwich saat açısı ve deklinasyon) kestirimi yapılacak ise en az bir kuazarın koordinatları sabitlenir, diğer bir ifade ile ilgili sütunlar dizayn matrisinden silinir veya NNR koşulu uygulanır. Bunu sağlamak amacıyla her kuazar için iki dönüklük koşul denklemi normal denklemlere eklenir.

VieVS yazılımı, içerdiği yukarıdaki parametre kestirimi seçeneklerini esnek bir şekilde sunmaktadır. Analizi yapan kişi amacı doğrultusunda hangi parametreleri kestirmek istediğini, kestirim aralıklarını, istediği parametreler için zorlamalı veya gevşek kısıtlayıcı çözümleri, farklı radyo teleskopları için, farklı atomik saatler için ve farklı kuazarlar için NNT/NNR koşullarını seçebilir. Parametre kestirimi öncesi farklı troposferik izdüşüm fonksiyonlarını (Vienna mapping function, VMF; Global mapping function, GMF; Niel mapping function, NMF) farklı kesme açıları için uygulayabilir. Farklı CRF kataloglarını veya farklı TRF kataloglarını datum seçiminde apriori değerler olarak kullanabilir. İstasyon konumlarına uygulanan jeofizik modellerden katı Yer gel-gitleri etkisi, okyanus yüklemeleri etkisi, atmosferik basınç gel-git etkisi apriori modele dahil edilebilir veya çıkarılabilir. Yer dönme parametreleri yüksek frekanslı gel-gitleri: okyanus gel-gitlerinin kutup gezinmelerine etkisi (Eanes modeli), Güneş, Ay bozucu gravite potansiyelindeki değişimin (lunisolar gravitative attraction) kutup gezinmelerine etkisi, UT1 gel-git salınımları (UT1 tidal variations) apriori modele dahil edebilir veya çıkarılabilir (Boehm, vd., 2009; Schuh, vd., 2009).

2.1. VLBI Saat Hatası Modeli

Sinyal gecikme ölçülerindeki (τ) en büyük hatayı radyo teleskoplarındaki atomik saatlerin senkronize olmamaları hataları (ofsetler) ve frekans tutarsızlıklarından kaynaklanan hatalar (trendler) oluşturur. VLBI parametre kestiriminde saat sıçraması (clock break) oluşmamış olan herhangi bir saat tüm oturum boyunca sabit alınır (ofset, trend ve kuadratik terim). Böylece, senkronizasyon hataları ve frekans tutarsızlıkları her saat için giderilmiş olur. Frekans tutarlılığı yüksek bir atomik saat veya hidrojen maser'ın referans saat olarak alınması analiz sonuç duyarlıklarını artırır. Saat parametrelerinin belirlenmesi için 2. derece bir polinom yeterlidir. Her bir saat için ölçü denklemi

$$\tau_{saat(s)} = \beta_0^{saat(s)} + \beta_1^{saat(s)}(t_i^{saat(s)} - t_0) + \beta_2^{saat(s)}(t_i^{saat(s)} - t_0)^2 \quad (14)$$

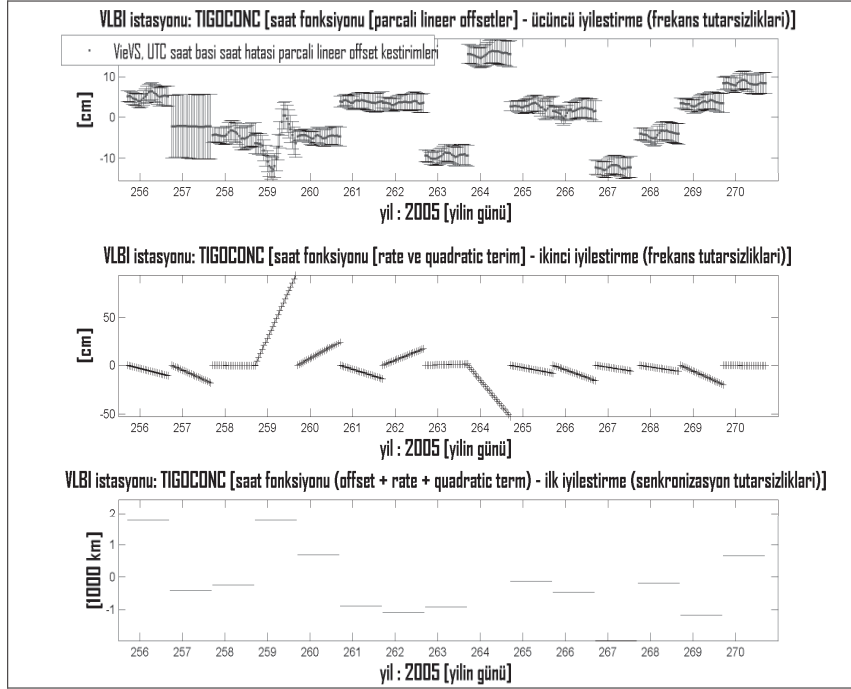
şeklinde oluşturulur. Burada s taramada (ölçüde) kullanılan saatlerden birini, β_i polinomun bilinmeyen katsayılarını, t_i her bir saatin farklı epoklardaki taramalara ait zaman değerlerini, t_0 referans (sabit) alınan saatin referans epoğundaki (oturumdaki ilk tarama) zaman değerini göstermektedir. Zaman gecikmeleri için ölçü denklemi,

$$\Delta \tau_{saat(s-1,s)} = \tau_{saat,s-1} - \tau_{saat,s} \quad (15)$$

şeklinde dir. Ölçü denklemlerinin, saat parametreleri bilinmeyenlerine göre kısmi türevleri,

$$\begin{aligned}\frac{d\tau_1}{d\beta_0} &= 1d\beta_0^{saat1} - 1d\beta_0^{saat2} \\ \frac{d\tau_1}{d\beta_1} &= (t_1^{saat1} - t_0)d\beta_1^{saat1} - (t_1^{saat2} - t_0)d\beta_1^{saat2} \\ \frac{d\tau_1}{d\beta_2} &= (t_1^{saat1} - t_0)^2 d\beta_2^{saat1} - (t_1^{saat2} - t_0)^2 d\beta_2^{saat2}\end{aligned}\quad (16)$$

şeklinde (Schuh, 1987; Titov, vd., 2004; Tesmer, 2004; Boehm, vd., 2009). Kuadratik polinoma ek olarak VieVS yazılımında dizayn matrisine frekans tutarsızlıklarından ötürü meydana gelen yüksek derecedeki değişimleri de düzeltebilmek için PL ofset modeli eklenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. CONT05 oturumları VieVS saat hata modeli kestirim değerleri

2.2. VLBI Troposfer Sinyal Gecikme Modeli

Atmosferin en alt tabakası olan troposferin, yaklaşık olarak kalınlığı, kutuplarda ~6-7 km, ekvatorunda ~16-20 km ve 45° enleminde ~12 km dir. Troposfer tabakasından geçen radio dalgaları yol olarak uzun fakat zaman olarak kısa bir yolu seçerler. Bu nedenle VLBI ölçülerine (τ)



troposfer sinyal gecikmesi düzeltilmesi getirilir. Troposferik sinyal gecikmesi $\Delta L_i^e(t)$ hidrostatik ve ıslak olmak üzere iki kısımda

$$\Delta L_i^e(t) = \Delta L_h^z(t) \cdot mf_h(e) + \Delta L_w^z(t) \cdot mf_w(e) + mf_g(e) \cdot [G_N \cos(\alpha) + G_E \sin(\alpha)] \quad (17)$$

modellenir (Davis, vd., 1985). Eşitlik (17)'de $mf_{h,w,g}$ hidrostatik, ıslak ve gradyan izdüşüm fonksiyonlarını (mapping functions), $\Delta L_{h,w}^z$ zenit doğrultusundaki hidrostatik ve ıslak troposferik gecikmelerini, $G_{N,E}$ kuzey ve doğu gradyanlarını, e sinyal yolunun yükselim açısını, α sinyal yolunun kuzey ile yaptığı açığı (azimut), t ölçü zamanını ifade eder (Şekil 4, Şekil 5).

Bir istasyonda, t anındaki zenit doğrultusu boyunca oluşan hidrostatik (kuru) gecikme $\Delta L_h^z(t)$, basınç $p(t)$ (hPa), istasyonun enlemi φ (°) ve yüksekliği h (m) olmak üzere,

$$\Delta L_h^z(t) = 0.0022768 \cdot \frac{p(t)}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \cdot h)} \quad (18)$$

eşitliğinden hesaplanır (Saastamoinen, 1973). Yüzey basınç ölçüleri ile hidrostatik gecikme 1 mm den daha duyarlı biçimde kestirilebilmektedir. Deniz seviyesi için, zenit hidrostatik gecikmesi yaklaşık 2.3 metreden, 5° yükselim açısında 25 metreye kadar artar (Boehm, vd., 2006).

Zenit ıslak gecikmesi ise çöl ortamında milimetre düzeylerinde iken nemli bölgelerde 35 santimetreye kadar çıkmaktadır. Troposfer tabakasındaki su buharı yüksekliğe ve zamana bağlı olarak çok değişkendir. Bu nedenle zenit ıslak gecikmesi yüzeyde yapılan basınç, sıcaklık ve nem gibi ölçülerle yeterli duyarlılıkta belirlenemez. Troposfer zenit ıslak gecikmesinin ($\Delta L_w^z(t)$) belirlenmesinde, VLBI istasyonunun bulunduğu yerde yapılan radyosonda (radiosonde) veya su buharı radyometresi (water vapor radiometer) ölçülerinden troposferin katmanları boyunca (zenit doğrultusunda) yaklaşık 30 km uzunluğunda ve 30 seviye yüzeyinden elde edilen su buharı basıncı (hPa), sıcaklık (°C) ve bağıl (rölatif) nem (%) değerleri kullanılır. 10 metre aralıklı yüzeyler için 100 km yüksekliğe kadar, ölçülen değerlere interpolasyon ve extrapolasyon yapılmasının ardından her katman için bu belirlenen yeni enterpolasyon değerleri ile ıslak refraktivite (ray tracing) değerleri hesaplanır. Tüm katmanlardaki ıslak refraktivite değerlerinin toplamından zenit ıslak gecikme değeri elde edilir. Zenit ıslak gecikmesi VLBI analizinde bilinmeyen parametre olarak hesaplanır.

