

地球周回衛星の 4-way 軌道決定の現状と、 月周回衛星への応用

小川 美奈^{*1}, 谷口 正^{*1}, 岩名 泰典^{*1}, 斉藤 正敏^{*1},
片桐 征治^{*2}, 青島 千晶^{*2}, 小井沼 久哉^{*3},
SELENE RSAT/VRAD ミッショングループ

Orbit determination of earth orbiter using 4-way tracking data and application to lunar orbiter

By

Mina OGAWA^{*1}, Sho TANIGUCHI^{*1}, Yasunori IWANA^{*1}, Masatoshi SAITOH^{*1},
Seiji KATAGIRI^{*2}, Chiaki AOSHIMA^{*2}, Hisaya KOINUMA^{*3}
and SELENE RSAT/VRAD team

Abstract: The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has been studying the feasibility of orbit determination technology with satellite-to-satellite (4-way) tracking data using the DRTS which was launched in 2002. The orbit determination was performed in batch processing mode, and showed that the accuracy level is equivalent to the results by tracking data from ground network stations.

This paper presents the overview of JAXA's experiments on orbit determination using 4-way tracking data of the DRTS user satellites such as the ADEOS-II and the ALOS. The application of this technologies to the SELENE orbiting the moon is also presented.

Keywords: Satellite-to-satellite tracking data, 4-way tracking data, orbit determination, DRTS, ADEOS-II, ALOS, SELENE

概 要

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、データ中継技術衛星 DRTS 経由で計測した衛星間測距データ (4-way 追跡データ) を用いて、軌道決定技術の実証実験を行っている。本論文では、4 way 追跡データを用いた地球周回衛星の軌道決定実験の主要な成果を報告する。また、2007 年打ち上げ予定の月周回衛星 (SELENE) では、月を周回する小型衛星経由で月裏側の 4-way ドップラを取得する計画である。4-way ドップラが SELENE 軌道決定・予報精度に与える影響についても紹介する。

1. は じ め に

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、1994 年に技術試験衛星 VI「きく 6 号」(Engineering Test Satellite -VI: ETS-VI) を打上

* 1 Consolidated Space Tracking and Data Acquisition Department, Office of Space Flight and Operation/JAXA

* 2 FUJITSU LIMITED

* 3 Daiko Denshi Tsushin, Ltd.

げて以来、衛星間通信技術を確立するための実験を行っている。対象技術の中には、衛星間追跡データを用いた軌道決定技術も含まれている。

2006年現在は、2002年9月に打上げたデータ中継技術衛星「こだま」(Data relay test satellite: DRTS)を用いた実証実験を行っている。本論文では、DRTSのユーザ衛星軌道決定実験の主な成果を紹介する。

2007年度打上げ予定の月周回衛星(SELenological and ENgineering Explorer: SELENE)では、月を周回する小衛星「リレー衛星」経由で、月の裏側の4-way ドップラを世界で初めて取得する計画である。4-way ドップラは月重力場モデルの改良に用いられる予定であるが、軌道決定に使用した場合に得られる SELENE 軌道決定・予報精度向上への寄与についても紹介する。

2. 地球周回衛星の4-way 軌道決定

本章では、静止衛星経由で地球周回衛星の4-way 追跡データを取得し、軌道決定に供する事例を紹介する。

2.1 DRTSによる4-way 軌道決定

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、2002年9月にH-II A ロケットを用いてデータ中継技術衛星「こだま」(Data relay test satellite: DRTS)を打上げた。DRTSのミッションは、1994年打上げの技術試験衛星VI型「きく6号」(ETS-VI)、1997年打上げの通信放送技術衛星「かけはし」(Communication and Broadcasting Engineering Test Satellite: COMETS)の成果を引き継いで、衛星間通信技術を確立することである。

