

2013 複数 GNSS 対応高精度軌道時刻推定ツール MADOCA の開発

○高須知二, 安田明生 (東京海洋大), 小暮聡, 中村信一, 三吉基之, 河手香織 (JAXA),
平原康孝, 澤村寿一 (NEC)

Development of Multi-GNSS Precise Orbit and Clock Determination Tool MADOCA
Tomoji Takasu, Akio Yasuda (Tokyo University of Marine Science and Technology),
Satoshi Kogure, Shin'ichi Nakamura, Motoyuki Miyoshi, Kaori Kawate (JAXA),
Yasutaka Hirahara, Toshikazu Sawamura (NEC)

Key Words: QZSS, LEX, Multi-GNSS, PPP, Orbit and Clock Determination

Abstract

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is planning to conduct precise point positioning (PPP) experiment by using the LEX (L-band experiment) signal channel of QZSS (quasi-zenith satellite system). The target accuracy of the PPP is under 10 cm RMS. The area of the service is all over the Asia and Oceanian region including the Pacific Ocean side where users can receive broadcasting signals by the QZSS satellites. The expected GNSS for the augmentation are GPS, GLONASS, QZSS and Galileo. PPP can provide precise positioning service to many users in the broad regions without dependency of ground stations. A lot of applications like precise farming, Tsunami detection, crustal deformation monitoring and GNSS meteorology are much expected by such the PPP technique. To generate the augmentation information for the PPP service, precise orbit and clock determination of GNSS satellites is necessarily required as well as the ground GNSS reference station network. For these purposes, JAXA decided to newly develop a precise orbit and clock determination software for multiple constellation GNSS from scratch in addition to extending the multi-GNSS monitoring network (MGM-net). We call the software "MADOCA" (multi-GNSS demonstration tool for orbit and clock analysis). In this paper, we provide the introduction of MADOCA including models and algorithms, technical features, implementation aspects, accuracy evaluation and the future plan.

1. 目的および背景

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は準天頂衛星 (QZSS) の LEX (L バンド実験) 信号チャンネルを使った測位補強情報による、単独搬送波位相測位 (PPP: precise point positioning) ¹⁾ 実験の計画を進めている。この PPP 測位補強の目標精度は 10 cm RMS 以下であり、サービスエリアは QZSS の放送信号が受信できる太平洋上を含んだアジア・オセアニア地域全域である。測位補強対象の衛星系は GPS、GLONASS、QZSS および Galileo である。

PPP は地上の基準点に依存せずに広範囲のユーザに高精度測位サービスを提供することが可能なため、精密農業、津波ブイ、地殻変動監視、GNSS 気象学等をはじめとする多数の理学・工学応用が期待されている。PPP 用の測位補強情報の生成には広域の地上基準局の観測データを使った高精度な衛星軌道・

時刻決定が必須である。本プロジェクトでは、そのために複数 GNSS に対応したリアルタイム GNSS 基準局網 (MGM-net) を整備すると共に、高精度軌道・時刻推定用ソフトウェアを新規に開発するものとした。ここで開発したソフトウェアを MADOCA (multi-GNSS advanced demonstration tool for orbit and clock analysis) と呼んでいる。

MADOCA の開発は二段階で実施され、平成 23 年度には GPS、GLONASS および QZSS 用オフライン解析機能の実装と評価、平成 24 年度にはリアルタイム解析機能の実装およびオフライン解析機能の Galileo 対応拡張が行われた。MGM-net、MADOCA および QZSS LEX 信号を使用した PPP 実験自体は平成 25 年度から実施される。