Troposferik sinyal gecikmesi ($\Delta L_w(t)$) her baz için

$$\Delta L_w^e(t) = -\frac{1}{c} [\Delta L_2^e(t) - \Delta L_1^e(t)] \quad (19)$$

şeklinde hesaplanır (Şekil 4). Burada $\Delta L_i^e(t)$ i istasyonunda, t zamanında, e yükselim açısına ait troposferik sinyal gecikmesidir. VLBI temel fonksiyonel modeline dahil edilen ise, her iki

istasyondaki gecikmenin farkıdır (Eşitlik 19), diğer bir ifade ile ölçüye getirilen troposferik sinyal gecikme düzeltmesidir.

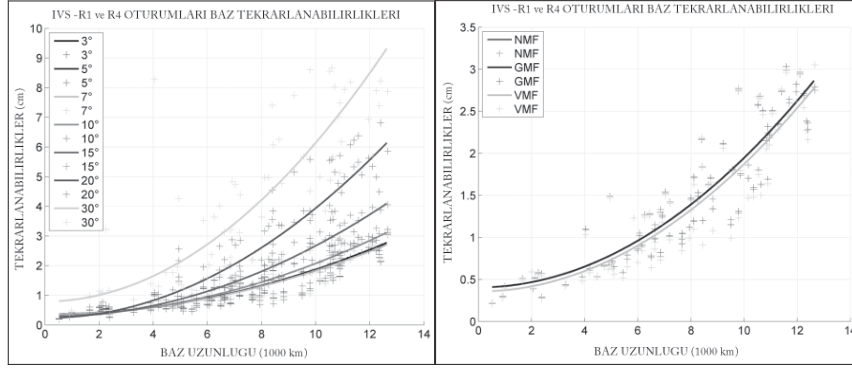
İzdüşüm fonksiyonları ($mf_{h,w}$) herhangi bir istasyonda, t anında zenit yönündeki troposferik gecikme ile ufuk düzleminde rasgele alınan herhangi bir yükselim açısındaki troposferik gecikme arasındaki oranı veren kesirli bir fonksiyondur (Niell, 1996). Troposferin kalınlığının ekvatorundan kutuplara doğru incelmelerinden ötürü herhangi bir istasyonda t anında aynı yükselim açısındaki zenit gecikmeleri aynı olmazlar. t anında aynı yükselim açısı için sinyalin güney troposfer yolunun kuzeye göre daha fazla olmasından dolayı troposferik gecikme miktarı, güneye doğru olan ölçülerde kuzeye doğru olan ölçülerden daha fazladır (troposferde homojen yapıda nem dağılımı ön koşulu ile). Buna troposfer gecikmesinin azimutal asimetri özelliği denir ve tüm izdüşüm fonksiyonlarında gradyanlar ile dikkate alınır. Gradyanları atmosferin küresel olmayan fazlalıklarındaki troposferik gecikme değerleri şeklinde de tarif etmek mümkündür (Şekil 5). Gradyan izdüşüm fonksiyonu,

$$mf_g(e) = mf_w(e) \cot(e) \quad \text{veya} \quad mf_g = mf_h(e) \cot(e) \quad (20)$$

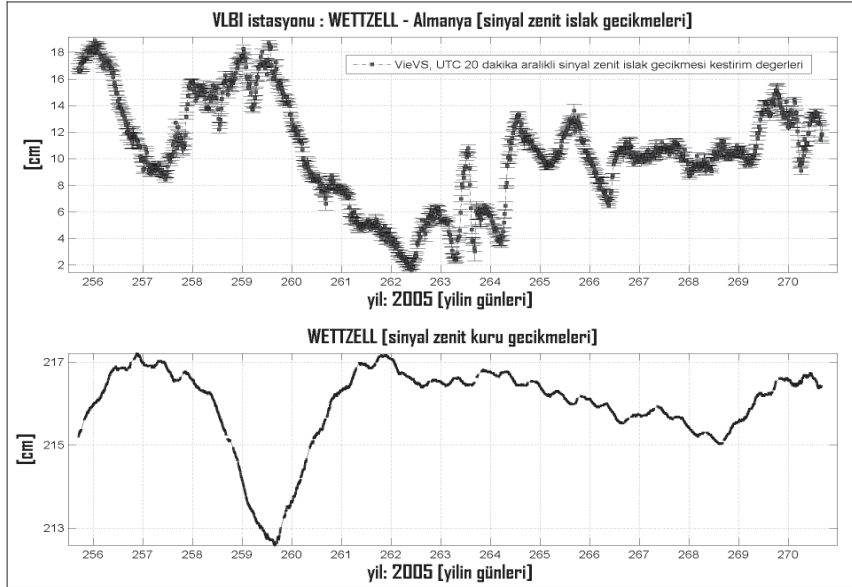
şeklinde ifade edilir. Jeodezik izdüşüm fonksiyonları

$$mf_{h,w}(e) = \frac{1 + \frac{a_i}{b_i}}{1 + c_i} \frac{\sin(e) + \frac{a_i}{\sin(e) + c_i}}{\sin(e) + \frac{b_i}{\sin(e) + c_i}} \quad (21)$$

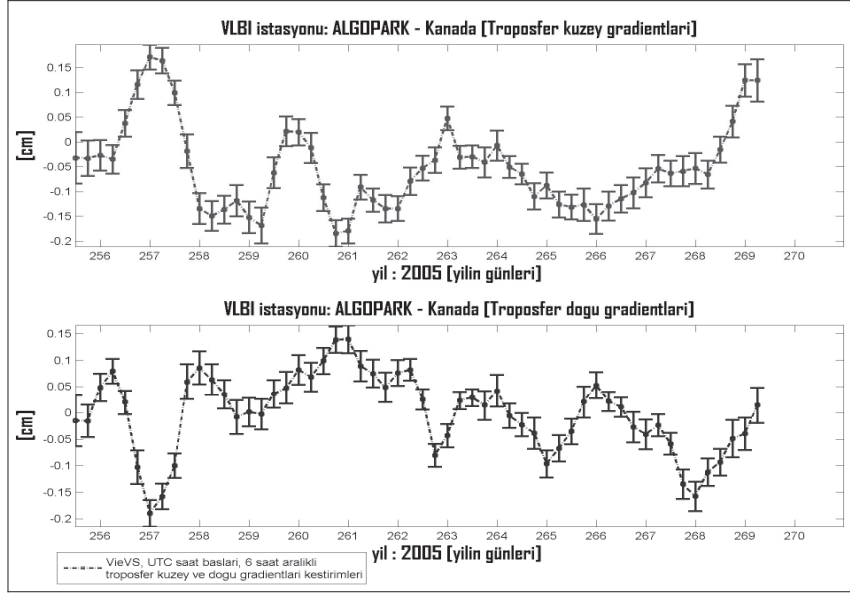
eşitliği ile verilen kesirli fonksiyondaki (Marini, 1972) hidrostatik ve ıslak a_i, b_i, c_i, \dots parametrelerini hesaplama yönü ile farklılaşırlar. Bu katsayılar enlem, elipsoidal yükseklik, yılın günü, yüzey sıcaklığı, toplam yüzey basıncı gibi ölçülerin bir fonksiyonu olan standart atmosfer modelleri ile (Chao, 1974) hesaplanabileceği gibi, radyosonda verileri ile (Niell, 1996), veya şimdilerde sayısal atmosfer modelleri (Numerical Weather Models) (Boehm, vd., 2006) ile de hesaplanabilir. İzdüşüm fonksiyonlarının duyarlılığı tüm kestirim parametrelerini, özellikle nokta yüksekliklerinin duyarlıklarını büyük oranda etkilemektedir. Farklı troposferik izdüşüm fonksiyonları (Niel Mapping Function, Global Mapping Function, Vienna Mapping Function) ve farklı kesme açıları için 01/04/2002 (mjd:52278) ve 06/29/2007 (mjd:54280) tarihleri arasında gerçekleştirilen tüm IVS-R1 ve -R4 oturumlarından elde edilen dengelenmiş baz vektörlerinin ortalama baz tekrarlanabilirlikleri Şekil 3'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucu sayısal atmosfer modellerini esas alan VMF ve 7° kesme açısı en yüksek baz duyarlılığının elde edilmesini sağlamıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Soldaki grafik: Farklı kesme açıları için VMF baz tekrarlanabilirlikleri ve sağdaki grafik: 3° kesme açısı için farklı troposferik izdüşüm fonksiyonları (NMF, GMF ve VMF) baz tekrarlanabilirlikleri.



