

氏 名 菊池 冬彦

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 926 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Differential Phase Delay Estimation by Same Beam
VLBI Method

論文審査委員 主 査 教授 川口 則幸
教授 佐々木 晶
教授 福島 登志夫
教授 日置 幸介（北海道大学）
グループ 小山 泰弘（情報通信研究機構）
リーダー
助教授 村田 泰宏（JAXA 宇宙科学研究本部）

論文内容の要旨

論文タイトル:

Differential Phase Delay Estimation by Same Beam VLBI Method

要旨:

月の起源を知る上で重要な情報の一つである月の金属核の有無に関しては、球面調和関数展開した月重力場の2次係数と、月の力学的扁平率を組み合わせ得られる慣性モーメントから推定できる。慣性モーメントは一般に、その値が0.4以下であれば重い物質すなわち核が中心に集中していることを表す。これまでの研究では0.4よりわずかに小さいことが示され、金属核の存在が示唆されているが、月の慣性モーメントに大きな感度を持つ月表層の地殻構造の推定精度が不十分であったことと、慣性モーメントの推定誤差が1%であり金属核の有無の推定に不十分だったため結論には至っていない。地殻構造は重力場と表面地形から推定されるが、従来の2way Range & Range Rate (R&RR) 観測のみによる月重力場観測では、月と地球の同期回転により月裏側重力場の有効なデータが得られず、また観測量が視線垂直方向の衛星の位置変化に対して感度が低いため月縁辺部の有効なデータが欠如していた。

2007年打ち上げ予定のわが国の月探査機SELENEのRSAT計画では一機の衛星が月の裏側にいる場合、地上局から可視であるもう一機の中継衛星を通じて電波の中継を行い、月裏側重力場を直接推定する。さらに同VRAD計画では、視線垂直方向の衛星の位置変化に感度を持つ相対VLBI観測を月周回の2衛星間で行い、月縁辺部の高精度重力場推定を行う。これらの観測の結果、月重力場を球面調和関数展開した時の低次項をこれまでの結果に比べて1桁高精度で求めることができれば、月全球での慣性モーメントを0.1%の誤差で推定可能となる。また、月重力場の高次項を1桁高精度で求めることによって慣性モーメントに大きな感度を持つ地殻の影響を補正することで、さらに精確に核の慣性モーメントすなわち、核の半径の二乗と密度の積を推定することができる。これは、月の起源に対する重要な制約条件となる。加えて、月の表側の海と裏側の高地の2分性の境界である月縁辺部の詳細な地殻構造からは、月表層が辿った異なる熱的進化過程に対して新たな制約条件を導く可能性が開かれる。

VLBIによる衛星の軌道決定はこれまでJPL/NASAのグループを中心に行われており、その有効性は認識されている。しかし、従来の群遅延方式では、遅延時間推定精度が広帯域信号の周波数幅あるいは複数の搬送波信号の周波数間隔に依存して数百MHz程度に限られているため、100psから数10psに限られており、VRAD/SELENEで目標とされる月重力場推定に必要な数10cmオーダーでの衛星の位置決定は不可能であった。そこで、VRAD計画では、遅延時間推定精度が電波信号の周波数に反比例し、群遅延に比べて遥かに高精度な位相遅延を多周波数VLBI法(MFV法)を用いて推定する。しかしながら、MFV法を用いた位相遅延推定には大きな課題が残されている。位相遅延推定ではフリッジ位相に含まれる 2π の不確定を解かなければならず、VRAD計画ではS帯(2GHz)3波、X帯(8GHz)1波の4つの搬送波が不確定の推定に用いられる。しかし、これら4つの搬送波の周波数配列は約6GHzの広い周波数帯域にわたり配置されているため、不確定を解くためには、2衛星間の相対フリッジ位相をS帯4.3度、X帯179度という極めて高精度で決定しなければなら

らない。その誤差要因としては、受信機熱雑音、大気変動をはじめとし、多くの誤差要因が挙げられる。特に大気変動の影響は大きく、2機の衛星を交互に観測するスイッチング観測では切り替え間隔よりも短周期の大気変動はキャンセルできず、残された大気変動はフリッカ雑音であるため時間積分ではほとんど除去できないため、位相誤差4.3度の条件の達成は非常に困難である。また、電離層遅延は電波信号の周波数の二乗に反比例する分散性の遅延量であり、分散性のない他の遅延とは異なり、独立に、電離層全電子数に換算して0.23TECU以下の精度で補正されなければならない。現在、GPSによるTECの推定精度は2TECU程度であるため、このような電離層遅延補正も非常に困難である。

