

小口径電波干渉計による低高度地球周回衛星の軌道決定

坂本 祐二*¹, 西尾 正則*², 高野 忠*³

Orbit Determination Method Using Radio Interferometry of Small-Diameter Antennas for LEO Satellites

By

Yuji SAKAMOTO*¹, Masanori NISHIO*² and Tadashi TAKANO*³

Abstract: In this paper, using the radio interferometry of two small-dish antennas, the phase difference of arrival radio caused by the arrival time delay was observed. The algorithm of orbit determination and the required facilities are considered and the performance of method was verified.

There is the 76-m baseline radio interferometry of two 1.4-m parabola antennas in the Faculty of Science, Kagoshima University. In the case study, using this facility, the one of Globalstar satellites, which is LEO clustered satellite system, was observed.

Keywords: orbit determination, radio interferometry, VLBI

概 要

本研究では、2台のアンテナで構成する小口径電波干渉計を用いて、到達時刻差に起因する到来電波の「位相差」を観測し、軌道決定のアルゴリズム、及び必要な機器構成を検討すると共に、その軌道決定能力を評価した。

事例研究として、鹿児島大学理学部が所有する1.4 m口径のパラボラアンテナ2台で構成する電波干渉計（基線長76 m）を用いて、低高度地球周回群衛星であるGlobalstarの一部の衛星を対象として実観測を実施した。

1. 背景 と 目的

1.1 研究背景

地上から1～2 kmの高度の水蒸気は、積乱雲などの激しい上昇運動や降雨を伴う雲の発達に密接に関連している。その量と空間分布、時間発展を高感度かつ連続して観測し、雲に発達する前にいち早く検出できれば、集中豪雨や落雷の災害を防ぐといった防災面からも有用と考えられる。

人工衛星から放射された電波が地球大気中を通過するとき、その中に含まれる水蒸気量によって伝播速度が変化する。この現象を利用し、状態量推定フィルタを用いて衛星軌道を決定し、軌道運動に起因する伝播速度変化分を取り除くことで、大気中の水蒸気分布を検出することを計画している。また本解析手法は、単に水蒸気分布を同定する目的だけでなく、人工衛星の高精度軌道決定手法としても期待できる。

* 1 Tohoku University

* 2 Kagoshima University

* 3 Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)/JAXA

1.2 研究目的

本研究では、2台のアンテナで構成する小口径電波干渉計を用いて、到達時刻差に起因する到来電波の「位相差」を観測し、軌道決定のアルゴリズムおよび必要な機器構成を検討すると共に、その軌道決定能力を評価する。将来、低高度地球周回衛星の新しい軌道決定システムとしての実用化をめざす。

本論文で紹介する事例では、鹿児島大学理学部が所有する1.4 m口径のパラボラアンテナ2台で構成する電波干渉計を用いて、低高度地球周回群衛星であるGLOBALSTARの一部の衛星を対象として実観測を実施する。アンテナ間距離は76 mである。

本研究の軌道決定手法の利点は、従来のRARR法による軌道決定と同程度の精度を維持したまま、地上局・人工衛星の双方において簡素な機器構成を実現できる可能性がある点である。また、現在の実観測環境ではアンテナ間距離が100 m未満であるが、将来的にはより長い基線での構成、すなわちVLBI軌道決定を構想している。これは相対VLBI手法と異なり準星の観測を必要としない。