Şekil 4. VieVS, CONT05 oturumlari 20 dakika aralikli zenit ıslak gecikme kestirim değerleri ve zenit kuru gecikmeler



Şekil 5. VieVS, CONT05 oturumları 6 saat aralıklı troposferik kuzey ve doğu gradyanları kestirim değerleri

3. Uzay ve Uydu Jeodezik Tekniklerin Kombinasyonu ve IERS Ürünleri

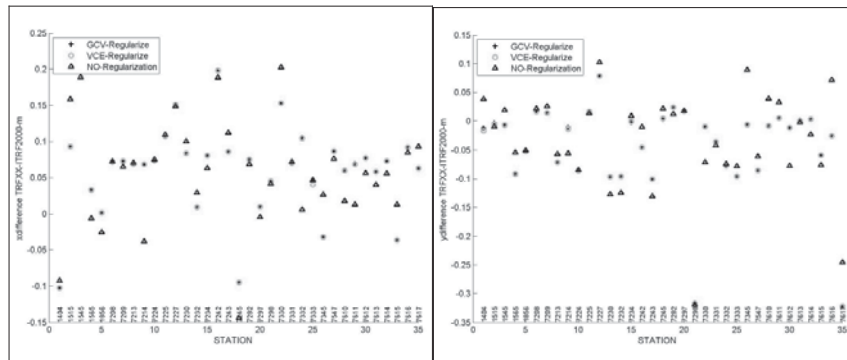
Temel jeodezik uzay ve uydu tekniklerinin VLBI, SLR/LLR (Satellite/Lunar Laser Ranging), GNSS (Global Navigation Satellite System), DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite) kombinasyonu son yıllarda jeodezi temel hedefleri arasındadır. Uzun yıllardan beri uzay ve uydu jeodezik verilerin analizine katkıda bulunmuş gruplar sonuçlarını birbirleriyle kıyaslamaktadırlar. Yer'in geometrisi, Yer'in gravite alanı ve Yer'in dönüklüğü gibi temel jeodezik parametrelerin kestirimi farklı tekniklerden (VLBI, GNSS, SLR/LLR, DORIS) elde edilen verilerin analizi ile elde edilmektedir. Birden fazla teknikten elde edilen bu parametrelerin karşılaştırılması ve kombinasyonu, IERS'in ürünlerinden olan ITRF, ICRF ve EOP tutarlılığının sağlanması gibi bir çok amaç için gereklidir.

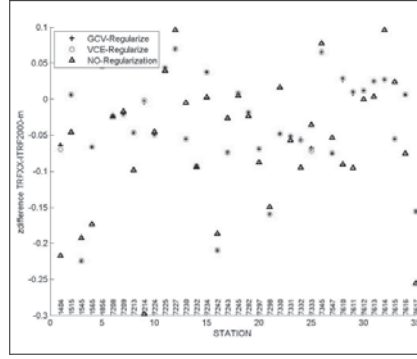
Aynı veya farklı tekniklerin her bir çözümünün kombinasyonu ölçüler, normal denklemler ve sonuçlar bazında gerçekleştirilebilir. En uygun yaklaşım ölçüler düzeyinde yapılan kombinasyondur. Ancak böyle bir kombinasyon oldukça nitelikli yazılımları gerektirir. Her bir ölçü tekniğine ait çözümlerde aynı modeller ve parametreler kullanılırsa normal denklemler düzeyinde yapılan kombinasyon ölçü denklemleri düzeyinde yapılan kombinasyonla aynı sonuçları verir (Rothacher 2002a, Rothacher 2002b).

Farklı Analiz Merkezleri (AC)'den elde edilen sonuçların giriş verisi olarak kullanılmasıyla tek bir zaman serisi üretmek için gerçekleştirilen kombinasyona intra-teknik kombinasyon denilmektedir. Intra-teknik kombinasyondan elde edilen tekniğe özel sonuçların giriş verisi

olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen kombinasyon da inter-teknik kombinasyon olarak bilinmektedir. Inter-teknik kombinasyonda önemli bir unsur da farklı uydu ve uzay jeodezik ölçü tekniklerinin bulunduğu yerleşelerde (co-location sites) ölçü sistemlerinin birbirleriyle ilişkisi bağlantı ölçüleri (local ties) yardımıyla sağlanmasıdır (Altamimi 2001; Ray ve Altamimi 2005). Bu bağlantı ölçüleri, yersel ölçü teknikleri kullanılarak yapılmaktadır. Dolayısıyla uydu ve uzay jeodezik tekniklerin kombinasyonu yersel ölçü tekniklerinin kombinasyonunu da içeriyor ifadesini kullanmak çok doğru ve yerinde olacaktır.

Her bir ölçü tekniğinden elde edilebilecek ortak bilinmeyen parametreler normal denklemlerdeki ortak bilinmeyen parametrelerin inter-teknik kombinasyonu yolu ile daha duyarlı belirlenebilir. Tutarlı kombinasyon sonuçlarına ulaşmak için bağlantı ölçülerinin kalitelerinin değerlendirilmesi ve bunların kombinasyon sonuçları üzerine etkileri, her bir analiz merkezinden elde edilen sonuçların kalite kontrolü, bu sonuçların kombinasyon aşamasında uygun ölçeklendirilmesi, kombinasyon sonucu için datum tanımı, en uygun optimal bir kombinasyon yöntemlerinin seçimi ve en son kombinasyon sonucunun kalite kontrolü gibi dikkate alınması gereken bir çok konu vardır (Angerman et al. 2002). Kombinasyonla ilgili bütün bu önemli konular, bilimcileri farklı algoritmalar, yeni fikirler ve yaklaşımlar sağlayarak kombinasyon çalışmalarına katkı sağlamaya teşvik etmiştir. Tanır 2008, VLBI intra-teknik kombinasyonu için her bir VLBI analiz merkezinden elde edilen verilerin kombinasyon aşamasında uygun ağırlıklandırılması ve kombinasyon sonuçlarının kararlılığının sağlanması için uygun regülasyon tekniklerinin kullanılması gibi temel fikirler üzerine kurulmuş optimal bir algoritmayı incelemiştir (Tanır vd. 2009). Bu çalışmadaki VLBI intra-teknik kombinasyondaki temel fikir iki adımlı deformasyon analizindekiyle benzer özelliklere sahiptir (Koch ve Papo 2003). Her bir VLBI AC'ye ait bilinmeyen varyans bileşenleri birinci adımda hesaplanmıştır ve ikinci adımda birleştirilmiş normal denklemler matrisine regülasyon uygulanmıştır. Çalışmadaki temel amaç, VLBI intra-teknik kombinasyonda regülasyonun etkisinin araştırılması ve bu yolla elde edilen sonuçların VLBI tekniğine dayalı elde edilecek TRF gerçekleşmesine etkileri araştırılmıştır. Bölüm 3.2. 'de anlatılacağı üzere ITRF gerçekleştirmesinin farklı uydu ve uzay tekniklerden elde edilmiş olan TRF'lerin uygun kombinasyonu ile elde edildiği gözönünde bulundurulursa, Tanır 2008'de elde edilen sonuçların gelecekteki ITRF gerçekleştirmelerine sağlayacağı bilimsel katkının önemi gözönünde bulundurulmalıdır.





Şekil 6. Regülarizasyon yönteminin kullanılması ve kullanılmamasıyla elde edilen TRF sonuçlarının ITRF2000 ile kıyaslanması

Şekil 6'da 1995-2001 yılları için farklı VLBI analiz merkezlerinden elde edilen sonuçların VLBI intra-teknik kombinasyonla elde edilmiş sonuçlarından hesaplanan TRF'in ITRF2000 ile karşılaştırmasını gösterilmektedir. Burada üç farklı kombinasyon algoritmasından elde edilen sonuçlarla hesaplanan TRF sonuçlarının kıyaslanması yapılmaktadır. 'GCV-Regülarize' ve 'VCE-Regülarize' farklı iki regülarizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen TRF sonuçlarını 'NO-Regülarization' ise regülarizasyon kullanılmadan elde edilen sonuçlardan hesaplanan TRF sonuçlarını göstermektedir. Şekil'de görüldüğü üzere, regülarizasyonla elde edilen sonuçlar diğerine göre daha tatmin edicidir.

IERS'in amacı ICRF, ITRF veya EOP içindeki zaman/uzay değişimlerini yorumlamak için gerekli olan jeofiziksel veriler ve standartlar, sabitler ve modelleri sağlamaktır. IERS, Teknik Merkezler, Veri Merkezleri, Kombinasyon Merkezleri, Analiz Koordinatörü, Merkezi Büro, Yönetim Kurulu gibi birimlerle misyonunu yerine getirir. IGS (Uluslararası GNSS Servisi), ILRS (Uluslararası Laser Ranging Servisi), IVS (Jeodezi ve Astrometri için Uluslararası VLBI Servisi), veya IDS (Uluslararası DORIS Servisi)'nin teknik merkezleri, katkı sağlayan her bir ölçü tekniği (GNSS, SLR/LLR, VLBI, DORIS) kapsamındaki faaliyetlerin organizasyonu ve geliştirilmesinden sorumludur. Veri Merkezleri IERS ürünlerinden (ITRF/ITRS, ICRF/ICRS, EOP, ve jeofiziksel akışkanlık maddeleri) sorumludur. Kombinasyon Araştırma Merkezleri (DGFI - Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Germany, IGN - Institut Géographique National, France, NRCan - Natural Resources, Canada) inter-teknik kombinasyonu gerçekleştirirler. IERS Kombinasyon Araştırma Merkezleri (ASI (Agenzia Spaziale Italiana, Matera, Italy), FESG (Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, Munich, Germany), DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Munich, Germany), FFI (Forsvarets forskningsinstitut, Kjeller, Norway), GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam, Potsdam, Germany), GIUB (Geodätisches Institut Universität Bonn, Bonn, Germany), GRGS (Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale, Toulouse, France), IAA (Institute of Applied Astronomy, St. Petersburg, Russia), IGN (Institut Géographique National, Paris, France) ve JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA)) analiz metodlarının geliştirilmesi ve tavsiye edilmesi, detaylı tanımların sağlanması, ve Analiz Koordinatörleri için gerekli yazılımların sağlanmasından sorumludur. ITRS Kombinasyon Merkezleri (DGFI, IGN, NRCan) Teknik Merkezlerinden elde edilen ITRF verilerinin kombinasyonu ile ITRF ürünlerini sağlar. IERS şemsiyesinin altında uzay

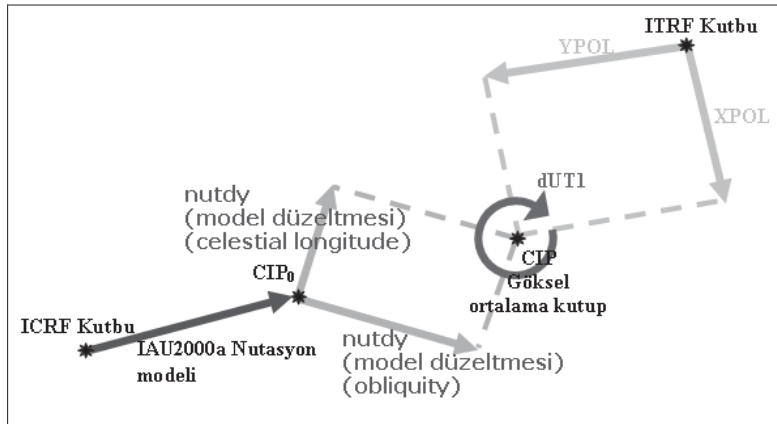
ve uydu jeodezik tekniklerin kombinasyonu alanındaki araştırma ve çalışmaları koordine eden Kombinasyon Çalışma Grubu da mevcuttur.