本稿では MADOCA の技術概要を紹介すると共に、現時点での性能評価結果、今後の拡張計画について述べる。

2. 構成および機能

MADOCA の構成を図 1 に示す。図中上側がリアルタイム解析機能、下側がオフライン解析機能とそれ以外を表し、以下のコンポーネントから構成される。

- (1) MGRTE: リアルタイム解析コア。拡張カルマンフィルタ (EKF) により軌道時刻推定を行う。
- (2) MGEST: オフライン解析コア。最小二乗法によるバッチ処理により軌道時刻推定を行う。
- (3) データ I/F: リアルタイムデータサーバ (RDS)、オフラインダウンローダ (OFFDL)、LEX メッセージ生成 (LMG) から構成される。
- (4) 評価・解析: 軌道時刻推定結果の精度評価を行う。プロダクトのグラフプロットを生成する。
- (5) 共通 API: 共通関数をライブラリとして提供する。座標変換、各種モデル、数値積分、最小二乗法、EKF 等。IERS Conventions 2010²⁾ 等の外部ライブラリを含む。

MADOCA のプログラムは、外部ライブラリを除いて、本プロジェクト用にスクラッチから新規開発した。主要な記述言語は ANSI C (C89) であり、一部の機能は Python で書かれている。基本的な実行環境は Linux、開発環境は GCC および GFORTRAN である。ソースプログラムは可能な限り環境依存部分を排除して可搬性を確保すると共に、各種モデルはモジュール化・ライブラリ化して容易に交換・拡張可能としている。外部ライブラリとしては RTKLIB v. 2.4.2³⁾、IAU SOFA⁴⁾、IERS Conventions 2010 サブルーチン、LAPACK/BLAS⁵⁾ を利用する。プログラムの総ライン数は約 5 万行であり、提供する豊富な機能に比較

して、非常にコンパクトな構成となっている。

MADOCA は多数のリアルタイム・オフライン用の標準 GNSS データ形式をサポートする。MADOCA で使用する入出力データ形式一覧を表 1 に示す。推定されたリアルタイム軌道時刻は最終的に LEX メッセージ形式に変換され QZSS マスタコントロール実験局 (MCS) に送られ、QZSS の LEX 信号チャンネルを介して PPP 実験ユーザに放送される。LEX メッセージ形式に含まれる軌道時刻メッセージは一部を除いて RTCM 3⁶⁾ SSR (state space representation) 規格に準拠している。

Table 1 Supported Formats by MADOCA

Data	I/O	Format
Observation/ Navigation Data	I	RINEX 2.11, 2.12, 3.00, 3.01
	I	RTCM 3.2 (Legacy, MSM)
	I	BINEX, Javad GREIS
Satellite Orbit	I/O	NGS SP3c
	O	RTCM 3.2 (SSR), CSV text
Satellite Clock	I/O	NGS SP3c, RINEX Clock
	O	RTCM 3.2 (SSR), CSV text
Receiver Clock	O	RINEX Clock, CSV text
Troposphere	I/O	SINEX Troposphere 0.01
	O	CSV text
Ionosphere	I	IONEX 1.0
Station Position	I/O	SINEX 2.02, CSV text
Antenna PCV	I	ANTEX 1.4
P1-C1/P2-C2 DCB	I	CODE DCB
Ocean Tide Loading	I	BLQ
VMF1	I	VMF1 grid
EOP	I	IERS Bulletin A, B
	I/O	IGS ERP v.2

