

平成22年5月7日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760546  
 研究課題名（和文） 小型地上局クラスタによる新方式VLBI軌道決定システムの基礎実験  
 研究課題名（英文） Basic study of novel orbit determination system using VLBI technology by clustered small-size ground stations  
 研究代表者  
 坂本 祐二（SAKAMOTO YUJI）  
 東北大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：50431523

研究成果の概要（和文）：本課題では、申請者が特許申請した新方式VLBI（超長基線電波干渉計）軌道決定手法を用いて、既存の低高度地球周回衛星を複数のクラスタ型小規模地上局で観測するシステムを提案し、実現に向けた基礎研究を実施する。まず既存の電波干渉計を利用して軌道上衛星を観測し、データ収集・解析の効率化を検討する。次に、クラスタ型小規模地上局を製作し、単独局による電波受信能力および解析結果を示す。これらの作業を通して、将来の観測ネットワークに向けた基礎技術を確立する。

研究成果の概要（英文）：In this research, novel orbit determination system using VLBI (Very Long Baseline Interferometry) is suggested, in which satellites on low earth orbits are observed by clustered small-size ground stations. Firstly, LEO satellites are observed by using existing radio interferometer, and efficient technique of collecting and analyzing observations are studied. Secondly, constructing a small-size ground station, the ability of receiving radio signals is evaluated by analyzing the real observations. Through these works, a basic technology toward a future networked observation system is established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙システム、軌道決定

## 1. 研究開始当初の背景

人工衛星の運用においては「軌道決定」が重要である。追跡・誘導目的に加え、観測地点の高精度位置は、環境モデル推定に欠かせない。研究代表者らは「電波干渉計を用いた軌道決定手法」の特許を申請した(西尾・坂本, 特願 2006-079274)。また、基盤研究(C)課題

(H18-19)において、本手法の具体化を実施した。これは従来の軌道決定精度を維持したまま、地上局・衛星の双方において簡素な機器構成を実現するために有効な手法である。電波干渉計は2基以上の受信アンテナで構成する観測系で、各アンテナが同一衛星から電波を受信するとき、幾何学的関係から電波到達

時刻の差(位相差)が生じる。この位相差観測値を大量収集し「状態量推定フィルタ」で処理することで最適軌道が決定できる。特にアンテナ間の距離が長い場合はVLBI観測系と呼ぶ。

最近活発化している月・火星探査衛星において、軌道決定に革新的な手法が必要とされている。これまでは、数10m級の巨大地上アンテナで衛星からの微弱な電波を受信していたが、電波伝送距離が長く、有用な決定精度を実現できない欠点があった。例えば「ひてん」の月スイングバイ観測時では、位置誤差が600m程度である。この欠点を回避する手法として「相対VLBI手法」が実用化されており、観測対象衛星とその近傍の基準星を交互に観測し、位置を決定できる。ここで、基準星の観測が不必要な手法が活用できれば、従来よりも自由度の高い観測が可能となる。

一方で、小規模な地上局による連携観測が世界中で活発化している。国内ではNPO法人UNISECのGSN-WGにおいて10機関程度の大学および高専が集まり、各機関の構内に設置した地上局のネットワーク連携を試みている。また世界的にも、ESA/JAXA/NASAが主導するGENSOにおいて、同様の地上局システムを開発中である。このようなクラスタ型小規模地上局の応用活用が今後期待されている。

本研究課題の代表申請者はこれまでの研究活動において、衛星観測局の整備や軌道決定手法の提案、および解析ソフトウェアの開発に従事してきた。まず、九州大学のUHF帯受信設備を用いて人工衛星の電波を受信し、そのレンジレート観測値から軌道決定するプログラムを開発し、実用性を確認した(2000)。次に、小型テザー衛星(2基の衛星が直径1mm未満、長さ2kmの糸でつながれたもの)の軌道決定に関する研究において、新しい軌道決定手法を提案すると共に、軌道決定プログラムに改良を加えて再利用した(2003)。そして鹿児島大学において、口径1.4mのX帯アンテナ3基による電波干渉計設備(結合型)を用い、低高度軌道人工衛星を観測した。観測電波の相関処理から得られる「位相差観測値」をプログラムで解析できるように改良を加え、実測値解析を実施した(2005)。これらの活動を通して、独自に開発した「軌道決定ソフトウェアODEF」は成熟した機能・性能を蓄積しており、今後も新しい課題において機能を追加し、再利用が可能である。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、申請者が提案する新方式VLBI軌道決定手法を用いて、既存の低高度地球周回衛星をクラスタ型小規模地上局で

