

長距離基線干渉計による木星デカメータ電波源の位置決定法

中 城 智 之*・小 野 高 幸**・飯 島 雅 英**
岩 川 琢 哉*・伊 藤 晃*

Position Determination Method of Jovian Decametric Radiation Sources based on Very Long Baseline Interferometer Observation

Tomoyuki Nakajo, Takayuki Ono, Masahide Iizima,
Takuya Iwagawa and Hikaru Ito

Abstract

In decameter range, position determination of celestial radio sources based on Very Long Baseline Interferometer (VLBI) observation has been considered to be difficult due to the fluctuation of electron density in the terrestrial ionosphere. However, in Japan, dual-frequency VLBI observations for Jovian decametric radiation (JDR) to eliminate the terrestrial ionospheric effect have been carried out in Tohoku University since 1994. Furthermore, Moon-Earth baseline VLBI observation for JDR sources has been suggested as a future project in recent years. We evaluated the validity of a new VLBI observation method for purpose of determining the source position of JDR with the accuracy of 20 arcsec.

1. 序論

長距離基線干渉計 (Very Long Baseline Interferometer ; VLBI) 観測は、宇宙起源の電波の電波源位置を地上観測によって詳細に決定する唯一の手法として1960年代から確立されてきた観測技術であるが、デカメータ帯 (波長約10 m) のような低周波数帯においては、地球電離層の影響により位置決定は困難であるとされてきた。デカメータ帯における代表的な電波源である木星デカメータ電波は、木星オーロラ現象と並行し、北極域の高度数千 km の領域で発生すると考えられており、双極子型の固有磁場を持つ惑星が放射する特徴的な電波の一つとして注目されてきたが、このような事情から、詳細な電波源位置の解明は解くべき課題として残されている。日本では、1970年代から東北大学のグループがこの問題に取り組んでおり、電波源が南北の両極域に存在することを示唆する興味深い結果^{[1]、[2]、[3]}が得られている一方、近年では、月面に観測局を展開して構成される月-地球間 VLBI 計画が提案されるなど^[4]、木星デカメータ電波の電波源位置を決定するための新しい観測方法の検討が始まっている。海外では、1990年代に入って、絶対位置決定の視点から低周波数帯 VLBI 観測への試みがなされ^[5]、現在では欧州の LOFAR (Low Frequency ARray) 計画として注目されている^[6]。このように、低周波数帯 VLBI 観測技術は、今後の低周波数帯における電波天文学の発展に寄与することが期待されている。

* 福井工業大学宇宙通信工学科 ** 東北大学大学院理学研究科

2. 長距離基線干渉計観測

2-1. 干渉計の原理

図1のような2基のアンテナの組が干渉計の基本構成であり、アンテナ間の距離 L を基線長という。基線長と比較すると電波源は非常に遠方に存在するため、電波源から観測局 A、B までの各電波伝搬経路は平行とみなせる。したがって電波が観測局 A、B に到達する時刻の差（以下、遅延時間）は、

$$\tau_g = \frac{L}{c} \cos \theta, \quad (1)$$

で与えられる。遅延時間 τ_g を観測によって求めれば、電波の到来方向 θ は、

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{c}{L} \tau_g \right), \quad (2)$$

として求められる。基線長が数 10km 以上となる干渉計を「長距離基線干渉計」(Very Long Baseline Interferometer ; VLBI) と呼ぶ。遅延時間は、観測点における受信信号の相互相関関数、

$$F(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_A(t-\tau) V_B(t) dt, \quad (3)$$

を計算することで求められる。ここで、 $V_A(t)$ 、 $V_B(t)$ は観測点 A、B における受信信号、 T は積分時間である。天体が放射する電波は一般に白色雑音なので、基本的には

$$F(\tau) = \frac{\sin[\pi B(\tau + \tau_g)]}{\pi B(\tau + \tau_g)} \cos[2\pi f_c(\tau + \tau_g)] \quad (4)$$

で表される形となる。ただし、 B および f_c は受信機の帯域幅、出力信号の中心周波数である。したがって、 $F(\tau)$ が最大となるような τ を探せば遅延時間 τ_g が求まる。