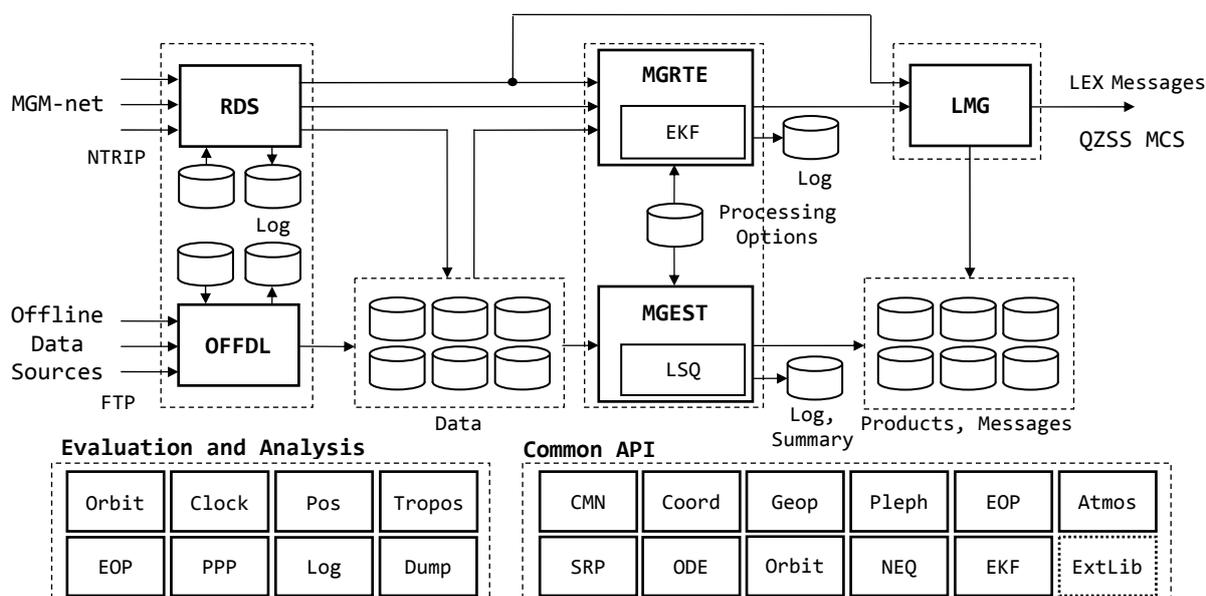


Figure 1 MADOCA Functional Block Diagram

3. モデルおよびアルゴリズム

高精度化をはかるため、軌道時刻推定に使用する各種モデルは、IERS Conventions 2010 や電離層二次項等、可能な限り最新のモデルを取りこんだ。MADOCA でサポートされるモデルを表 2 に示す。

MADOCA におけるパラメータ推定手法としては、オフライン解析では逐次重み付き最小二乗法 (LSQ)、リアルタイム解析では拡張カルマンフィルタ (EKF) が使用される。複数 GNSS 衛星の軌道時刻推定における推定パラメータ数は最大で数 10 万以上に達するため、計算時間および所要メモリ容量削減のために、計算アルゴリズムの最適化を行った。

オフライン解析の処理フローを図 2 に示す。最小二乗法の正規方程式 (NEQ) はコレスキー分解により解かれるが、所要メモリ容量を削減するため、エポック毎に時計推定値をいったんスクラッチファイルに出力し、他パラメータ推定値を求めた後、再度読み込んで更新する。

Table 2 Supported Models by MADOCA

Model	Description
System	GPS, GLONASS, QZSS and Galileo
Observables	ZD ionosphere-free carrier-phase and pseudorange (L1/L2 or L1/L5)
Antenna PCV	IGS08.ATX or IGS05.ATX
Attitude Model	GPS IIA, IIR, IIR-M: Kouba (2009) GPS IIF, GLONASS: Dilssner (2010) QZSS: YS and EC other: Nominal Yaw
Phase wind-up	Wu et al., (1993)
Troposphere	ZHD: Saastamoinen and GPT mapping func.: NMF, GMF or VMF1 ZTD and gradient as piece-wise linear
Ionosphere	1st-order: ionosphere-free LC 2nd-order: Kedar et al. (2003)
Site Displacement	solid earth tide: IERS 2010 ocean tide loading: FES2004 pole/ocean pole tide: IERS 2010
ECI-ECEF Transformation	IAU 1976/1980, IAU 2000A or IAU2000A/2006 (IAU SOFA)
EOP	IERS Bulletin A, B or IGS ERP, EOP variation by IERS 2010
Geopotential	EGM96 or EGM2008
Earth Tides	IERS 2010 and FES2004
Third Body	Moon, Sun, Jupiter and Venus
Planet Ephem.	JPL DE405 or DE421
SRP Model	cannon Ball, CODE RPR, GSPM04.b, DBY or MDBY
Empirical Acceleration.	RAC constant and cyclic terms as piece-wise constant
Relativity	IERS 2010
ODE Solver	RK4, RKF4(5) or Gragg extrapolation
Adjustment	weighted least square estimation (offline) or dual-cycle EKF (real-time)
Ambiguity Resolution	network mode ambiguity resolution (Ge, 2005) satellite position/velocity, SRP ,
Estimated Parameters	empirical-acceleration, satellite/receiver clock, station position, ambiguity, EOP, geocenter offset and receiver bias