3.1. Yer Dönme Parametreleri

Güneş ve Ay'ın Yer üzerinde oluşturduğu sabit ve zamana bağlı değişken bozucu gravite potansiyeli, gel-git oluşumları yanında Yer'in dönme ekseninde sapmalara da yol açar. Böylece prezesyon ve nutasyon oluşur. Karmaşık fiziksel modellere ve konvasiyonlara (kabullere) girilmeden Yer'in dönme parametrelerinin belirlenmesinde VLBI'in kullandığı geometrik model şöyle özetlenebilir: IERS 2003 konvasiyonları ile ortaya koyulan IAU2000A prezesyon-nutasyon modeli ile CIP'nin J2000.0 epoklu CRF'deki (örn: ICRF-Ext.1) yaklaşık konumu hesaplanır (CIP₀) (Mathews et al., 2002; McCarthy ve Petit, 2004) (Şekil 7). Ardından IERS C04 05 yer dönme parametreleri kombinasyonu serisi nutasyon düzeltmeleri *nutdx* (nutaton in obliquity), *nutdy* (nutaton in celestial longitude) modelden hesaplanan yaklaşık değere eklenerek ölçü anındaki CIP'nin CRF'deki konumu

$$\begin{aligned} X(t)_{CIP} &= X(t)_{CIP_{IAU2000.A}} + nutdx_{IERS C04} \text{ (Nutaton in obliquity)} \\ Y(t)_{CIP} &= Y(t)_{CIP_{IAU2000.A}} + nutdy_{IERS C04} \text{ (Nutaton in celestial longitude)} \end{aligned} \quad (22)$$

şeklinde elde edilir (Şekil 7, Şekil 12 ve 13).



Şekil 7. Yer dönme parametreleri (EOP), ICRF ve ITRF arasındaki ilişki (Schuh, vd., 2008)

Ölçü anındaki, gerçek ekinoks saat açısı H , kutup gezinmeleri x_p ve y_p ile oluşturulan dönüklük matrisleri

$$R = \begin{bmatrix} \cos(H) & -\sin(H) & 0 \\ \sin(H) & \cos(H) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} \cos(x_p) & 0 & -\sin(x_p) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(x_p) & 0 & \cos(x_p) \end{bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(y_p) & \sin(y_p) \\ 0 & -\sin(y_p) & \cos(y_p) \end{bmatrix} \quad (23)$$

çarpımları sonucu TRF ile CIP arasındaki bağlantı

$$R_{XY} = \begin{bmatrix} \cos(H) & -\sin(H) & -\sin(x_p)\cos(H) - \sin(y_p)\sin(H) \\ \sin(H) & \cos(H) & -\sin(x_p)\sin(H) + \sin(y_p)\cos(H) \\ \sin(x_p) & -\sin(y_p) & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

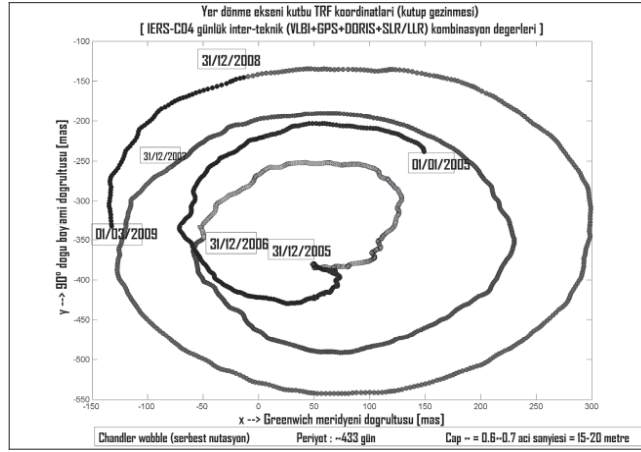
şeklindeki dönüşüm matris eşitliği ile elde edilir (Şekil 7, Şekil 8). Bozucu gravite potansiyelinde oluşan gün içi değişimler kutup gezinmeleri ve gün uzunluğunu etkiler. Kutup gezinmelerinin diğer bir nedeni ise Yer'in iç yapısındaki kitle dağılım yoğunluklarındaki farklılıklar ve değişimleridir (konveksiyon akımları). Kutup gezinmelerine ve gün uzunluğu değişimlerine yol açan diğer etkenler ise okyanus gel-gitleri ve karasal gel-gitler sonucu oluşan kitle dağılımı değişimidir. Ayrıca atmosferdeki zamana bağlı basınç (mass) ve rüzgar (motion) yükleri değişimi kutup gezinmeleri ve gün uzunluğunu etkiler. Tüm bu fiziksel etkenlerin oluşturduğu t zamanı için Yer içindeki, kabuktaki ve atmosferdeki tüm noktaların (i) toplam açısız momentleri (L , birim: Nms veya $kg m^2 s^{-1}$),

$$\sum_i L_i = r_i m_i v_i \sin(\theta_i) \quad (25)$$

ve aynı noktaların torkları (τ , birim: Nm veya $kg m^2 s^{-2}$)

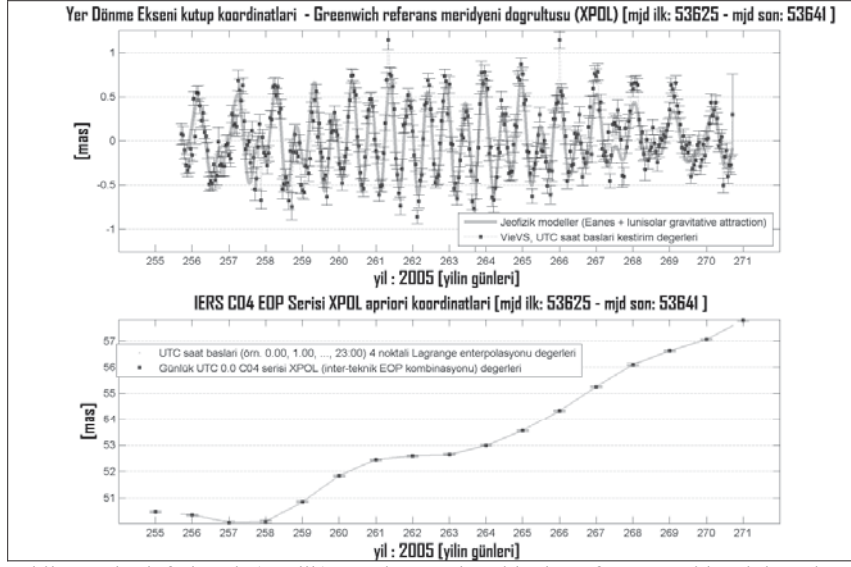
$$\sum_i \tau_i = \sum_i r_i F_i \sin(\theta_i) \quad (26)$$

modellenebilir ise VLBI ölçülerinden elde edilen Yer dönme parametreleri ile jeofizik modellerden hesaplananlar ölçü duyarlılığı içerisinde eşit olurlar. Yukarıdaki eşitliklerde r_i dönme ekseninden i kitesine olan vektör, m_i kitlenin ağırlığı, v_i kitlenin hızı, F_i kitleye etkileyen dış kuvvetlerdir. Açısız moment değerleri dış yüklerin etkisi olmadığında Yer'in atalet (eylemsizlik) momentini açıklarken, tork (kuvvet momenti) değerleri Güneş, Ay ve diğer gezegenlerin meydana getirdiği bozucu gravite potansiyellerinin gradyeninin, atmosferik basınç yüklemelerinin, okyanus yüklemelerinin, vs. oluşturduğu momentlerin bileşkesini diğer bir ifade ile dış kuvvetlerin oluşturduğu toplam kuvvet momentini açıklar. IERS C04 Yer dönme kombinasyonu serisinden 1.01.2005-01.03.2009 tarihleri arasında oluşan Yer dönme eksenini kutbu gezinmeleri Şekil 8'de verilmiştir.