2-2. デカメータ帯 VLBI 観測における問題点

2-2-1. 観測される遅延時間に含まれる誤差

干渉計の電波源位置の決定能力を空間分解能といい、観測波長と基線長の比で決定される。木星デカメータ電波の観測では少なくとも 100km 級の基線長が必要である。しかし、このような基線長で観測局が配置される場合、各観測局への電波伝播経路上のプラズマの特性差が遅延時間に影響を及ぼす。特に、地球電離層には数 10km 規模の空間スケールで電子密度の粗密が存在し、各観測局への経路における電子密度が異なるために余分な遅延時間 τ_i が発生する。また、観測システムの特性差に起因する遅延時間 τ_{sys} も、その同定は一般に困難である。すなわち、観測される遅延時間 τ_{obs} は、

$$\tau_{obs} = \tau_g + \tau_i + \tau_{sys} + \tau_\epsilon, \quad (5)$$

となる。第1項の τ_g は(1)式で表される幾何項であり、第2項以降が全て誤差成分となる。 τ_i および τ_{sys} は系

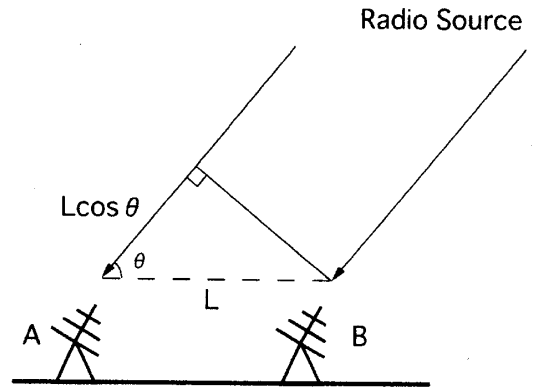


図1.干渉計の原理

統誤差、 τ_e は、信号の SN 比、観測システムの受信周波数帯域幅および積分時間によって決定される偶然誤差である。電波源の絶対位置決定を行うには、これら誤差成分の除去あるいは抑制が必要不可欠である。

2-2-3. 地球電離層の影響

特に、地球電離層の問題は、デカメータ帯 VLBI 観測における最大の問題である。(5)式第 2 項の地球電離層起源の遅延時間 τ_i は、プラズマの屈折率を表す Appleton-Hartree の式を用いた計算によって、

$$\tau_i = \frac{K}{2\pi f^2} \Delta N_{TEC}, \tag{6}$$

と導かれる。ここで、 $K=8.4 \times 10^{-7} [\text{m}^2/\text{sec}]$ なる定数、 f は観測周波数である。また、 ΔN_{TEC} は各経路上の総電子数の差である。表 1 は、 τ_i の周波数依存性を計算したものである。計算においては、 ΔN_{TEC} として典型的な量である

$10^{16} (1/\text{m}^2)$ を採用している。周波数が低くなるにつれ影響が大きくなり、特に木星視直径に相当する $\Delta\tau_g = 70\text{ns}$ ($\angle\theta = 40$ 秒角) と比較すると、デカメータ帯

では地球電離層の影響によって電波源位置の瞬時決定が非常に困難な状況であることがわかる。

表 1. τ_i の周波数依存性

周波数 f	τ_i
20MHz	3000ns
100MHz	130ns
1GHz	1.3ns

2-3. 従来の VLBI 観測結果

木星デカメータ電波の長距離干渉計観測は 1960~1970 年代にかけて、アメリカとオーストラリアのグループにより数千 km の基線長で行われた。これらの観測では、得られた相関係数から電波源の大きさの上限が 400km であると結論されているが、電波源の位置については議論されていない。

電波源の位置についての報告は東北大学のグループによる観測が最初である [1] [2] [3]。これらの観測では基線長 100km の長距離基線干渉計システムを用いて電離層の影響を除去するための 2 周波数観測が行われ、数 10 秒程度の非常に短い時間スケールで電波源の位置の南北が入れ替わる現象が報告されている (図 2)。現在、福井工業大学と東北大学で構成される 400km 級長距離基線干渉計システムを用いた 2 周波数観測が継続中である。ただし、電波源の絶対位置ではなく、位置の時間変化を求めるといった限定的な手法である。

