

# 広帯域フィードの開発

情報通信研究機構 電磁波計測研究所 時空標準研究室 氏原秀樹

## 1.これまで

鹿島ではVLBIによる原子時計の遠隔地間での周波数比較のため広帯域受信システムを開発してきた。このプロジェクトはガラパゴスVLBIにちなんでGala-Vと命名された。既に34mアンテナには多モードホーンによる広帯域フィードが搭載され、6.5-15GHzで利用されている。これは、さらに広い帯域を目指して開発中の入れ子構造のフィード（イグアナ・フィード）の内部となる娘フィードの試作であり、市販のダブルリッジ導波管-SMA変換器を使った直線1偏波受信である。

フィードの物理サイズは使用する最大波長で決まるが数値計算での解像度は最小波長で決まる。例えば最低周波数が2.2GHz、最大周波数が14.4GHzだと比は約7であり、最高周波数の計算では最低周波数での計算に要するメッシュの $7 \times 7 \times 7 =$ 約350倍のメッシュ数が数値計算に必要となる。また、通常のフィードでは帯域中心と上限、下限程度を計算すれば済むが広帯域フィードでは受信周波数のほぼ全域での評価が必要となり、Gala-Vでは20点程度を評価対象としている。なので、総計算時間がメッシュ数と評価点数に比例すると「単純に」仮定しても、通常のフィードの2500倍の時間がかかる。他方、工作精度は最小波長で決まり、工作サイズは最大波長で決まるので、作るのも相応に難しい。「広帯域フィードは34m用を先に」と強く言われたのでとりあえず計算量が少ない半面、帯域が狭い多モードホーンを載せたが、根本的にはプロジェクト開始当初の計算リソースではこなせない課題であった。よって、イグアナフィードの全体の完成は遅れている。

## 2.今年度

かといってなにもしないわけにはいかないので、2013年度のNICTインセンティブ経費で開発した小型局用広帯域フィードを34m用にアレンジして搭載した。この経費はプロジェクト研究ではなく萌芽的な個人研究が対象であり、MARBLEなど鹿島のプロジェクトで使用するアンテナに特化せずにSKAなど広い用途を目指して応募したものである。

開発した広帯域フィードはレンズ付きホーンアンテナで、現状ではレンズに反射防止対策をしていないので表面反射による損失の問題はあるが、レンズ間隔を離すことで軽減している。これはNINJAフィードと名付けられた。使用しているレンズは凸レンズで素材にはTPXを使用した。敢えて厚めに作っていてビーム幅が細くなっている。素材単価が20-30万円ほどと高いために34mアンテナに搭載後に性能を見ながら薄くしていき、ビームを広げていくこととしたからである。ただしTPXの比重はテフロンのは半分であり、テフロンほど滑りやすくもなく高所での作業性は良い。現時点での開口能率の測定値（岳藤さん測定）を図1に示す。広帯域フィードではRFIも飛び込んでくるので所々不正な値になるが、概ね3.2-12.5GHzで能率30-40%程度である。高域側の能率低下はフィードの特性と同軸導波管変換器(WRD350D36)の特性が主因だろう。全体の能率が低いのは前述のレンズの問題と、光軸に対するフィードの傾き調整がなされていないためである。

また、直線2偏波受信用の同軸導波管変換器も製作した。片方の端子の低域側で共振が見られるが、とりあえず2016年度に性能を改善したNINJAフィードとともに34mアンテナに搭載する予定で、フィードと合わせた全長は500mm程度の見込みである。これは国立天文台共同研究開発経費によるもので、電波天文用の円偏波に対応できるように広帯域90度ハイブリッドも購入済みである。加えて、プロジェクト経費で2偏波に対応する波長多重タイプの光RF伝送器も購入した。現在使用中のものは1偏波あたり光ファイバが2本必要（しかも片方は偏波保持タイプ）で、しかも波長多重伝送ができないので、2偏波受信では計4本のファイバが必要となる問題があった。

