

称号及び氏名	博士（理学） 海田 正大
学位授与の日付	平成21年 6月30日
論文名	「電波干渉計 VSOP-2 のための円偏波ポーライザーの研究開発 (Research and Development of Circular Polarizer for Radio-Interferometer VSOP-2)」
論文審査委員	主査 小川 英夫 副査 溝口 幸司 副査 前川 寛和

論文要旨

1 はじめに

宇宙の歴史と進化は、ビッグバン以降加速膨張してゆく時空において、小さな密度ゆらぎが成長して構造が形成される過程である。宇宙における構造化とは、自己重力によって高密度化する収縮と、天体の集団が大規模化してゆく合体という過程である。後者の合体は、ダークマターと恒星とガス雲の集合である銀河、銀河と銀河間ガスやダークハローの集団である銀河団、さらに超銀河団といった大規模構造を形成してきた。一方前者の収縮は、分子雲や恒星、惑星や白色矮星、中性子星、そしてブラックホールと、様々な階層にある多様な天体を誕生させた。宇宙における収縮は、エネルギー発生においても重要な要素である。恒星での核融合反応は収縮によってガスが高密度化した結果であるし、ブラックホールは降着する物質の重力エネルギーを解放することで、活動銀河核やX線星として輝いている。収縮過程とそれに伴うエネルギー発生メカニズムへのアプローチは、様々な天体の現象や起源を明らかにする上で重要である。

そのための有力な手法であるVLBI(Very Long Baseline Interferometry)は複数のアンテナを合成して一つの巨大な電波望遠鏡とする技術であり、天文学において最も高い空間分解能が得られる。望遠鏡の進化の歴史は高分解能獲得への歴史でもあり、世界初の電波天文衛星「はるか」を用いたスペースVLBIである電波干渉計VSOP(VLBI Space Observatory Programme)では、周波数5GHzで0.4ミリ秒角という高分解能を達成した。この分解能は人間視力(約1分角)に比べて150万倍の向上であり、近傍の活動銀河核において数百シュバル

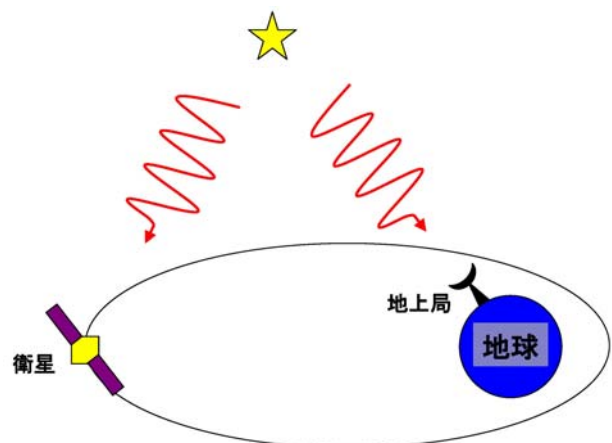


図1 VSOP-2計画の概要。人工衛星の電波望遠鏡と地上の電波望遠鏡で干渉計を構成する。

ツシルト半径のオーダーに到達した。

現在計画が進められている VSOP-2 は 38 マイクロ秒角という高い空間分解能を用いて、宇宙の極限領域を解像しようというスペース VLBI 計画である (図 1) この分解能は近傍の星生成領域で太陽半径程度に達し、降着円盤から原始星への質量降着と角運動量輸送の現場と考えられる磁気圏を初めて解像できる。また、近傍の活動銀河核で 10-100 シュバルツシルト半径程度に相当し、ブラックホールの周囲で重力エネルギーを放射やジェット加速に変換する現場である降着円盤を、初めて捉えることができる。このように VSOP-2 による高分解能撮像は、宇宙の収縮過程に伴う天体生成・エネルギー発生 of のしくみを一段深く理解する、重要なステップとなることが期待される。さらに VSOP-2 では活動的天体でエネルギー変換に大きな影響を与える磁場の本格観測を行うことを予定している。そのためには、両偏波を同時測定する機能が必要となる。

本研究はこのために新たな左右両偏波に分離を行う円偏波ポーライザーの開発研究を主な内容としている。

2. VSOP-2 地上電波望遠鏡のための 22 GHz 帯円偏波ポーライザーの開発

VSOP-2では主要な観測テーマとしてブラックホールから発生するジェット構造に対する磁場の三次元構造の解明が挙げられる。そのためには、右旋、左旋の両円偏波観測による偏波角及びファラデー回転量度の観測が不可欠となる。そのために、高性能且つ広帯域のポーライザーの開発が要請されていた。本研究では、VSOP-2干渉計のための22 GHz帯円偏波ポーライザーの開発を行った。