以上のように、従来の VLBI 観測では電波源の絶対位置の決定は行われていない。

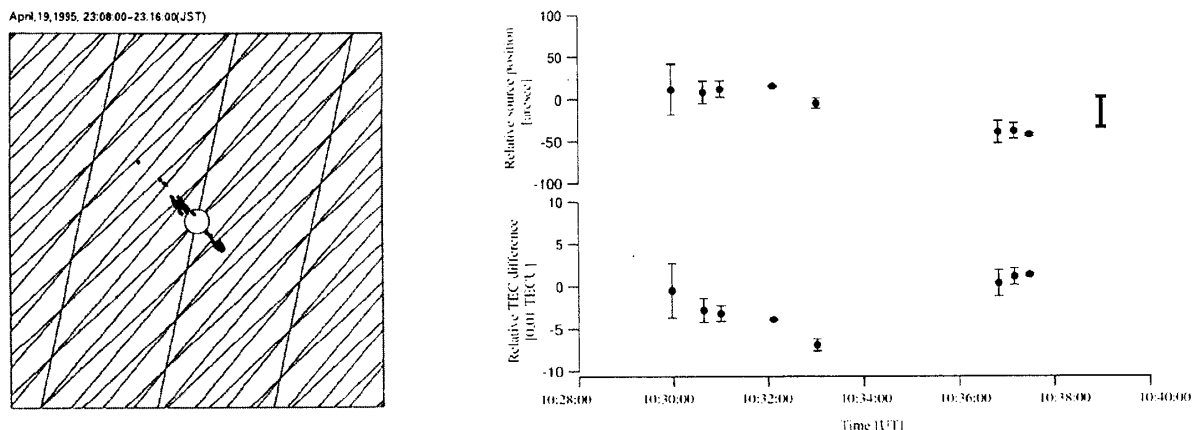


図 2. 2 周波数観測法を用いて電離層の影響を除去して測定された木星デカメータ電波源の位置の変化。(左)1995 年 4 月 19 日、(右)2002 年 4 月 16 日の観測例である。(左)では中央の円が木星の大きさである。また、(右)では上パネルが電波源の位置の変化を表しており、右端の縦棒が木星の視直径である。両観測例とも電波源が南北極域に存在することを示唆している。

3. データ解析

3-1. 解析の目的

遅延時間の誤差を有効な精度で除去する手法を確立する上で、これまでの VLBI 観測によってどの程度の精度が実現できているか、または観測において必要なパラメータの適切な値を検討することは非常に重要である。そこで、過去に得られた木星デカメータ電波の VLBI 観測データを用いて、特に銀河背景放射に起因する偶然誤差 τ_e の標準偏差 $\sigma(\tau_e)$ に着目して検討を行った。 $\sigma(\tau_e)$ は理論的には、

$$\sigma(\tau_e) = \frac{1}{\rho_0 \sqrt{2BT}}, \quad (7)$$

で与えられる^[7]。ここで、 ρ_0 は正規化相互相関係数であり、信号の SN 比によって決定される。また B、T は周波数帯域幅と積分時間である。したがって、実際の観測において得られる標準偏差を求めれば、(7)式に基づいて、適切な周波数帯域幅 B と積分時間 T を検討可能となる。

3-2. 観測システム及び使用データ

今回の解析で用いたデータは、東北大学の米山および飯館観測所で観測されたデータである。米山-飯館基線は基線長約 111km でほぼ南北方向の基線であり、各局における観測システムを図 3 に示す。受信アンテナとして 20MHz から 40MHz に感度を持つ 9 素子対数周期アンテナを採用しており、受信信号は前置増幅部で 25dB 増幅の後、2 系統の 3 段スーパーヘテロダイン方式受信機