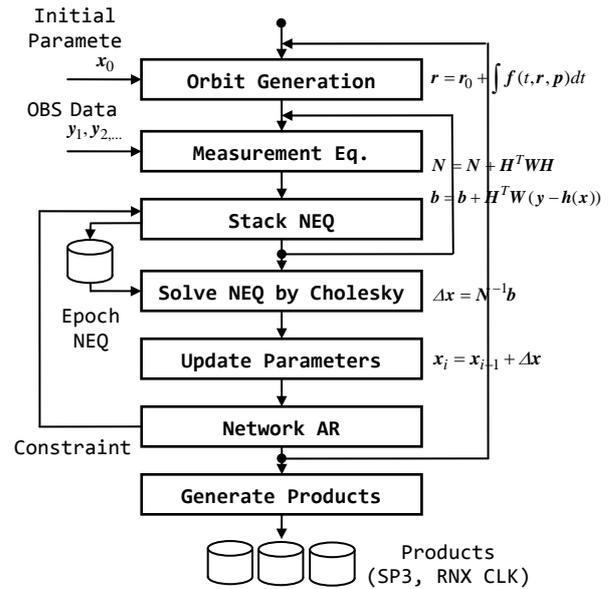


Figure 2 Iterated Weighted LSQ Flow

最小二乗法によるパラメータ推定値が得られた後、高精度化のため、6000 km 以下の全基線についてネットワークアンビギュイティ決定 (Ge, 2005)⁷⁾ を行う。ここで整数化されたアンビギュイティは次ループの最小二乗法において、拘束条件として導入される。これらのループは解が収束するまで繰り返され、収束後に解析結果が出力される。

さらに計算時間を短縮するため、OpenMP によるコードのマルチスレッド実行と最適化線形代数ライブラリを導入した。これら的高速化の結果、オフライン解析において 69 基準局 24H 分の観測データから、約 5 分間で全 56 衛星の軌道時刻推定が可能となっている。(CPU: Core i7 2600K, 4 コア)

リアルタイム解析においてパラメータ推定値はエポック毎に EKF により更新される。EKF により長期間、多数のフィルタ更新を行った場合、しばしば数値演算誤差累積に起因する数値不安定問題が発生する。この問題を回避するため、一般に UD 分解フィルタや SRIF (square root information filter) 等の改良型フィルタを適用することが多いが、これらの計算コストは大きく計算速度の点で不利である。

MADOCA では数値安定性と計算速度を両立させるため、EKF 用に新しいフィルタを開発した。開発した EKF 更新則を図 3 に示す。最終段の共分散行列更新 (8) において行列の対称性を確保することにより数値演算誤差の影響が出にくい形式になっている。さらに、スパース行列と最適化線形代数ライブラリを使用して高速な行列計算を実現している。

Operation	LAPACK/BLAS
(1) $\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{H}, \mathbf{R}$	
(2) $\mathbf{D} = \mathbf{P} \mathbf{H}^T$ (sparse matrix operation)	
(3) $\mathbf{S} = \mathbf{H} \mathbf{D} + \mathbf{R}$ (sparse matrix operation)	
(4) $\mathbf{U} = \text{chol}(\mathbf{S})$ DPOTRF	
(5) $\mathbf{E} = \mathbf{D} \mathbf{U}^{-1}$ DTRSM	
(6) $\mathbf{K} = \mathbf{E} \mathbf{U}^{-T}$ DTRSM	
(7) $\mathbf{x} = \mathbf{x} + \mathbf{K} \mathbf{v}$ DGEMV	
(8) $\mathbf{P} = \mathbf{P} - \mathbf{E} \mathbf{E}^T$ DYRK	
chol(): Cholesky decomposition, $\mathbf{S} = \mathbf{U}^T \mathbf{U}$	