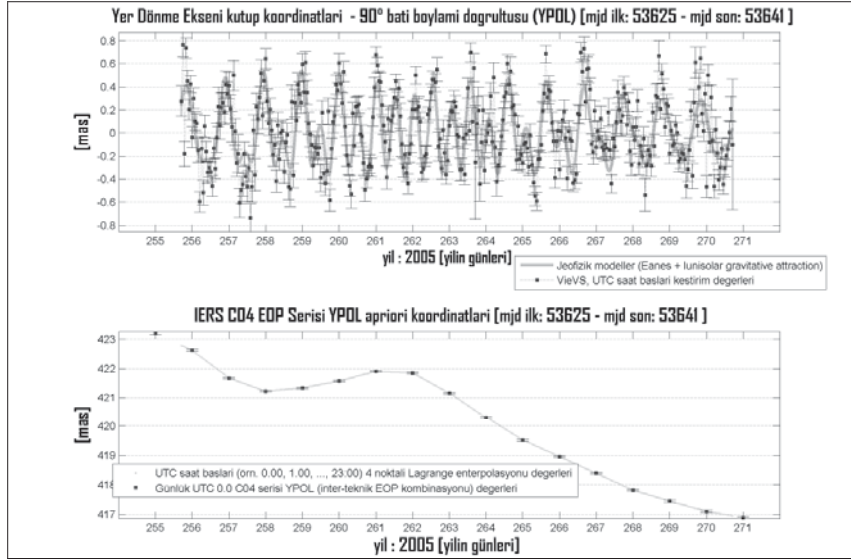


Şekil 8. 01.01.2005-01.03.2009 tarihleri arasında oluşan Yer dönme eksen kutbu gezinmeleri günlük TRF koordinatları (IERS C04 serisi).

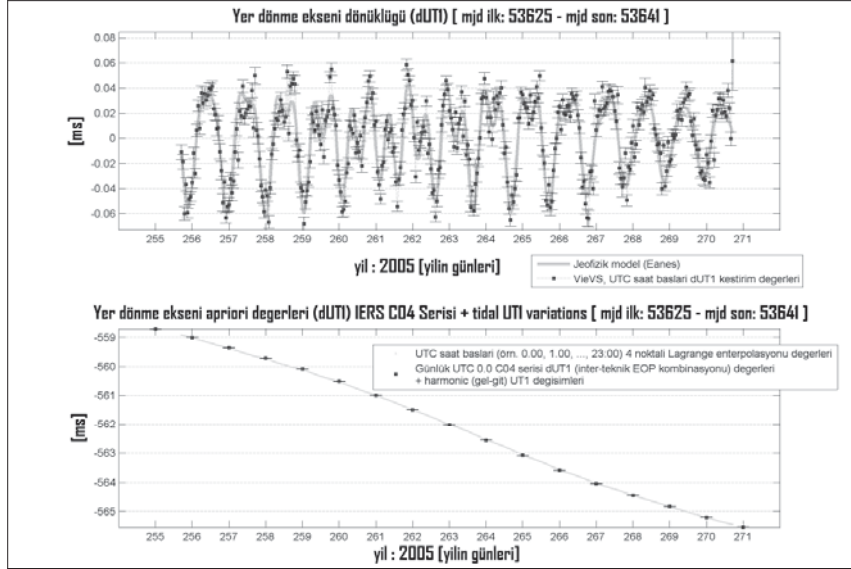
Yer dönme eksen kutbu koordinatlarının gün içi değişimlerinin diğer bir ifade ile yüksek frekanslı değişimlerinin (örn. saatlik değerleri) kestiriminde jeofizik modeller kullanılabilir. Kutup koordinatlarının gün içi zamansal çözünürlükte harmonik değişimine (gel-git değişimine) neden olan en büyük etken okyanus gel-git etkisi ve Güneş, Ay bozucu gravitesindeki değişimlerdir (McCarthy ve Petit, 2004). Bu modellerden hesaplanan değerler ile VLBI ölçülerinin VieVS yazılımı ile işleme analizinden elde edilen değerler Şekil 9 ve 10'da karşılaştırılmıştır. Uyumun yüksek olması jeofizik modellerin başarısını gösterir. Yerin gün içi dönme hızında ($dUT1$) oluşan değişimler okyanus gel-gitleri modelinden (Eanes) hesaplanan değerleri ile VieVS kestirim değerleri Şekil 11'de verilmiştir.



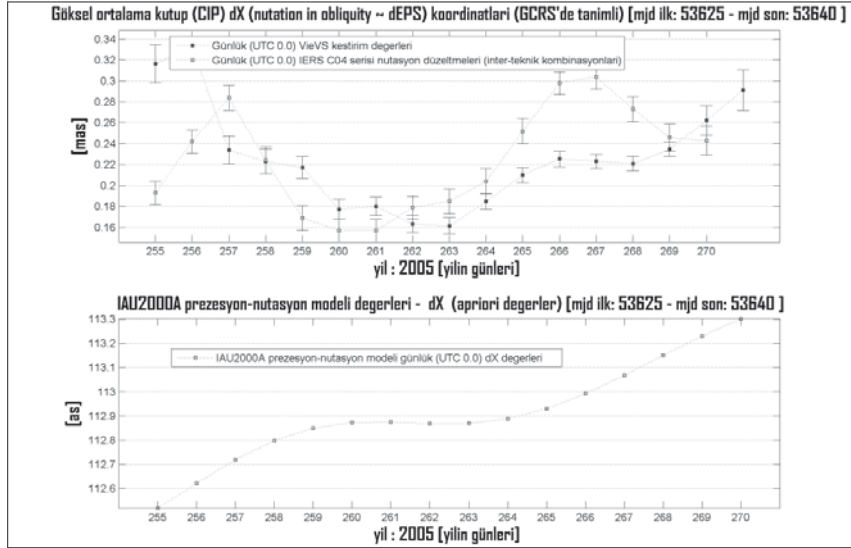
Şekil 9. Yüksek frekanslı (saatlik) Yer dönme eksen kutbu referans meridyeni doğrultusu koordinatları (x_p) ve jeofizik modeller ile VieVS kestirim değerleri



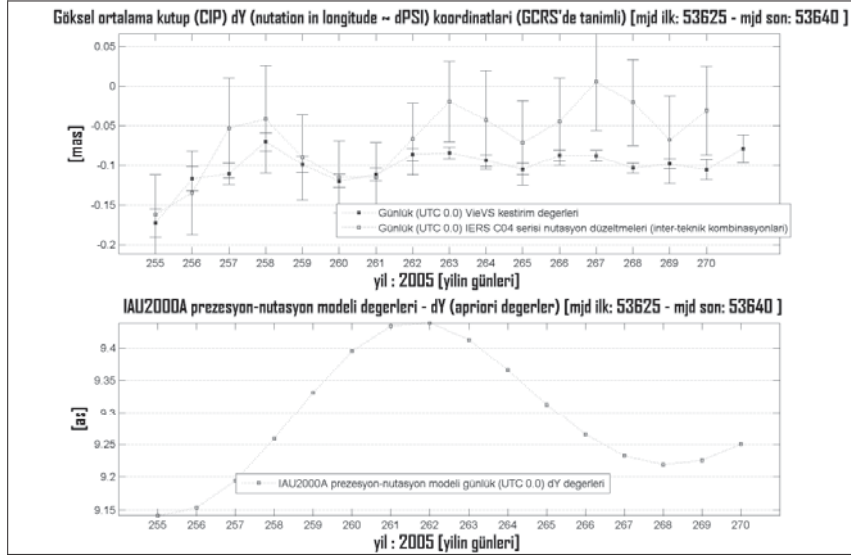
Şekil 10. Yüksek frekanslı (saatlik) Yer dönme eksen kutbu 90° batı boyları doğrultusu koordinatları (y_p) ve jeofizik modeller ile VieVS kestirim değerleri



Şekil 11. Yüksek frekanslı (saatlik) Yer dönme eksenı açısı (hızı) ($dUT1$) Eanes modeli ile hesaplanan değerleri ve VieVS kestirim değerleri



Şekil 12. IAU 2000A prezasyon-nutasyon modelinden hesaplanan nutasyon açıları $X(t)_{CIP_{IAU2000A}}$, IERS C04 serisi düzeltmeleri $nutdx_{IERS C04}$ ve VieVS kestirim değerleri



Şekil 13. IAU 2000A prezesyon-nutasyon modelinden hesaplanan nutasyon açıları $Y(t)_{CIP_{IAU2000A}}$, IERS C04 serisi düzeltmeleri $nutdy_{IERS C04}$, ve VieVS kestirim değerleri

3.2. ITRF (Uluslararası Yersel Referans Ağı-International Terrestrial Reference Frame)

ITRF çözümlerinin ölçeğini, baz ölçme duyarlılığının yüksek olmasından dolayı (12000 km \pm 3 cm) VLBI belirler. Tüm uzay jeodezi tekniklerinin bulunduğu yerleşkelerde (co-location sites) sistemlerin birbirleri ile olan bağlantı ölçüleri yardımı ile (local ties) her sistemin belirlediği TRF'ler ilişkilendirilmiş olur. Bu durum normal denklemler düzeyinde teknikler arası kombinasyon yolu ile ortak bilinmeyen parametrelerin daha duyarlı belirlenmesine katkı sağlar. Ayrıca her tekniğin farklı yöntem, araç, model ve kestirim algoritması kullanması kestirilen parametrelerin birbirinden bağımsız olmasını (minimum korelasyona sahip olmasını) böylece elde edilen parametrelerin güvenilirliklerinin yüksek olmasını sağlar. TRS gerçekleştirmeleri olan TRF'leri oluşturan dünyaya dağılmış noktaların konumları, ilgili noktalardaki jeofizik etkilerinden arındırılmış koordinatlardır. Diğer bir ifade ile nokta konumlarında oluşan gün içi (sub-diurnal) periyotlu gel-git (tidal) deformasyonları ve periyodik olmayan (plastik) deformasyonlar jeofizik modeller ile her ölçü için hesaplanır ve nokta konumlarına apriori düzeltme olarak getirilir. Böylece konvansiyonlar gereği gel-git bağımsız kabuk – TRF (tide free crust, ITRF) elde edilir. t ölçü epöğü anında noktanın konumu

$$X(t) = X(t_{2000,0})^{ITRF 2005} + v_{\Delta X}^{ITRF 2005} \cdot (t - t_{2000,0}) + \Delta X_{jeofizik_model(i)}(t) + \Delta X_{kestirim} \quad (27)$$

eşitliğinden elde edilir. Yukarıdaki eşitlikte jeofizik_model(ΔX_i), i . jeofizik modelden t ölçü epöğünde hesaplanan, nokta konumunda oluşan yer değiştirmeyi ifade eder. Bu işlem her ölçü



için gerçekleştirilir. Her ölçü için istasyonların konumlarına jeofizik modellerden getirilen düzeltmeler şunlardır:

