

# VLBI2010 による高精度測地技術開発計画と課題

関戸 衛 平成 24 年 6 月 5 日

## 1 次世代測地 VLBI 技術 VLBI2010

測地 VLBI コミュニティでは、NASA/GSFC と MIT Haystack 観測所が中心となり、次世代の測地 VLBI が目指す目標と、そのための観測システムの提案をまとめ、その仕様を公開して議論を進めている [1]。その目標精度は、国際測地 VLBI の基線長計測精度として安定して 1mm を達成することである。これを実現するための技術開発要素として以下のような技術使用が提案されている [1]。



図 1: VLBI2010 仕様として建設されたドイツ Wettzell の Twin-Telescope の 2 つのアンテナのうちの 1 つ (左) と、NICT が VLBI2010 仕様を開発している MARBLE 小型 VLBI アンテナ (右)

**高速スリューレートの 12m クラスのアンテナ** 現在の測地 VLBI 観測の精度を制限している主な要因は、大気 (水蒸気) の遅延量の不確定さである。そのため、短時間により多くの方向の天体を観測することで、大気遅延量推定の独立性を高め、精度のよい大気遅延推定を行うことが必要となっている。短時間で一つの天体について十分な SNR を得るには高感度なアンテナが必要であるが、単に高感度の大型アンテナではスリューレートが遅くなることから、そのトレードオフとして、スリューレートの大きな 12m クラスの中小口径の電波望遠鏡で広帯域観測を可能にし感度を向上させるという基本方針である。また、電波の光学的 Path Length のアンテナ仰角変化に伴う変動は 0.3mm 以下とすることが求められている。

**2-14GHz の観測周波数を受信できる直線 2 偏波広帯域受信機** 観測帯域を拡大することは、高感度化を実現することと、高い遅延分解能の計測を行うという両方にとって重要である。しかし、VLBI2010 が想定している 2GHz - 14GHz の広帯域の円偏波受信機を実現することは困難であり、直線偏波の受信機を使うことが必要となる。現在、広帯域の受信が可能なフィードとして Rindgren Quad-Ridge Horn アンテナや、スウェーデンのシャルマー大学が開発している Evelen Feed が候補として検討されている。周波数に依存した焦点位置のソフトや、フィードロスによる  $T_{\text{sys}}$  を抑えるため冷却する必要があるなど、解決に向けた検討・検証が行われている。

大容量のデータ取得 (1GHz バンド幅 2Gbps × 2 偏波 × 4band) 観測帯域幅 1 GHz の信号を 4 チャンネル 2 偏波取得する、これが VLBI2010 の基本的な観測モードである。両偏波取得することから、データ取得レートは 1 局あたり (2Gbps × 1bit × 4ch × 2pols=) 16Gbps の記録を行う必要がある。これは、記録速度およびデータ量の両面において、従来の定常的な VLBI 観測に比べて大幅な記録系の性能が必要であり、データ記録系の開発においても、チャレンジングな課題である。

2-14GHz から任意の 1GHz バンド幅を選択観測できる UpDown Converter 広帯域受信機の問題点の一つは、電波干渉 (Radio Frequency Interference: RFI) に大して脆弱であるということである。雑音温度  $T=300K$  のありふれた雑音強度でも、2-14GHz の受信帯域幅の電力を全て受信すると Low Noise Amplifier(LNA) 入力端で -73dBm にもなる。RFI の状況は国ごと、観測局ごとに異なることが予想され、RFI を避けて観測周波数を選ぶようにするため、UpDown Converter という固定周波数のアンチエイリアスフィルタを使い、任意の周波数を選択するための装置が考案されている [2]。

直線偏波の相関処理と円偏波の相関処理への変換・2 次処理ソフトウェア 上で述べたように、16Gbps のデータ量を現実的に、実用可能な速度で相関処理するための、高速相関処理システムの開発が必要である。

また、同一の天体の直線偏光を観測した場合でも、地球上の異なる緯度・経度のアンテナからみた偏光方向角 (位置角) は異なる。従来のアンテナではこのような問題を回避できるように円偏光の信号を受信していたが、(直線偏波) 広帯域受信機では偏波方向の位置角の違いを考慮した処理が必要となる。この処理には、(1) サンプラの内部でデジタル的に円偏光を作り出す、(2) 相関処理の際に X,Y の直交偏波の組み合わせの処理結果から円偏光の相関処理結果を導出する、という 2 つの方法がある。偏波処理の機能を持つ高速な相関器の開発は必要な課題の一つである。

位相遅延量を使った観測 VLBI2010 のシステムでは、2-14GHz の広帯域の信号を使って群遅延計測を行い、その群遅延量から位相のアンビギュイティを決定して、最終的に位相遅延を観測量として使うことが想定されており、これを “broadband delay” と定義している。仮に、3-12GHz から 4 バンドを最小冗長配列で配列した場合の、遅延計測精度は SNR=20 で 6 psec 程度が期待でき、これを使って位相遅延の不定性を除くことが出来ると考えられる。具体的詳細なアルゴリズムの開発と検証が必要である。