Figure 3 Numerically Stable Measurement Update

以上に加えて、時定数の長いパラメータのEKF更新周期を他のパラメータより長くした二重サイクルフィルタを採用することにより、さらに計算を効率化する工夫をはかっている。以上の実装により、リアルタイム解析では基準局60局の1 Hzリアルタイム観測データを入力して衛星時計推定値を1 Hzで更新することが可能となっている。(CPU: 前述)

リアルタイム解析コア(MGRTE)の機能ブロック図を図4に示す。図中、EKF推定は以上に述べたアルゴリズムによりパラメータ推定値を求める中心機能である。リアルタイム解析コアは、EKF推定に加えて、観測データと航法データを外部から入力し、品質管理・前処理を行ったうえでEKF推定に入力するためのデータフィード機能、EKF推定によるパラメータ推定値から、指定された種別・周期の補強メ

ッセージを生成するメッセージ生成機能、外部コンソールからのログインにより、リアルタイム解析の監視制御を可能にする監視制御機能から構成される。リアルタイム解析コアに入力された観測データは指定時間ウィンドウだけバッファリングされてから、EKF推定によるパラメータ推定に使用される。ここで指定時間以上遅れて到着したレイテンシの大きな観測データは破棄される。EKF推定はCPU時刻に基づいて指定された間隔で周期実行される。通常、CPU時刻はNTPにより数10ミリ秒以内でUTCに同期されるが、UTCのうるう秒挿入時にCPU時刻飛びが発生する。リアルタイム解析コアにはこのCPU時刻飛び対策の機能も含まれている。

4. 精度評価

4.1. オフライン軌道・時刻

オフライン解析機能により推定した、軌道時刻について、GPSおよびGLONASSに関してはIGS最終暦との比較、QZSSおよびGalileoに関してはオーバーラップ法により精度を評価した。表3に評価結果を示す。GPS軌道誤差の例を図3に示す。GPSおよびGLONASS軌道の精度は各々2 cmおよび5 cm以下(3D-RMS)、QZSSおよびGalileo軌道の精度は各々6 cmおよび10 cm以下(3D-RMS)となっている。GPSとGLONASSのオフライン軌道時刻品質としてはIGS解析センター解と同程度の精度を達成していると言える。