実際に観測・解析するシステムの基礎研究を実施する。軌道決定精度を評価すると共に、受信・データ解析に必要な装置、および処理アルゴリズムの効率化を検討する。決定精度の目標値は、従来手法(RARR法)と同等である1m未満に設定する。まず、VLBI軌道決定におけるデータ収集・解析の効率化を検討する。次に、クラスタ型小規模地上局による軌道観測システムを構築し、実際の衛星を対象とした実観測および性能評価を実施する。

本研究の最終目的は、研究代表者が特許申請した新しい軌道決定手法を用いて、低高度地球周回衛星および月・火星探査衛星の新方式軌道決定システムを実用化することである。例えば、惑星表面にVLBI(超長基線電波干渉計)を構成する受信機ユニットを2機以上投下し、地球からの観測を介さずに、惑星表面上のみで軌道決定観測系を構築することが可能になる。実現に向けた技術課題は「構成装置・データ処理の単純化」である。

## 3. 研究の方法

電波干渉計は2基以上の受信アンテナで構成する観測系で、各アンテナが同一衛星から電波を受信するとき、幾何学的関係から電波到達時刻の差(位相差)が生じる。この位相差観測値を大量収集し「状態量推定フィルタ」で処理することで最適軌道が決定できる(図1)。

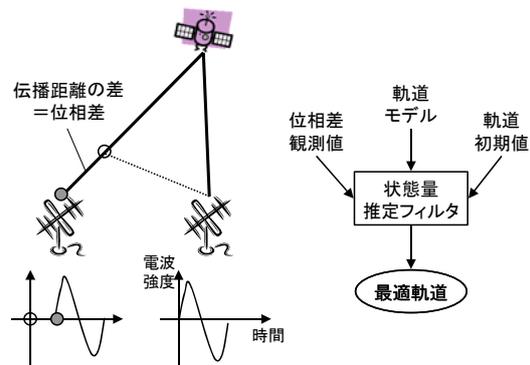


図1 電波干渉計による軌道決定

これまで軌道決定に広く使われているRARR法(Range and Range Rate)は、地上局と衛星間の電波往復時間の測定が必要であった。地球周回衛星の場合、位置決定誤差は数m程度である。衛星搭載のGPS受信機を活用する例もあるが、高度2万km以上(月・火星衛星を含む)では利用困難である。本課題で基礎実験する新手法では、衛星からの「受信電波のみ」をデータ処理すれば良く、観測機器の単純化が可能になる。

またRARR法が衛星・地上局間の「視線方向運動」に感度を持つのに対し、VLBI観測系は「視線方向に垂直な運動」に感度を持つ。そのため、両手法を混合することでも特徴を

活かせる。(図 2)

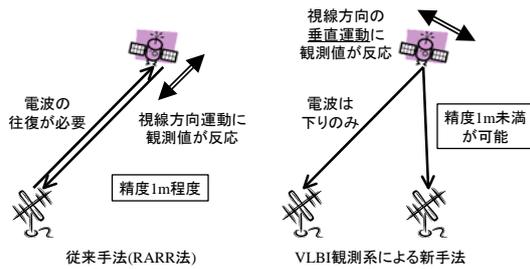


図 2 従来手法(RARR法)と新手法の違い

鹿児島大学の電波干渉計(基線長 58m)で高度 1417km の Globalstar-M41 を実験的に観測した(坂本他, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2005)。これを基にした予測は、標準偏差で 17m の位置決定誤差が期待できる(2.4 日間観測, 40ms 間隔)。基線長を 100km まで拡大すると、誤差は 10mm まで反比例に縮小し、RARR 法よりも高精度が期待できる。

(1) 本課題では、まず既存の電波干渉計を用いて低高度地球周回衛星を観測し、データの収集および解析に関して効率化を検討する。これまで、研究代表者は軌道決定ソフトウェア ODEF を開発しており、本プログラムに機能追加する。

(2) 研究代表者が所属する東北大学において、クラスタ型小規模地上局を構築し、軌道決定に必要なデータ処理系を検討・評価する。地上局ハードウェアは、電波受信部品・データ変換部品(無線電波をデータ化する)・データ記録部品で構成する。電波受信部品は一般に広く普及している UHF 帯アンテナで構成する。またデータ変換部品には、a) 汎用のスペクトラムアナライザ、または b) 汎用の受信機を用いた復調信号をコンピュータ上でリアルタイム FFT 解析することによりデータ化する。実際に人工衛星を観測したデータの解析は、理想データに基づく数値解析とは異なり、観測誤差の原因特定やその除去対策など、実用に則した軌道決定アルゴリズムが必要となる。この実験を通して、解析技術を向上するとともに、実用に供することが出来るクラスタ型小規模地上局の要求仕様を明確化する。

