

3D02 高速波線追跡ツールKARATによる大気遅延推定モデルの 定量的評価

○市川隆一† トーマス ホビガー 瀧口博士 小山泰弘

近藤哲朗 (情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター)

E-mail: †richi@nict.go.jp

An Evaluation of Atmospheric Correction Models using the Fast Ray Tracing Algorithms through the JMA Mesoscale Numerical Weather Data

Ryuichi ICHIKAWA , Thomas HOBIGER ,

Hiroshi TAKIGUCHI , Tasuhiro KOYAMA , and Tetsuro KONDO

(KASHIMA SPACE RESEARCH CENTER, NICT)

E-mail: †richi@nict.go.jp

Key words: GNSS, VLBI, atmospheric path delay, numerical weather prediction model, mapping function

Abstract

We simultaneously calculate atmospheric parameters (zenith wet delay and a gradient vector) and position errors estimated from atmospheric slant path delays obtained by new ray tracing technique [Hobiger et al., 2007] through the meso-scale numerical weather data with 10 km horizontal resolution. In this numerical calculation both isotropic and anisotropic mapping functions are evaluated. We find that the large horizontal and vertical position errors up to 20 mm associated with severe rain fall event. These horizontal position errors are dramatically reduced by anisotropic mapping function. On the other hand, the vertical position errors are not reduced. This result suggests the errors of zenith total delay estimates associated with the lateral heterogeneity of the atmosphere yield the vertical errors.

1. はじめに

GPS、GLONASS、Galileo、あるいは準天頂衛星システムなどの衛星航法システム (GNSS: Global Satellite Navigation System) や、地球姿勢変動観測や宇宙飛翔体の軌道決定に用いられる VLBI 技術は、人工衛星や銀河系外の電波天体から発射されるマイクロ波を地上の受信機で受けて計測する。これらの宇宙測地計測技術では、衛星から地上局までの電波の伝搬時間、あるいは地上の2地点間での伝搬時間差が基本的な測定量となる。このときの時刻の計測精度は、少なくとも 10^{-12} 秒に達する。

地球大気による見かけ上のマイクロ波の経路長の伸び、す

なわち伝搬遅延誤差 (Atmospheric Path Delay/以後これを“大気遅延”と呼ぶ) は、天頂方向で 2.3-2.8m にも及び、これは時刻精度に換算すると 10^{-9} 秒の桁に達する大きさである。大気遅延のうち、静水圧平衡が仮定できる大気成分^(注1)に起因する遅延量 (これを“静水圧遅延量”と呼ぶ) が 80 – 90% を占め、これらは地上気圧によるモデル推定によりミリの精度で補正可能である。一方で、水蒸気に起因する遅延 (これを“湿潤遅延量”と呼ぶ) は、地球上で水蒸気が偏在して分布し、かつその時空変動が予測困難であるため、この除去がマイクロ波を用いた宇宙測地計測技術の精度向上の鍵を握っ

(注1): 主に水蒸気を除く酸素、窒素などで構成される乾燥大気成分

ている (大気遅延の詳細については昨年の我々の宇科連講演論文を参照されたい [1])。

昨年の宇科連講演会において、我々は気象学の分野で天気予報に用いられる数値天気予報データを用いた大気遅延推定手法の開発について紹介した [1]。その後、Hobiger ら [2], [3] は、大気遅延計算に用いる波線追跡アルゴリズムの高速化、及び高精度化に成功した。我々は、この波線追跡計算ツールを “KARAT” (KASHIMA RAYtracing TOOLS) と名付け、実際の GPS 解析に適用した場合の大気遅延除去効果について評価を進めている。

KARAT は、現実に近い大気中での電波の伝搬経路を計算できるため、気温、気圧、水蒸気分圧といった各気象要素の変動が、例えば GPS 測位解析に対してどのような誤差をもたらすかをシミュレーション可能である。このようなシミュレーションは、従来 GNSS や VLBI のデータ解析で用いられる大気推定モデルの適用限界を評価する上で重要である。さらに、これらの解析結果から真の地殻変動、地球姿勢変動、宇宙飛行体の軌道情報などのシグナルと大気遅延によって生じた見かけの変動とを峻別する上でも有効と考えられる。そこで、本講演では、GPS の PPP (高精度単独測位/Precise Point Positioning) 解析を例に取り、KARAT による測位誤差シミュレーション結果を示す。

