

Çok Uzun Baz Enterferometrisi (VLBI) Tekniğinde, Saat Hatası ve Troposferik Gecikme Parametre Kestirim Modelleri (Clock Error and Tropospheric Delay Parameter Estimation Models of the Very Long Baseline Interferometry Technique)

Kamil TEKE^{1,2}, Johannes BOEHM¹, Emine TANIR³, Harald SCHUH¹

¹Vienna University of Technology, Institute of Geodesy and Geophysics,
Gusshausstrasse 27-29, E128/1, 1040, Vienna, Austria

²Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü,
Beytepe, 06800, Ankara, Türkiye

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü,
61080, Trabzon, Türkiye
kteke@mars.hg.tuwien.ac.at

ÖZET

Global Jeodezik Gözlem Sistemi (GGOS) önerileri doğrultusunda farklı uzay jeodezik tekniklerinde modelleme, parametrisasyon (bilinmeyenlerin belirlenmesi) ve analiz standartlarında homojenleştirme ve geliştirmeler yapılacaktır. Bununla birlikte, Uluslararası Çok Uzun Baz Enterferometrisi Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS), VLBI2010 projesi kapsamında yeni oluşturacağı sistemden elde edilecek önemli sayıdaki gözlem artışının VLBI yazılım paketleri kapsamında analiz edilebilmesine olanak sağlayacak güncellemeleri öngörmüştür. Yeni VLBI2010 sisteminin geleceğe yönelik analiz ilişkili gereksinimlerine cevap vermek üzere Viyana Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Jeofizik Enstitüsü tarafından, VLBI veri analizi yazılımı (Vienna VLBI Software, VieVS) geliştirilmektedir. Programlama dili olarak, yazılımın oluşturulması çabalarını kolaylaştıracak birçok fonksiyon ve araç içeren Matlab seçilmiştir. Proje sonunda geliştirilen VLBI analiz yazılımı VieVS ile GGOS'un gelecek IVS gereksinimlerine cevap verilmesi beklenmektedir. Şimdiye kadar stokastik süreçler modellenmiştir (VLBI saat hataları ve troposferik ıslak gecikme parametreleri). VLBI parametrelerinin kestirimi 'Parçalı Lineer (PL) ofset fonksiyonu' ile her saat başı veya bölümleri (her 20, 10, 5 dakika) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal problemlerden (rank defektleri) kurtulmak ve tutarlı bir parametre kestirimi gerçekleştirmek için bazı koşullar (kısıtlayıcılar) sahte (pseudo) gözlem denklemleri şeklinde modele dahil edilmiştir. Bu çalışma kapsamında VLBI temel gecikme (ölçü) modeli, VLBI radyo teleskobu gözlem istasyonunda bulunan atomik saatlerin veya hidrojen maserların senkronizasyon tutarsızlarından kaynaklanan saat hatası modeli ve troposferik ıslak gecikme modeli ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: Çok Uzun Baz Enterferometrisi, VLBI, saat hatası modeli, troposferik ıslak gecikme modeli, VieVS, parçalı lineer ofsetler.

ABSTRACT

Based on the recommendations given by the Global Geodetic Observing System (GGOS), common standards in modeling, parameterization (designation of unknowns) and analysis will be homogenized and improved across the various space geodetic techniques. In addition, there is the project VLBI2010 of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) which is asking for major updates of the Very Long Baseline Interferometry (VLBI) software packages because of the significant increase of the number of observations with the new system. As to reach the analysis related future requirements of VLBI2010 a new VLBI data analysis software (called Vienna VLBI Software, VieVS) is developed at the Institute of Geodesy and Geophysics at Vienna University of Technology. The programming environment Matlab is used, which considerably eases the programming efforts because of many built-in functions and tools. At the end of the study, the VieVS software will fulfill all future requirements of GGOS, IVS. The work done up to now is the modeling of stochastic processes (VLBI clock errors and tropospheric wet delays). VLBI parameters are estimated by 'piecewise linear offset function', i.e. only offsets are estimated at integer hours or integer fractions of it (every 20, 10, 5 minutes). In order to avoid numerical problems (as e.g. rank deficiencies) and to stabilize the parameter estimation process, some constraints as pseudo observations are included in the model. In this paper, the VLBI delay model, the clock error model due to the inconsistencies of the atomic clocks and hydrogen masers at radio telescope sites and the tropospheric wet delay model will be discussed.

Key Words: Very Long Baseline Interferometry, VLBI, clock error model, tropospheric wet delay model, VieVS, piecewise linear offsets.

1. GİRİŞ

Astronomi ve astrofizik alanlarında gerçekleştirilen araştırmalar doğrultusunda 1970'li yıllarda geliştirilen Çok Uzun Baz Enterferometrisi (VLBI) tekniği (Cohen ve Shaffer, 1971) galaksi içi ve çoğunlukla galaksi dışı uzay objelerinden [quasi-stellar radio source (kuazar)] dünyaya ulaşan radyo dalgalarının, dünyanın farklı konumlarındaki iki veya daha fazla radyo teleskobu (Şekil 1) tarafından alınması [dalga boyları ve ilgili frekansları sırası ile 13 ve 3.5 cm olan 2.3 GHz (S-bandı) ve 8.4 GHz (X-bandı)] ve beraberinde radyo teleskopları ile aynı gözlem istasyonunda bulunan atomik saatlerce ölçülen zamanın (iç duyarlığı $\cong 10 - 20 \times 10^{-12}$ saniye) ilgili sinyallere etiketlenmesi ve hard disklere kaydedilmesi, sonrasında zaman etiketlerinin karşılaştırmalarını yapan sistemlerin (korelatör) (Şekil 2) bulunduğu belli merkezlerde toplanan hard disklerin zaman etiketli sinyallerinin eşleştirilmesi ilkesine dayanır. Sinyallerin çakışması (maksimum eşleşmesi) ile eşleşen sinyallere etiketli zamanların farkı [τ :grup gecikmesi (group delay)] alınarak VLBI temel ölçüsü elde edilir. Tüm VLBI analiz parametreleri grup gecikmesi (τ) ölçülerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanır (Campbell, 2004). Günümüzde grup sinyal gecikmesi yaklaşık 10-20 pikosaniye (3-6 milimetre) hassasiyette belirlenebilmektedir (Sovers vd, 1998). Günümüzde VLBI tekniği (Shapiro vd, 1974), (Ma, 1978), (Campbell ve Witte, 1978) ile birlikte sadece astronomik amaçlı çalışmalar için değil

jeodezik amaçlı çalışmalar için de kullanılmaktadır.

VLBI ölçülerinin analizleri sonucu radyo teleskopları arasındaki baz vektörleri b , yer dönüklük parametreleri (kutup gezinmesi x_p , y_p , yer zamanı ile atomik zaman farklı olan $\Delta UT1$, ve nutasyon parametreleri $d\psi$, $d\epsilon$), atmosferik parametreler, gözlem istasyonu konumları ve kuazar (radyo kaynağı) koordinatları (deklınasyon ve Greenwich saat açısı (rektezansiyon, right ascension) gibi bir dizi jeodezik parametre kestirimi yapılmakta ve gel-git etkileri, atmosferik yüklemeler, okyanus yüklemeleri ve plaka hareketleri belirlenebilmektedir.

VLBI ile kıtalar arası baz vektörlerinin uzunluklarının (1000-12000 km) 1-2 cm duyarlıkta ve zamana bağlı tutarlı tekrarlanabilmesi mümkündür. Yer sabit referans sistemlerinin (TRS) gerçekleştirmelerinde diğer bir ifade ile yer sabit referans çatılarının (TRF) oluşturulmasında VLBI radyo teleskoplarının oluşturduğu ağlarda gerçekleştirilen düzenli oturumlardan yararlanarak referans çatısının ölçek faktörü belirlenebilmektedir. Bunların yanı sıra, VLBI uzay jeodezi tekniğini diğer tekniklerden ayıran en büyük üstünlüğü; Göksel Referans Çatıları (CRF) (Gök sabit) ile TRF arasındaki bağlantıyı sağlayan yer dönüklük parametrelerini hiç bir hipotez veya varsayıma dayandırmadan doğrudan ölçebilmesidir.



Şekil 1. Radyo Teleskobu, Effelsberg, Almanya [URL 1].



