

電波干渉計に搭載される 6.7GHz 帯・8GHz 帯受信機の同一給電化

松本浩平

大阪府立大学大学院 理学系研究科物理科学専攻 宇宙物理学研究室

要旨

VLBI (Very Long Baseline Interferometry / 超長基線電波干渉法) における主要観測周波数の 6.7GHz と 8GHz 帯を同時受信できる受信機を提案する。6.7GHz 帯受信機と 8GHz 帯受信機はともに大きな給電部を持つ。さらに望遠鏡機器室のスペースの制約もあり、観測のたびに時間をかけて受信機を入れ替える必要があった。同一給電化を困難にするのは円偏波分離器の帯域である。私は円偏波分離器の導波管回路部の形状に工夫を加えることによって擬似的に周波数帯域を広げること成功した。

1. イントロダクション

VLBI は数千キロ離れた複数台のアンテナが受信した信号を干渉させ、電波画像を干渉縞として取り出す観測装置である。1mas 程度の超高分解能観測が可能であるが、感度があまり良くないという欠点を持つ。しかしながら観測対象を選ぶことで非常に強力な観測ツールとなる。

Class(II)メタノールメーザーはメタノール分子によるメーザー放射で 6.7GHz に強いピークを持つ。輝度が非常に高く、寿命が長い、500 個以上のメタノールメーザースポットが銀河面上で見ついている[1]、などのことから VLBI を用いたアストロメトリのツールとして注目されている。8GHz 帯ではシンクロトロン放射による連続波を観測する。主に AGN に付随するジェットの高分解能観測が行われている。

現状の VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) や JVN (Japanese VLBI Network) では 6.7GHz 帯受信機 (図 1) および 8GHz 帯受信機が別々に用意されている。ただし山口 32m 電波望遠鏡や日

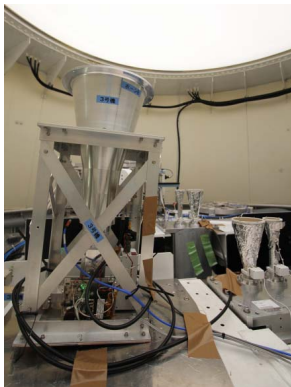


図 1 VERA に搭載されている 6.7GHz 帯受信機 (左)。右側には 22GHz 帯、43GHz 帯ホーンが設置されている。

立・高萩 32m 電波望遠鏡では 2 つの受信機を同時に設置できる空間が無いために、観測周波数を切り替えるために観測時間を割いて受信機を入れ替える必要があった。その理由を以下で述べる。

6.7GHz 帯受信機および 8GHz 帯受信機は主に 3 つのコンポーネントから構成される。まず受信機に電波を給電するためのフィードホーン、VLBI 観測は円偏波で行われるので円偏波を左右円偏波に分離し直線偏波に変換するポーラライザー、そして電波の増幅を行う低雑音増幅器 (Low Noise Amplifier / LNA) である。フィードホーンと LNA は現在比帯域 40% を超える広帯域のものが開発されているが、ポーラライザーは最も広帯域なものでも比帯域 25% とまだ広帯域化の開発されておらず、これが受信機全体の帯域を制限している。6.7GHz から 8.8GHz までの給電は比帯域が最低 27% 必要なので 2 つの帯域の受信機は個別に作られている。

本研究では 6.7GHz 帯および 8GHz 帯 (8.0-8.8GHz) を同じ給電部で受信できる受信機の開発のために最大のネックであった広帯域ポーラライザーの開発を行った。

2. 現状のポーラライザー

現在 VERA 6.7GHz 帯受信機に搭載されているポーラライザーには方形導波管にセプタムと呼ばれる階段状の金属板を挟んだリッジセプタム型ポーラライザーを採用している。これは[2]によって初めて実験的に示され比帯域 20% を超える帯域で良好な特性を持つことが示されている。実際は電波の進行方向を変えるベンドと出力導波管サイズを調整するインピーダンストランスフォーマーを組み合わせることが多い。このタイプのポーラライザーはさまざまな周波数帯で製作され 20GHz までには[3]、

40GHz帯は[4]によって報告されている。リッジセブタム型ポラライザーの帯域は低周波側では方形導波管の基本モード TE₁₀ のカットオフ周波数、高周波側では高次モード TE₁₁ のカットオフ周波数の間で表され、

$$\frac{c}{2a} < f < \frac{c}{\sqrt{2}a} \dots (1)$$

となる。aは導波管の1辺の長さ、cは光速なのでポラライザーの帯域はaのみで決まる。そこでaの値を変化させポラライザーの帯域特性を解析した。解析には3次元電磁界解析ソフトであるHFSS(Ansoft社)を用いた。結果を図2に示す。図2によると方形導波管を大きくしていくことで良好な帯域が低周波側にシフトするのが分かる。(1)式よりポラライザーの理論帯域は約34%と求まる。しかし6.7GHz帯で基本モードのカットオフによる緩やかな性能劣化、もしくは8GHz帯でセブタム内の高次モード共振による性能劣化が起こってしまい、実際の天文観測用機器として使用できる帯域は25%程度にとどまる。ゆえに単純に方形導波管サイズを変えるだけの従来の設計手法では両帯域に良好な特性を持ったポラライザーを実現することはできない。