2. 理 論

2.1 軌道決定手法の特徴

従来のRARR法と、本研究で取り扱うVLBI観測系による新手法の特徴を比較する。

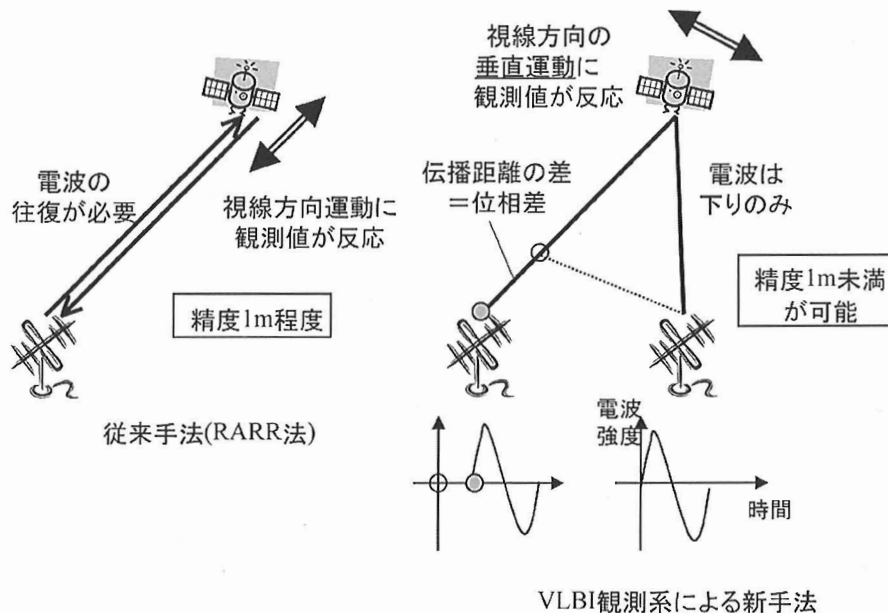


図1 従来手法 (RARR法) との比較

RARR法では、地上局から人工衛星までの電波の往復時間測定から、地上局－衛星間の視線距離 (range) 及び変化率 (range rate) を観測する。位置決定精度は地上局ごとに大小あるが、大まかに1 m程度であり、視線方向の軌道運動に観測値が感度を持つ。

一方、VLBI観測系による新手法では、2台以上の地上局を必要とする。電波は下りのみを受信し、各アンテナの受信電波を相関処理することで、「位相差」を観測する。位相差は 2π の範囲でしか観測できないため、 $2\pi N$ (N は任意の整数) の不確定性が存在する。さらに機器構成の簡素化に伴い、単に N を同定しても真の値にならず、不確定のオフセットが存在する。

下り電波のみを観測する場合、搬送周波数の誤差が懸念されるが、単に1局で受信する場合と比較すると2局で同時受信する場合は、位相差への影響はかなり小さくなる長所がある。またRARR法と異なり、視線方向に垂直な軌道運動に対して観測値が感度を持つ。2局間の距離を長くすることで高精度化が容易であり、精度1 m未満が期待できる。

2.2 軌道決定アルゴリズム

観測値推定モデルの概要を次図に示す。各アンテナにおけるレンジ観測値を ρ_e, ρ_w 、搬送周波数を f_0 、受信周波数 (ドッ

ブラシフト含む) を, f_e, f_w , 各アンテナにおける位相を ϕ_e, ϕ_w を定義し, 両アンテナの位相差 ϕ および位相差変化率 $\dot{\phi}$ を次式で導出する.

$$f_i = \left(1 - \frac{\dot{\rho}_i}{c}\right) f_0, \phi_i = \frac{2\pi}{c} f_i \rho_i \quad \therefore \phi = \frac{2\pi}{c} (f_e \rho_e - f_w \rho_w), \dot{\phi} = \frac{2\pi}{c} (f_e \dot{\rho}_e - f_w \dot{\rho}_w)$$

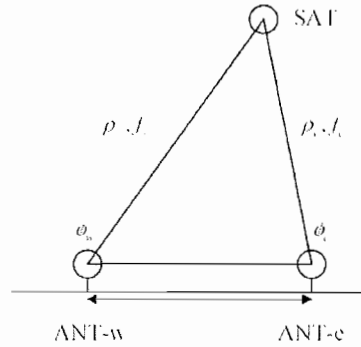


図2 観測値推定モデル

位相差観測値, 軌道モデル, 観測値推定モデル, 初期軌道を「状態量推定フィルタ」に入力することで, 最適軌道を出力することが出来る. ここで, 状態量推定フィルタには本論文著者が自作したプログラム「ODEF」を使用する.