#### 4. 研究成果

(1) 既存の電波干渉計を用いた低高度地球周回衛星の観測

はじめに、電波干渉計による衛星観測モデル、および軌道決定アルゴリズムを検討し、数値解析により有効性を確認した。次に、鹿児島大学に既設の小口径電波干渉計(図 3)を

使用して、低高度地球周回衛星 Globalstar を観測し、軌道決定プログラム ODEF による解析性能を評価した。また、基線長および数値微分時間が軌道決定精度に与える影響を定量化した。これらの詳細な結果は、雑誌論文 1 で解説する。

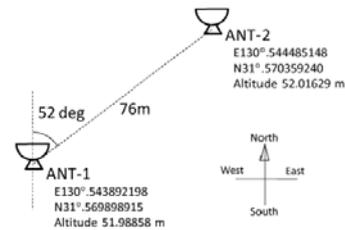


図 3 小口径電波干渉計 (鹿児島大学)

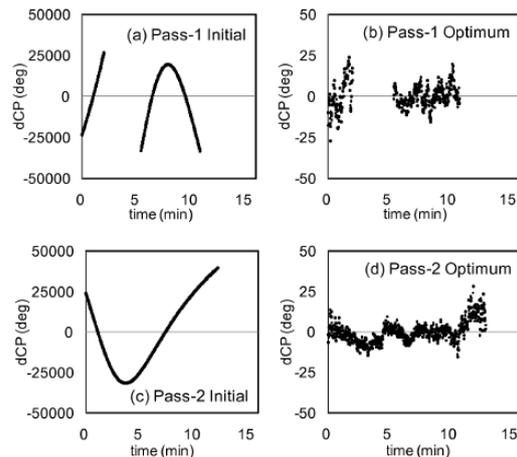


図 4 小口径電波干渉計による実観測値を用いた解析例

図 4 に、実観測値を用いた解析結果の例を示す。観測値 CP は電波干渉計で計測できる位相差を示し、Pass-2 は Pass-1 に対して 1 日後の観測値である。この 2 つのパスの観測値から、軌道要素を決定する。軌道決定前の軌道要素は意図的な誤差を含めているため、観測値と推定値の残差(a, c)は比較的大きな値である。これに対して、軌道決定後の残差(b, d)は大幅に縮小していることが確認できる(RMS で 7.5deg)。本実験により、観測ノイズの大きい不良データの削除方法や、最適な軌道要素を導出するための安定したアルゴリズムの構築が達成できた。

(2) クラスタ型小規模地上局の構築

電波受信部品・データ変換部品(無線電波をデータ化する)・データ記録部品で構成するクラスタ型小規模地上局を構築した。本地上局は安価な民生用装置で構成されており、大がかりな工事も必要としない。将来的に、多くの国内機関および海外機関に設置することを想定し、受信ゲインを犠牲にしつつも、ハンドリング性およびトータルコストを優先した。



図5 クラスタ型小規模地上局(屋外)



図6 クラスタ型小規模地上局(屋内)

屋外アンテナ部の総外形は 1.5 x 1.5 x 1.2m (アンテナ仰角 0deg 時)であり、車輪を使って移動することが可能である。完全に足場を固定することも可能であるが、固定しなくても台風並みの風速に対して動かないように設計している。アンテナは衛星を追跡できるようにモータで方位角・仰角を制御可能である。

屋内機器は、汎用のコンピュータに加え、アマチュア無線用のローテータコントローラ、トランシーバで構成する。いずれも安価に調達でき、コンピュータからリモート制御が可能である。

受信能力を確認するために、軌道上の衛星 Cubesat XI-V を開発元の東京大学と同時に観測し、取得したデータの正解率を評価した。この結果、東京大局に対して 86%のデータ取得率を確認した。データ取得率が低い原因は、仰角の低い時間帯において受信ゲイン不足が生じているためである。それ以外の時間帯では正常にデータ受信できていることから、低高度衛星の観測能力は十分にあると判断できる。

また、アンテナシステムの可搬能力を評価するために、山梨県に本地上局を移動させて、

同様に受信実験を行い、仙台市と同様に衛星受信が可能であることを確認した。この作業により、現在の可搬機構のデメリット部分を改修し、より設置フリーな構造に改善している。