## 2 国内外の状況と NICT の取り組みと課題

測地 VLBI の国際コミュニティでは、この VLBI2010 仕様に沿ったアンテナの建設が開始されている。米国 NASA/GSFC と MIT Haystack 観測所は、Westford の実験アンテナや GSFC の GGAO 局に冷却 Rindgren Horn 受信機を搭載して、広帯域の受信システム、Mark5C と呼ばれる広帯域記録系、UpDown Converter、広帯域 PCAL システム等を開発・検証がすすめられている。ドイツ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) の Wettzell 観測局では、広帯域のリングフォーカスシステムを採用した Twin-Antenna と呼ばれる高速駆動アンテナが 2012 年はじめに建設され、今後受信機を搭載した試験を行っていく予定となっている。スペインの Instituto Geografico Nacional(IGN) では、VLBI2010 仕様のアンテナの設計が終了し、現在 3 基のアンテナの製造が開始されている。日本でも国土地理院に VLBI2010 仕様のアンテナ建設の予算が認められ、アンテナや観測システムの検討が進められている。

NICT においては、周波数時刻比較を目的として小型 VLBI アンテナ MARBLE の開発を進めており、小型アンテナを高感度化する一環として VLBI2010 仕様に準拠した広帯域化を図っている。NICT の中期計画のスパンである 5 年間で成果を出すために、VLBI2010 の仕様である 2-14GHz の広い周波数帯が観測可能な広帯域フィードや UpDownConverter などを時間をかけて開発している余裕がないため、4 バンドの固定周波数を採用し、4 チャンネルのゼロ冗長配列となる 1:3:2 または 2:3:1 の周波数間隔となる観測周波数配列を決定して、

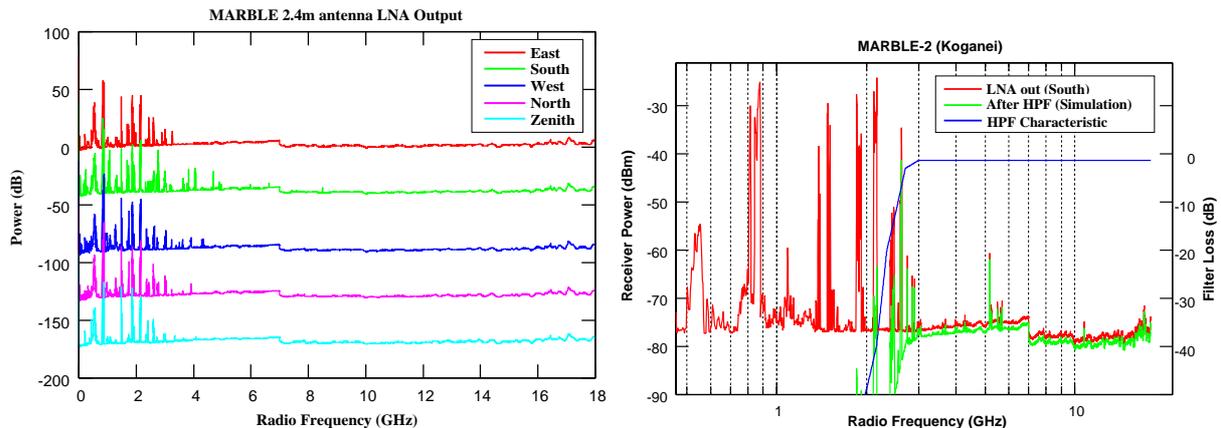


図 2: 鹿島の MARBLE 1 号機の LNA 出力をスペアナでモニタした結果 (左) と、RFI 対策として導入した 3.5GHz の High Pass Filter(HPF) の特性及び、RFI の抑圧効果を示す。実際に HPF を導入した結果、左の図に見られる 2GHz 帯以下の RFI 信号はまったく見られなくなった。

アナログ系の開発を行う計画である。観測周波数の 4 バンドを固定することで開発対象となるフィードの特性の検討が比較的容易になり、周波数変換器をより安価・短時間で開発することが可能となる。

前節で述べた VLBI2010 仕様のための技術開発項目はどれも開発課題であるが、その他の解決すべき課題の一つに Radio Frequency Intwerference (RFI) の問題がある。広帯域の受信機系はそれだけでアンプの入力パワーが高いため飽和しやすい上に、2 GHz 帯以下の周波数では、携帯電話や移動体無線、無線 LAN などを使用されており、特に近年は携帯電話の爆発的普及と、それに伴う携帯電話基地局の設置が増加し、天体観測可能な電波環境は悪化している。NICT で開発している小型アンテナシステムの MARBLE では近傍の基地局 (主として 800MHz) の影響で初段の LNA が飽和し、システム雑音温度の測定も困難な状況となった。そこで、やむを得ず LNA の前段に 3.5GHz 以下をカットする High Pass Filter(HPF) を導入し、観測が可能な状態を回復している (図 2)。このフィルタの挿入により、MABLE アンテナでは測地 VLBI で電離層遅延量の補正に使用してきた S-band の観測ができなくなっており、今後 3 GHz 以上の周波数を 4 バンド使用した VLBI2010 仕様の測地 VLBI 技術の開発が必須となっている。

今後、RFI 調査を鹿島、小金井、つくばなどで行い、慎重かつ迅速に観測に使用する 4 つの周波数帯を決定する予定である。他の VLBI2010 使用の観測局は 2-14GHz の任意の周波数帯域が観測可能な仕様となるので、NICT の周波数・時刻比較のプロジェクトで開発したアンテナも VLBI2010 との共同観測が可能であると考えている。

## 参考文献

- [1] B.Petrachenko, et al., “Design Aspects of the VLBI2010 System –Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee–”, NASA/TM-2009-214180, June, 2009. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/misc/V2C/TM-2009-214180.pdf>
- [2] Rogers,A.E.E, “Performance characteristics of Updown converter”, Mark5 Memo #59, 30 Aug., 2010.