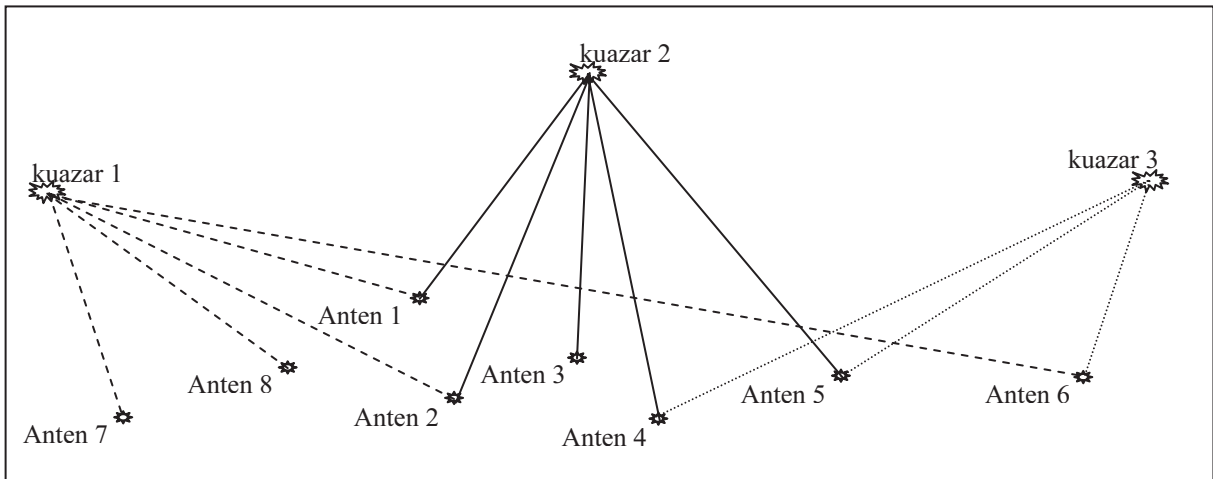
Şekil 2. Bonn Astro/Geo Mark IV Korelatörü
[URL 2].

İki veya daha fazla radyo teleskobunun bir kuazara yaptığı birinci taramadan (scan) elde edilen gecikme ölçüleri ve ardından bir önceki tarama ile ortak radyo teleskopları olmak şartı ile farklı teleskoplarında katılımı ile aynı kuazara veya farklı bir kuazara yapılan ikinci tarama (scan) gecikme ölçüleri (τ) şeklinde 24 saat boyunca gerçekleştirilen taramalardan elde edilen zaman gecikmeleri ölçüleri (Şekil 3), ölçülere ilişkin öncül kovaryans matrisi, tüm parametrelere ilişkin öncül yaklaşık değerler (CRF'de tanımlı öncül yıldız koordinatları (örn. ICRF-Ext.1), TRF'de tanımlı (örn. ITRF2000) öncül nokta konum ve hız vektörleri, öncül yer dönüklük parametreleri (örn. IERS C04,

Combined C04)) ve parametre kestirimine ilişkin seçenekler (minimum kısıtlayıcı ile çözüm, serbest çözüm, zorlamalı çözüm, gevşek kısıtlayıcılarla çözüm, kesme açısı, troposferik ızdüşüm fonksiyonu, parametre kestirim zaman aralıkları vd.) VLBI parametre kestirimi için girdi verilerini oluşturmaktadır.

Analiz sonucu CRF'de tanımlı kuazar (oturumda gözlem yapılanlar) koordinatları, TRF'de tanımlı VLBI radyo teleskopları (aynı oturumda gözlem yapanların) koordinatları, yer dönüklük parametreleri, baz uzunlukları, atmosferik parametrelerden zenit ıslak sinyal gecikmesi PL offsetleri, atomik saat hatası PL offsetleri gibi bir dizi parametrenin kestirimi yapılır.

Analiz öncesi bu parametrelerden bir kısmı veya büyük bir bölümü sabit alınabileceği gibi hepsi değişken olarak da seçilebilir. Bu parametreler istasyona özel ve küresel parametreler olarak gruplandırılabilir. Analize ilişkin tüm hesaplar gök sabit ve yerin döndüğü, güneş, ay ve diğer gezegenlerin relativistik etkilerinin dikkate alındığı quasi-inertial bir koordinat sistemi olan barisentrik koordinat sisteminde yapılır. Parametrelerin kestiriminden sonra tüm parametreler tekrar tanımlandıkları sisteme dönüştürülürler. VLBI ile ilgili temel prensipleri içeren tüm bilgiler (Sovers vd, 1998; Campbell, 1979; Schuh, 1987; Nothenagel, 1991; ve Takahashi, 1994)'de bulunabilir.



Şekil 3. VLBI taramaları (scans).

Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG), Global Jeodezi Gözlem Sistemi (GGOS) projesi kapsamında, uzay ve uydu jeodezisi tekniklerinden (VLBI, GNSS, SLR, LLR ve DORIS) istasyon koordinatlarında 1 mm ve hızlarından 0.1 mm/yıl duyarlık gereksinimini karşılamasını beklemektedir (Drewes ve Reigber, 2005; Petrachenko vd, 2008). Konumsal ve zamansal çözünürlüğü yüksek, güncel jeodezik parametrelerin sağlanmasına yönelik Uluslararası Çok Uzun Baz Enterferometri Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS), VLBI2010 projesini başlatmıştır. Bu proje kapsamında GGOS gereksinimlerini karşılamak üzere radyo teleskopları gözlem istasyonlarının, korelatörlerin ve analiz merkezlerinin bir dizi geliştirme ve güncelleme yapması öngörülmüştür. Viyana Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Jeofizik Enstitüsü, IVS analiz merkezinde bu kapsamda simülasyon çalışmaları yapılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmaları VLBI analiz yazılımlarının yeni sistemle birlikte elde edilecek çok fazla sayıda ölçüyü değerlendirmek ve bu ölçülerden yüksek zamansal çözünürlükte parametre kestirmek hususunda yeterli olmayacağını göstermiştir. Bu makalede VLBI temel gecikme (fonksiyonel) modeli ile ilgili kısa bir anlatımın ardından VLBI analiz yazılımı VieVS'de geliştirilen, VLBI saat hata ve troposferik ıslak gecikme modellerine değinilmiştir.

2. VLBI TEMEL GECİKME (FONKSİYONEL) MODELİ

İki radyo enterferometresi arasındaki zaman gecikmesi (τ_{geom}) (bir radyo kaynağından yayılan radyo dalgasının iki radyo teleskobuna ulaşmasında oluşan zaman farkı), gözlem istasyonunun yer merkezli konum vektörü r_1 ve enterferometreler arasındaki baz vektörü $b = r_2 - r_1$ olmak üzere,

$$\tau_{geom} = \tau_2 - \tau_1 = -\frac{1}{c} \cdot b \cdot k \quad (1)$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte, c radyo dalgasının hızını (vakum ortamda ışık hızını), k radyo kaynağı (kuazar) doğrultusu birim vektörünü τ_1 ve τ_2 aynı radyo kaynağından gelen eş frekanslı [dalga boyları ve ilgili frekansları sırası ile 13 ve 3.5 cm olan 2.3 GHz (S-bandı) ve 8.4 GHz (X-bandı)] radyo dalgalarının radyo teleskoplarına ulaşma zamanlarını göstermektedir (Nothnagel, 1991).

Baz vektörü b , yer sabit referans çatısında (örn. ITRF2000) tanımlıdır. Buna karşın radyo kaynağı doğrultu birim vektörü (k) gök sabit bir koordinat sisteminde (örn. ICRF-Ext.1) tanımlıdır. İki sistem arasındaki dönüşümünü gerçekleştirmek için, yer dönüklük parametreleri ile oluşturulan dönüşüm matrisleri kullanılır. Beş dönüklük parametresi ile oluşturulan dört dönüklük matrisi; W kutup gezinmesini ($Wobble$ x_p and y_p), S yerin dönüş zamanını ($Spin$, $dUT1$), N Nutasyonu ($d\psi, d\epsilon$), ve P Prezesyonu (ξ_A, Θ_A) göstermek üzere (1) eşitliği

$$\begin{aligned} \tau_{geom} &= -\frac{1}{c} \cdot b \cdot R \cdot k \\ &= -\frac{1}{c} \cdot b \cdot W \cdot S \cdot N \cdot P \cdot k \end{aligned} \quad (2)$$

şeklinde de ifade edilebilir (Ma, 1978; Nothnagel, 1991). W , S , N , ve P dönüklük matrisleri her parametrenin kendi dönüklük eksenlerindeki Euler dönüklük açıları ile tanımlanır (Nothnagel, 1991; Sovers vd, 1998).

Yukarıdaki (2) eşitliği sadece geometrik VLBI gecikme modelini açıklamaktadır. Bu eşitliğe atmosferik etkiler, karasal gel-git etkileri, okyanussal ve karasal yüklemeye etkileri, saat hataları, radyo teleskobunda oluşan gravite ve sıcaklık deformasyonları, sinyalin geçiş yolu üzerindeki relativistik etkileri gibi fiziksel etkiler de eklendiğinde, VLBI temel ölçü denklemi

$$\begin{aligned} \tau_{obs} &= -\frac{1}{c} \cdot b \cdot W \cdot S \cdot N \cdot P \cdot k \\ &+ \tau_{j-abb.} + \tau_{t-abb.} + \tau_{Rel.} + \tau_{Tid.} + \tau_{Load.} \\ &+ \tau_{Instr.} + \tau_{Clock} + \tau_{Ion.} + \tau_{Atm_h} + \tau_{Atm_w} \end{aligned} \quad (3)$$

eşitliği elde edilir.