電波天文のミリ波領域における円偏波分離の方式については、主に3つの方式が存在する (図2)。1の方式は1/4波長板を用いた方式で矩形導波管のEベクトルの向きと同じ向きの片偏波のみを受信する。2の方式は1/4波長板を用いている点と同様であるが、直交偏波計 (OMT) を用いる事によって両直交偏波の受信が可能となる。よって右旋、左旋の両円偏波が受信可能となる。3の方式は導波管型の円偏波ポーライザーを用いる方式である。この方式では1/4波長板の代わりに、導波管内にて位相を90°ずらし両円偏波を分離している。この方式では、光学系の1/4波長板での損失が無いにより効率的に円偏波の分離が可能となる。本研究では3つめの方式である導波管型セプタムポーライザーの開発を行った。

地上電波望遠鏡用のポーライザーに要求される周波数帯域は 20.5-25 GHz である。これは、VSOP-2 の観測帯域 20.6-22.6 GHz、同周波数帯の主な輝線である 23 GHz の水メーザー、23-25 GHz に存在するアンモニア輝線をカバーする帯域が単一の電波望遠鏡としても用いられる地上電波望遠鏡には求められるからである。一方、同周波数帯域では帯域が上記のような広帯域な性能を有するものは存在しない。そこで我々は、帯域 20%の今迄にない広帯域ポーライザーの開発を行った。

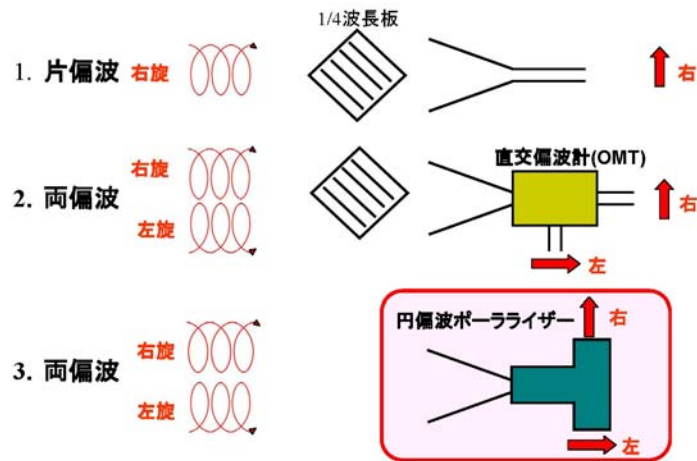


図2 電波天文のミリ波領域における円偏波分離方式。1の方式は1/4波長板を用いた方式で矩形導波管のEベクトルの向きと同じ向きの片偏波のみを受信する。2の方式は直交偏波計 (OMT) を用いる事によって両直交偏波の受信が可能となり、よって両円偏波が受信可能となる。3の方式は本研究である導波管型の円偏波ポーライザーを用いる方式である。

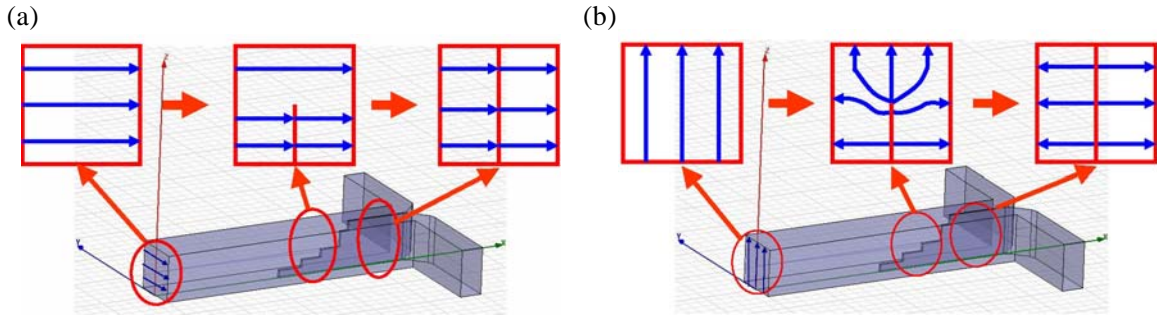


図 3(a)セプタム部での水平偏波の振る舞い。信号は 2 分岐されるが、位相及び伝送モードに変化はない。(b)セプタム部での垂直偏波の振る舞い。方形導波管の入力時は TE_{10} 伝送モードであるが、セプタム部で TE_{10} 及び TM_{01} モード、両高次モードが混在したモードとなる。この時管内波長が長くなるために水平偏波に対して位相が遅れる。