2. KARAT による測位誤差シミュレーション

2.1 気象庁数値予報データ

2007 年 9 月現在、気象庁は気象業務支援センターを通じて、実際の天気予報に用いる複数種類の数値天気予報データを提供している (数値予報データの詳細については [1] を参照されたい)。我々は、これらのうち、格子間隔約 10km、経度方向に 361、緯度方向に 289 個の格子点を持つメソスケール客観解析データ (MANAL/Meso-scale analysis data) を計算に使用している。MANAL は、3 時間 (2006 年 4 月以降) 毎に出力され、これが現時点での最小の時間分解能となる。ただし KARAT には、スプライン補完で簡単に時間補完する機能も付加しており、任意の時刻での遅延量計算も可能となっている。図 1 には、KARAT で計算した天頂方向の大気遅延量の空間分布の例を示した。これは、2006 年 7 月 21 日 20 時 UT のプロットで、九州から西日本の南方海上にかけて東西に帯状に延びる遅延量大の分布が見取れる。この分布は、この同時期に西日本に大きな被害をもたらした集中豪雨に相当する水蒸気が集中した領域を示している。

KARAT の詳細について別の文献に譲るが [2], [3]、前回報告した遅延量計算ツールの開発方針 [1] との大きな違いは我々独自の数値予報データの再構築にある。高速計算を可能にするためには、電波の伝搬経路上の屈折率を計算する際に解析的手法が使えるように改良するのが近道である。そこで、元の数値予報データの各計算格子に与えられる温度、気圧 (正

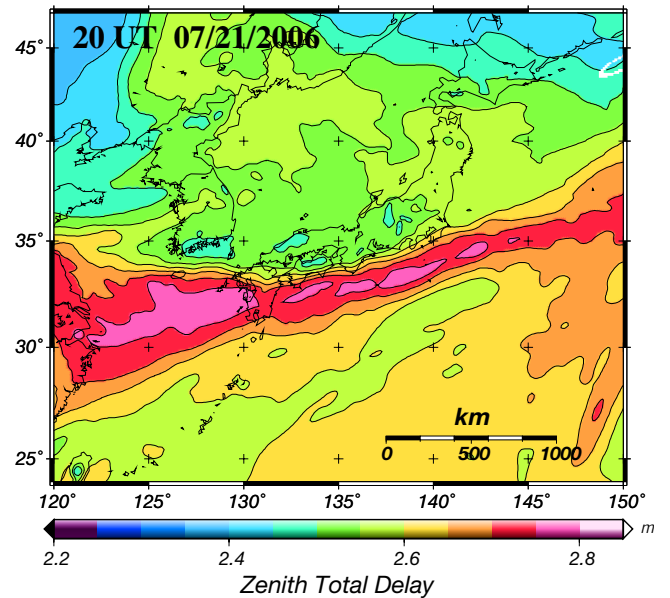


図 1 KARAT を用いて計算した 2006 年 7 月 21 日 20 時 UT の天頂大気遅延量の空間分布図

確には等気圧面高度)、水蒸気分圧の値から、等経緯度間隔の格子網での値を内挿で求め、数値予報データを再構築した。これにより、地球中心からの距離と経緯度の 3 パラメータで伝搬経路を記述可能となった。この計算アルゴリズムの改良により、クロック周波数 3GHz の Pentium D クラスの計算機で 1 秒間に約 1200 パスの遅延量計算が実現した。なお、KARAT では大気屈折率を計算するために、Bevis et al. [1992] による係数 [4] を用いている。

2.2 マッピング関数

GNSS や VLBI の測位解析では、視線方向の大気遅延量が天頂方向の大気遅延量 (天頂遅延量) の何倍になるかを仰角を変数として関係づけた仰角依存関数 (マッピング関数/mapping function、例えば [5] ~ [9] など) で得られる値を偏微分係数として最小自乗法により天頂遅延量を推定する。言い換えれば、このマッピング関数そのものが、GNSS や VLBI のデータ解析での大気推定モデルということになる。