Bu eşitlikte,

$\tau_{j-abb.}$: Yıllık aberasyon [yer'in güneş ağırlık merkezli koordinat sisteminde (solar system barycentre) hareketi sonucu oluşan radyo dalgası kırılımı etkisi) sinyal gecikmesi,

$\tau_{t-abb.}$: Günlük aberasyon (yer'in kendi eksenini etrafındaki hareketi sonucu oluşan radyo dalgası kırılma etkisi) sinyal gecikmesi,

$\tau_{Rel.}$:Relativistik etkiler sinyal gecikmesi,

$\tau_{Tid.}$:Karasal gel-git (solid tides) ve okyanussal gel-git (ocean tides) sonucu yerin açısıl momentumunda oluşan değişimlerin meydana getirdiği deformasyonların sinyal gecikmesi,

$\tau_{Load.}$:Okyanussal gel-git ve atmosferik basınç yüklemeleri değişimleri gibi yükleme etkilerinin sonucu oluşan deformasyonların sinyal gecikmesi,

$\tau_{Ion.}$:İyonosfer sinyal gecikmesi,

$\tau_{Instr.}$:Aletsel deformasyonlar (örn. VLBI radyo teleskobunun gravitasyonel ve sıcaklık deformasyonları) sinyal gecikmesi,

τ_{Atm_h} :Troposfer hidrostatik sinyal gecikmesi,

τ_{Atm_w} :Troposfer ıslak sinyal gecikmesi,

τ_{Clock} :Saat senkronizasyon tutarsızlık hatası (saat hatası) sinyal gecikmesidir.

(3) eşitliği daha açık yazılacak olursa (4) eşitliği elde edilir. (4) eşitliğinde X_i , Y_i , Z_i radyo teleskoplarının yer merkezli yere bağlı (Earth Centered Earth Fixed) bir sistemde (örn.

ITRF2000) tanımlı koordinatlarını, R göksel ve yersel koordinat sistemleri arasındaki dönüklük matrisini, $h(t)$ radyo kaynağının (kuazarın) Greenwich saat açısını (rektezansiyon), δ radyo kaynağının (kuazarın) deklinasyonunu göstermektedir. Bilinmeyenlerin belirlenmesine ilişkin Uluslararası Yer Dönüklük ve Referans Sistemleri Servisi (IERS) 2003 konvansiyonları resmi tanımlamaları olmasına rağmen (McCarthy ve Petit, 2004) bilinmeyenlerin belirlenmesi ve modelleme amaca yönelik olarak kullanıcıdan kullanıcıya değişebilmektedir.

3. VLBI SAAT HATASI ve ZENİT ISLAK GECİKMESİ MODELLERİ

VLBI ölçüleri taramalara dayalı olarak (scan-wise) gerçekleştirilir. Her bir taramada iki veya daha fazla radyo teleskobu bir kuazara yöneltilerek ölçü alınır. Zaman etiketli sinyallerin korelasyonu sonucu elde edilen grup sinyal gecikmeleri (τ) değerleri her bir oturum için oluşturulmuş olan ASCII yapıdaki NGS uzantılı ölçüler dosyasında yer almaktadır. Ölçü ve alamanak dosyasındaki ilgili tüm veriler tarama esaslı olmak üzere ayrı ayrı Matlab yapı dizilerine (structure arrays-C derleyicisindeki karşılığı sınıf tanımı ile eş olan) aktarılır. Her bir yapı dizisi alt-yapı dizilerinden oluşmakta olup temel yapı dizisi taramaya dayalıdır. VLBI oturumu analiz yazılımı iç veritabanı için düzenlenebilecek bilinmeyenlerin tanım dizisinin bir bölümü Tablo 1'de özetlenmiştir.

$$\tau_{obs} = -\frac{1}{c} \cdot \begin{pmatrix} X_A - X_B \\ Y_A - Y_B \\ Z_A - Z_B \end{pmatrix} \cdot R(x_p, y_p, dUT1, d\Psi, d\varepsilon, z, \xi_A, \Theta_A) \cdot \begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos h(t) \\ \cos \delta \cdot \sin h(t) \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (4)$$

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

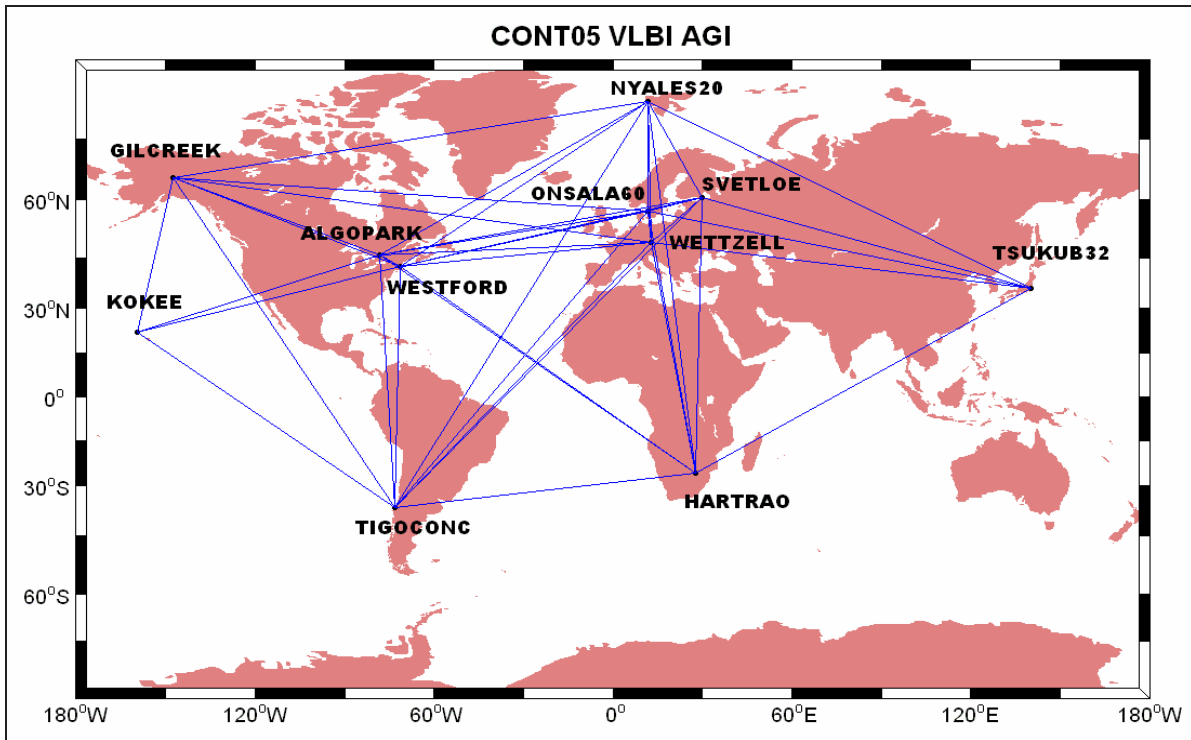
$$+ \tau_{Instr.} + \tau_{Clock} + \tau_{Ion.} + \tau_{Atm_h} + \tau_{Atm_w}$$

Tablo 1. Bir VLBI oturumu analiz yazılımı için düzenlenebilecek bilinmeyenlerin tanım dizisi.