DRTS スペースネットワーク(以下「DRTS SN」)は、DRTS およびフィーダリンク局として筑波宇宙センター内の筑波局(PGT)と地球観測センター内の鳩山局(HGT)で構成されている。DRTS SNは、DRTS 経由の衛星間追跡データとして、Sバンド4-way レンジ・ドップラ(ドップラ補償あり、なし)、SバンドおよびKバンドの中継1-way ドップラを取得することができる。取得された追跡データは、筑波宇宙センター内の軌道力学系システムへ、計測中にリアルタイム伝送、あるいはパス終了後にファイル伝送される。

DRTSのユーザ衛星のうち、現在までに追跡データを取得した衛星は、環境観測技術衛星「みどり2号」(Advanced Earth Observing Satellite II: ADEOS-II)、光衛星間通信実験衛星「きらり」(Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite: OICETS)、陸域観測技術衛星「だいち」(Advanced Land Observing Satellite: ALOS)の3衛星である。軌道決定実験には、ドップラ補償無しのSバンド4-way レンジ・ドップラ(以下「4-way 追跡データ」)が用いられている。

2.2 軌道決定・予報精度の緯度依存性

DRTSの真下、すなわち赤道上空をユーザ衛星が通過する間に取得された4-way 追跡データはあまり軌道決定に寄与しないと予想されたため、最初のDRTS ユーザ衛星であるADEOS-II(高度約803 km)のデータを用いて、4-way 追跡データ取得地域が軌道決定・予報精度に与える影響を調べた。

まず、軌道決定精度を確認するために、2004年7月4日～7日のADEOS-II 4-way 追跡データ(1日8パス)を、赤道上空、中緯度帯、極上空それぞれ10分ずつに分割し、3日間のデータアークで軌道決定を行い、基準軌道との比較を行った。

軌道予報精度については、軌道決定値を3日後まで軌道伝播し、基準軌道と比較することにより評価を行なった。

基準軌道には、ADEOS-II 搭載1周波 GPSR および地上 GPSR のデータを用いて高精度軌道決定システム(GUTS) [1]が算出したADEOS-II 精密軌道を採用した。当時のADEOS-II 精密軌道の位置誤差は40 cm 以下であった。

位置決定精度および3日予報精度を表1に示す。予想通り、赤道付近の4-way 追跡データを使用した場合が一番精度が悪いことが確認できる。

表1 位置決定・予報精度の緯度依存性
(ADEOS-IIでの実績。数値は(文献[2]より))

| 4-way 計測の地域 | 位置誤差(m) | |
|-------------|---------|--------|
| | 決定 | 予報 |
| 赤道上空 | 140 以下 | 850 以下 |
| 中緯度帯 | 50 以下 | 120 以下 |
| 極上空 | 60 以下 | 80 以下 |

2.3 データアーク長と軌道決定・予報

ALOS（高度約 692 km）では、ミッションデータの伝送に衛星間通信を定常的に利用しており、軌道決定に使用する追跡データもすでに 4-way 追跡データが主となっている。地球観測センターからの運用要求として、「軌道予報精度を常に 1 km 以内」に保持する要求があるため、4-way 追跡データによる軌道決定運用開始前に、軌道予報精度の確認を行った。

ALOS の初期機能確認段階において、評価用の追跡データとして、下記のフィーダリンク局組み合わせ毎に 3 日間ずつ、4-way 追跡データを 1 日あたり 8 パス以上、地上局から直接計測する 1-way あるいは 2-way 追跡データをサンチャゴ局、キルナ局、マスパロマス局で 4～8 パス／1 日取得した。

PGT ケース：PGT をフィーダリンク局として取得した期間（2006.3.29 0:00–2006.4.1 0:00 UTC）

HGT ケース：HGT をフィーダリンク局として取得した期間（2006.4.4 0:00–2006.4.7 0:00 UTC）

PGT+HGT ケース：PGT と HGT を両方使用した期間（2006.4.7 0:00–2006.4.10 0:00 UTC）

PGT ケースは、3 月 31 日 14 時 UT 台に DRTS のホイールアンローディングが発生し、以後の 4-way 追跡データが軌道決定に使用できない、かつ、その期間の 1/2-way 追跡データも取得していないことから、実質のデータ期間は他ケースと比べて半日少ない。