マッピング関数を用いると、ある仰角 θ の全遅延量 ΔL は下記のように簡単に表すことができる。

$$\Delta L = \Delta L_h^z M_h(\theta) + \Delta L_w^z M_w(\theta), \quad (1)$$

ここで、 ΔL_h^z と ΔL_w^z は、それぞれ天頂方向の静水圧遅延量と湿潤遅延量である。これらに乗じられている $M_h(\theta)$ と $M_w(\theta)$ がマッピング関数である。マッピング関数は、第一近似としては $\sin(\theta)$ の逆数を基本形として表現する。さらに、地球の曲率や、大気モデルなども考慮したマッピング関数になると次のような連分数形式で表す (例えば [6], [7])。

$$m(\theta) = \frac{1}{\sin \theta + \frac{a}{\sin \theta (\text{or } \tan \theta) + \frac{b}{\sin \theta + \frac{c}{\sin \theta + \dots}}} \quad (2)$$

ここで、 θ は電波源の真の仰角、 a 、 b 、及び c はそれぞれマッピング関数のパラメータであり、定数、ないしは温度、水蒸気分圧などの関数である。

さて、GNSS 測位解析での鉛直測位誤差軽減や、VLBI のように長時間双方での可視域確保が必要な大陸間観測では、仰角 5 度、ないしは 3 度といった低仰角観測を行う。このような観測を実施する場合、大気下層に偏在する水蒸気の水平変動の影響が特に顕著となる。そこで、大気水平変動をモデル化したマッピング関数（これを“方位依存マッピング関数”、あるいは“異方性マッピング関数”と呼ぶ）が開発され、実用に供されてきた [10] [11]。異方性マッピング関数では、大気構造の水平変動を単純な一次平面の勾配で仮定する。本研究では、この異方性マッピング関数について併せて評価を行った。

2.3 測位誤差シミュレーション

本研究で紹介する測位誤差シミュレーションの模式図を図 2 に示す。なお、ここでは議論を簡単にするために、GPS の PPP 解析を想定しており、衛星側の時刻誤差、及び電離層での遅延誤差は無いものと仮定している。また、同じく簡単のため受信機内部の時刻オフセットも図示していないが、以降の計算ではアプリアリに 100psec のオフセットを KARAT から計算される視線遅延量に一律に加えた。

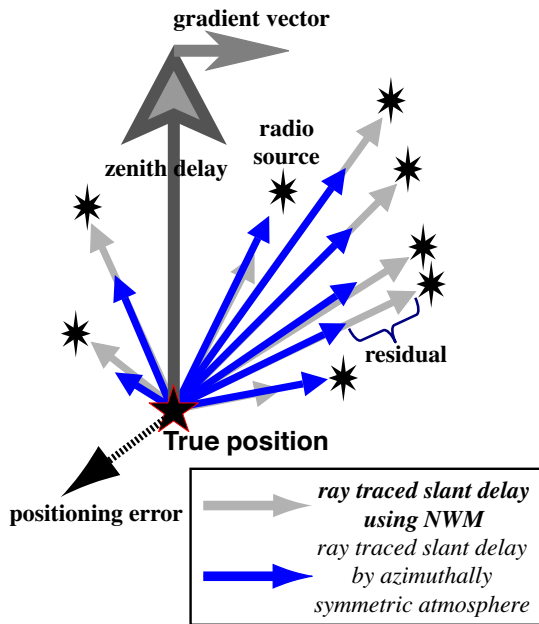


図 2 波線追跡法で計算した視線遅延量に基づく測位誤差シミュレーションの概念図

まず、MANAL データに基づき KARAT により実際の

GPS 衛星配置を元にして視線遅延量を計算した。ここでは、国土地理院の全国 GPS 観測網 (GEONET) の IGS つくば観測点 (TSKB) における、ある日の 3 時間分、約 300 個の GPS 衛星の方位・仰角の組み合わせを計算に用いた。計算した視線遅延量を“真の大気遅延”とみなすと、これには観測点周辺の大気構造が反映する。しかしながら、GNSS や VLBI の解析で大気遅延の推定に用いられるマッピング関数に誤りがあれば、“推定された大気遅延”に誤差が含まれることになる。