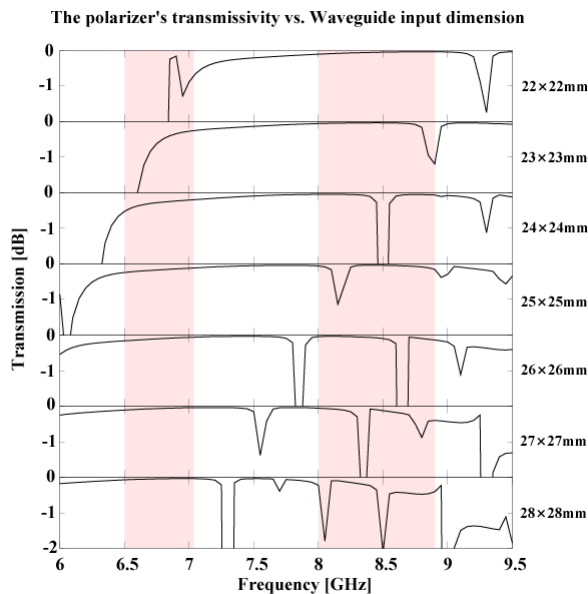


図2 方形導波管サイズに対する。ポラライザーの帯域通過特性。右端に方形導波管サイズを示した。また6.7GHz帯、8GHz帯の使用帯域をピンク色で示した。

3. 広帯域ポラライザー

本研究ではポラライザーの帯域がセブタム部の導波管形状に依存することを踏まえたうえでポラライザーのセブタム部に用いていた導波管を従来の直線形状(図3)からテーパ形状にしたポラライザーを新たに開発した(図4)。シミュレーションおよび試作したものを測定した結果を図5に示す。なお測定にはベクトルネットワークアナライザを用いた。シミュレーションおよび測定の結果、新たに考案したポラライザーは6.7GHz帯での基本モードのカットオフによる性能劣化が少ない。また8GHz帯に発生しがちであった高次モードによる共振が7.6GHzにシフトしたなどの非常に興味深い特性を持っており(図6)、セブタム部にテーパ形状を用いたポラライザーは6.7GHz帯と8GHz帯の両帯域(比帯域30%)に対してインサクションロス0.3dB以下という良好な特性を得ることができた。

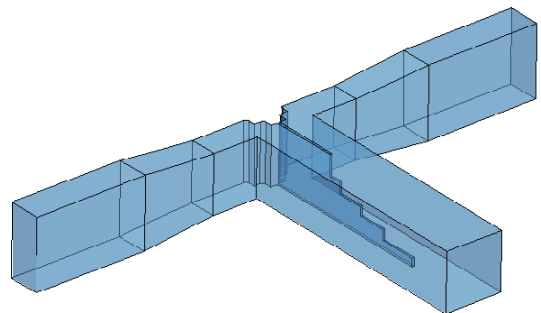


図3 従来のポラライザーのモデル図。セブタム部にはE面バンドとテーパー変換器が接続される。

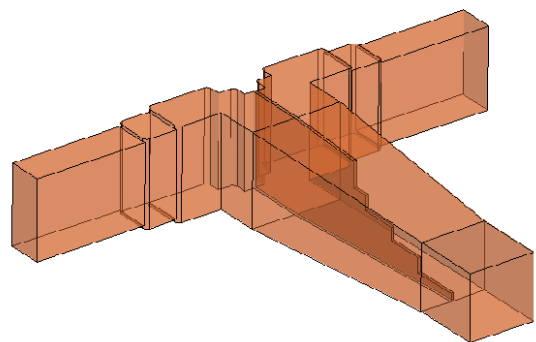


図4 新たに考案した広帯域ポラライザーのモデル図。セブタム部の導波管は1辺23.6mmから33mmへのテーパ形状をしている。セブタム部にはE面バンドおよびステップ変換器が接続される。