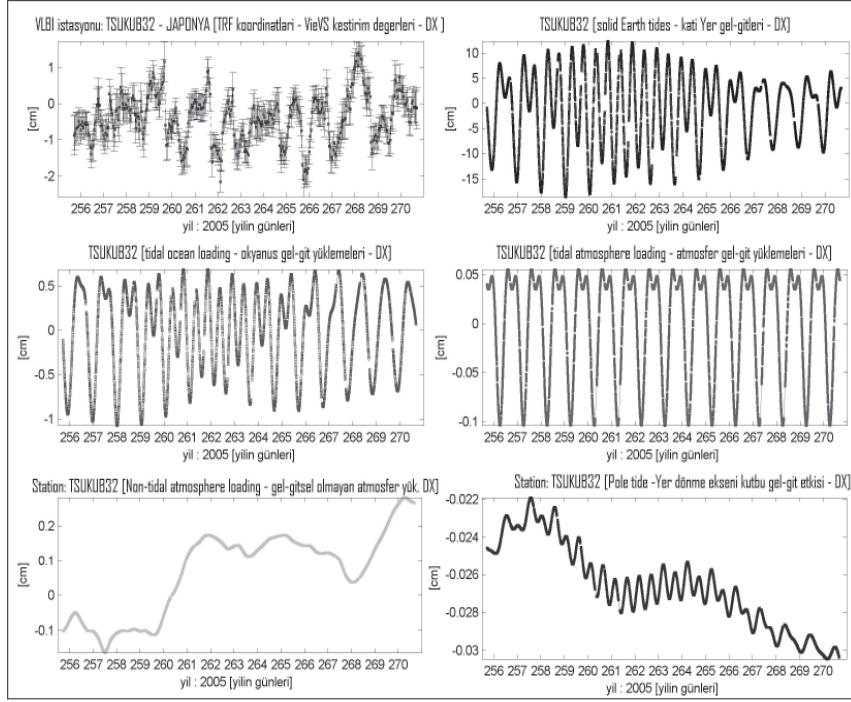
- *Katı Yer gel-gitleri*: Güneş ve Ay'ın gün içi konumuna bağlı olarak oluşturduğu bozucu gravite potansiyeline Yer'in elastik tepkisi (periyot : gün içi (sub-diurnal), genlik: $\sim \pm 30$ cm)

- *Okyanus gel-git yüklemeleri*: Okyanuslarda gün içi periyotlu gel-gitler neticesinde oluşan kitle dağılımındaki değişim sonucu meydana gelen harmonik hareketler. Okyanusa yakın (100 ~ 200 km) noktalarda etkisi daha fazla (periyot: gün içi genlik: $\pm 1-2$ cm).

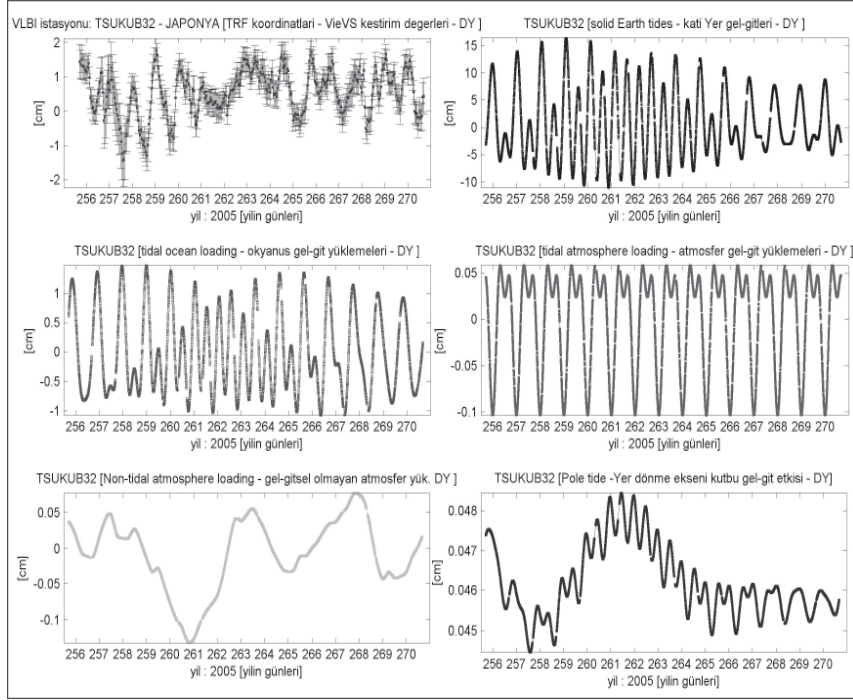
- *Atmosfer gel-git yüklemeleri*: Güneşin gün içi hareketinin meydana getirdiği atmosfer basıncında oluşturduğu değişimlerin nokta üzerinde yaptığı gel-git hareketi. S1 ve S2 olmak üzere iki farklı (periyotlar: 24 ve 12 saat) sinusoidal dalgalanımın modülasyonu sonucu elde edilir (periyot : gün içi, genlik: $\sim \pm 0.1 - 6$ mm).

- *Gel-gitsel olmayan atmosfer yüklemeleri*: Atmosfer basıncında uzun periyotlu değişimlerin nokta üzerinde oluşturduğu gün içi periyoda sahip olmayan hareketler (periyot : haftalar, aylar, mevsimler, gün içi deformasyon : $\sim 1 - 4$ cm).

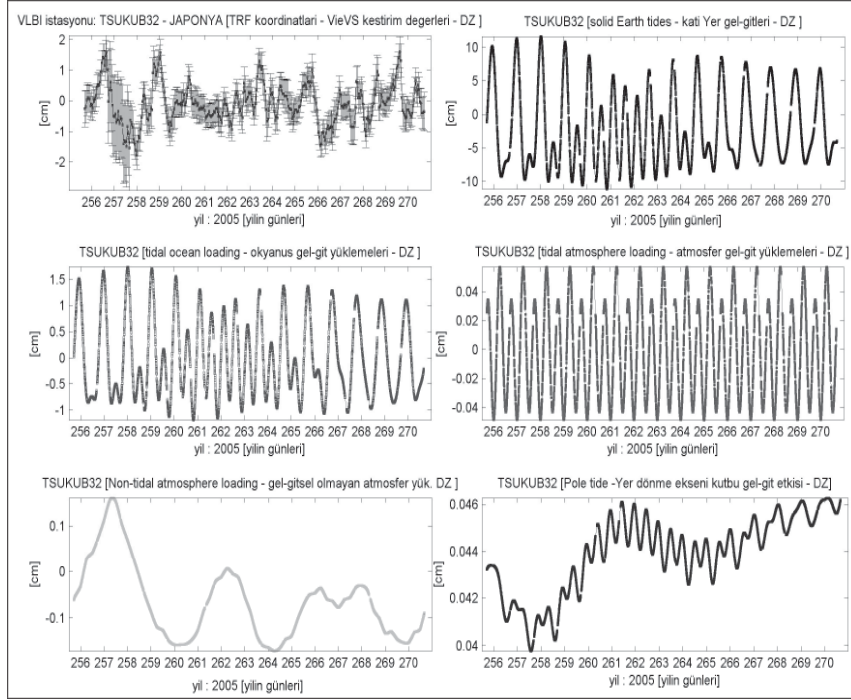
- *Yer dönme eksenini kutbu sapmaları*: Yer dönme eksenindeki sapmalar (kutup gezinmeleri) sonucu meydana gelen merkezkaç kuvvetindeki değişimlerin nokta üzerinde oluşturduğu gel-git hareketleri (Scherneck, 1991; Mathews, vd., 1995; Ray, 1999; Petrov ve Boy, 2004; Haas ve Schuh, 1996; Spicakova, vd., 2009). Atmosfer gel-git yüklemeleri haricinde yukarıda bahsedilen tüm konvansiyonel jeofizik modeller gün-içi spektrasi haricinde uzun periyotlu salınımlar (harmonik değişimler) içerir. Tüm bu yüklerin oluşturduğu deformasyonlar her ölçü için oturdaki tüm istasyonların konumlarına düzeltme olarak getirilir (Şekil 14, 15 ve 16). Böylece analiz yazılımı ile elde edilen kestirim değerleri modeller ile belirleyemediğimiz periyodik ve episodik (örn: deprem) konumsal değişimlerdir.



Şekil 14. Tsukub32 istasyonunda CONT05 oturumları boyunca $dX_{ITRF2005}$, VieVS kestirim değerleri ve jeofizik modellerden apriori getirilen gel-git düzeltmeleri



Şekil 15. Tsukub32 istasyonunda CONT05 oturumları boyunca $dY_{ITRF2005}$, VieVS kestirim değerleri ve jeofizik modellerden apriori getirilen gel-git düzeltmeleri



Şekil 16. Tsukub32 istasyonunda CONT05 oturumları boyunca $dZ_{ITRF2005}$, VieVS kestirim değerleri (UTC saat başları) ve jeofizik modellerden apriori getirilen gel-git düzeltmeleri

ITRS, VLBI, SLR/LLR, GNSS ve DORIS tarafından ölçülen belirli sayıda yer noktasındaki koordinat ve hız kestirimlerinin, varyans-kovaryans bilgilerinin uygun bir ağırlıklandırma tekniği kullanılması ile yapılan hesaplarla gerçekleştirilir (Altamimi (2004, 2006 and 2007) and Boucher et al. 1999). Birden fazla tekniğin kullanılmasının avantajı kombinasyonla elde edilmiş ITRF çözümündeki hataların her bir ölçü tekniği tarafından belirlenen TRF çözümlerine göre daha az olmasıdır. Her bir ölçü tekniğine ait analiz merkezleri tarafından hesaplanan TRF çözümlerinin kombinasyonu ile ITRF çözümü elde edilmiş olur. TRF çözümleri için oluşturulan SINEX dosyalarında istasyon koordinatları ve hızların ve varyans-kovaryans bilgileri vardır.