ここで、“真の大気遅延”と“推定された大気遅延”との差を観測量として、実際の PPP 解析に即して次のように東西、南北、上下の各成分、天頂遅延量、及び受信機内部の時刻オフセットを推定する観測方程式をたて、最小自乗法により推定した。

一般的な線形化した観測方程式は、

$$Y = AD + e \quad (3)$$

のように表現できる。まず、行列 e は誤差ベクトルであるが、式を簡略化するために KARAT で計算された視線遅延量の誤差が 0、すなわち $e = 0$ と仮定する。また、行列 D は、推定パラメータで構成される行列であり、

$$D \equiv \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \Delta L_Z \\ \Delta \tau \end{bmatrix} \quad (4)$$

と書ける。ここで、 x 、 y 、及び z は測位解の東西、南北、及び上下の各成分を、また、 ΔL_Z は天頂遅延量、 $\Delta \tau$ は受信機内部の時刻オフセットである。また、行列 Y が、各々の衛星の方位 ϕ ・仰角 θ を元に KARAT から計算された視線遅延量であり、エポック 1 番目の衛星から、エポック m 番目の衛星までの値を並べると

$$Y \equiv \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \\ \vdots \\ \Delta L_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

のようになる。行列 A は、各パラメータの偏微分係数で構成される計画行列であり、

$$A = [-\cos \theta \cos \phi, -\cos \theta \sin \phi, -\sin \theta, m(\theta), 1] \quad (6)$$

とおける。よって、行列 D を求めるために、

$$D = (A^T A)^{-1} A^T Y. \quad (7)$$

の計算を行えばよい。ここで A^T は、 A の転置行列である。

図 2 に示す positioning error とは、式 (4) の行列 D の最初の 3 項、 x, y, z で表現されるベクトルであり、これがマッピング関数で除去しきれずに残った大気遅延に起因する測位誤差である。

図 2 では、“推定された大気遅延”として球対称の大気構造を仮定したマッピング関数からの推定値を想定して示した。先に紹介した異方性マッピング関数を解析に用いた場合も同じように測位誤差のシミュレーションが可能である。この場合は、

$$D \equiv \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \Delta L_Z \\ G_{NS} \\ G_{EW} \\ \Delta \tau \end{bmatrix} \quad (8)$$

のように、大気勾配を表現する 2 つのパラメータ G_{EW} 、 G_{NS} を加えて同様に推定することになる。このときの計画行列 A を、MacMillan[1995] による大気勾配モデル [10] で書き下すと、

$$A = [-\cos \theta \cos \phi, -\cos \theta \sin \phi, -\sin \theta, m(\theta), \cos \phi, \sin \phi, 1] \quad (9)$$

となる。本論では、この大気勾配を考慮した場合の計算結果も次項で示す。なお、今回の測位誤差シミュレーションでは、時刻オフセットの推定も併せて試みたが、紙面の都合もあり本論ではその議論は割愛する。

3. 計算結果

測位誤差シミュレーションの例として、まず図 1 に示した大気条件下での内之浦局における計算結果を図 3 に示す。この図に示すのは、球対称大気構造を仮定した Niell による NMF マッピング関数 [6] を天頂遅延量推定に用いた場合に生じ得る測位誤差である。言い換えれば、NMF マッピング関数で除去しきれなかった大気遅延残差によってもたらされた局位置誤差である。図中の内之浦から南南西方向に伸びる矢印が計算された測位誤差の水平成分を示し、真の位置から南南西方向に約 1.1cm ほど大気遅延によって見かけ上ずれてしまうことを意味する。一方、内之浦局の位置に示した円の色で測位誤差の鉛直成分を示すが、この時はほぼ 0mm であった。

さらに、2006 年 7 月の一ヶ月間について、同様の計算を行い、内之浦局における測位誤差のシミュレーション結果を示したのが図 4 である。この月は、全般に西日本では梅雨前線の活発な活動と月後半の集中豪雨の影響が顕著であり、水平成分では絶対値で 20mm、また上下成分では 30mm 近く