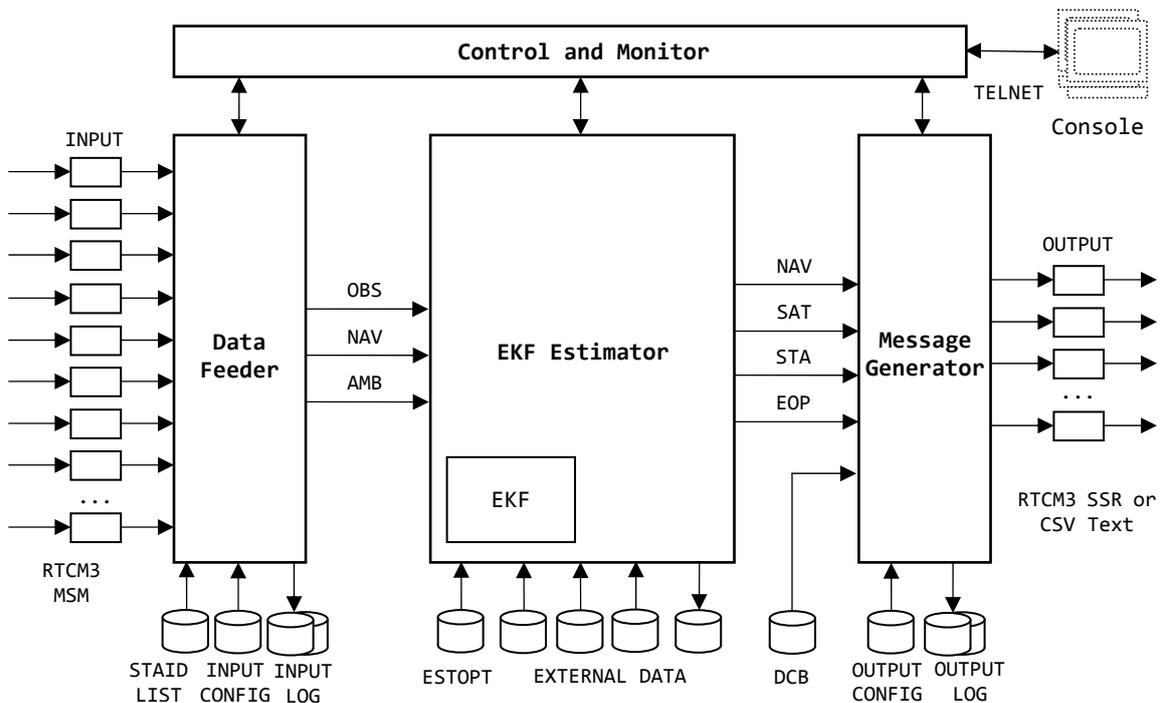


Figure 4 MADOCA Real-Time Estimator (MGRTE) Block Diagram

Table 3 Offline MADOCA Orbit/Clock Accuracy

System	RMS Error		Notes
GPS	Radial	0.89 cm	2011/1/1 - 12/31 (365 days) wrt IGS Final
	Along-track	1.10 cm	
	Cross-track	1.12 cm	
	3D	1.81 cm	
	Clock	0.131 ns	
GLONASS	Radial	1.37 cm	2011/1/1 - 12/31 (365 days) wrt IGS Final
	Along-track	3.70 cm	
	Cross-track	2.94 cm	
	3D	4.92 cm	
	Clock	0.131 ns	
QZSS	Radial	2.37 cm	2011/6/4 - 11/3 (153 days) 24H overlap
	Along-track	4.47 cm	
	Cross-track	3.21 cm	
	3D	5.99 cm	
Galileo	Radial	2.22 cm	2012/11/2 - 2013/2/27 (117 days) 24H overlap
	Along-track	8.47 cm	
	Cross-track	2.92 cm	
	3D	9.23 cm	

4.2. リアルタイム軌道・時刻

リアルタイム解析機能により推定された軌道時刻の精度については、シミュレーションにより評価した。評価方法としては、IGS 60 局の RINEX データから、模擬的にリアルタイム観測データ、航法データを生成し、リアルタイム解析機能に入力した。リアルタイム解析機能の出力をいったん保存し、IGS 最終暦と比較することにより、GPS 軌道時刻の精度を算出した。リアルタイム軌道誤差を図 4 に示す。時計を含めた精度を表 4 に示す。図 4 に示すように推定開始からパラメータの収束に 24H 程度の時間がかかっているため、表 4 の集計には起動直後 24H 分の推定値は除外し統計を取っている。

GLONASS に関してはリアルタイム推定を続けると軌道推定結果が不安定になる現象が見られたため、まだ未評価である。今後、GLONASS についてこれら原因を調査・特定した後、リアルタイム軌道精度の評価を行う予定である。

Table 4 Real-Time MADOCA Orbit/Clock Accuracy

System	RMS Error		Notes
GPS	Radial	1.52 cm	2012/2/1 - 2/14 (14 days) wrt IGS Final by Simulation
	Along-track	2.49 cm	
	Cross-track	1.81 cm	
	3D	3.44 cm	
	Clock	0.184 ns	

4.3. リアルタイム PPP 測位精度

リアルタイム解析機能により推定された軌道時刻の品質を評価するために、推定軌道時刻を基に生成された補強情報を使ってキネマティック PPP 測位を行い、その測位精度を評価した。ここで、リアルタイム軌道時刻推定に使用した基準局は、QZSS 監視局