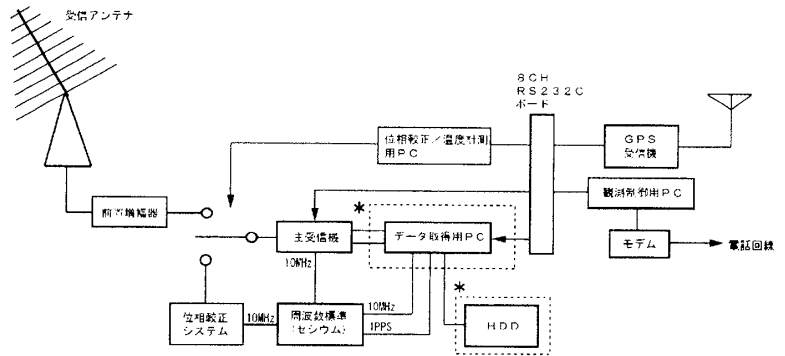


図 3. 観測システムのブロック図

により、中心周波数 10kHz (帯域幅 10kHz) の信号に変換される。この信号を各観測局で独立に 50kHz でサンプリングし、HDD に保存している。信号の位相安定性を確保するために、セシウム周波数標準が使用されている。また、各観測局の時刻同期のために、GPS の 1 PPS 信号を AD 変換している。

3-3. 使用データ

解析は 2002 年 4 月 16 日に、東北大学の米山及び飯館観測所で観測された Io-B 電波源より到来するデータに対し行っている。図 4 にフーリエ変換を用いて求めたフリッジ位相の時間変化を示す。図 4 下段のグラフにおける負の傾きの直線は、木星中心に電波源の位置を仮定した場合のフリッジ位相である。フリッジ位相の観測値とパターンが一致しており、このことから木星起源の電波であると結論される。また、電波の受信電力は (1~2MJy) となっており、過去に観測された木星デカメータ電波のスペクトルと比較すると、ほぼ典型的な強度の現象である。このデータの内最も受信強度が強い 10:37:08(UT)~10:37:11(UT)の 3 秒間のデータを解析に用いた。

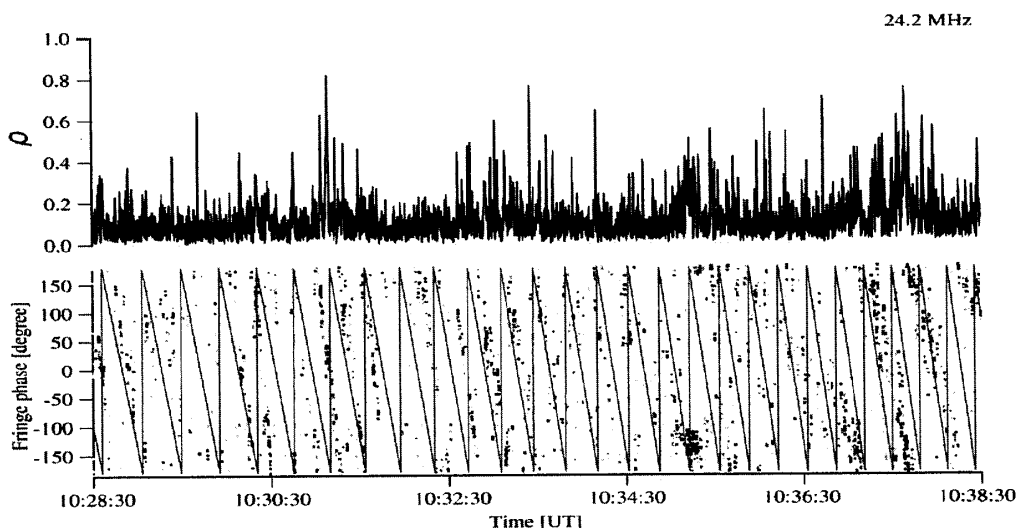


図4. 2002年4月16日に受信された木星デカメータ電波のVLBI観測結果。(上) 正規化相互相関係数および(下) フリンジ位相の時間変化である。(下) の直線はフリンジ位相の予測値である。

3-4. 解析結果

遅延時間の決定精度を検討するために、連続した3秒間のデータを用いて相互相関関数の計算を行った。具体的には、8.192m秒ごとに相互相関波形を計算し、合計375個(8m秒×375=3秒)の相互相関波形を求める。このとき、電波源が点源であることを仮定し、相関波形がピークに対して左右対称になるように、システム位相に対する補正を行っている。そして、これら375個の相互相関波形を重ね合わせ、遅延時間の