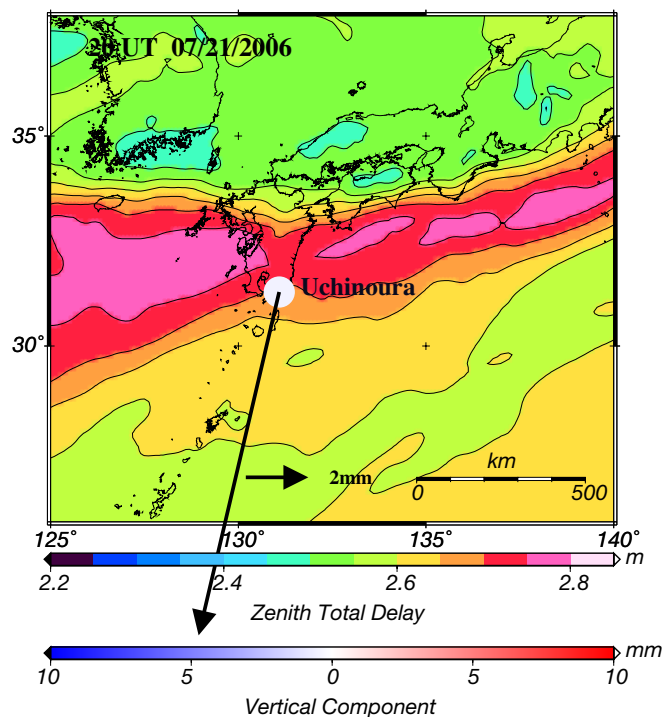


図 3 KARAT を用いて計算した 2006 年 7 月 21 日 20 時 UT における内之浦での推定測位誤差

及びような測位誤差の計算結果が得られている (特に 7/5-7 頃と 7/21-23 頃)。月後半の 7 月 20 日以降では、上下成分と共に、特に南北成分での測位誤差変動が激しくなるが、これは先の図 1 に示される東西に伸びる帯状の水蒸気分布に起因する影響と考えられる。

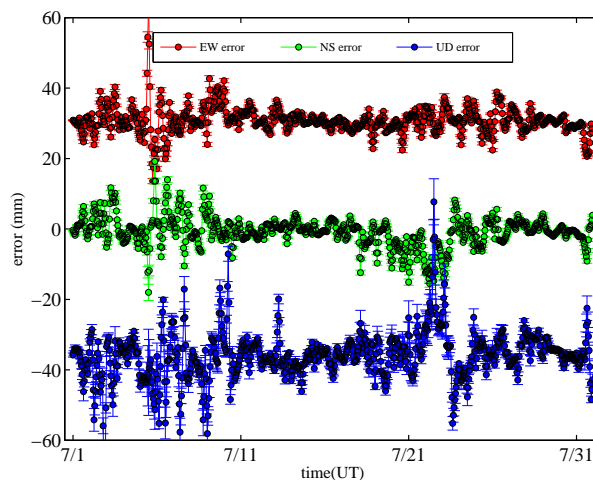


図 4 内之浦におけるシミュレーションで計算された測位誤差の時系列 (上から、東西、南北、上下成分である)。遅延推定で大気構造を球対称とした場合 (大気の水平勾配をモデル化しない)。なお、プロットの判別が容易なように、東西、上下の各成分には、+30mm、および -30mm のオフセットを与えている。

次に、式 (8)、(9) を用い、大気水平勾配も含めて推定した場合に計算される局位置誤差を図 5 に示す。また、この図には併せて天頂遅延量の時系列を下段にプロットした。この図から明らかなように、測位誤差の水平成分 (東西、南北) の時間変動の振幅が顕著に小さくなっている。このことは、水平成分に関しては、先に述べた水蒸気の空間変動による影響を異方性マッピング関数を用いることで効果的に取り除くことに成功したことを意味する。一方で、上下成分については、図 4 で示されるプロットとほぼ同じ変動が示されており、異方性マッピング関数の寄与がほとんどないことを示唆する。