それぞれのケースについて、対象期間内の 4-way 追跡データのみ、1/2-way 追跡データのみ、4-way 追跡データ + 1/2-way 追跡データ、使用データ期間（データアーク）1 日、1.5 日、2 日、3 日のサブケースを設定して解析を行った。

初期機能確認段階における運用ベースラインである 1/2-way 追跡データ 3 日間分を使用した軌道決定値を評価基準として、ALOS 軌道要素と大気密度補正係数 ρ_1 を推定した軌道決定値の比較を行った結果を表 2 に示す。PGT ケース／データアーク 1 日では、 ρ_1 推定が収束せず、位置差（ ΔR ）が 400 m 強となっており軌道決定できていない。それ以外のケースでは、データアークが長くなっても必ずしも ΔR が小さくなっておらず、いずれも ΔR が数 m～40 m 以下である。

次に、ALOS 搭載 2 周波 GPSR データ及び地上 GPSR データを用いて GUTS により算出した精密軌道を評価基準として、各ケース／サブケースでの軌道予報精度の評価を行った。評価対象時期の GUTS 精密軌道の位置精度は 5～85 cm である。1/2-way 追跡データを併用しても、データアークが 1.0 日、1.5 日の場合には、3 日で ΔR が 1 km を超えるケースがあることがわかった。例を図 1 に示す。

2.4 精度向上へ向けて

DRTS 4-way 追跡データを用いた軌道決定は、ALOS では定常的に行われているが、精度向上の努力も続けている。例えば、DRTS のホイールアンローディングによる加速度を考慮して DRTS 自体の軌道決定精度を向上させる、4-way 追跡データに対してより精度のよい対流圏屈折補正を行う、といった方法により、4-way 追跡データによる軌道決定・予報精度が向上することがわかっており、実運用への反映へ向けて評価解析を継続している。また、フィーダリンク局間でレンジにバイアスがある可能性が高く、局バイアスの調査を行っている。

表 2 データアークと位置決定精度（文献[2]より）

| Data type | Data Span(day) | Difference in position(m) | | |
|----------------|----------------|---------------------------|-----|---------|
| | | PGT | HGT | PGT+HGT |
| 1/2-way | 3.0 | - | - | - |
| | 2.0 | 10 | 6 | 11 |
| | 1.5 | 16 | 2 | 8 |
| | 1.0 | 16 | 9 | 6 |
| 4-way | 3.0 | 8 | 38 | 20 |
| | 2.0 | 22 | 32 | 26 |
| | 1.5 | 26 | 33 | 49 |
| | 1.0 | 417 | 21 | 37 |
| 4-way +1/2-way | 3.0 | 7 | 23 | 11 |
| | 2.0 | 5 | 21 | 13 |
| | 1.5 | 6 | 24 | 17 |
| | 1.0 | 10 | 16 | 20 |