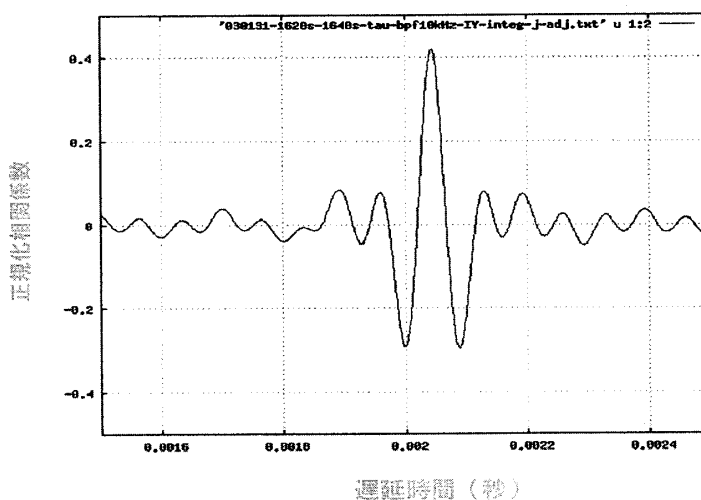


図5. 得られた正規化相互相関関数

平均値と標準偏差を求めた。図5が、重ね合わせの結果得られた相互相関関数である。正規化相関係数が最大となる遅延時間 τ_{obs} は、

$$\tau_{obs} = 2044.035 \mu\text{sec} \pm 0.150 \mu\text{sec}, \quad (8)$$

となった。今回の解析では、基線長 $L=111\text{km}$ 、周波数帯域幅 $B=10\text{kHz}$ 、積分時間 $T=3$ 秒であり、求めた遅延時間の標準偏差 $\sigma(\tau_\epsilon)$ は $0.15 \mu\text{sec}$ となった。この結果から、電波の到来方向の標準偏差 $\sigma(\theta)$ を計算すると、

$$\sigma(\theta) = \frac{c}{L \sin \theta} \sigma(\tau_\epsilon) = \frac{3 \times 10^8}{111\text{km} \times \sin(63^\circ)} \times 0.15 \mu\text{sec} = 92 \text{arc sec}, \quad (9)$$

となり、木星視半径20秒角の約5倍の大きさに相当する結果となった。すなわち、電波源位置の南北を判別する精度が得られないことが分かった。

4. 考察

4-1. 遅延時間の標準偏差の改善

今回の解析において、木星デカメータ電波の相関波形は白色雑音とみなしてよく、遅延時間解析が適用可能であることが示された。しかし、得られた 92 秒角という精度は木星視半径の 20 秒角の約 5 倍の大きさであり、基線長 111km に対して、周波数帯域幅 10kHz および積分時間 3 秒では精度が充分ではないことがわかった。したがって、基線長 L、周波数帯域幅 B、積分時間 T をより適切な値を求めるために、

$$\sigma(\theta) \propto \frac{1}{\rho_0 L \sqrt{BT}} \quad (10)$$

に基づいて検討を行う。しかしながら、木星デカメータ電波はバースト状の出現特性であるため、積分時間 T の拡大による改善はあまり見込めない。すなわち、 σ_θ を 1/10 にするには T を 100 倍にする必要があるが、木星デカメータ電波の出現特性を考慮すると困難である。したがって、主に周波数帯域幅と基線長の関係に着目する。今回得られた精度が、周波数帯域幅 B および基線長 L の拡大により、(10)式にしたがって標準偏差が改善された場合の予測を図 6 に示す。基線長が 400km 以上で、木星の南北を判別可能な標準偏差に改善し得ることが分かる。