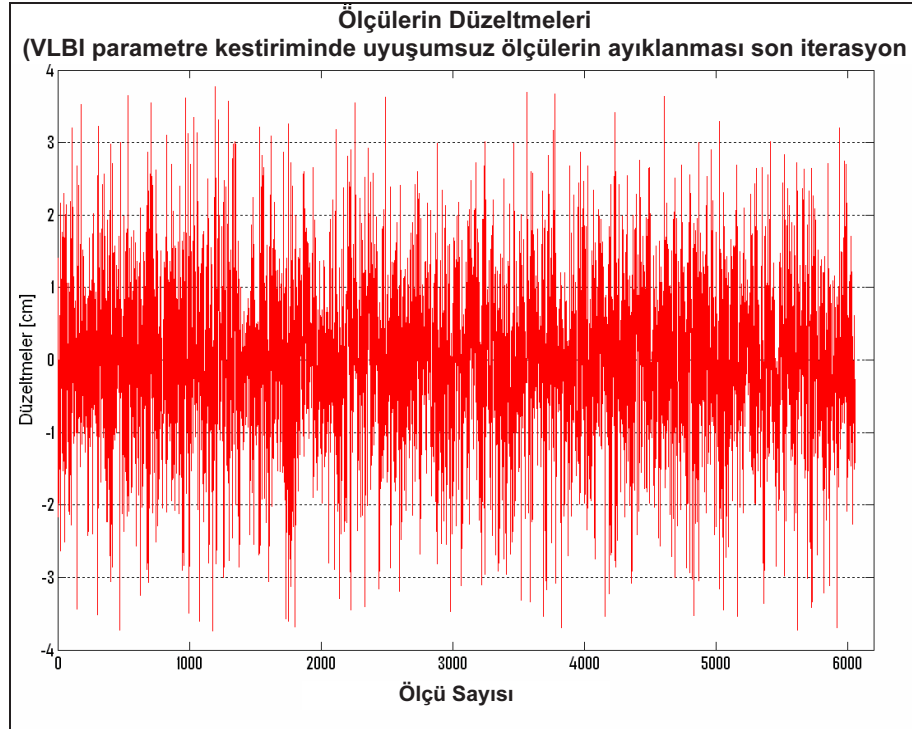
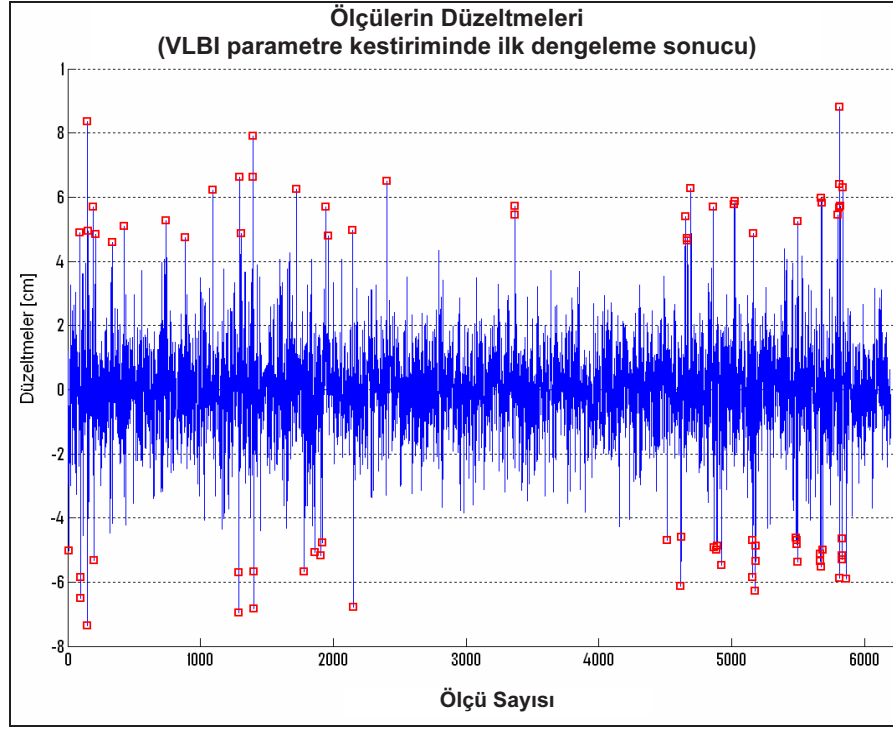
Tanım Dizisi			Açıklama	Birim
Tarama	Gözlem	<i>iso</i>	Radyo kaynağı (kuazar) sayısı (ilgili taramaya ait)	1
		<i>i1, i2</i>	Radyo teleskobu (ilgili taramaya ait istasyonlar)	1
		<i>obs</i>	Ölçülen grup sinyal gecikme değerleri	saniye
		<i>sig</i>	Grup sinyal gecikme ölçüleri hataları	saniye
		<i>com</i>	Hesaplanan grup sinyal gecikme değerleri	saniye
		<i>pnut, ppol</i>	Yer dönüklük parametrelerinin kısmi türevleri	saniye/radyan
		<i>dra, dde</i>	Radyo kaynağı koordinatlarının kısmi türevleri	mili açı (arc) saniyesi
		...		
	İstasyon	<i>x, y, z</i>	Kartezyen koordinatlar	metre
		<i>dx, dy, dz</i>	Kartezyen koordinatların kısmi türevleri	1
		<i>az, zd</i>	Azimut, zenit mesafesi	radyan
		<i>zhd</i>	Troposferik hidrostatik zenit gecikmesi	metre
		<i>gmfh, gmfw</i>	Küresel hidrostatik ve ıslak izdüşüm fonksiyonları	1
		...		
	<i>nobs</i>		Taramadaki ölçü sayısı	1
	<i>mjd</i>		Taramanın ölçü epoğu (modified Julian Day)	UTC

VLBI ile ulaşılabilecek en yüksek duyarlık değerlerini yakalama amacına yönelik olarak gerçekleştirilmiş olan CONT05 kampanyası toplam 15 günlük, 11 radyo teleskobu ile gerçekleştirilen sürekli VLBI oturumudur. İlk ölçü 12 Eylül 2005 tarihinde (Pazartesi) 17:00 UTC de, son ölçü ise 27 Eylül 2005 tarihinde (Salı) 16:30 UTC de gerçekleştirilmiştir. CONT05 VLBI kampanyasındaki radyo teleskopları: olarak, Algonquin Park (Kanada), Gilmore Creek

(Alaska, Amerika Birleşik Devletleri -ABD), Kokee Park (Hawaii, ABD), Westford (Massachusetts, ABD), Ny Alesund, (Norveç), Onsala60 (İsveç), Svetloe (Rusya), TIGO (Concepcion, Şili), Tsukuba (Japonya), Wettzell (Almanya) istasyonları seçilmiştir (Şekil 4). Radyo istasyonlarının seçiminde teknik yeterlilik ve duyarlık ölçütleri göz önüne alınmış ve kampanya öncesi her istasyon için bu ölçütler test edilmiştir (Schlüter ve Behrend, 2007).



Şekil 4. CONT05 kampanyasındaki VLBI radyo teleskopları.



Şekil 5. CONT05 kampanyası 12 Eylül 2005 tarihli 24 saatlik oturumun ölçü düzeltmeleri ve uyumsuz ölçülerin ayıklanması.

Islak zenit gecikmeleri ve saat hataları parametrelerinin kestiriminde CONT05 kampanyasının 12 Eylül 2005 tarihinde gerçekleştirilen ilk 24 saatlik oturumu kullanılmıştır. Modelde herhangi bir kesme açısı kullanılmamış ve tüm gözlemler modele dahil edilmiştir. Zenit ıslak gecikmelerinin kestiriminde Küresel İzdüşüm Fonksiyonu [Global Mapping Function (GMF)]'nın kısmi türev değerleri kullanılmıştır. Gevşek koşullar saat hatası ve zenit ıslak gecikmesi modellerinin her ikisine de pseudo-gözlem denklemleri formunda dahil edilmiştir. Analiz sonuçlarına ilişkin parametreler bir dizi uyuşumsuz ölçünün iteratif olarak ayıklanmasının ardından elde edilmiştir. Her gözlem düzeltilmesinin ($v_{l(i)}$), kendi standart sapmasına ($m_{v_{l(i)}}$) oranından hesaplanan standartlaştırılmış düzeltme değeri ($T = v_{l(i)} / m_{v_{l(i)}}$) 0.95 güven aralıklı Student (t -) dağılımı sınır değeri ile karşılaştırılmıştır. Sınır değerden büyük standartlaştırılmış düzeltme değerine sahip gözlemlerin istatistiksel olarak uyuşumsuz olduğuna karar verilerek ölçülerin ağırlıklarını küçültmek yerine ölçü setinden atılmıştır (Şekil 5) (Wolf ve Ghilani, 1997).

a. Saatlerin Senkronizasyon Uyuşumsuzluğu ve Frekans Tutarsızlığı Hatalarının Modellenmesi

Sinyal gecikme ölçülerindeki (τ) en büyük hatayı istasyondaki atomik saatlerin senkronize olmamaları hataları (ofsetler) ve frekans farklılıklarından kaynaklanan hatalar (trendler) oluşturur. VLBI analizi parametre kestirimi aşamasında istasyon koordinatları (X, Y, Z)_{ITRF2000} ve saat parametreleri (ofset, trend ve kuadratik terim) master istasyon için tüm oturum boyunca sabit alınır. Böylece elde edilen rölatif saat değerleri (zaman farkları) ile saatlerdeki senkronizasyon hataları giderilir. Saat sıçramaları (clock breaks) olan bir oturumda ise saat sıçraması olmayan bir master istasyon seçilerek fark alınır. 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

$$\begin{aligned}\tau_{\text{saat}_1} &= \beta_0^{\text{saat1}} + \beta_1^{\text{saat1}}(t_i^{\text{saat1}} - t_0) + \beta_2^{\text{saat1}}(t_i^{\text{saat1}} - t_0)^2 \\ \tau_{\text{saat}_2} &= \beta_0^{\text{saat2}} + \beta_1^{\text{saat2}}(t_i^{\text{saat2}} - t_0) + \beta_2^{\text{saat2}}(t_i^{\text{saat2}} - t_0)^2 \\ &\vdots \\ \tau_{\text{saat}(s)} &= \beta_0^{\text{saat}(s)} + \beta_1^{\text{saat}(s)}(t_i^{\text{saat}(s)} - t_0) + \beta_2^{\text{saat}(s)}(t_i^{\text{saat}(s)} - t_0)^2\end{aligned}\quad (5)$$