8 局、MGM-net 17 局、IGS 局 21 局、計 46 局、使用した衛星は GPS のみである。なお、この実験では QZSS LEX 信号による放送は使用せず、MGRTE から出力された RTCM 3 SSR メッセージを、直接 RTKNAVI 2.4.2 (RTKLIB のリアルタイム測位 AP) に入力した。測位精度評価の比較のため、リアルタイム IGS 暦 (<http://product.igs-ip.net:2101/IGS01>) による PPP 測位も並行して実行している。PPP 測位解の精度を図 5 に示す。本実験で得られた PPP 測位解の精度は、概ね目標値の 10 cm RMS を満足している。ただし、リアルタイム解析機能を長期で運用すると PPP 測位解が不安定になる事象が見られる場合があり、今後より長期の安定性評価を行うと同時に、不安定原因の調査と対策が必要である。

5. おわりに

以上 QZSS LEX 信号チャンネルを使った PPP 実験のために開発した複数 GNSS 対応高精度軌道時刻推定ツール MADOCA の技術概要と特長について説明した。平成 25 年 8 月現在 QZSS 初号機「みちびき」の LEX 信号を使った PPP 実験 (MADOCA-LEX) が既に開始されている。今後、これらの実験結果を基に改良を進めていく必要がある。また現版からの機能拡張として PPP-AR 用 FCB (fractional cycle bias) 推定や BeiDou 衛星への対応を進めていく予定である。

参考文献

- 1) J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, Vol.102, No.B3, 5005-5017, 1997
- 2) G. Petit and B. Luzum (eds.), IERS Technical Note No.36, IERS Conventions (2010), 2010.
- 3) T. Takasu, RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, April 29, 2013
- 4) IAU Standards of Fundamental Astronomy SOFA, <http://www.iausofa.org>
- 5) The Netlib: LAPACK - Linear Algebra PACKage, <http://www.netlib.org/lapack>
- 6) RTCM Standard 10403.2, Differential GNSS (global navigation satellite systems) services - version 3, February 1, 2013
- 7) M. Ge, G. Gendt, G. Dick and F. P. Zhang, Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions, *Journal of Geodesy*, 79:103-110, 2005

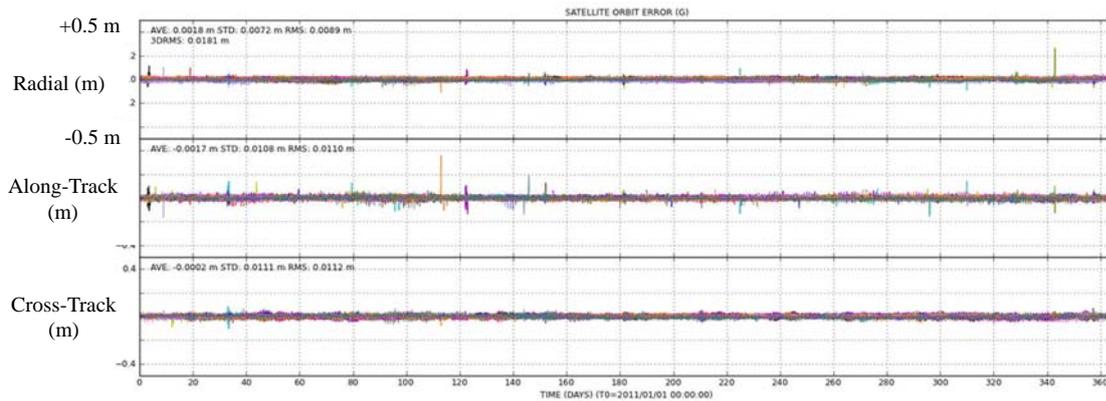


Figure 3 Offline MADOCA GPS Orbit Error (2011/1/1 - 12/31, 365days) wrt IGS Final