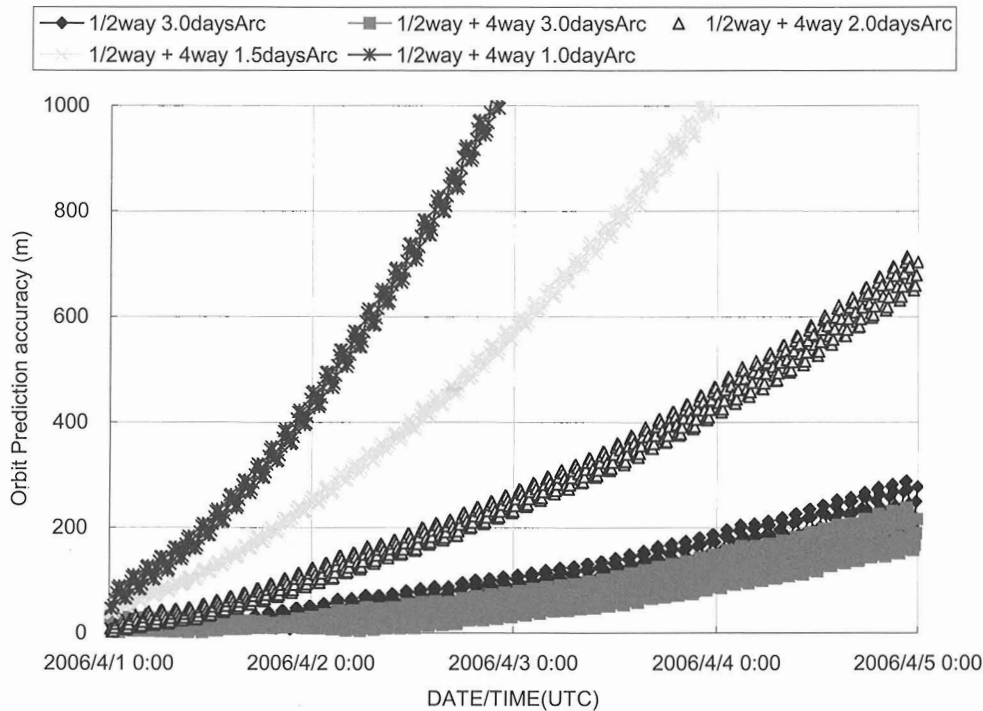


図1 ALOS 軌道予測精度 (PGT 4-way 追跡データでの例, 文献[2]より)

3. 月周回衛星への応用

2007年度打上げ予定の月周回衛星 (SELEnological and ENgineering Explorer: SELENE) では, 月を周回する小衛星「リレー衛星」経由で, 月の裏側の 4-way ドップラを世界で初めて取得する計画である[3]. 本章では, この 4-way ドップラの軌道決定・予測精度向上への寄与について紹介する.

3.1 月の裏側での 4-way ドップラ計測

SELENE 計画は, 月の高度 100 km \times 2400 km の楕円軌道, 軌道傾斜角 90 度のリレー衛星経由で, 高度約 100 km の極軌道を周回する周回衛星 (主衛星) が月の裏側を通過中の 4-way ドップラを取得する予定である. 4-way ドップラ計測のイメージ図を図2に示す. SELENE の 4-way ドップラはミッションデータの 1 種として, 月重力場モデルの改良に供される予定である.

3.2 SELENE 周回衛星の軌道決定・予測精度への寄与

月重力場推定に用いるには 1 ヶ月, 2 ヶ月といった比較的長期間の 4-way ドップラが必要であるが, 1 日程度の 4-way ドップラでも, 軌道決定に利用することはできる. 4-way ドップラを併用すれば, 地球上の局から 2-way ドップラを取得するのとは異なる視線方向の情報を得ることができるので, 軌道決定・予測精度が向上することが予想される.

まず, SELENE 周回衛星の 2006 / 8 / 1 ~ 15 エポックの軌道を仮定し, 月の表側の周回衛星 2-way ドップラを沖縄局から直接計測して, 軌道決定を行う場合の精度を共分散解析により求めた. 1 日に取得する 2-way ドップラは, 実運用時と同等の 6 時間 (3 パス) までとし, 軌道決定のデータアーク長も 6 時間とした. 次に, 任意に選択した 8/3, 8/7, 8/8, 8/14 について, 2-way ドップラ計測と重ならない時間帯のみのリレー衛星経由 4-way ドップラを臼田局で計測し, 2-way ドップラ, 4-way ドップラを用いて周回衛星とリレー衛星の軌道を同時に推定した場合の決定精度を共分散解析により求めた. 軌道決定時の初期共分散は無限大相当 (位置 10^5 km, 速度 1 km/s), 考慮パラメータは, 月重力係数誤差 (LP 100 J の誤差共分散 40 次 40 位まで, 相関あり), 太陽輻射圧補正パラメータ誤差 (20 %), レンジレートバイアス (2-way ドップラ 1 cm/s, 4-way ドップラ 5 mm/s) である.