şeklinde oluşturulur. Burada s oturumdaki toplam saat sayısını, β_i polinomun bilinmeyen katsayılarını, t_i her bir saatin farklı epoklardaki taramalara ait zaman değerlerini, t_0 referans (sabit) alınan saatin referans epoğundaki zaman değerini göstermektedir. Zaman gecikmeleri için ölçü denklemleri,

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{\text{saat}(1,2)} &= \tau_{\text{saat}_1} - \tau_{\text{saat}_2} \\ \Delta\tau_{\text{saat}(1,3)} &= \tau_{\text{saat}_1} - \tau_{\text{saat}_3} \\ &\vdots \\ \Delta\tau_{\text{saat}(s-1,s)} &= \tau_{\text{saat}_{s-1}} - \tau_{\text{saat}_s}\end{aligned}\quad (6)$$

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

$$\begin{aligned}\frac{\partial\tau_1}{\partial\beta_0} &= 1d\beta_0^{\text{saat1}} - 1d\beta_0^{\text{saat2}} \\ \frac{\partial\tau_1}{\partial\beta_1} &= (t_1^{\text{saat1}} - t_0)d\beta_1^{\text{saat1}} - (t_1^{\text{saat2}} - t_0)d\beta_1^{\text{saat2}} \\ \frac{\partial\tau_1}{\partial\beta_2} &= (t_1^{\text{saat1}} - t_0)^2 d\beta_2^{\text{saat1}} - (t_1^{\text{saat2}} - t_0)^2 d\beta_2^{\text{saat2}}\end{aligned}\quad (7)$$

şeklinde dir. Saat parametreleri (ofset, trend ve kuadratik terimler) için katsayılar matrisleri,

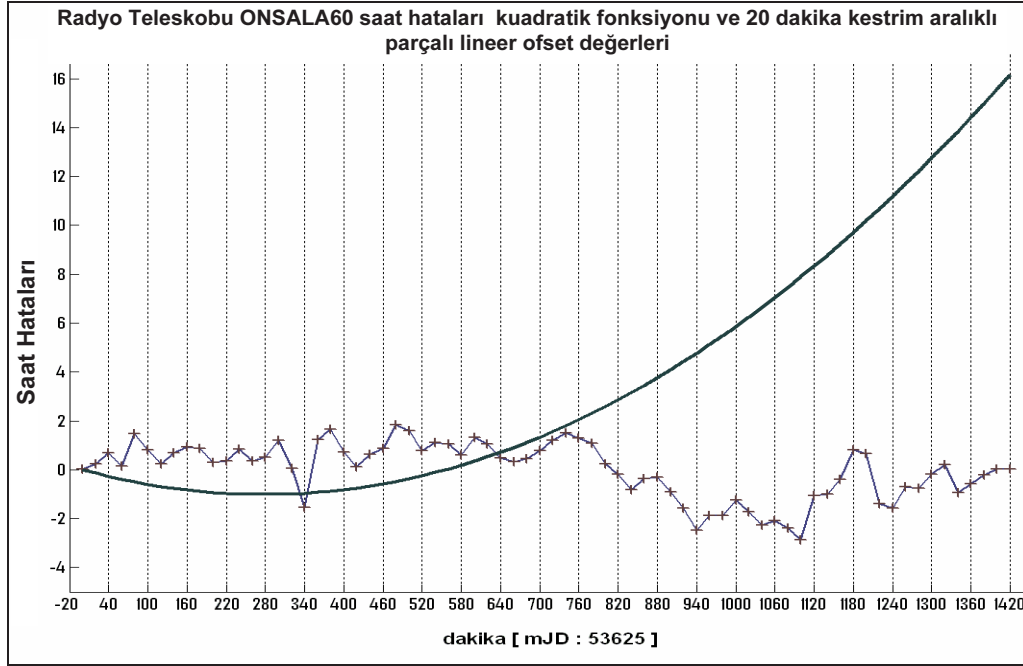
$$\begin{aligned}
A_{\text{saat.ofset}} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_{m-1} \\ \tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\beta_0^{\text{saat}1} & d\beta_0^{\text{saat}2} & \dots & d\beta_0^{\text{saat}(s-1)} & d\beta_0^{\text{saat}(s)} \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \\
A_{\text{saat.trend}} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_{m-1} \\ \tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\beta_1^{\text{saat}1} & d\beta_1^{\text{saat}2} & \dots & d\beta_1^{\text{saat}(s-1)} & d\beta_1^{\text{saat}(s)} \\ t_{\text{saat}1} - t_0 & -(t_{\text{saat}2} - t_0) & \dots & 0 & 0 \\ t_{\text{saat}1} - t_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -(t_{\text{saat}(s)} - t_0) \\ 0 & 0 & \dots & t_{\text{saat}(s-1)} - t_0 & -(t_{\text{saat}(s)} - t_0) \end{bmatrix} \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{\text{saat.kuadratik}} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_{m-1} \\ \tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\beta_2^{\text{saat}1} & d\beta_2^{\text{saat}2} & \dots & d\beta_2^{\text{saat}(s-1)} & d\beta_2^{\text{saat}(s)} \\ (t_{\text{saat}1} - t_0)^2 & -(t_{\text{saat}2} - t_0)^2 & \dots & 0 & 0 \\ (t_{\text{saat}1} - t_0)^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -(t_{\text{saat}(s)} - t_0)^2 \\ 0 & 0 & \dots & (t_{\text{saat}(s-1)} - t_0)^2 & -(t_{\text{saat}(s)} - t_0)^2 \end{bmatrix} \\
A_{\text{saat}} &= [A_{\text{saat.ofset}} \mid A_{\text{saat.trend}} \mid A_{\text{saat.kuadratik}}] \quad (9)
\end{aligned}$$

şeklinde oluşturulur (Schuh 1987; Titov vd, 2004; Tesmer, 2004; Hobiger vd, 2008). Kuadratik polinoma (Şekil 6) ek olarak VLBI saat modeline frekans farklılıklarındaki yüksek derecedeki değişimleri de belirleyebilmek için PL ofset parametreleri kestirilir. Aşağıdaki (14) eşitliğinde verilen PL ofset modeli, kestirim aralıklarına bağlı olarak parametre sayısı değişen sürekli bir fonksiyondur (Şekil 6).

CONT05 kampanyasının ilk 24 saatlik oturumda (12 Eylül 2005) tüm radyo

teleskoplarının atomik saatlerinde meydana gelen senkronizasyon uyumsuzluğu ve frekans tutarsızlığı hataları tüm oturum için oluşturulan polinomun trend ve kuadratik terimleri (8) ve (9) eşitlikleri ve bu polinoma ek olarak her kestirim aralığı için oluşturulan PL ofset fonksiyonunun ofset değerleri (16) eşitliği ile En Küçük Kareler Kestirimi (EKK) parametre kestirimi yöntemi ile elde edilmiştir. Onsala60 radyo teleskobunun atomik saat hatasına ait kuadratik fonksiyon ve parçalı lineer ofsetleri kestirim parametreleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. CONT05 kampanyası ilk 24 saatlik oturumunda Onsala60 radyo teleskobunun atomik saat hatası (kuadratik fonksiyon ve PL ofset fonksiyonu ile belirlenen saat hataları – kestirim aralıkları).

b. Troposferik Sinyal Gecikmesinin Modellenmesi

Radyo sinyalleri, radyo kaynağından (kuazar) radyo teleskoplarına doğru olan yolculuklarında elektromanyetik dalgaları saptıracak miktarda serbest elektronların bulunduğu ionosfer (kalınlığı yaklaşık olarak 70-500 km) ve elektriksel nötr olan troposfer (yaklaşık olarak kalınlığı, kutuplarda 6-7 km, ekvatorunda 16-20 km ve $\varphi = 45^\circ$ de 12 km) tabakalarından geçmektedir. Radyo dalgaları, geçtiği yol boyunca tabakaların yoğunluk ve diğer bazı zamana bağlı değişen karakteristik özelliklerine (sıcaklık, basınç vs.) bağlı olarak kırılma ve yansımaya maruz uğramaktadır. İyonosferdeki gecikme etkisi çift frekanslı ölçüler ile (VLBI için 2.3 ve 8.4 GHz) hemen hemen tamamen giderilmektedir.

Atmosferin en alt tabakası olan troposfer, atmosferin tüm ağırlığının %75 ini ve su buharının ise yaklaşık %98'ini ihtiva eder. Zenit hidrostatik gecikmesinin 3/4'ü troposfer tabakasında oluşur. Bir istasyonda, t anındaki zenit hidrostatik gecikme $\Delta L_h^z(t)$, basınç (hPa) ve istasyon koordinatları (enlem φ (°), ve yükseklik h (m)) ile

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

şeklinde hesaplanır (Saastamoinen, 1973). Yüzey basınç ölçüleri ile hidrostatik gecikme 1 mm den daha duyarlı biçimde kestirilebilmektedir. Yüzey basınç ölçüsünde yapılacak 1 hPa hata, zenit hidrostatik gecikmesinin kestiriminde 2.3 mm hataya sebep olur. 0.1 mm duyarlıklı hidrostatik gecikme kestirimi için ise 0.05 hPa duyarlıkta yüzey basınç ölçümü yapılmalıdır. Deniz seviyesi için, zenit yönündeki hidrostatik gecikme yaklaşık 2.3 metreden, 5° yükselim açısında 25 metreye kadar artar (Boehm vd, 2006).