観測値は 2π の範囲であり, 不確定なオフセットを含んでいる環境であるため, そのまま状態量推定フィルタに入力しても解は得られない. まず, 位相差 (以後, PD と表記する) の「変化率」を観測値としてフィルタ処理するアルゴリズム①を図3左に示す. 実測環境では, 位相差 PD の全観測値が連続しているとは限らず, 不連続区間が生じる. そのたびにオフセットに含まれる不確定性が変化するため, 推定観測値との直接比較が難しくなる. このアルゴリズムでは, 実測した位相差 PD を数値微分して位相差変化率 (以後, PDR と表記する) を算出する. 位相差変化率 PDR は, 推定観測値との直接比較が可能であり, 従来の状態量推定フィルタで処理可能である.

まず, 実測値 PD_a を数値微分 (ND) して PDR_b を算出した後, 初期軌道 X_c を入力し, 状態量推定フィルタ (ODEF) で最適軌道 X_d を計算する. この最適軌道 X_d から計算 (OOBS) できる推定値 PD_e と実測値 PD_a の残差を DPD_e とする. 理想的には残差は常にゼロになるが, 実際にはモデル誤差やランダム誤差の影響が残る. ここで ND, ODEF, OOBS は独自開発ソフトの名称である.

このアルゴリズム①では, 数値微分時に生じる誤差が軌道決定に大きな影響を及ぼす. そこで, 数値微分誤差を軽減するアルゴリズム②を提案する (図3右). まずアルゴリズム①と同様に最適軌道 X_d を計算する. この X_d から推定値 PD_e を計算し, 数値微分した PDR_f と, 直接推定した PDR_g を比較することで, 数値微分で生じる誤差 DPDR_h を算出し, これを PDR_b から取り除くことで, 数値微分誤差を含まない PDR_i を取得する. この PDR_i を用いて再び状態量推定フィルタで処理することで, より真の値に近い最適軌道 X_j を決定することが出来る. 最適軌道 X_j から計算できる推定値 PD_k と実測値 PD_a の残差 DPD_k を検証することで, 軌道決定アルゴリズムの妥当性を評価する.

状態量推定フィルタ (ODEF) のアルゴリズムは, 汎用的なバッチフィルタを採用する. 状態量ベクトル X は, エポック時刻 (任意に選択できる) の慣性座標系位置, x, y, z および速度 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ で定義する. 実測観測値ベクトルを Z, 推定観測値ベクトルを \bar{Z} , 観測誤差共分散行列を R, 感度行列を H, 状態量誤差共分散行列を P, 状態量修正量を ΔX と定義し, 次式を採用する.

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T, \mathbf{Z} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T \quad (n \text{ は総データ数}) \\ H &= \partial \bar{\mathbf{Z}} / \partial \mathbf{X}, P = (H^T R^{-1} H)^{-1}, \Delta \mathbf{X} = P H^T R^{-1} (\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}}) \end{aligned}$$