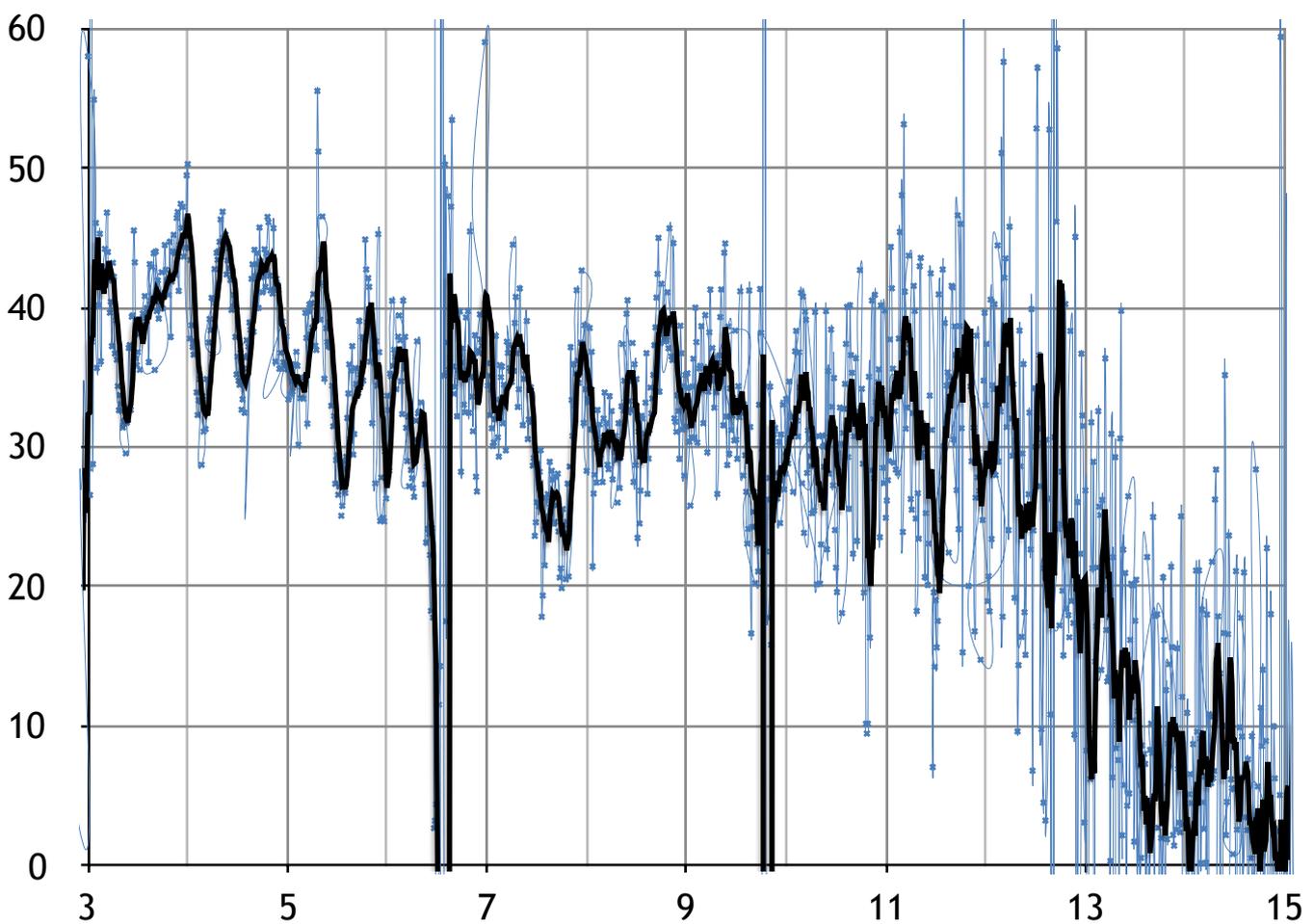


図1. NINJAフィードの開口能率(2015/8/6)

### 3.これから

Gala-Vでは34mと小型局MARBLEを組み合わせるので小型局側の改修も行う。プロジェクト開始当初はスコープ外で「余力があれば」ということであったが、電磁波計測研究所の経費配分に応募して予算を頂けた。主鏡を現状の1.5mと1.6mから両方とも2.4mに交換し、パラボラ直焦点の光学系からカセグレンに変更、これに合わせてNINJAフィードも設計して、そこそまともな性能に生まれ変わると期待している(そもそも新・旧MARBLEともにフィードと鏡面の距離が「波長に比して」近いので鏡面にあたる波面が球面にならず、性能予測に困難を抱えている)。

現MARBLEは特に高域側において開口能率が低い、製作時に入手できた広帯域フィードの性能が制限しているので、これはやむを得ないだろう。これに加えて、ケーブル捻回転部の問題も抱えている。最初から多重伝送できる普通の光RF伝送器を使っていれば、電波暗室でのアンテナ測定にも実績のあるロータリージョイントでスマートに解決できた。RFのアナログ伝送としても多芯ロータリージョイントが市販されているので、これでもよかった。出来上がったシステムを事後的に限られた予算と期限、現有機材でどう解決するかはなかなか考えどころである。

一般論として、その場しのぎの改修を重ねてきた機器をさらに改修するのは新規開発より手間がかかり、設計期間も長くて費用も嵩む。研究者にとっては時間も貴重な資源であるので、効率的に使いたい。長期的な費用対効果に鑑みれば、どこかキリのいいタイミングでシステムの断捨離も必要だろう。

### 謝辞

試作フィードと2偏波導波管類はNICT試作室が製作した。

広帯域受信系の両メタノールバンド(6.7GHz/12.2GHz)対応、2偏波受信化などの性能拡張には国立天文台共同研究開発経費(代表:山口大学 藤沢健太)のご支援をいただいた。