Islak zenit 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 duyarlıkta belirlenemez. Troposfer zenit ıslak gecikmesinin ($\Delta L_w^z(t)$) belirlenmesinde, troposferin katmanları boyunca radyosonda ölçülerinden zenit doğrultusunda yaklaşık 30 km boyunca 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 değerlerin ara değerlendirme ve dış değerlendirme (extrapolasyon) yapılmasının ardından her katman için belirlenen yeni değerler ile ıslak kırılma 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 ($\Delta\tau_{tro}$) her baz için

$$\Delta\tau_{Tro}^e(t) = -\frac{1}{c}[\Delta L_2^e(t) - \Delta L_1^e(t)] \quad (11)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $\Delta L_i^e(t)$ i istasyonunda, t zamanında, e kesme açısına ait troposferik sinyal gecikmesidir. VLBI temel fonksiyonel modelinde kullanılan troposferik gecikme parametresi, her iki istasyondaki gecikmenin farkıdır, diğer bir ifade ile baza getirilen troposferik sinyal gecikme düzeltmesidir. Troposferik sinyal gecikmesi $\Delta L_i^e(t)$ hidrostatik ve ıslak olmak üzere iki kısma ayrılarak

$$\Delta L_i^e(t) = \Delta L_h^z(t) \cdot mf_h(e) + \Delta L_w^z(t) \cdot mf_w(e) \quad (12)$$

şeklinde modellenir (Davis vd, 1985). Eşitlik (12)'de $mf_{h,w}$ hidrostatik ve ıslak izdüşüm fonksiyonlarını (mapping functions), $\Delta L_{h,w}^z$ ise zenit doğrultusundaki hidrostatik ve ıslak troposferik gecikmeleri ifade eder.

İzdüşüm fonksiyonları (mapping functions) herhangi bir istasyonda, t anında zenit yönündeki troposferik gecikme ile ufuk düzleminden rasgele alınan herhangi bir yükselim açısındaki troposferik gecikme arasındaki oranı veren kesirli bir fonksiyondur (Niell, 1996). Troposferin kalınlığının ekvator dan kutuplara doğru incelmelerinden ötürü herhangi bir istasyonda t anında aynı yükselim açısındaki zenit gecikmeleri aynı olmaz. t anında aynı yükselim açısı için sinyalin güney troposfer yolunun kuzeye göre daha fazla olmasından troposferik gecikme miktarı, güneye doğru olan ölçülerde kuzeye doğru olan ölçülerden daha fazladır. Buna troposfer gecikmesinin azimutal

asimetri özelliği denir ve tüm izdüşüm fonksiyonlarında dikkate alınır. Jeodezik izdüşüm fonksiyonları

$$mf_{h,w}(e) = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin(e) + \frac{a_i}{\sin(e) + \frac{b_i}{\sin(e) + c_i}}} \quad (13)$$

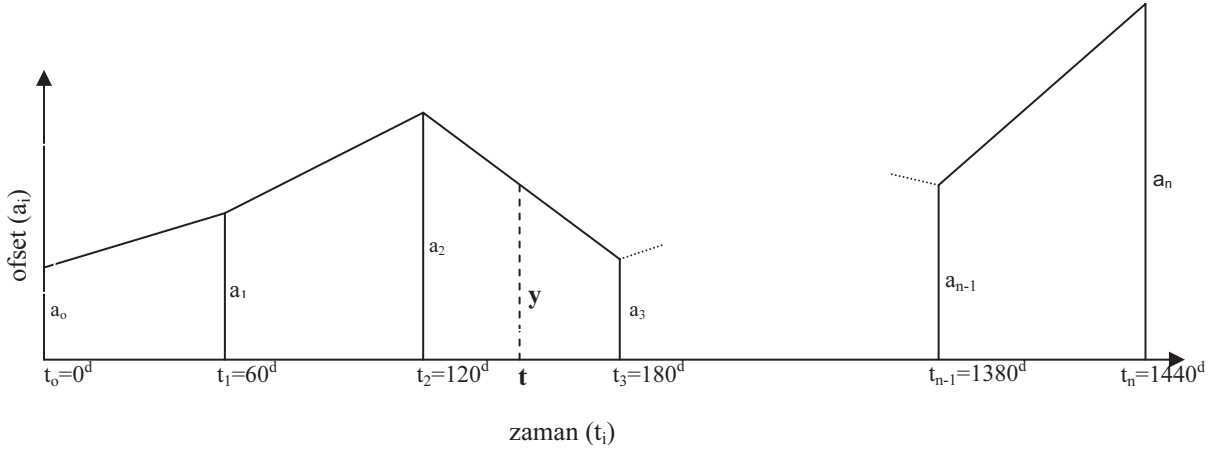
eşitliği ile verilen kesirli fonksiyondaki (Marini, 1972) hidrostatik ve ıslak a_i, b_i, c_i, \dots parametrelerini hesaplama yönü ile farklılaşır. Bu katsayılar enlem, elipsoidal yükseklik, yılın günü, yüzey sıcaklığı ve toplam yüzey basıncı gibi ölçülerin bir fonksiyonu olan standart atmosfer modelleri ile (Chao, 1974) hesaplanabileceği gibi, radyoson verileri ile (Niell, 1996), veya şimdilerde sayısal atmosfer modelleri (Numerical Weather Models) (Boehm vd, 2006) ile de hesaplanabilir. İzdüşüm fonksiyonlarının duyarlılığı tüm kestirim parametrelerinin özellikle istasyon nokta yüksekliklerinin duyarlıklarını büyük oranda etkilemektedir.

c. Saat Hataları Parametrelerinin ve Troposferik Zenit ıslak Gecikmelerinin Sürekli Parçalı Lineer Ofset Fonksiyonu ile Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında, 'PL ofsetler' şeklinde oluşturulan saat hatası ($\Delta\tau_{clk}$) ve troposferik ıslak zenit gecikme ($\Delta L_w^z(t)$) parametrelerinin kestirim modeli (14) VieVS yazılımına uygulanmıştır. Modeller için önerilen sürekli PL ofset fonksiyonu (continuous piecewise linear ofset function) şeklinde ifade edilir. Fonksiyonun temsili grafik gösterimi 60 dakikalık kestirim aralıkları için Şekil 7'de sunulmuştur.

$$y = a_0 + \frac{a_1 - a_0}{t_1 - t_0}(t_1 - t_0) + \frac{a_2 - a_1}{t_2 - t_1}(t_2 - t_1) + \dots + \frac{a_n - a_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}(t - t_{n-1}) \quad (14)$$

$$= a_{n-1} + \frac{a_n - a_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}(t - t_{n-1})$$



Şekil 7. VLBI analizinde saat hataları ve zenit ıslak gecikmeleri parametrelerinin PL ofsetler ile kestirimi grafik gösterimi (PL ofsetler - 60 dakikalık kestirim aralıkları).

(14) eşitliğinde verilen ölçü denklemlerinin kısmi türevleri bilinmeyen parametreler a_n ve a_{n-1} 'e göre,

$$\frac{\partial y}{\partial a_{n-1}} = \left(1 - \frac{t - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right) da_{n-1} \qquad \frac{\partial y}{\partial a_n} = \left(\frac{t - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right) da_n \qquad (15)$$

şeklinde elde edilir. PL ofsetler modeli için EKK dizayn matrisi ilgili kısmi türev değerleri

$$A_{\text{saat.par.lin.ofset}} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{t'_1 - t_0}{t_1 - t_0} & \frac{t'_1 - t_0}{t_1 - t_0} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 - \frac{t'_2 - t_0}{t_1 - t_0} & \frac{t'_2 - t_0}{t_1 - t_0} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - \frac{t'_{m/n} - t_0}{t_1 - t_0} & \frac{t'_{m/n} - t_0}{t_1 - t_0} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - \frac{t''_1 - t_1}{t_2 - t_1} & \frac{t''_1 - t_1}{t_2 - t_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - \frac{t''_2 - t_1}{t_2 - t_1} & \frac{t''_2 - t_1}{t_2 - t_1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 - \frac{t''_{m/n} - t_1}{t_2 - t_1} & \frac{t''_{m/n} - t_1}{t_2 - t_1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 - \frac{t^{(n)}_1 - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} & \frac{t^{(n)}_1 - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 1 - \frac{t^{(n)}_2 - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} & \frac{t^{(n)}_2 - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 - \frac{t^{(n)}_{m/n} - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} & \frac{t^{(n)}_{m/n} - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \end{bmatrix}_{m \times n} \qquad (16)$$

şeklinde yerine konularak oluşturulur. Bu eşitlikte n ölçü sayısını, n bilinmeyen lineer ofset sayısını göstermektedir. Örneğin, saat hatası modeli için kestirim aralığı 60 dakika seçildiğinde VLBI oturumları 24 saat sürdüğü için bilinmeyen sayısı (25 ofset değeri, 1 trend ve 1 kuadratik terim) toplam 27 olur.