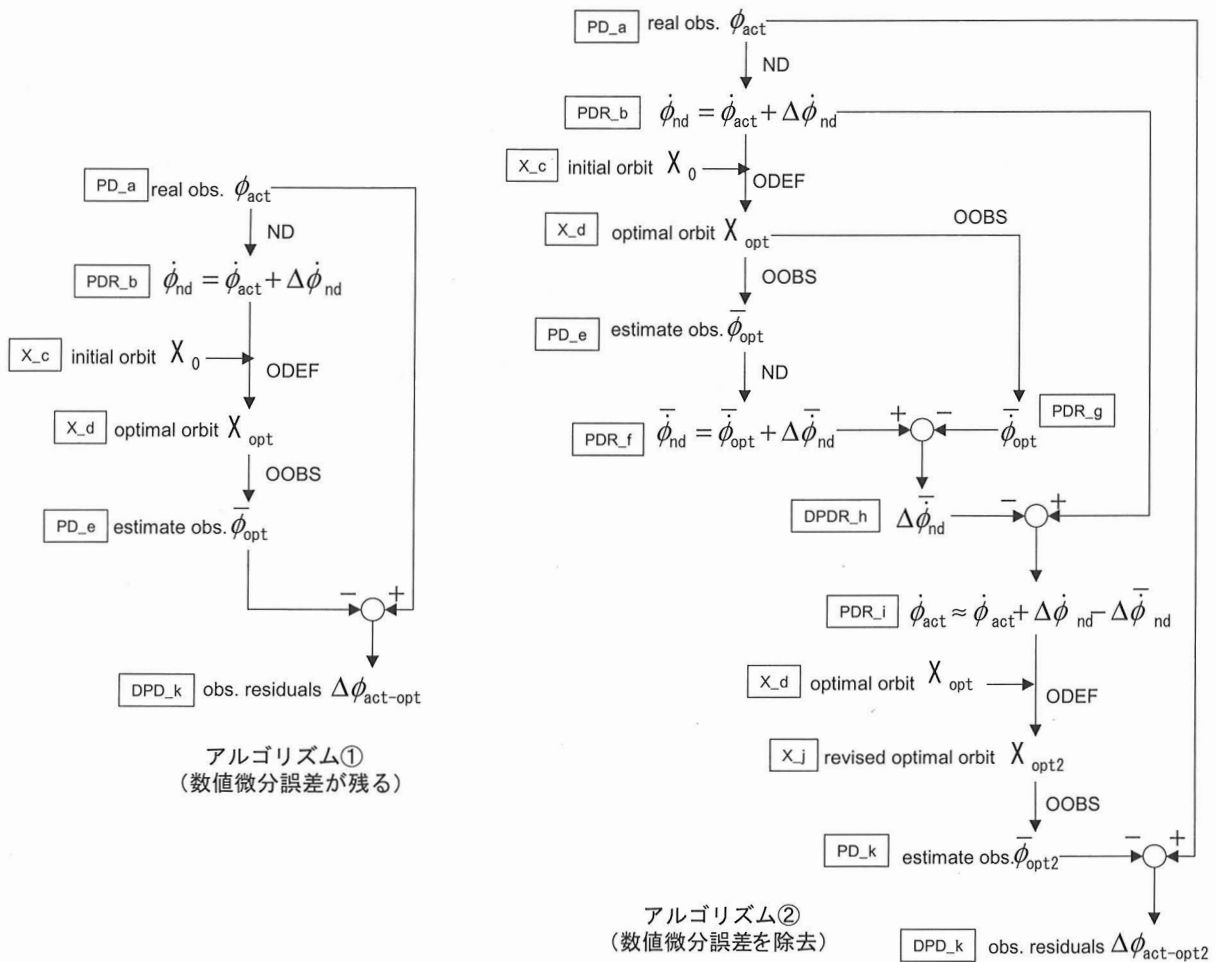


図3 軌道決定アルゴリズム

3. 事例研究

3.1 観測条件

本研究で提案する軌道決定手法の有効性を検証するための環境として、鹿児島大学理学部が所有する小口径電波干渉計を利用する。この電波干渉計は直径1.4 mのパラボラアンテナ2台で構成し、基線長は76 mである。LEO衛星を観測対象とし、各アンテナで同時刻に受信する電波の位相差 (2π の範囲) を最小40 msの間隔で出力するシステムである。位相差の変化率は直接観測できない。

観測条件は下記のとおりである。

- ・ 観測対象：GLOBALSTAR M 31 (円軌道・高度1409 km・軌道傾斜角52 deg)
- ・ 搬送周波数 6876.712 MHz (鹿児島大学にて実測)
- ・ 電波干渉計基線長：76 m
- ・ 観測パス数：6 (2006/9/14 ~ 2006/9/15 UTC)

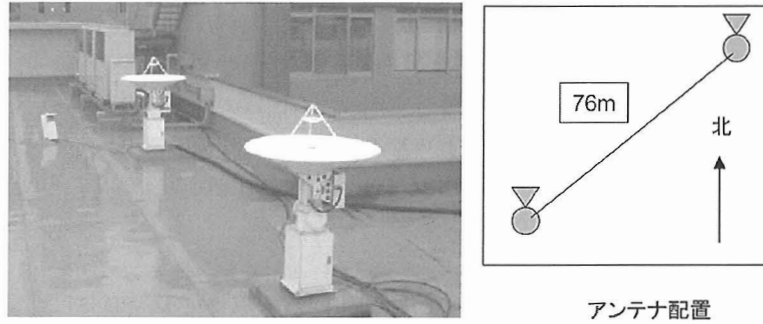


図4 小口径電波干渉計（鹿児島大学理学部）

3.2 観測値PDの取得

解析に使用した全6パス（合計1.12日）の概要を表に示す．ここでデータ数，開始・終了時刻はPD観測値（PD_a）のものである．これは40ms毎に計測できる生測定値を「25点平均」したものであり，結果としてPD_aでは1s毎に1点取得するものとみなす．これは軌道決定フィルタの計算機負荷を軽減するための処理である．エポック時刻は，第一データの観測時刻である．