また、上下成分の顕著な変動は図 5 の下段に示した天頂遅延量の変動が同じく顕著な期間とほぼ対応している。式 (7) の計算を行う際に、局位置の上下成分と天頂遅延量とが強くカップリングすることが良く知られている。このことから、これらの期間では天頂遅延量の推定に大幅な誤差が生じ、これが上下成分の大きな測位誤差となったと考えられる。講演では、この点についても定量的な評価について報告する予定である。

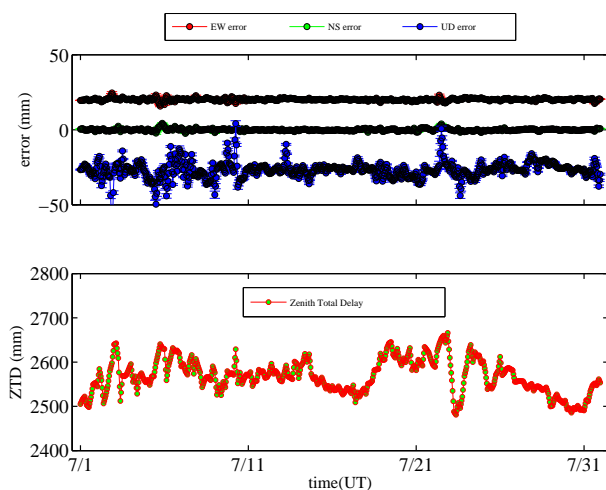


図 5 上段は内之浦におけるシミュレーションで計算された測位誤差の時系列。大気構造の水平勾配を一次平面で近似して遅延推定を行った場合。なお、プロットの判別が容易なように、東西、上下の各成分には、 $+25\text{mm}$ 、および -25mm のオフセットを与えている。下段は、同期間の内之浦における天頂大気遅延の時系列である。

4. ま と め

Hobiger らの手法 [2], [3] により改良、かつ高速化された波線追跡アルゴリズムにより、気象庁メソスケール客観解析データに基づく大気遅延量を計算するツール “KARAT” を用いて、GPS の PPP 解析を想定した測位誤差シミュレーションを行った。2006 年 7 月の一ヶ月間の MANAL データに基づく解析では、例えば内之浦 GPS 観測点において、集中豪雨に伴って生じた東西の帯状の顕著な水蒸気分布によ

って水平、上下共に 20mm を越えるような測位誤差が生じることが示された。この測位誤差の水平成分については、大気水平変動を考慮した異方性マッピング関数によって効果的に除去できることが確認できた。一方で、上下成分については、マッピング関数の違いによる振る舞いに違いはなかった。解析期間中の天頂遅延量変動と、測位誤差の上下成分の変動との間には強い相関が見られ、従来から知られる天頂遅延量の推定誤差と上下成分との強いカップリングが、このシミュレーションからも示唆される。本講演では、複数の地域、またより長期にわたっての測位誤差の評価結果についても報告する。

参 考 文 献

- [1] 市川隆一、関戸衛、小山泰弘、数値天気予報データを用いた大気伝搬遅延量推定ツールの開発、第 50 回宇宙科学技術連合講演会講演論文集 1D15、2006。
- [2] Hobiger T., Ichikawa R., Koyama Y., Kondo T., KASHIMA RAY-Tracing Service (KARATS) - Fast ray-tracing through numerical weather models for real-time positioning applications in East Asia, 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, April 12-13, 2007, Vienna, Austria.
- [3] Hobiger T., Ichikawa R., Koyama Y., and Kondo T., Fast ray-tracing algorithms for real-time positioning applications using numerical weather models, *Earth and Planetary Science letters*, in preparation, 2007.
- [4] Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97, 15787-15801, 1992.
- [5] Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 20, 1593-1607, 1985.
- [6] Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 101, 3227-3246, 1996
- [7] Niell, A. E., A. J. Coster, F. S. Solheim, V. B. Mendes, P. C. Toor, R. B. Langley, and C. A. Upham, Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radionsonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 830-850, 2001.
- [8] Boehm, J. and H. Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.
- [9] Boehm, J., B. Werl and H. Schuh, 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, 2006.
- [10] MacMillan, D.S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1041-1044, 1995.
- [11] Chen, G. and T. A. Herring, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102, 20489-20502, 1997.