Katsayılar matrisinin regüler olmaması ve rank bozukluğuna sahip olması gibi sayısal problemleri çözmek ve parametre kestirimini tutarlılaştırmak için PL offsetler fonksiyonunun kestirim aralıkları arasında koşullar pseudo-ölçü denklemleri şeklinde oluşturulmuştur. Pseudo-ölçü denkleminde iki ofset arasındaki fark sıfıra eşitlenmiş,

$$a_{i+1} - a_i = 0 \pm 50 \text{ mm} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

gevşek koşul için ölçülerinkilere göre daha büyük standart sapma değeri atayarak pseudo-gözlem denklemleri ağırlıklandırılmıştır. Aşağıda sunulan denkleme modeline göre;

$$(A'PA + H'P_cH)dx = A'Pl + H'P_ch \quad (18)$$

çözüm sağlanmıştır. (18) eşitliğindeki gerçek ve pseudo-gözlem denklemlerine ait fonksiyonel ve stokastik modelin matris gösterimi

$$\begin{bmatrix} v \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ H \end{bmatrix} dx - \begin{bmatrix} dl \\ h \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$K_{II} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K_c \end{bmatrix} = S_{0c} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_c \end{bmatrix}$$

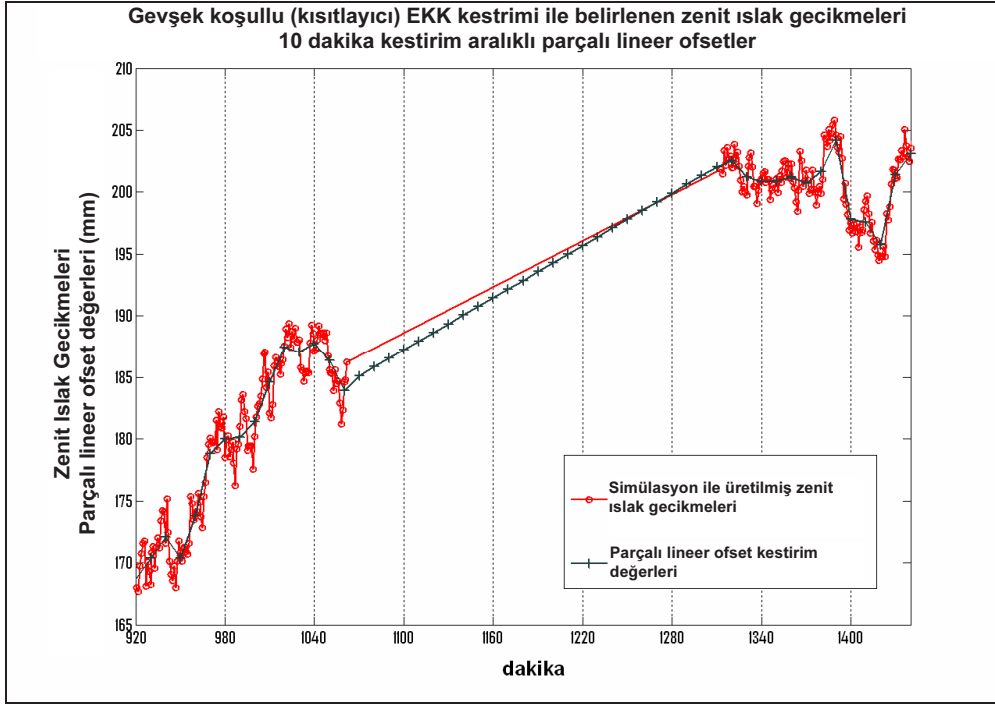
şeklindedir. (19) eşitliğinde; K_{II} , ölçü ve koşullara ait varyans-kovaryans matrisini; H , pseudo-gözlem denklemleri dizayn matrisini; h , pseudo-ölçüler vektörünü; K_c , pseudo-ölçü denklemlerinin varyans-kovaryans matrisini; P_c , pseudo-ölçü denklemlerinin ağırlıklarını, A , gerçek ölçülerin dizayn matrisini; P , varyans-

kovaryans matrisini; dx , bilinmeyenlerin (saat hataları PL ofsetleri, trend ve kuadratik terimleri, troposferik ıslak zenit gecikmeleri PL ofsetleri) düzeltmelerini ve dl , ötelenmiş (indirgenmiş) ölçüler vektörünü göstermektedir. Soncul karesel ortalama hata

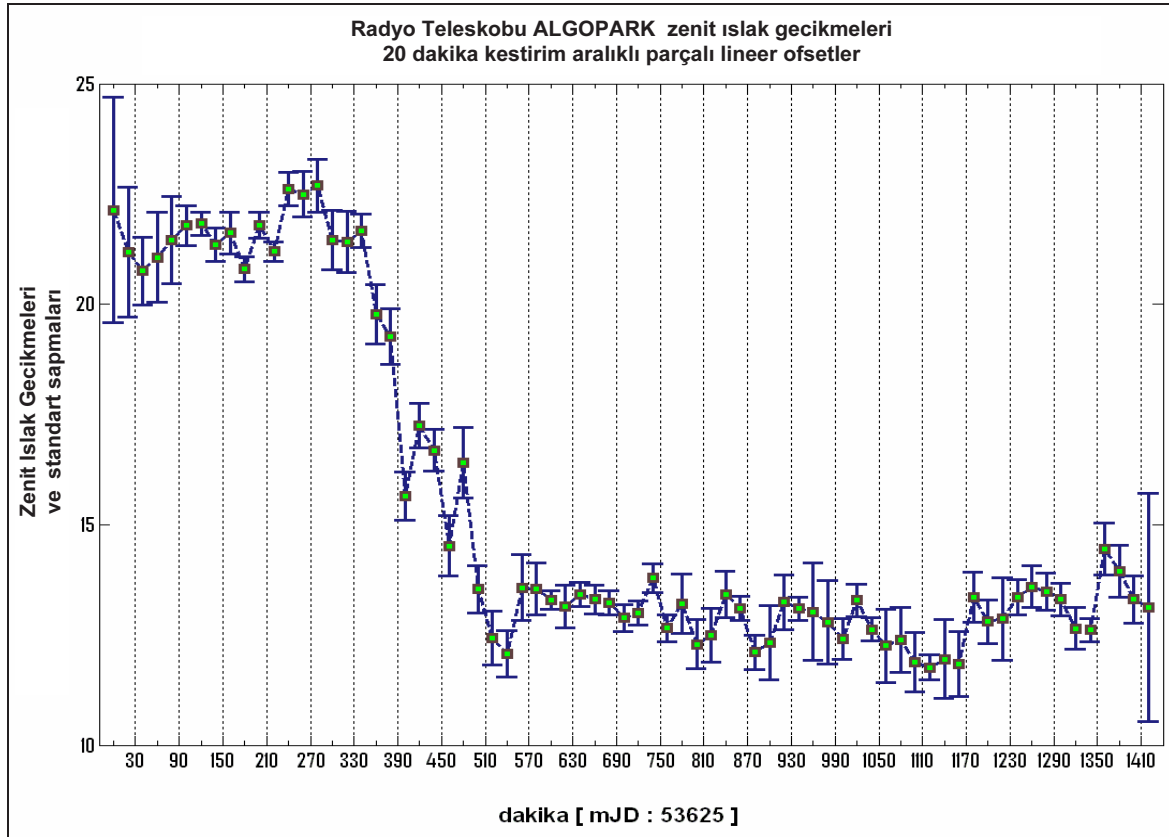
$$S_{0c} = (v'Pv + v_c'P_c v_c) / (n_{ölçü} + n_{kosul} - n_{bilinmeyen}) \quad (20)$$

eşitliğinden elde edilir. $n_{ölçü}$, n_{kosul} ve $n_{bilinmeyen}$ sırası ile ölçü sayısı, pseudo-gözlem eşitliği şeklinde oluşturulan ofsetler arasındaki koşulların sayısı ve bilinmeyen parametrelerin sayısını göstermektedir. Örneğin, Şekil 8'de bir günlük VLBI oturumunun bir bölümü için 920 – 1440 dakikalar arası zenit ıslak gecikmelerinin (17) PL ofsetler ile kestirimi görülmektedir. 1080-1320 dakikaları arasındaki 4 saatlik sürede herhangi bir ölçü yapılmadığı bir durum için model, eğer koşullar kullanılsaydı çözümsüz olacaktı. Gelecekte, saat hataları ve zenit ıslak gecikmesinin ofset kestirim aralıkları 10 veya 5 dakika seçildiğinde ilgili aralığa düşen ölçü sayısı bilinmeyen parametre sayısından fazla olacağından bu durum ile sıkça karşılaşılacaktır. Gevşek koşulların, pseudo-gözlem denklemleri şeklinde modele dahil edilmesinde koşulların ağırlıklarının ölçü ağırlıklarından çok daha küçük olmasından ötürü kestirim parametreleri üzerinde etkisi de olmayacaktır. PL ofsetlerinin kestirimini yapıldığı model, saat hatası ve zenit gecikme parametrelerinin kestirimi ile birlikte yer dönüklük parametrelerinin ve radyo teleskoplarının koordinatlarının kestiriminde de kullanılacaktır.