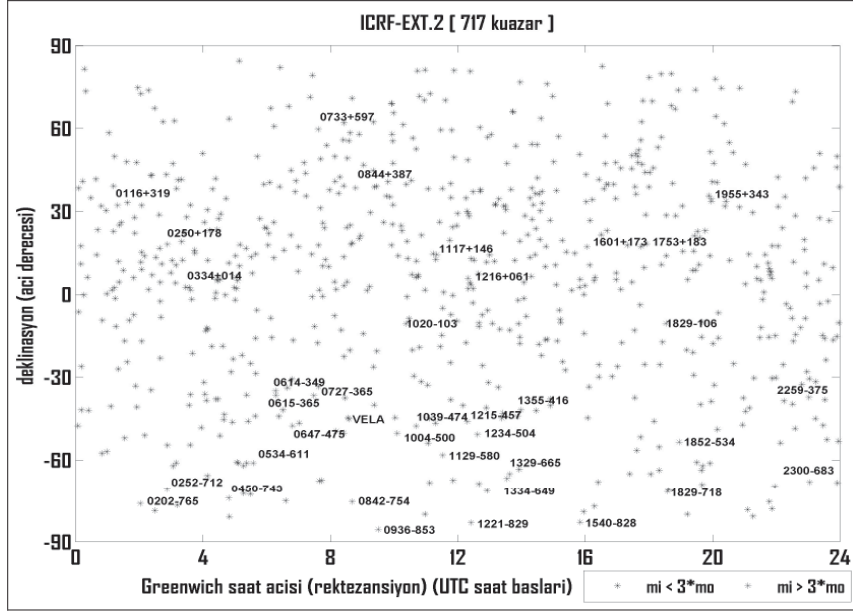
ITRF kombinasyon hesabında, yer dönme parametrelerinin (EOP) günlük değerleri ve istasyon koordinatlarının, uydu teknikleri için haftalık, VLBI için günlük zaman serileri girdi verisi olarak kullanılır. Zaman serilerinin analizi ITRF hesapları için başlıca işlemdir. ITRF'in en son versiyonu 400'den fazla noktadan oluşan ve bir çoğu iki ve daha fazla teknikte donatılmış bir ağırlıklandırma olan ITRF2005'dir. ITRF2005, bir önceki versiyonun tersine, istasyon koordinatlarının ve EOP'un zaman serisi formundaki giriş verileriyle oluşturulmuştur. ITRF2005'in giriş verileri, belirli bir tekniğin her bir Analiz Merkezi (AC) sonuçlarının kombinasyonu olarak IAG'nin Teknik Servisleri (IGS, ILRS, IDS, ve IVS) tarafından sağlanır, DORIS haricinde. ITRF2005'in kombinasyonu, ITRF Kombinasyon Merkezleri (DGFI-Deutsches Geodätisches



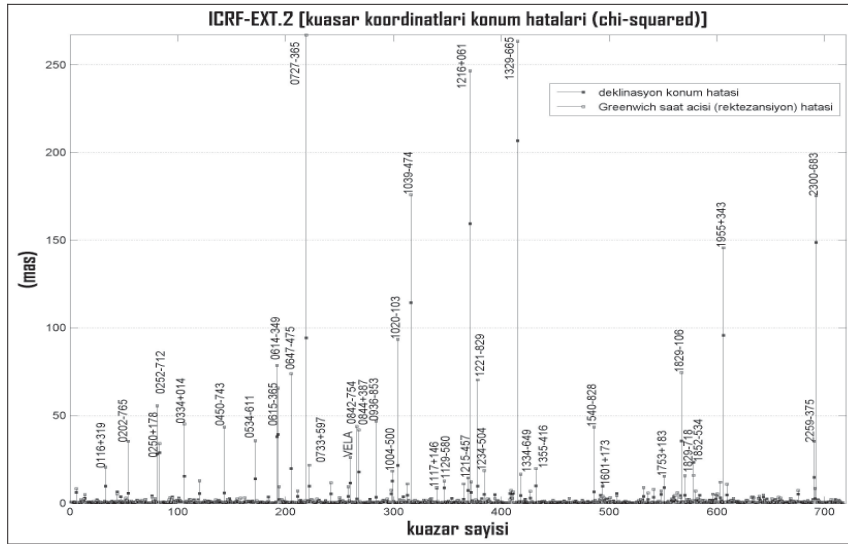
Forschungsinstitut, IGN-Institute Géographique National, NRCan-Natural Resources, Canada) tarafından gerçekleştirilir (Nothnagel 2005, Angermann v.d. 2005). Resmi ITRF2005 sürümü ITRF Veri Merkezi olarak IGN tarafından sağlanmaktadır (URL 3). ITRF, ICRF ile IERS'in kombinasyonunu gerçekleştirdiği EOP yardımıyla ilişkilendirilir.

3.3. ICRF (Uluslararası Göksel Referans Ağı-International Celestial Reference Frame)

Uluslararası Astronomi Birliği'nin (International Astronomical Union, IAU) 1997 yılı 23. Genel Toplantısı sonucu ICRS gerçekleştirmelerinin (ICRF) temel göksel koordinat çatısı olarak kullanımını önerilmiştir. ICRF, J2000 (1 Ocak 2000) epochunda tanımlı, gök ekvator düzlemini esas alan koordinat sistemi olarak 212'si 'tanımlayıcı-defining' galaksi dışı kuazar (global çözümde NNR koşulları uygulananlar) olmak üzere toplam 608 kuazar ile gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirme 1979 – 1995 yılları arasındaki VLBI oturumlarının global oturum çözümü ile oluşturulmuştur (Ma, vd., 1998). Bu ilk core ICRF çözümünde 'tanımlayıcı-defining' kuazarların (sources) ortalama konum hatası 0.25 mili açı saniyesi (mas) dir. 1995 – 2002 yılları VLBI oturumlarını kapsayan ve 109 yeni 'tanımlayıcı' kuazarın eklendiği oturumlar ile yapılan global çözüm ile ICRF genişletilmiştir ve ICRF-Ext.1 kataloğu oluşturulmuştur. Kuazarların durağanlığı (stability) gözlem yapılan radio kaynaklarının (kuazar, source) ICRF'e dahil edilmesinde ve sonrasında 'tanımlayıcı' kuazar olarak karar verilmesinde ölçüt olmuştur. Resmi olmayan ICRF-Ext.2 kataloğu ICRF-Ext.1 çözümüne yeni 400 kadar VLBI oturumunun eklenmesi ile şimdiki rakamlara göre 212 'tanımlayıcı-defining', 294 'aday-candidate', 109 'yeni-new', ve '102 'diğer-other' olmak üzere toplam 717 kuazardan oluşmaktadır (Fey, vd., 2004). Şekil 17'de ICRF-Ext.2 kuazarlarının gök küresine dağılımı ve Şekil 18'de Greenwich saat açısı (rektansiyon) ve yükselim açısı (deklınasyon) konum hataları görülmektedir.



Şekil 17. ICRF-Ext.2



Şekil 18. ICRF-Ext.2 rektezansiyon ve deklınasyon konum hataları, uyumsuz sayılabilecek kuazarlar.



4. Trabzon KTU GEOD VLBI Analiz Merkezinin Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisine (IVS) Öngörülen Katkıları

IVS Yönetim Kurulunun 23 Mart 2009 tarihinde Fransa'nın Bordo şehrindeki toplantısında KTÜ Harita Mühendisliği Bölümünde KTU-GEOD adıyla Türkiye'de ilk olmak üzere bir VLBI Analiz Merkezinin kurulmasına oy birliği ile karar verilmiştir. Uluslararası düzeydeki uzay jeodezik çalışmalara katkı sağlayabilmek açısından oldukça öneme sahip olan bu analiz merkezi aşağıdaki konularda IVS'e katkı sağlaması öngörülmüştür;

- VLBI ve diğer uzay ve uydu jeodezik tekniklerden elde edilen parametrelerinin kestiriminde stokastik modellerin kullanımı,
- Uydu ve uzay jeodezik tekniklerin intra- ve inter-teknik kombinasyonu ile ilgili algoritmaların geliştirilmesi,
- VLBI istasyonlarına geri bildirimlerin sağlanabilmesi,
- Yazılım geliştirme ve iyileştirme için teorik altyapının oluşturulması,
- Farklı VLBI Analiz Merkezleri tarafından elde edilen ürünlerin (istasyon koordinatları başta olmak üzere) kullanılan kestirim yöntemleri açısından kıyaslanması,
- IERS'in belirlediği konvansiyonlara katılmak.

KTU GEOD, yukarıdaki yönde öngörülen faaliyetlerini öncelikli olarak Avrupa VLBI Ağı (European VLBI Network, EVN) ve Avrupa Yersel Referans Sistemi (European Terrestrial Reference System, ETRS)'nin gelişimine katkı sağlayacak şekilde şekillendirecektir.