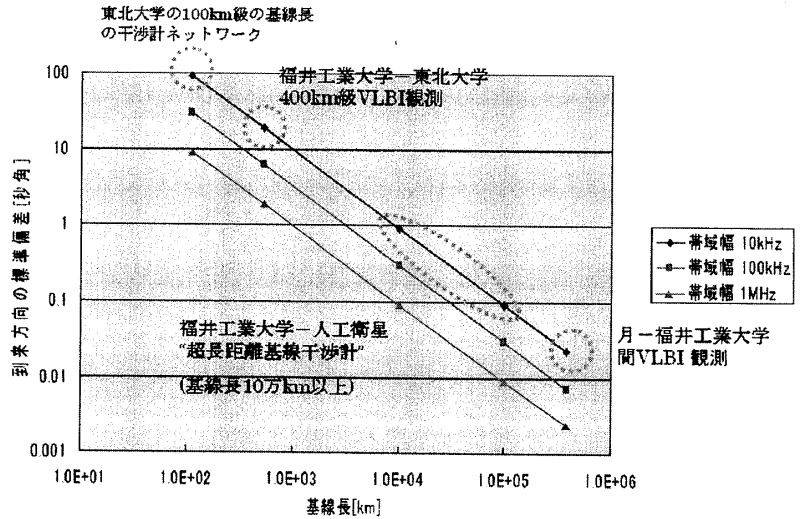


図 6. 解析結果と(11)式に基づいて予測される到来方向の標準偏差の基線長及び周波数帯域幅に対する依存性

4-2. 遅延時間解析法を用いた木星デカメータ電波源の絶対位置決定に向けて

4-2-1. 超長距離基線干渉計による地球電離層の影響の除去

電波源の絶対位置を決定するには、地球電離層の影響の除去が不可欠である。その方法として、現在検討がなされている月-地球間干渉計のような非常に基線長の長い「超長距離基線干渉計」を用いる方法が考えられる。電波の到来方向の誤差 $\Delta\theta$ は(1)式より次のように表される。

$$\Delta\theta = \frac{c}{L \sin \theta} \Delta\tau_{obs} \quad (11)$$

ここで、 $\Delta\tau_{obs}$ は遅延時間の計測誤差であり、

$$\Delta\tau_{obs} = \tau_i + \tau_{sys} + \Delta\tau_\epsilon \quad (12)$$

である。(11)式から、基線長 L が長くなれば到来方向の誤差は小さくなる。超長距離基線干渉計では、片方の観測局が宇宙空間にあるため τ_i は基線長に因らない。したがって、基線長の拡大により、 τ_i の影響が相対的に小さくなる。

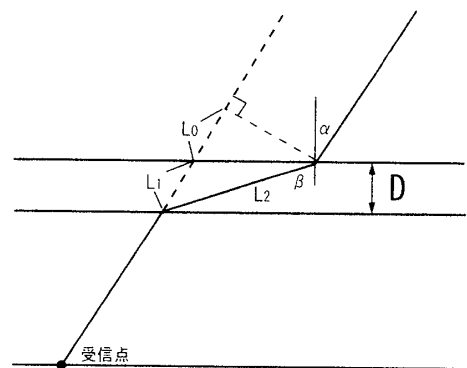


図 7. 計算で用いた電離層モデル

この効果を定量的に見積るために、次のような計算を行った。

- (i) 地上の観測局(地上局)と宇宙空間の観測局(宇宙局)の、2基の観測局を想定する。
- (ii) 電波源は点源である。
- (iii) 電波源から宇宙局に至る電波伝搬経路上は、電子密度を0とする。
- (iv) 地上局上空に、単層の電離層を配置する(図7)。電離層の厚さ D は 100km, 電子密度は観測が通常、真夜中に行われることから、IRI モデルより、最大値の $5 \times 10^5 / cc$ を採用した。

計算結果を図8に示す。図8は、電離層起源の到来方誤差(縦軸)の基線長(横軸)に対する依存性を示している。右上の角度は、電波源の仰角であり、仰角および基線長が大きくなると誤差が小さくなる。特に、地上と月面の観測局で構成される超長距離基線干渉計(基線長 38 万 km) では、10 秒角以下の精度となる。また、人工衛星を用いる場合でも、基線長が 20 万 km 以上であれば、20 秒角以下の精度となり、電波源位置の南北を決定可能となる。