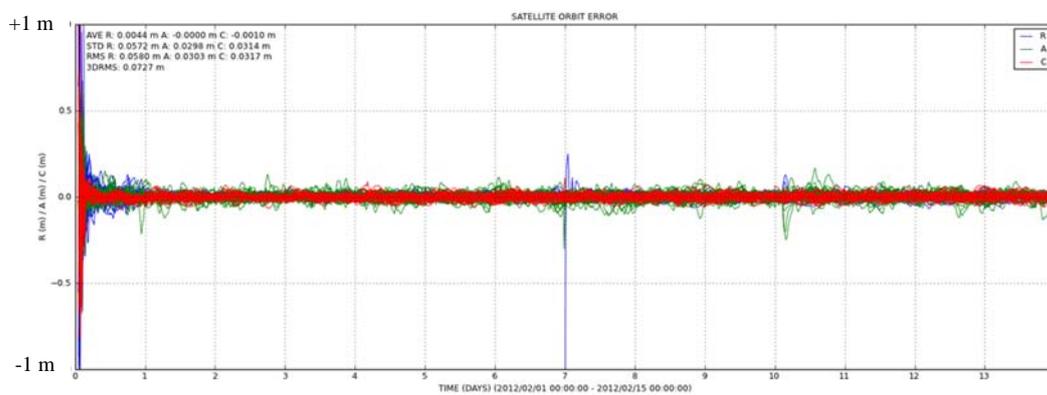


Figure 4 Real-Time MADOCA GPS Orbit Error (2012/2/1 - 2/14, 14 days) wrt IGS Final
(Radial, Along-Track, Cross-Track)

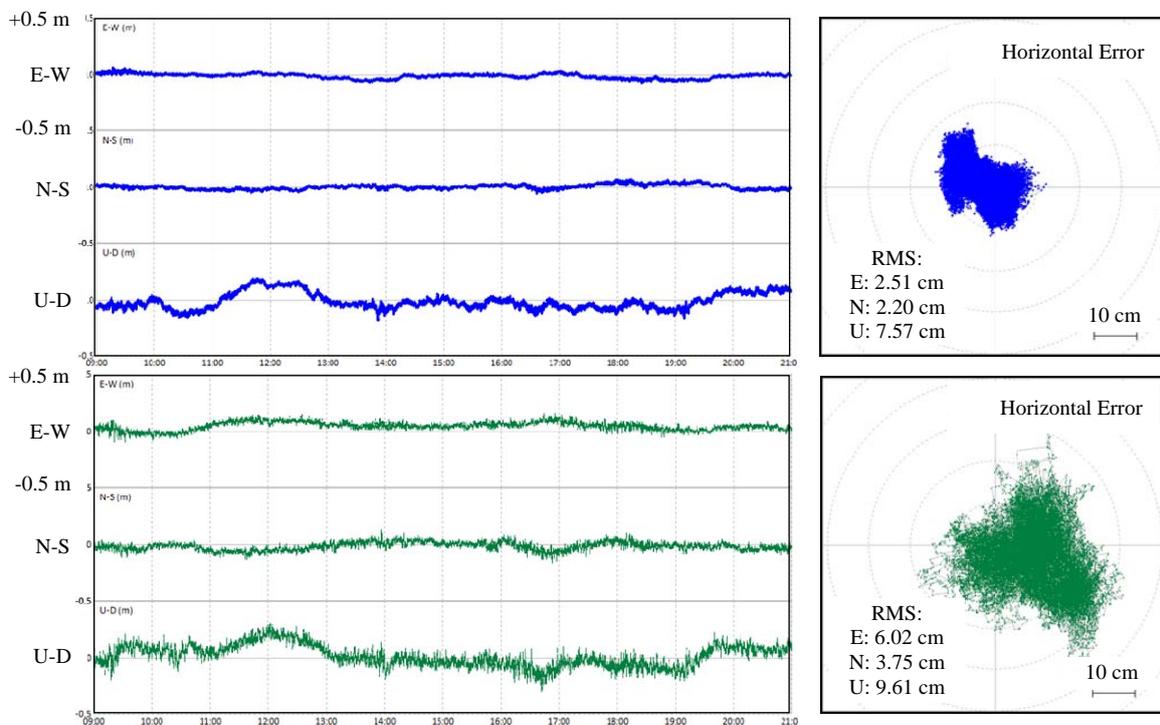


Figure 5 Kinematic PPP Solution Error (2013/5/20 9:00-21:00, 12H)
with Real-Time MADOCA GPS Orbit/Clock (upper) and RT-IGS GPS Orbit/Clock (lower)
(Reference position is based on 24H static PPP solution)