そこで解決策として、2機の衛星が天球面上で極めて接近する機会が多いことを利用した同一ビーム VLBI 観測手法による相対位相遅延推定法を新たに提案する。同一ビーム観測では近接した2衛星からの信号の同時刻のフリンジ位相の差を取ることで、大気変動をはじめとするほとんどの誤差要因を除去し、確実に不確定を解き、相対位相遅延を推定できることが期待される。これまで、相対位相遅延の不確定推定に同一ビーム VLBI 観測法を応用した例は過去になく、極めて画期的な手法である。相対位相遅延を不確定なく推定することにより、VRAD 計画の目標である世界最高精度の3.3psでの遅延時間の決定が可能となる。

これらの目的を達成するため、筆者は以下の研究・開発を行った。同一ビームVLBI観測による相対位相遅延推定に有効な狭帯域VLBI記録システム、相関処理ソフトウェア、クラスター型相関処理システムの開発を行った。また、これらのシステム、ソフトウェアの検証のため、国際基線による衛星VLBI観測を行い、複数の狭帯域搬送波信号を用いた群遅延解析に成功するとともに、軌道重力場解析プログラムを用いた軌道推定を行い、その有効性を示した。さらにVRAD計画における同一ビームVLBI観測頻度の見積もりと観測時に予想される誤差要因に関する考察を行い、実際の運用条件等を考慮した相対位相遅延推定の計算機シミュレーションを行った。

その結果、大気遅延変動が大きい場合や伝搬性電離層変動が発生した場合、同一ビームVLBI観測法を行うことで初めて、MFV法の位相誤差、電離層遅延補正の条件が達成されることを明らかにした。また、相対位相遅延の推定誤差は2機の衛星の離角と仰角に依存し、3.3psから数十psであることを示した。これは、2機の衛星間でフリンジ位相の差を取ることで除去可能な大気変動の周期が、離角と仰角に依存するためである。これに対して、スイッチング観測ではMFV法の条件の達成が困難である。

VRAD計画の場合、2衛星間の離角が0.1度以下となりS帯/X帯とともに同一ビーム観測が可能となる期間においては、2衛星の平均仰角が15度以上であれば、相対位相遅延を不確定なく50秒積分値で世界最高の3.3psで推定可能であることを示した。2衛星間の離角が0.37度となり、S帯は同一ビーム、X帯はスイッチング観測となる場合では、2衛星の平均仰角が46度以上であれば、S/X帯同一ビーム観測時に比べて精度は若干低下するが、相対位相遅延を不確定なく50秒積分値で22psの精度で推定可能である。さらにこれらの考察に加え、搬送波信号を連続に受信できるパスにおいて、同一ビーム観測が不可能な時間帯においても、50秒程度の同一ビーム観測の機会があればそのパスすべてで不確定なく相対位相遅延を求める手法を考案した。本論文ではVRADの全観測パスの約90%のパスでいずれかの同一ビーム観測の機会があることが見積もられ、同一ビームVLBI観測

による相対位相遅延推定と2way&4wayのR&RR観測を行うことにより、SELENEの目標である重力場の低次項については約1桁以上、高次項については1桁の精度向上が可能であることが明らかになった。この結果は、月の金属核の有無、表側と裏側の2分性の原因解明など、月の起源と進化の解明への新たな道筋を示すものと期待される。

今後の研究活動では、SELENEの本観測におけるVLBI観測スケジュールの立案、観測、データ解析を主導的に行い、世界最高精度の月重力場推定に取り組む。さらには、我が国の次期月探査計画や中国、米国等の月探査計画における衛星の高精度位置決定、重力場推定を行うため、アジア・太平洋地域における衛星追跡VLBI網の構築や、多数の基線と可変型の周波数配列を用いた新たな位相遅延推定法の研究を行う。

