

広帯域フィードの開発と応用

氏原秀樹 岳藤一宏 関戸衛(NICT・時空標準/鹿島)

1. 開発目的

VLBIによる遠隔地間での原子時計の比較に利用するために2台の小型VLBI可搬局MARBLEと鹿島34mアンテナの広帯域化を行なった。34mアンテナはカセグレン光学系であり、VGOSやSKAで使用されているビーム幅の広い広帯域フィードはそのままでは使用できない。したがって、新たにフィードおよびOMT（直交2偏波分離器）を開発したが、周辺のRFI環境と広帯域フィード設計の容易さ、記録データ量の削減を考慮して周波数範囲は3.2-14.4GHzとし、Gala-Vと名付けた。

小型局として使用するMRABLEは従来は市販のビームの広いフィードを使用してパラボラの主焦点で受信していたが、カセグレン用広帯域フィードが実現できたので、これへの交換とともに口径を2.4mへ拡大したカセグレンアンテナに改造し、感度の向上も図った。

2. 開発戦略

VLBI基線での感度は次式で表される。

$$SNR = \frac{\pi S}{8k} D_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2 B_w \tau}{T_{sys1} T_{sys2}}}$$

残念なことに受信機を冷却する予算はないので常温とした。主局の34m側の口径で感度を大きく稼いでいるが、小型局の口径を1.6m/1.5mから2.4mへ拡大したことで感度が向上する。もちろん限られた予算と開発期間の中で最も効果的なのはバンド幅の拡大で、従来のS/X帯のみの受信に比べると一桁以上の改善が見込める。開口能率は、うまく設計すれば80%程度に届くだろうが20-40%だったとしてもダメージは少ない。全体としてみれば能率の良い広帯域フィードを短期間で実現するのは極めて難しいので開口能率の設計目標は50%程度に留め、短期間で安く「確実に」開発できることを優先した。そのためにコルゲートホーンやマルチモードホーンなど、フィードの内部と開口面の電磁界分布が解析解で容易に表現できる方式を採用している。テーパースロットやイレブンフィードなど電磁界分布が数値解でしか表現できないアンテナは、見た目は簡単そうに見えても調整や性能改善が難しく開発期間が大幅に伸びてしまうリスクがある。

3. 開発状況

34mアンテナについては広帯域化とともに2偏波受信が可能となった。国産のRF光伝送器は不安定である上に波長多重ができず、1回線あたり偏波保持ファイバとシングルモードファイバの2本を必要とするなど不経済であったので海外製品に置き換えた。イタリアに移設するMARBLE1についても別の会社の海外製品に交換している。

今年度は春先に産総研(つくば)に設置されたMARBLE1の改修を行い、3局ともに広帯域化が達成された。既に改修済みのNICT小金井のMARBLE2と異なり、図1のようにCFRPパイプをフレーム材として使用している。これは軽量化と高剛性を狙ったものであり、後日に小金井局の改修も予定している。主鏡はコストダウンのためにアルミ板を2枚つきあわせて、へら絞りで制作されたが、たかだか15GHzの最高周波数でも応力解放による変形や素材が柔らかいことによる種々の問題があるように感じられる。イタリアに輸送する前に、さらに強化したCFRPパイプを基準に主鏡を固定し、鏡面精度の向上と調整の容易化を図る予定である。現状のMARBLE1の開口能率と雑音温度を図2に示す。



図1 改修後のMARBLE1

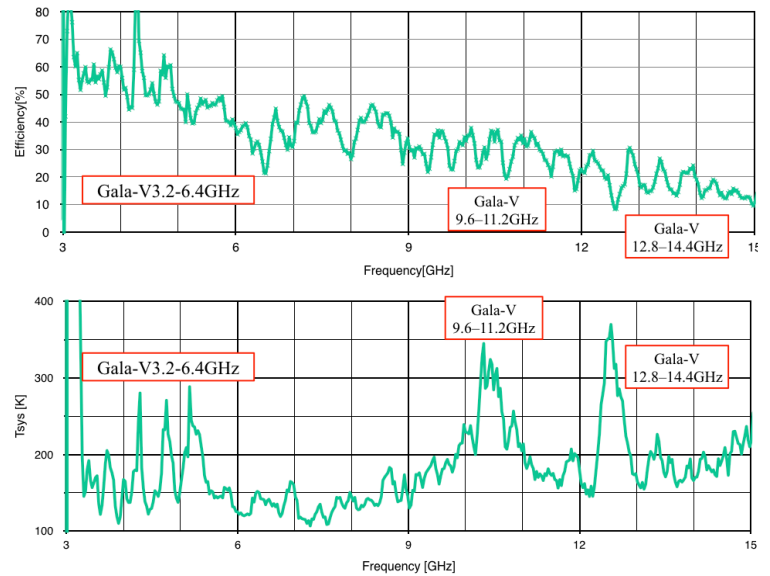


図2 MARBLE1の開口能率と雑音温度

現在、主鏡の左右でCFRPフレームに対して5mmの高低差があり、高域側での能率劣化の一因と推測される。雑音温度についてはOMTのリターンロス特性やフィードのビーム形状の問題により原子時計の比較に使わない周波数帯での劣化があるが、これは開発期間を短縮するためであり、やむを得ない。今後も逐次設計を改良して小型局でも12.2GHzのメタノールメーザの観測に使用できるようにしたいと考えている。また3.2GHz以下からのRFIの漏れ込みに由来する初段アンプの混変調雑音による温度上昇があるが、つくば局は比較的静かな方である。小金井よりも鹿島のほうが状況が悪く、遮断特性を改良したOMTを製作中である。アンプが飽和しても、雑音温度が上昇しても相関処理をするから問題ないと言う人もいるが、SNRを稼ぐために積分時間、ようするに天体あたりの観測時間が伸びてしまうという弊害があり、できるだけ多方向の多くの天体を観測して遅延時間決定精度の向上を図る我々のプロジェクトでは無視できない問題である。飽和のない理想的なアンプや光伝送系もサンプラも現存せず、開発コストも膨大であろうから、適切なフィルタおよびフィルタ特性をもたせたフィードやOMTでRFIを遮断するのが良策であろう。

4.まとめと今後

短期間かつ極めて限られた予算と人員ながら我々は世界初のカセグレンアンテナ用広帯域フィードを実現し、世界最大幅での相関処理も達成したが、壮大な目標を設定せず現実的に可能なステップアップの着実な積み重ねで得られた成果であると考え。話題になった「下町ボブスレー」は目標とする仕様を満たせなかったと言う点で致命的な失敗であり、いかに日本企業が「井の中の蛙」なのかを如実に示してくれた。広帯域システムについての開発経験のない日本の天文学者、VLBI技術者達がSKAに向けて開発を進めるなら、二の轍を踏まないようにしたい。

謝辞

広帯域フィードのメタノールメーザ帯受信対応は国立天文台共同研究開発経費(山口大 藤沢教授代表)で、NINJAフィードはNICTインセンティブ経費(FY2013)による。フィードの測定は京大METLABで行なった。

本フィードに関連する論文: Development of wideband feed for Kashima 34 m Antenna

RADIO SCIENCE, Hideki Ujihara, Version of Record online : 18 APR 2017, DOI: 10.1002/2016RS006071