観測周波数25MHz

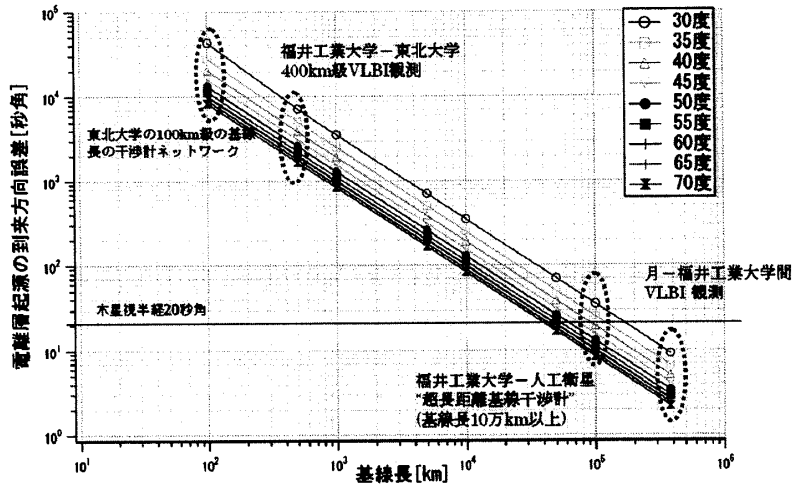


図8. 電離層起源の到来方誤差の基線長に対する依存性

4-1-2. 2周波数観測法と超長距離基線干渉計の組み合わせ

また、2周波数観測法も同時に用いて地球電離層の影響をさらに除去することにより、さらに決定精度を向上させることができるかと期待される。2周波数観測法とは、2つの観測周波数を用いて、それぞれ独立に遅延時間を求め、連立方程式を解く手法で地球電離層の影響を除去する手法である。図9は25MHz及び25.5MHzの2周波数を用いた観測を行った場合の電離層起源の到来方向誤差である。10万km以上の基線長では、 τ_i の影響を10秒角以下に抑えることができ、精度が向上することが期待される。

観測周波数25MHz、25.5MHz

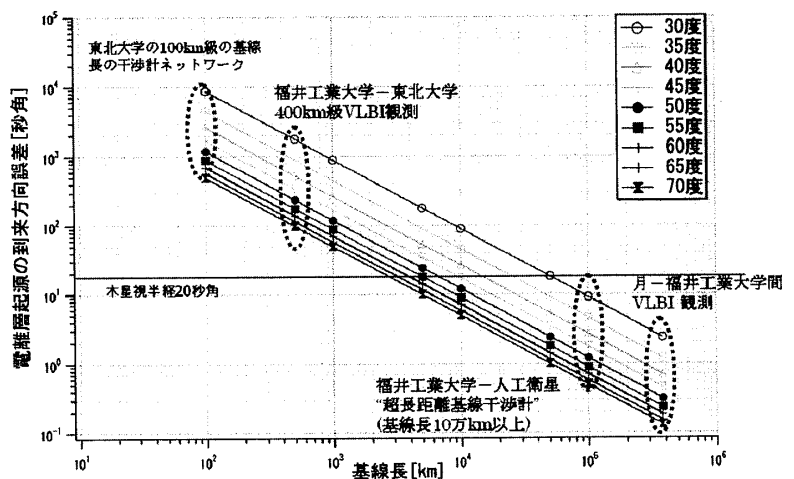


図9. 2周波数観測法を併用した場合の電離層起源の到来方向誤差の基線長に対する依存性

5. 結論と今後の展望

木星デカメータ電波の長距離基線干渉計における、遅延時間の解析法の適用可能性について過去の観測データに基づいて検討を行った。特に、遅延時間の精度を決定する周波数帯域幅、積分時間について与えられた基線長に対する適切な値を検討した。その結果、100km 基線長では帯域幅を 100kHz 以上、福井工業大学—東北大学で構成される 500km 級の基線長では 10kHz 以上の帯域幅で木星の南北を判別可能な精度が得られることが期待されることがわかった。さらに、地球電離層の影響を除去するための方法について検討した結果、基線長が 10 万 km 以上の超長距離基線干渉計と 2 周波数観測を組み合わせる手法により、絶対位置決定における地球電離層の影響を数秒角程度にまで抑えることが可能であることが示された。