さらに, 得られた共分散行列を 3 日間伝播した結果を図3に示す. ケース名は, MM 月 DD 日に 2-way ドップラを使って周回衛星の軌道決定を行ったものは MMDD-2 way, 4-way ドップラを併用し 2 衛星推定を行ったものは MMDD-4 way としてある. 横軸の上段は日付, 下段の斜体は周回衛星の軌道面と月-地球方向のなす角度 (度), 縦軸は位置誤差 (km) である.

月の表側の2-way ドップラのみで軌道決定を行う場合には、軌道決定・予報精度が軌道面の角度に大きく依存している。4-way ドップラを併用すると、0807-4 way ケース以外では、軌道面の角度によらず3日間伝播誤差が0.5 km 以下になっている。

0807-4 way ケースでは4-way データが2分間しかないため、2衛星推定を行うとリレーの軌道が決まらず、4-way ドップラの効果が現れないようである。そこで、実運用時と同様に7日間のデータアークでリレー衛星の軌道決定を行い、その事後共分散を考慮パラメータとして周回衛星のみの軌道決定を行った場合の精度を求めた（ケース0807-4 wayM）。その結果、他のケースと同様に、3日間伝播でも0.5 km 以下の誤差で周回衛星の軌道が求められることがわかった。

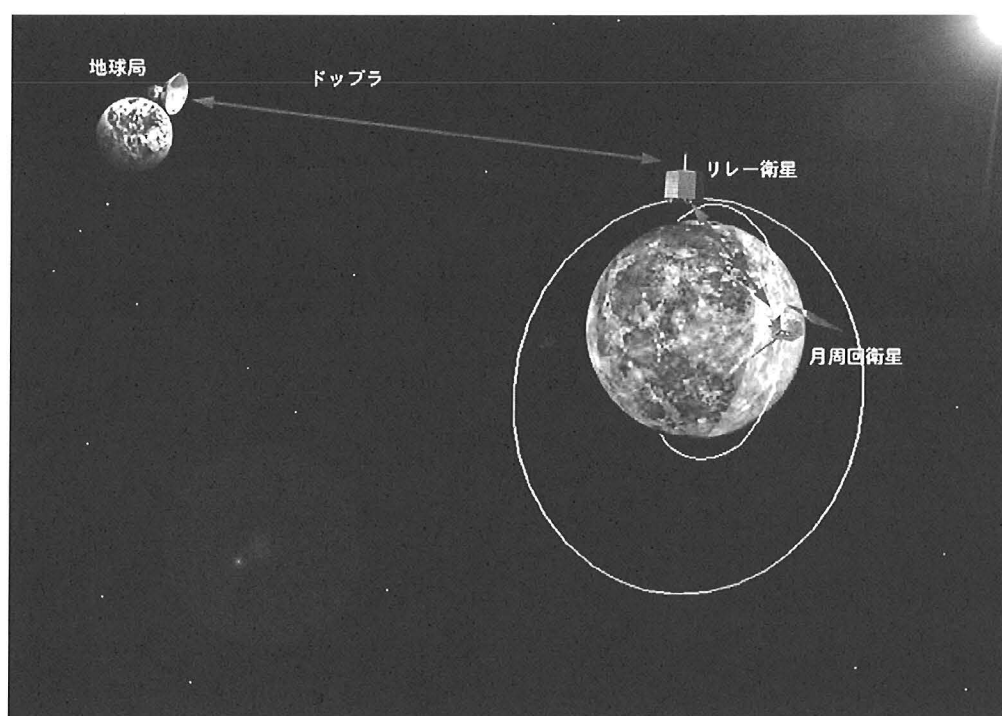


図2 月の裏側での4-way ドップラ計測

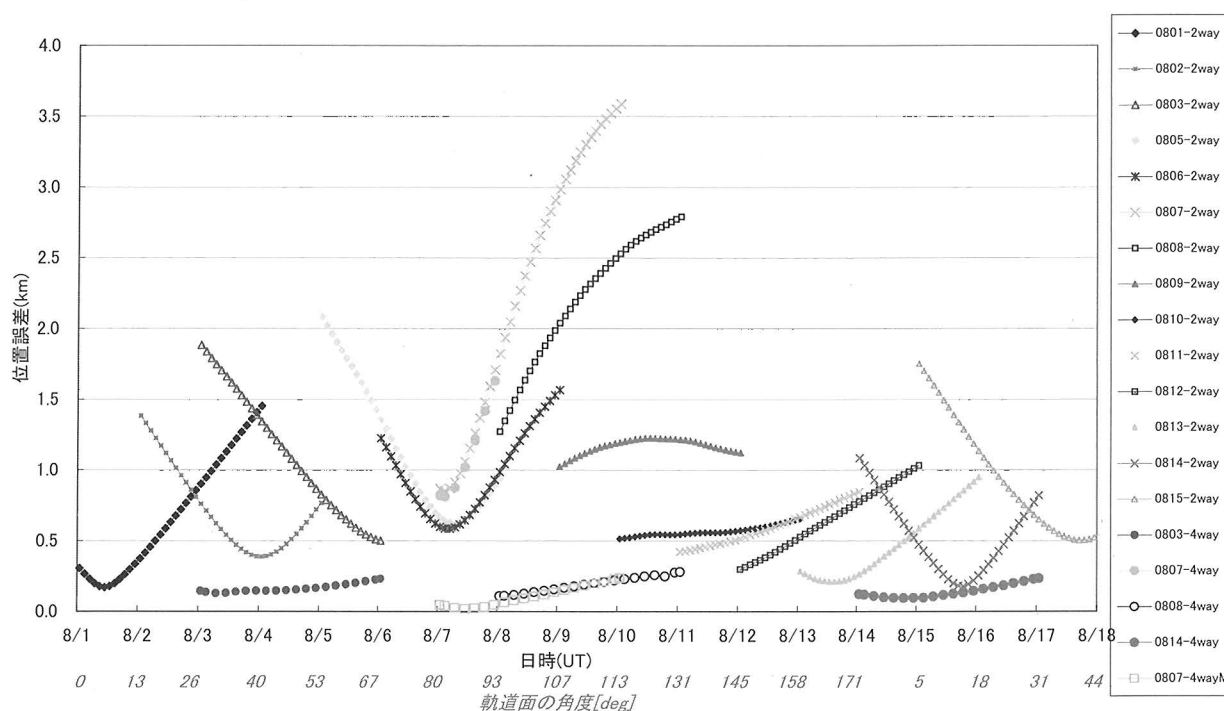


図3 月周回衛星の位置決定・予報精度

4. ま と め

JAXA は、DRTS 経由の 4-way 追跡データを用いて、地球周回のユーザ衛星の軌道決定実験を行っている。4-way 追跡データを用いた軌道決定・予報精度は、地上局から直接計測した 1/2-way 追跡データを用いた場合と同等であることが確認できており、ALOS では実運用に供している。

月軌道上での 4-way 追跡データはまだ実データが得られていないため、SELENE の周回衛星、リレー衛星軌道を仮定して誤差共分散解析を行った。1 日分（6 時間分）の 4-way ドップラデータだけでも、周回衛星の軌道決定・予報精度向上に非常に有効であることが期待できる。

参 考 文 献

- [1] Maki Maeda, *et al.*, “NASDA’s Precise Orbit Determination System”, 14th International Symposium on Space Flight Dynamics (Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Vol. XXI Special Issue), Brazil, pp. 356–360, 1999
- [2] Mina OGAWA *et. al.*, “OVERVIEW OF ORBIT DETERMINATION EXPERIMENTS USING SATELLITE-TO-SATELLITE TRACKING DATA VIA THE DRTS”, Proceedings of 25 th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) /19th Space Flight Dynamics Symposium, CD-ROM, ISTS 2006-d-59, 2006
- [3] 岩田隆浩 他, “SELENE の 3 機の月周回衛星を用いた軌道決定による月重力場観測システム”, 「先進的軌道計測・決定技術に関する研究会」講演集, JAXA, 2006