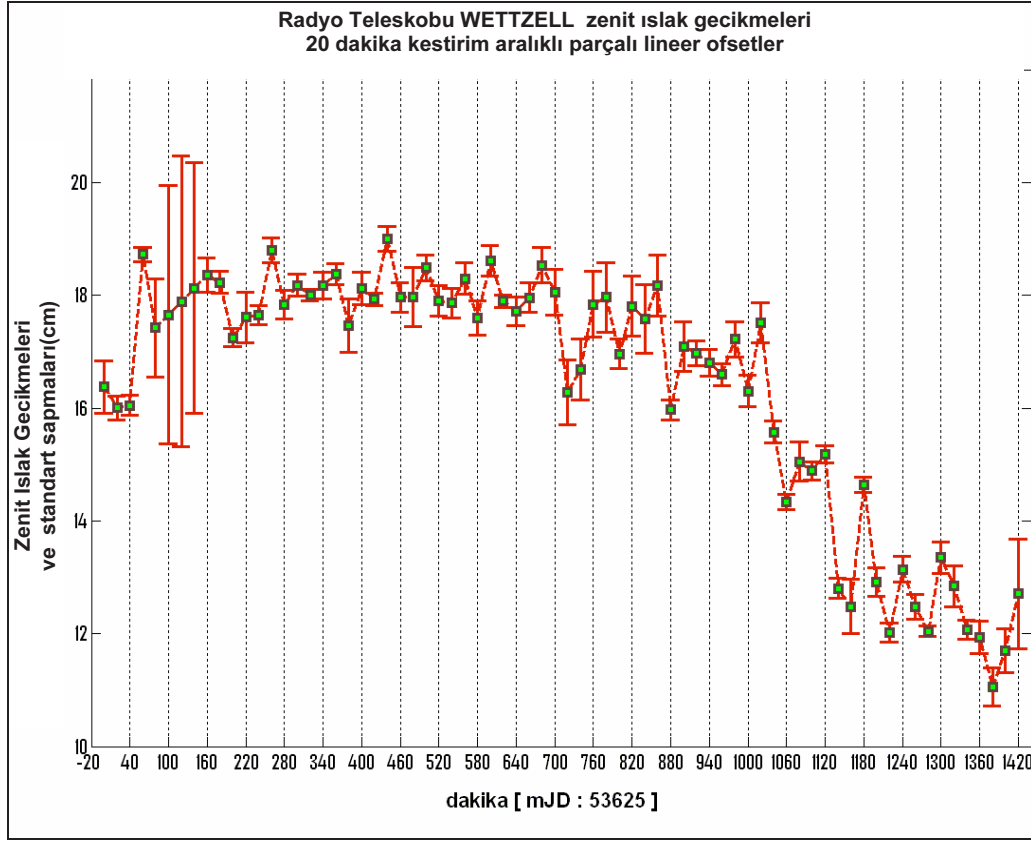
CONT05 kampanyası ilk 24 saatlik oturumunun (12 Eylül 2005) radyo teleskoplarındaki zenit ıslak gecikme parametreleri (16) eşitliğinde verilen PL ofset modeli ile (17) eşitliğinde verilen gevşek koşullar modele dahil edilerek hesaplanmıştır.



Şekil 8. Pseudo-gözlem denklemleri şeklinde modele dahil edilen gevşek koşullar ile 10 dakikalık aralıklar için zenit ıslak gecikmelerinin kestirimi.



Şekil 9. CONT05 kampanyası ilk 24 saatlik oturumunda Algopark radyo teleskobu zenit ıslak gecikmeleri (PL ofset değerleri ve standart sapmaları – kestirim aralıkları).



Şekil 10. CONT05 kampanyası ilk 24 saatlik oturumunda Wettzell radyo teleskobu zenit ıslak gecikmeleri (PL ofset değerleri ve standart sapmaları – kestirim aralıkları).

Şekil 9'da kestirimi yapılan Algotark'a ait ilk ve son zenit ıslak gecikme değerlerinin ve Şekil 10'da Wettzell'e ait 6., 7. ve 8. gecikme değerlerinin standart sapmalarının diğerlerine göre büyük olmasının nedeni, ilgili 20 dakikalık kestirim aralığında ölçü bulunmaması ve bu aralıklar için çözümün pseudo-gözlem denklemleri ile sağlanmış olmasıdır. Atanan standart sapma değerlerinin gerçek ölçülerinkilere göre büyük olması koşulların gevşekliğini göstermektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında VLBI saat hatalarının ve zenit ıslak gecikmelerinin yüksek zamansal çözünürlükte (her 20, 10, 5 dakika) kestirimine olanak sağlayan "parçalı lineer ofsetler" modeli geliştirilerek, VLBI temel ölçü modeli içerisine dahil edilmiştir. Bazı kestirim aralıklarında ölçü bulunmamasından dolayı katsayılar matrisinde oluşan rank bozukluklarının ortadan kaldırılması için ofsetler arasındaki koşullar (kısıtlayıcılar) pseudo-gözlem denklemleri şeklinde oluşturulmuş ve

pseudo-gözlem denklemlerine atanan yüksek standart sapma değerleri ile koşullar gevşekleştirilmiştir. Böylece normal denklemlerin katsayılar matrisinin küçük kestirim aralıklarında ölçü eksikleri bulunması durumunda da regüler yapıda oluşması sağlanmıştır. VLBI parametrelerinin kestiriminde, saat hataları ve zenit ıslak gecikmeleri yanında yer dönüklük parametreleri ve radyo teleskobu istasyon koordinatları gibi tüm jeodezik parametrelerin parçalı lineer ofsetler fonksiyonu ile modellenmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- 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.
- Campbell, J., ve Witte, B., 1978, **Grundlage und geodätische Anwendung der very long baseline interferometry (VLBI)**, Zeitschrift für Vermessungswesen, 103, s. 10-20.

- 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.
- Campbell, J., 2004, VLBI for Geodesy and Geodynamics, In: **The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy**, F. Mantovani and A. Kus (eds.), Kluwer Academic Publishers, s. 359-381.
- 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.
- Drewes, H., ve Reigber, C., 2005, **The Global Geodetic Observing System (GGOS) of the International Association of Geodesy - Objectives and Status**, FIG Working Week 2005 and GSDI-8.
- Hobiger, T., Koyama Y., Boehm, J., Kondo, T., ve Ichikawa R., 2008, **The effect of the neglect of VLBI reference station clock-offsets on UT1 estimates**, submitted to Advances in Space Research.
- Ma, C., 1978, **Very long baseline interferometry applied to polar motion, relativity and geodesy**, NASA Technical Memorandum 79582, University of Maryland, Maryland.
- Marini, J.W., 1972, **Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile**, Radio Sci., 7(2), s. 223-231.
- 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., 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.
- Petrachenko, B., Boehm, J., MacMillan, D., Pany, A., Searle A., ve Wresnik J., 2008, **VLBI2010 Antenna Slew Rate Study**, Proceedings of the 5th IVS General Meeting, St. Petersburg, s. 410 – 415.
- Saastamoinen, J., 1973, **Contributions to the theory of atmospheric refraction**, part II, Bull. Geod., 107, s. 13-34.
- Schlüter, W., ve Behrend, D., 2007, **"The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): current capabilities and future prospects"**, Journal of Geodesy, 81, Nos. 6–8, s. 379–387.
- 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.
- Shapiro, I.I., Robertson, D.S., Knight, C.A., Counselman, C.C., Rogers, A.E.E., Hinteregger, H.F., Lippincott, S., Whitney, A.R., Clark, T.A, Niell, A.E., ve Spitzmesser, D.J., 1974, **Transcontinental baseline and the rotation of Earth measured by radio Interferometry**. Science, 186, s. 920-922.
- Sovers, O.J., Fenslow J.L., ve Jacobs, C.S., 1998, **Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results**. Reviews of Modern Physics, 70, No. 4.
- 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.
- Tesmer, V., 2004, **Das stochastische Modell bei der VLBI-Auswertung**, DGK Reihe C, Heft 573, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- 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.
- Wolf, P.R., Ghilani, C.D., 1997, **Adjustment computation: statistics and least squares in surveying and GIS**, s. 353-354.
- [URL 1], <http://mars.hg.tuwien.ac.at>, 24.Aralık 2008.
- [URL 2], <http://www.mpifrbonn.mpg.de/public/pr/pr-utc-dt.html>, 24.Aralık.2008.