### (3) クラスタ型小規模地上局による電波解析能力の評価

単独局では位相観測が出来ないため、まずは受信電波を解析して、ドップラ周波数を計測する作業を実施した。計測方法は2通りであり、a) 汎用のスペクトラムアナライザを使用した場合、および b) 汎用の受信機を用いて信号復調し、コンピュータ上でリアルタイム FFT 解析した場合、である。手法 a) を用いた計測に関しては、九州大学が所有する既存の小規模地上局で数ヶ月間の連続観測を実施し、性能を評価した(学会発表の 2. を参照)。一方、b) の手法に関しては、図5で示す小規模地上局を利用して実験した。受信機を用いて CW 信号を復調し、その音声波形(800 ± 300Hz 程度)をリアルタイムで FFT 解析し、受信電波の周波数を解析する。本観測においても、実測値には多くのノイズが含まれているため、適切なノイズ除去手法を適用しなければならない。また、観測データのある区間で平均化して、軌道決定アルゴリズムで処理するデータ数を減少させることにより、解析プログラムの処理時間を短縮している。このような実用的な解析行程に関しては、軌道上の衛星 CUTE-1 を観測しデータ解析することで、試行錯誤して最適な手法を構築した。獲得した周波数計測データの例を図7に示す。

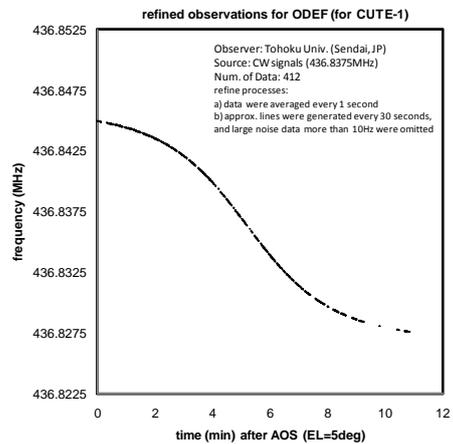


図7 クラスタ型小規模地上局による電波解析(周波数計測)

この周波数データを使用して、軌道決定を実施した。その結果得られた観測値と推定値の残差を図8に示す。±10Hz 以内のデータを統計すると、標準偏差は 2.8Hz であった。これは手法 a) (19.7Hz) よりも良好な解析結果であり、スペクトラムアナライザを使用せず、

低コストに電波解析できる行程を確立したことになる。

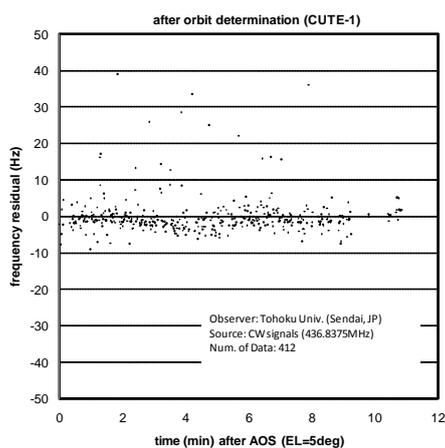


図8 クラスタ型小規模地上局による  
実観測値を用いた解析例

#### (4) 今後の研究計画

軌道決定手法の確立(1)、観測ハードウェアの構築(2)、予備的な観測実験(3)の一連の作業を通して、クラスタ型小規模地上局を使用した電波観測の準備が整った。この地上局を2局以上使用して、50~100m程度の間隔をおいて設置し、受信した電波を相関処理することで、電波干渉計の位相差計測値を得ることが出来る。この計測値を使用して(1)で確立したプログラムを使用することで、性能評価実験を実施する計画である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. Yuji Sakamoto and Masanori Nishio, "Orbit Determination Using Radio Interferometer of Small-Diameter Antennas for LEO Satellites," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Ref. No. TAES-200900132R, Accepted at 2010. (査読あり)

2. Yasuhisa Oda, Mitsuhiro Komatsu, Naomi Kurahara, Yuya Nakamura, Yuji Sakamoto, Shinichi Nakasuka, Anura Wickramanayake, Priya Fernando, "Improvement in University Satellite Operation Using Ground Station Network," Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol. 7, ists26, December 2009, Tn\_31-Tn\_34. (査読あり)

[学会発表] (計3件)

1. 米山明里, 中野壽彦, 澤上友貴, 坂本祐

二, 吉田和哉「人工衛星管制のための移動式小型アンテナ開発及びネットワーク運用評価」日本航空宇宙学会北部支部 2010年講演会, 平成22年3月10日, 仙台市.

2. Yuya Ariyoshi and Yuji Sakamoto, "Experiment of Orbit Determination Method using Amateur Radio Ground Station," Proceedings of the 18th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagamihara, Japan, July 28-29, 2008, pp. 307-312,

3. Yasuhisa Oda, Mitsuhiro Komatsu, Naomi Kurahara, Yuya Nakamura, Yuji Sakamoto, Shinichi Nakasuka, Anura Wickramanayake, Priya Fernando, "Improvement in University Satellite Operation Using Ground Station Network," 2008-u-17, the 26th International Symposium on Space Technology and Science (26th ISTS), Hamamatsu, Japan, June 2-6, 2008.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] 該当なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

坂本 祐二 (SAKAMOTO YUJI)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 50431523

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者 該当なし