今後の展望としては、福井工業大学と東北大学で構成される 400km 級長距離基線干渉計による観測による 2 周波数観測を継続すると共に、今回の検討の妥当性を確認することが必要不可欠である。また、木星デカメータ電波の電波源の絶対位置決定システムとして、地上の観測局群と人工衛星で構成される VLBI ネットワーク (図 10) について検討することが挙げられる。電波源の南北位置を判別するため、人工衛星の軌道は地心距離 10 万 km の極周回軌道とし、特に、観測システムの特長差に起因する遅延時間 τ_{sys} を求めるためのキャリブレーション信号を発生する機能と人工衛星の位置を計測するための機能についての検討が必要になる。

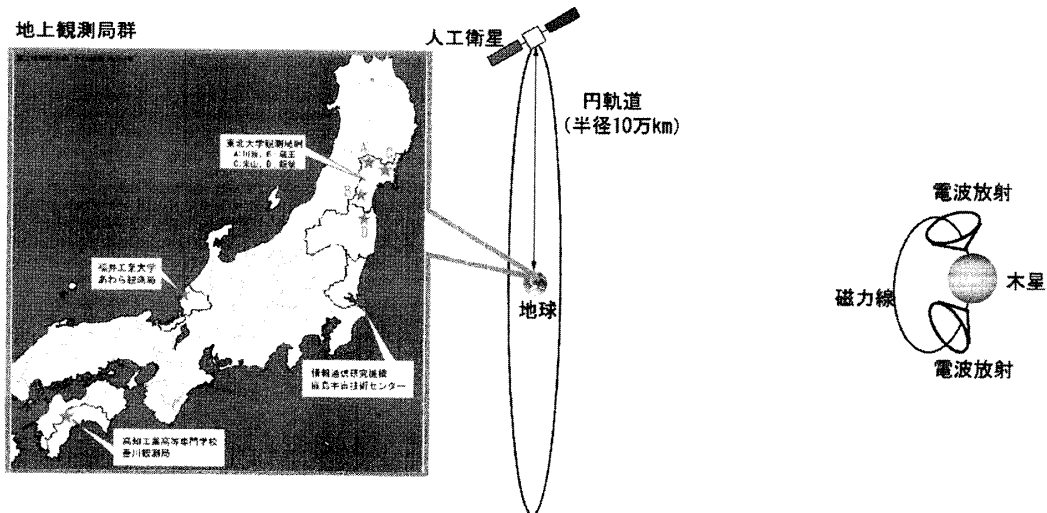


図 10. 人工衛星を用いた超長距離基線干渉計ネットワーク (左地図は、現在構築中の VLBI ネットワーク)

参考文献

[1] 飛田、東北大学修士論文、1986。
 [2] Murao, H., Identification of the Jovian decameter wave radiation sources using two-frequency interferometer network system, Ph. D. thesis, Tohoku University, 1995.
 [3] Nakajo, T., Development of the dual frequency interferometer system for studies on the source location of Jovian decametric radiation, Ph. D. thesis, Tohoku University, 2003.
 [4] 今井一雅、近藤哲郎、三澤浩昭、土屋史紀、中城智之、河野宣之、野田寛大、岩田隆浩、東純平、今井雅文、「月—地球間 VLBI に向けての e-VLBI 地球観測網による木星電波源の研究プロジェクト」、地球電磁気・地球惑星圏学会 2007 秋学会、名古屋、講演会予稿集 (CD-ROM)
 [5] Kassim, N. E., R. A. Perley, W. C. Erickson, and K. S. Dwarakanath, Subarcminute resolution imaging of radio sources at 74 MHz with the Very Large Array, *Astrophys. J.*, **106**, 2218-2228, 1993.
 [6] Kassim, N. E., T. J. W. Lazio, W. C. Erickson, P. C. Crane, R. A. Perley, and B. Hicks, The Low-Frequency array (LOFAR): Opening a new window on the universe, *Proceedings of SPIE*, **4015**, 328-340, 2000.
 [7] Takahashi, F., T. Kondo, and Y. Takahashi, "Very Long Baseline Interferometer" (in Japanese), Ohm Co., Ltd., Tokyo, 1997.

(平成 20 年 3 月 31 日受理)