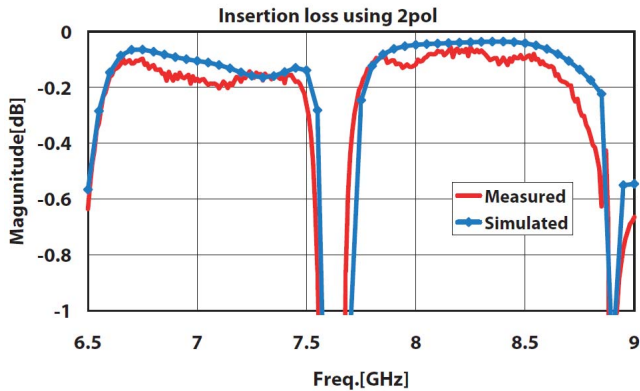


図5 広帯域ポーライザーのインサージョンロス。赤線がネットワークアナライザで測定した結果。青線が電磁界シミュレーションを用いた計算値。

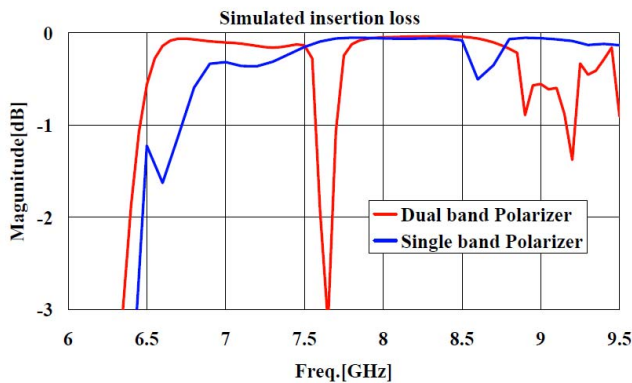


図6 ポーライザーのインサージョンロス。同じ導波管径 a で直線形状とテーパ形状のセプタム部を比較した。赤線がテーパ形状。青線が直線形状。

3. 広帯域ポーライザーを用いた受信機の評価

VERA 6.7GHz 帯受信機を使い、新たに開発した広帯域ポーライザーの評価を行った。評価は受信機雑音温度に対して行い、評価方法は受信機を常温黒体と液体窒素で冷却した 77K の黒体を向けたときの出力差をスペクトラムアナライザにて評価する HOT-COLD 法を用いた。その結果を図 7 に示す。

図 7 によると広帯域ポーライザーは 6.7GHz 帯、8GHz 帯いずれも 80K 程度の低雑音性能を達成している。使用した LNA が 60K 程度の雑音を持つので良好な性能だといえる。特に 8GHz 帯ではその違いは顕著である。まず従来の 6.7GHz 帯ポーライザーでは 8GHz 帯では高次モードが発生し伝送ロスが増大するため雑音温度が 100K 程度と高くなっている。そして従来のポーライザーでは 8.1GHz にポーライザーの共振に由来する雑音温度の高いピークが存在する。

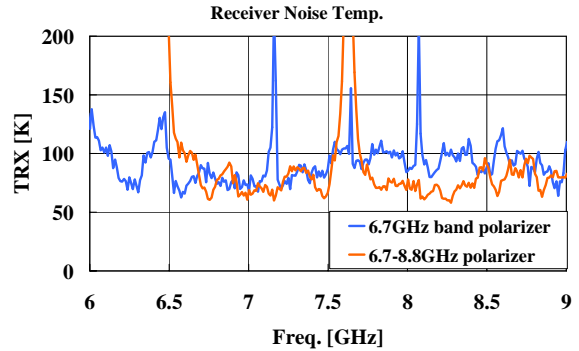


図7 受信機雑音温度の測定結果。青線が従来の 6.7GHz 帯ポーライザー。赤線が新たに開発した広帯域ポーライザー。

4. まとめと今後の展望

VLBI 観測用受信機の広帯域化の要はポーライザーの帯域である。本研究では広帯域ポーライザーを考案し試作および評価を行った。セプタム部の導波管形状を従来の直線形状からテーパ形状に変更することで 6.7GHz 帯側での伝送ロスの低減、8GHz 帯側での高次モード共振の回避ができることを発見し、両帯域に対して良好な特性を持つポーライザーを開発した。またポーライザーを受信機に搭載して試験を行ったところ両帯域で 80K 程度の良好な雑音温度特性を得て、ポーライザーの有効性を示した。本研究で開発したポーライザーは導波管回路なので冷却することで更なる低雑音性能が見込まれる。本ポーライザーを用いた受信機は VERA のほか、山口 32m 電波望遠鏡や日立・高萩 32m 電波望遠鏡にも適用可能であり、受信機入れ替えの手間を省くことで望遠鏡稼働効率の向上が見込まれる。

参考文献

- [1] M. R. Pestalozzi et al., "A general catalogue of 6.7-GHz methanol masers. I," *A&A*, 432, pp737-742, 2005.
- [2] M. H. Chen et al., "A wide-band square-waveguide array polarizer," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-21, pp.389-391, 1973.
- [3] J. Bornemann et al., "Ridge waveguide polarizer with finite and stepped-thickness septum," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.43, no.8, pp.1782-1787, 1995.
- [4] M. Kaidenet al., "Septum polarizer for Ka-band H-shaped rotary joint," *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, vol.30, no.7, pp.727-737, 2009.