表1 実測値解析に使用した観測パス概要

pass ID	number of data		start		finish		time span	
	(each pass)	(since epoch)	UTC	UTC	UTC	UTC	(each pass)	(since epoch)
0	955	955	2006/09/14 05:11:04	05:27:20	05:27:20	05:27:20	16.3 min	0.01 day
1	982	1937	2006/09/14 07:10:44	07:27:28	07:27:28	07:27:28	16.7 min	0.09 day
2	1017	2954	2006/09/14 21:49:16	22:06:36	22:06:36	22:06:36	17.3 min	0.71 day
3	903	3857	2006/09/14 23:50:44	00:06:07	00:06:07	00:06:07	15.4 min	0.79 day
4	1020	4877	2006/09/15 05:56:07	06:13:30	06:13:30	06:13:30	17.4 min	1.04 day
5	768	5645	2006/09/15 07:57:14	08:10:19	08:10:19	08:10:19	13.1 min	1.12 day

生測定値は幅 2π の範囲に制限されており， 2π の整数倍および不確定なオフセットを含んでいる．この不連続測定値を連続化し，25点平均したものがPD観測値となる．この処理を図に示す．例として，パス0のPD_aを図示する．

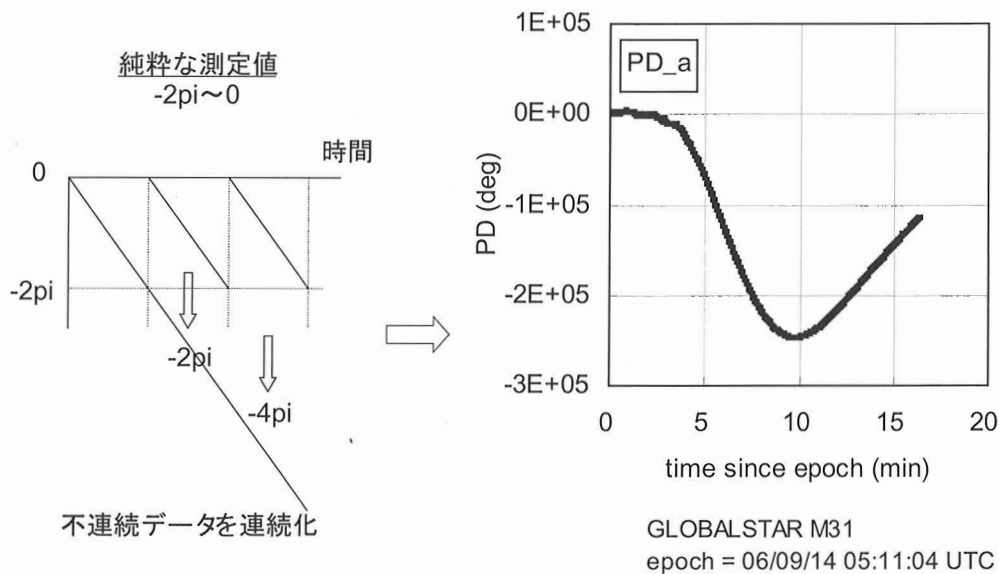


図5 位相差観測値（PD_a）

このPD 観測値から観測ノイズを統計した結果を次図に示す。左図は各測定時刻（40 ms 毎の生測定値）における測定値と25データ平均の差分を二乗したものである。これはランダムノイズの分散に類似する値と見なせる。ノイズが著しく大きい区間がエポック後0～6分および12分～16分に確認できる。右図はエポック後7～11分の範囲を拡大したもので、サンプル数は6000点である。ノイズが安定したこの区間の標準偏差は11.751 degである。