論文審査結果の要旨

タイトル : Differential Phase Delay Estimation by Same Beam VLBI Method

月が親鉄元素を含む中心核を持つか否か、あるいは中心核のサイズと密度を明らかにすることは、月の起源に関する仮説の重要な判定材料となる。一方、月の慣性能率は力学的扁平率と重力場の低次項から求められ、中心核のサイズと密度に制限を与えるので、慣性能率の高精度の推定は月の起源を知る上で重要になる。現在、慣性能率を求める上で重力場の低次項の推定精度が力学的扁平率のそれより劣るため、慣性能率の推定精度を向上するには重力場の低次項を高精度で求めることが期待されている。また、中心核の慣性能率を推定するには月の殻の寄与分を十分な精度で見積もる必要があり、高次重力場と地形データによる重力異常から推定できる殻の厚さの全面にわたる分布を知ることも重要である。2007年打ち上げ予定のわが国の月探査機 SELENE は低次から高次にわたる重力場を高精度で推定するため、従来の視線方向にのみ感度を持つドプラー観測に加え、視線に垂直な方向に感度を持つ VLBI 観測を行う予定である。本論文はこの探査機の位置とその変化の精密追跡に VLBI を応用する研究について述べたものである。

従来、VLBI 観測は広い帯域の信号を受信して位相の周波数に対する傾き、つまり群遅延を観測量にしてきた。これに対して2つの衛星が送信する複数 (SELENE では4) の周波数信号を受信し、各周波数における2つの衛星間の位相差 (位相遅延差) 自身を最終的な観測量とする方法が Y. Kono によりすでに提案された。しかし、この方法は以下の大きな問題を含んでいる。つまり、4つの周波数信号は搬送波であり極めて帯域は狭く、位相の測定では $0 \sim 2\pi$ の値しか求められないので、位相差から遅延を求める際に 2π の整数倍の不明量を含まなければならない。しかし2つの衛星を交互に観測していたのでは、一方を観測している間に他方の中性大気や電離層で生じる遅延が変化し、2つの衛星が極めて接近したとき以外は 2π の整数倍の不明量なしに位相差は求まらない。このような理由から、位相遅延を観測量にするこの方法で成功した例はこれまでになかった。

申請者は上記の問題を解決するため、先ず他の測定で得られた中性大気と電離層で生じる遅延変化の時系列データに、受信システムに含まれる雑音の量、軌道推定誤差など予想される誤差要因を加え、擬似受信信号を作成した。この信号を用いて種々の観測方法の評価を行った。その結果、近接する2つの衛星を交互に観測せず、衛星の中間方向を追跡することにより2つの衛星からの信号を同時に受信すれば 2π の整数倍の不明量を知ることができることを示し、2つの衛星の離角が 0.1 度以内のときは位相遅延差の測定精度は約 3ps (月周回軌道で 20cm の誤差) という世界最高の驚異的な精度を達成できることを示した。

また2つの衛星が離れても、連続する観測時間内に2つの衛星からの信号を同時に受信できる期間があれば、測定精度は多少低下するものの、 2π の整数倍の不明量なしの測定が可能であることを示した。また SELENE の予測軌道から、全観測可能時間の 90% で 2π の整数倍の不明量なしに位相遅延差を推定できることを示し、実際に観測する時間を適当に選べば、 2π の整数倍の不明量なしの観測が可能となることを明らかにした。

申請者は上記観測方法を確立しただけでなく、この観測のための受信システムの一部、および2衛星からの受信信号の相互相関関数から位相遅延差推定に至る複雑な処理・解析ソフトも完成させ、さらに中国2局との国際実験を実施して、全システムの妥当性も確認している。これらの中で特筆すべきは、相関処理の高速化である。相関処理はこれまでは巨大システムでのみ可能であり、これに要する時間が観測可能時間を制限してきた。近年、PCの性能向上と相まって、このような状況を打破するため、PCクラスターによる処理が世界の各機関で進められている。申請者は、このような技術の発展をいち早く採用し、1週間分のデータ処理を22時間で処理するPCクラスターを構築した。

以上、申請者の研究成果は月の精密重力場を推定するため、月探査機の位置を世界最高精度である約20cmの誤差で追跡する観測法を考案し、これを実現する処理・解析装置およびソフトウェアを完成させたものである。これらの成果は今後の月・惑星内部構造の解明に貢献するだけでなく、将来、宇宙飛翔体の高精度追跡へ広く応用でき、高く評価できる。