5. Sonuç ve Öneriler

IVS, başta IERS, ve IAU olmak üzere bir çok kurumsal yapıya, Yer ve uzay araştırmalarına ilişkin bilim dallarına veri sağlar. ICRF, ITRF, EOP ürünlerinin oluşturulmasında ve jeofizik modellerin geliştirilmesinde büyük rol oynar. Nutasyonu ve Yer ortalama dönme ekseninin inersiyel tabanlı bir referans sistemine (quasi-inersiyel: ICRF) bağlı mutlak dönüklüğünü (dUT1) doğrudan varsayimsız ölçebilen, CIP'nin ICRF'deki konumunu en duyarlı belirleyen ve ICRF'in oluşturulmasında ölçüleri (oturumları) analiz edilen tek uzay tabanlı konum belirleme sistemidir. IVS, VLBI2010 projesi kapsamında IAG'ın Küresel Jeodezik Gözlem Sistemi (Global Geodetic Observing System, GGOS) gerçekleştirme projesinin öngördüğü hedeflere ulaşmak amacı ile radyo teleskoplarından, analiz yazılımlarına kadar tüm alt yapısını güncellemektedir. Viyana Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Jeofizik Enstitüsü, IVS analiz merkezi bu bağlamda simülasyon ve yazılım geliştirme çalışmalarını başarı ile yürütmektedir. EVN ölçülerinin analizleri, intra- ve inter-teknik kombinasyonlar ve yazılım geliştirme çalışmalarına hizmet etmek üzere, KTU, Harita Mühendisliği Bölümü bünyesinde yeni bir analiz merkezi kurulması önerisi, IVS Yönetim Kurulunun 23 Mart 2009 tarihinde Fransa'nın Bordo şehrindeki toplantısında oy birliği ile kabul edilmiştir. Bu bağlamda yapılacak olan çalışmalar yeni oluşturulacak IERS ürünlerine (ICRF, ITRF, EOP vd.) doğrudan katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan ham veriler Uluslararası VLBI Servisi (IVS) tarafından üretilmiştir.



Kaynaklar

- Altamimi, Z., (2007). Definition and Realization of Terrestrial Reference Systems, *Applications to ITRS and ETRS89*, Instituto Geográfico Português (IGP), Lisbon, March 7, 2007.
- Altamimi, Z., (2006). Reference Systems: Definition and Realization, *AFREF Technical Workshop*, University of Cape Town, July 9-13, 2006.
- Altamimi, Z., (2004). Challenges and Achievements in Combining Terrestrial Reference Frames, *IDS Plenary Meeting*, May 3-4, 2004.
- Altamimi, Z., (2001). Report on local tie problems in collocation sites as result from ITRF2000 Analysis, ITRF Report 4 on local ties.
- Angermann, D., Thaller, D. ve Rothacher, M., (2002). IERS SINEX combination campaign, *Proceedings of the IERS Workshop on Combination Research and Global Geophysical Fluids Bavarian Academy of Sciences*, Munich, Germany, 18 - 21 November 2002, IERS Technical Note 30.
- Angermann D., Drewes, H. ve Krügel, M., Meisel, B., (2005). Advances in terrestrial reference frame computations, *Dynamic Planet: Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic tools, IAG Symposia*, Vol.130, 595-602, Springer.
- Boehm, J., Spicakova, H., Plank, L., Teke, K., Pany, A., Wresnik, J., Englich, S., Schuh, H., Hobiger, T., Ichikawa, R., Koyama, Y., Gotoh, T., Otsubo, T. ve Kubooka, T., (2009), "Plans for the Vienna VLBI Software VieVS", *19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, 10th IVS Analysis Workshop*, 23-28 March 2009, Bordeaux, France.
- Boehm, J., Werl, B. ve Schuh, H., (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
- Boucher, C., Altamimi, Z. ve Sillard P. (1999). The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97), IERS Technical Note 24, Observatoire de Paris.
- Campbell, J., (1979). Die Radiointerferometrie auf langen Basen als geodatisches Messprinzip hoher Genauigkeit, DGK Reihe C, Heft 254, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Chao, C.C., (1974). The Troposphere Calibration Model for Mariner Mars 1971, JPL Tech. Rep., s. 32-1587, Jet Propul. Lab., Pasadena Calif.
- Cohen, M.H. ve Shaffer, D.B., (1971). Positions of radio sources from long baseline Interferometry, *Astron. Journ.*, 76, s. 91-101.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E. ve Elgered, G., (1985), Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length, *Radio Sci.*, 20(6), s. 1593-1607.



Fey, A.L., Ma, C., Arias, E.F., Charlot, P., Feissel-Vernier, M., Gontier, A-M., Jacobs, C.S., Li, J. ve MacMillan, D.S., (2004) The second extension of the international celestial reference frame: ICRF-Ext.1. *Astron J* 127:3587.

Haas, R. ve Schuh, H., (1996). Determination of frequency dependent Love and Shida numbers from VLBI data. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 23 No. 12/1996. pp. 1509-1512.

Koch, K.R. ve Papo H.B., (2003). The Bayesian approach in two-step modelling of deformations, *AVN*, 8, 365-370.

Ma, C., Arias, E.F. ve Eubanks, T.M., Fey A.L., Gontier A-M., Jacobs C.S., Sover O. J., Archinal, B. A., Charlot, P., (1998). The international celestial reference frame as realised by very long baseline interferometry. *Astron J.*, 116-516.

Marini, J.W., (1972), Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile, *Radio Sci.*, 7(2), s. 223-231.

Mathews, P. M., Buffet, B. A. ve Shapiro, I. I. (1995). Love numbers for a rotating spheroidal Earth: New definitions and numerical values. *Geophys. Res. Lett.*, 22. pp. 579-582. 1995.

McCarthy, D.D., ve Petit, G., (2004). IERS Conventions 2003, IERS Technical Note 32, Observatoire de Paris.

Niell, A.E., (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J.Geophys. Res.*, 101, B2, s. 3227-3246.

Nothnagel, A., (2005). VTRF 2005 - A combined VLBI terrestrial reference frame, In: M. Vennebusch and A. Nothnagel (Eds.): *Proceedings of the 17th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, Noto, Italy, 22-23 April 2005, 118-124.

Nothnagel, A., (1991). Radiointerferometrische Beobachtungen zur Bestimmung der Polbewegung unter Benutzung langer Nord-Süd-Basislinien, *DGK Reihe C*, Heft 368, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main.

Petrov, L. ve Boy, J. P., (2004). Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. B03405. 2004.

Ray, J. ve Altamimi, Z., (2005). Evaluation of co-location ties relating the VLBI and GPS reference frames, *Journal of Geodesy*, Vol. 79, No.4-5, 189-195.

Ray, R., (1999). A global ocean tide model from TOPEX/Poseidon altimetry/GOT99.2 – NASA/TM-1999-209478. pp. 58. Goddard Flight Center/NASA, Greenbelt, MD. 1999.

Rothacher, M., (2002a). Combination of space-geodetic techniques, *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, 33-43.

Rothacher, M., (2002b). Towards a rigorous combination of space geodetic techniques, *Proceedings of the IERS Workshop on Combination Research and Global Geophysical Fluids Bavarian Academy of Sciences*, Munich, Germany, 18 - 21 November 2002, IERS Technical Note 30.



Saastamoinen, J., (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction, part II, *Bull. Geod.*, 107, s. 13-34.

Scherneck, H. G., (1991). A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements. *Geophys. J. Int.*, 106. pp. 677-694. 1991.

Schuh, H., Böhm, J., Englich, S., Heinkelmann, R., Mendes Cerveira, P.J., Pany, A., Tanir, E., Teke, K., Todorova, S., Wresnik, J., (2008). "Vienna IGG Special Analysis Center Annual Report 2007", IVS 2007 Annual Report, D. Behrend and K.D. Baver (eds.), NASA/TP-2008-214162, p. 208-211.

Schuh, H., Böhm, J., Englich, S., Heinkelmann, R., Mendes Cerveira, P.J., Pany, A., Plank, L., Spicakova, H., Teke, K. ve Wresnik, J., (2009). Vienna IGG Special Analysis Center Annual Report 2008, IVS 2008 Annual Report, D. Behrend and K.D. Baver (eds.), NASA/TP.

Schuh, H., (1987). Die Radiointerferometrie auf langen Basen zur Bestimmung von Punktverschiebungen und Erdrotationsparametern, *DGK Reihe C*, Heft 328, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Sovers, O.J., Fanselow J.L. ve Jacobs, C.S., (1998). Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Reviews of Modern Physics*, 70, No. 4.

Spicakova, H., Boehm, J., Mendes Cerveria, P. J. ve Schuh, H., (2009). Determination of degree-2 Love and Shida numbers from VLBI. Accepted for publication in *Bulletin d'Information des Marees Terrestres*. 2009.

Takahashi, Y., (1994). Estimation of Errors in VLBI data and Position Determination Error. *Journal of Geodetic Society of Japan*, 40, No. 4, s. 309-331, Tokyo.

Titov, O., Tesmer, V. ve Boehm J., (2004). OCCAM v. 6.0 software for VLBI data analysis. In *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings*, edited by Nancy R. Vandenberg and Karen D. Baver, NASA/CP-2004-212255.

Tesmer, V., (2004). Das stochastische Modell bei der VLBI-Auswertung, *DGK Reihe C*, Heft 573, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Tanir, E., (2008). A Study About Optimal Intra-Technique Combination of VLBI Analysis Center Solutions, *Doktora Tezi*, Technischen Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Vienna, Austria.

Tanir, E., Heinkelmann, R. ve Schuh, H., Kusche, J. ve J.P. van Loon (2009). Assessment of the Results of VLBI Intra-Technique Combination Using Regularization Methods, *International Association of Geodesy Symposia Series*, Geodetic Reference Frames, IAG Symposium Munich, Germany, 9-14 October 2006, Vol. 134, Drewes, Hermann (Ed.), 2009, XI, 324 p. 229 illus., Hardcover, ISBN: 978-3-642-00859-7

URL 3. ITRF 2005 Combination Strategy,
http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/computation_strategy.php, 9 Eylül 2009.