40 ms 毎の測定値を25点平均したPD_aでは、統計的にノイズは5分の1になるので、ノイズ標準偏差を2.350 degとみなせる。

3.3 観測値 PDR の取得

観測値PDを数値微分して、観測値PDR（アルゴリズム表のPDR_b）を取得する。PDにはランダム誤差が含まれており、微分時間間隔が短いほどPDRに含まれるランダム誤差も大きくなる。ランダム誤差を小さくするために、ある程度大きな時間間隔で数値微分する。数値微分誤差はこの後の過程で除去されるので問題はない。本ケースでは、数値微分間隔を40 sに設定した。観測値PDには不良区間があるため、以下の自動的に識別する処理を採用する。

1. PDの全データに対して数値微分を実行
2. 40 s区間ごとに二次近似曲線を計算し、PDRとの差分からRMS（2乗平均の平方根）を統計
3. 設定したしきい値よりもRMSが小さい区間のみPDRを採用し、残りの区間は削除

図7にこの処理結果を示す。左図では、PDRを40 s毎の全22区間に分け、各区間において二次曲線との差分からRMSを計算している。ここでは、区間10～14および区間19を採用する。しきい値の決定は、実測経験に基づくもので0.28 deg/sとした。右図のPDR_bは、例としてパス0のものを示す。

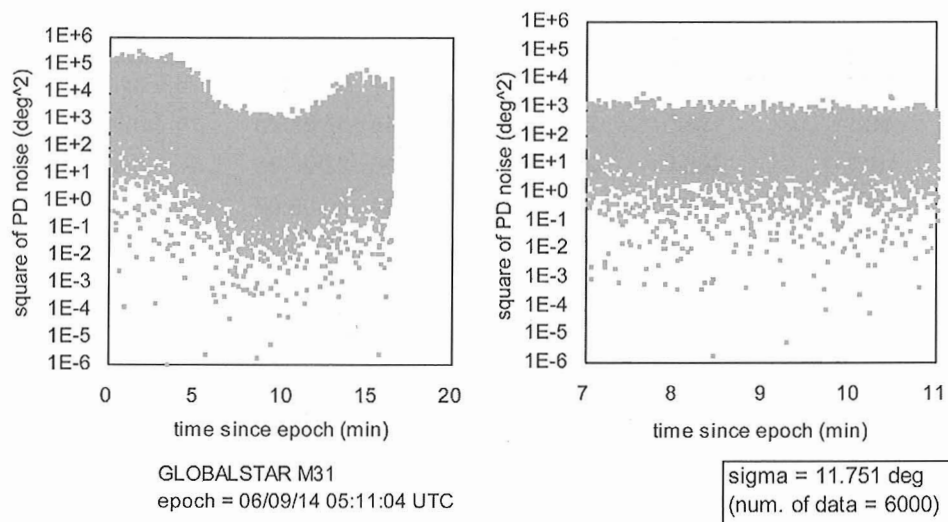


図6 40 ms 毎測定値のノイズ統計（右は7～11分区間の拡大）

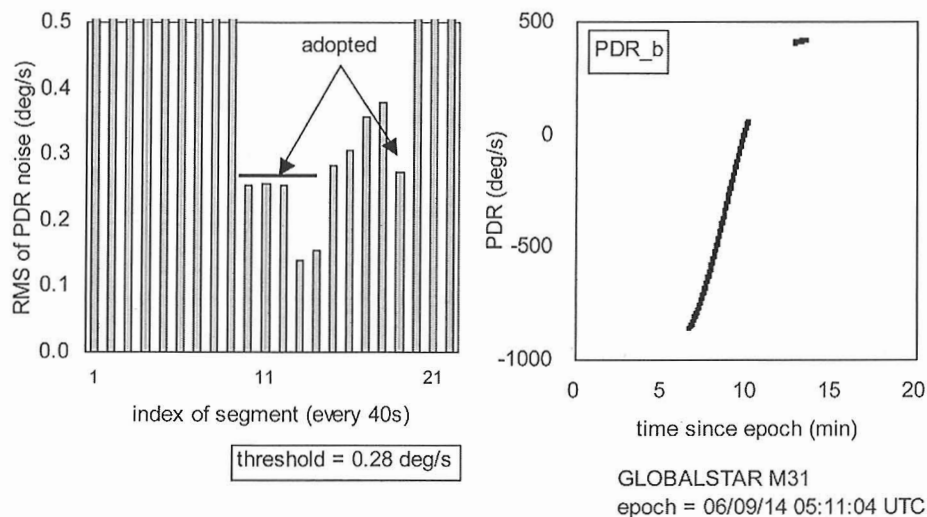


図7 良区間識別および位相差変化率観測値（PDR_b）

3.4 観測時刻誤差の考慮

状態量推定のパラメータに、各観測パスに独立した観測時刻誤差を加える。これは本観測システムにおいて、各パスごとに異なる観測時刻の不確実性が含まれているためである。観測時刻に対する確度をハードウェアおよびソフトウェア的に向上させることは今後の課題である。

アルゴリズムを次図に示す。全観測時刻に対して、エポック時刻の軌道要素は軌道モデルに従って軌道生成する。これに加え、各観測パスごとに観測時刻の誤差 τ を定義する。ただし、最初のパスと最後のパスにおいては、 τ はゼロと固定する。これは軌道パラメータ推定との従属性を回避するためである。

実際にシミュレーションした結果では、初期値を1s程度とした場合、2ms程度の確度で時刻誤差 τ を決定することが可能であることを確認した。

ここで、各パスごとの τ は、他パスの観測値に影響を与えないため、既存のバッチフィルタでは軌道パラメータと同時に決定することができない。参考[1]の5.2節で同様のパラメータ推定問題を取り扱っており、同じアルゴリズムを採用することで解決した。

3.5 解析結果

解析結果を次表に示す。初期軌道 (X_c)、最適軌道 (X_j) の各状態量値をまとめる。各軌道パラメータに位置10km、速度10m/sの意図的誤差を加えて解析を始めた場合において、安定して最適値へ収束することを確認した。また時刻誤差決定は、最大で-2.063sとなり、かなり大きな値である。この値が実際に時刻誤差によるものか、他の要因によって生じているものか、今後も検討が必要である。

次に、数値微分誤差の除去効果を次図に示す。左が除去しないときのPD残差（推定値と実測値の差分、DPD_e）、右が除去したときのPD残差（DPD_k）である。いずれも横軸はデータ番号であり、全観測パスを連続的にプロットしている。状態量推定フィルタにおいて、不良区間として採用していない区間ではPD残差が大きく乱れているが、採用区間においては連続性を確認できる。数値微分誤差を除去しない左図の場合、PD残差に大きな曲線性が見られるが、除去後の右図では、PD残差が大きく縮小している様子を確認できる。

共分散解析の結果をまとめると、観測値残差の標準偏差は0.399 deg/sである。また、状態量決定の標準偏差 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ から、位置決定の標準偏差 $\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ を計算すると、45mである。実際にこの水準の軌道決定が達成できているかの確認に関しては今後の課題である。

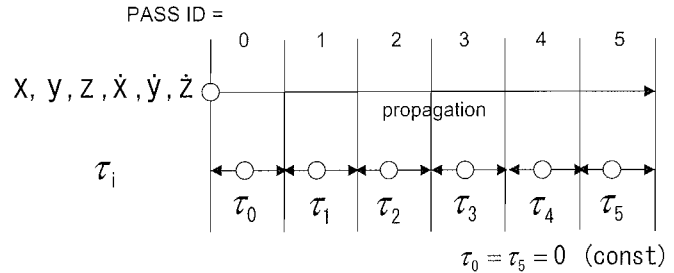


図8 観測時刻誤差の定義

表2 軌道決定結果

		initial	optimal	revised
		X_c	X_j	$X_j - X_c$
x	km	-4918.164	-4928.168	-10.004
y	km	168.473	158.468	-10.005
z	km	6034.841	6024.843	-9.998
dx	m/s	-1504.555	-1514.552	-9.997
dy	m/s	-6904.106	-6914.103	-9.997
dz	m/s	-1044.812	-1054.811	-9.999
tau_0	s	0	0.000	0.000
tau_1	s	0	1.172	1.172
tau_2	s	0	-1.471	-1.471
tau_3	s	0	-1.661	-1.661
tau_4	s	0	-2.063	-2.063
tau_5	s	0	0.000	0.000

target = GLOBALSTAR M031

epoch = 06/09/14 05:11:04 UTC

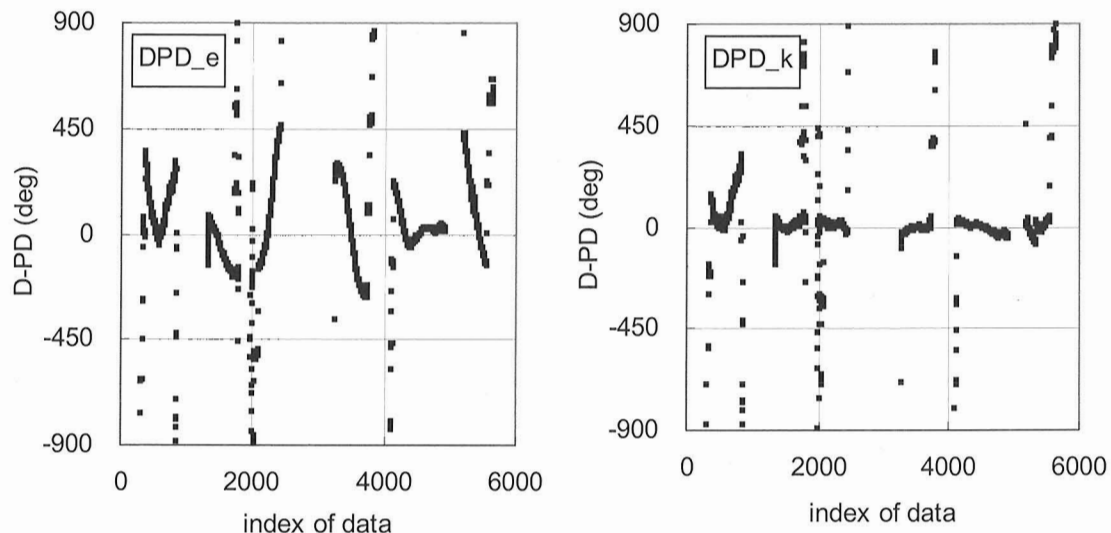


図9 位相差観測値の残差 (DPD)

4. 結論 および 課題

本研究では、2台のアンテナで構成する小口径電波干渉計を用いて、到達時刻差に起因する到来電波の「位相差」を観測し、軌道決定のアルゴリズム、及び必要な機器構成を検討すると共に、その軌道決定能力を評価した。事例研究として、鹿児島大学理学部が所有する1.4 m口径のパラボラアンテナ2台で構成する電波干渉計（基線長76 m）を用いて、低高度地球周回群衛星であるGLOBALSTARの一部の衛星を対象として実観測を実施した。

本研究では新しい軌道決定手法を提案している。 2π の範囲で位相差を観測し、その変化率を状態量推定フィルタで処理する。数値微分で変化率を算出するため、数値微分誤差を除去するアルゴリズムを提案した。また観測時刻誤差も同時に決定した。

約1.12日間の実観測結果から軌道決定を実施したところ、初期軌道に約10 km および10 m/sの誤差が含まれるケースで安定して最適値に収束することを確認した。このときの観測値標準偏差は0.399 deg/sであり、位置決定の標準偏差に換算すると45 mである。

今後の課題として、共分散解析結果の妥当性を評価することが必要である。また観測システムの時刻計測誤差を縮小するために、計測ソフトウェアおよびハードウェアに改善が必要である。

参 考 文 献

- [1] Y. Sakamoto and T. Yasaka, "Methods for the Orbit Determination of a Tethered Satellite System by a Single Ground Station," *Memoirs of the Faculty of Engineering Kyushu University*, Vol. 63, No. 3, pp. 185–202 (2003).