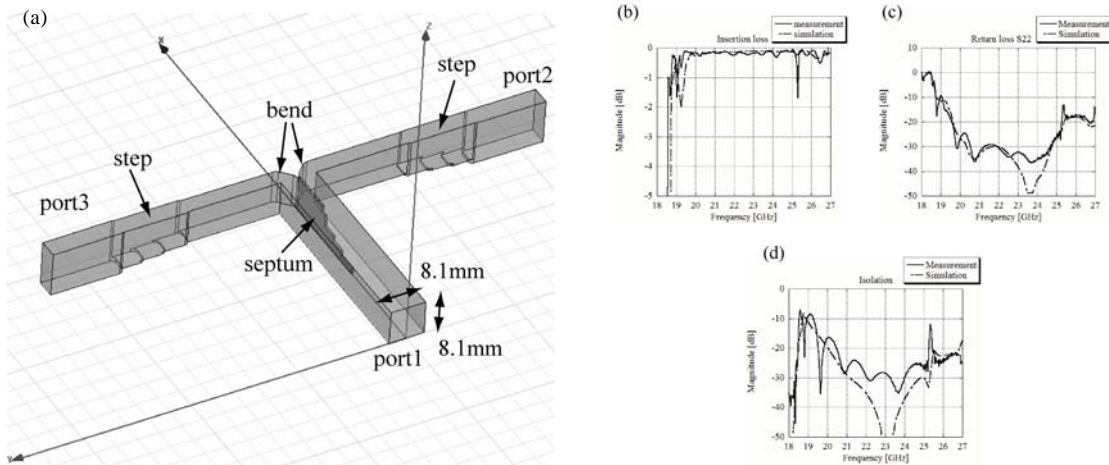


図 4 (a) ポーライザの構成。(b) 22 GHz 帯ポーライザの性能測定の結果、インサージョンロス S21 (c) リターンロス S22 (d) アイソレーション S32。

設計は 3 次元電磁界解析ソフト HFSS を用いて行った。図 4 (a) に設計したポーライザの構成を示す。ポーライザは円偏波を分離するセプタム部、導波管の向きを 90° 変えるベンド部、出力導波管のサイズを標準サイズに変更するステップ部で構成される。このうち性能に最も重要なのは両円偏波を分離するセプタム部である。円偏波は位相が 90° ずれた二つの直線偏波の合成であり、逆に位相を 90° ずらす事により直線偏波に分離可能である。セプタム部では水平偏波に対して、垂直偏波の位相が 90° 遅れる事により円偏波を分離する。図 3(a)に水平偏波のセプタムを通過する時の振る舞いを示す。水平偏波は TE_{10} モードで方形導波管を伝送し、セプタム部に入力される。セプタム部にて信号は 2 分岐されるが伝送モードは変わらずに矩形導波管へと出力される。よって位相の変化もない。一方垂直偏波の場合を考える。port 1 より TE_{01} モードで入力した垂直偏波は、セプタム部にて TE_{01} モードと TM_{01} モード及び高次モードが混在したモードへと変換される。ここで水平偏波に対して位相が $\pm 90^\circ$ に変換されるため、セプタムを通過後は水平偏波と同じ TE_{10} モードとして矩形導波管内を伝送する (図 3 (b))。入力である port 1 から入力した右旋、左旋の円偏波はセプタム部で分離され port 2、port 3 へ伝送される (図 4 (a))。

製作したポーライザの性能を測定した結果を図 4 (b) ~ (d) に示す。開発したポーライザは帯域 20.5–25 GHz において、インサージョンロス平均 0.15 dB、リターンロス 20 dB 以上、アイソレーション 20 dB 以上の良好な性能を獲得し、今迄にない広帯域なポーラ

イザーの開発に成功した。これは VSOP-2 の性能目標を満たす性能であり、また地上電波望遠鏡の観測要求を満たす帯域を同時に得る事ができた。

3 VSOP-2 のための 40 GHz 帯ロータリージョイントの開発

本研究では 22 GHz 帯でのポーライザー開発の経験を生かし、その応用的な研究として VSOP-2 搭載用に 2 台の円偏波分離器を直列に接続する方式のロータリージョイントを提案した。電波天文では、野辺山観測所の旧 17 GHz 太陽干渉計や名古屋大学空電研の旧 3.75 GHz・9.4 GHz 太陽干渉計等に用いられていた。導波管型ロータリージョイントに求められる性能は、固定側の矩形導波管から入力した電波を、機器を回転させた状態においても低損失、低位相変動特性を維持しつつ、出力の矩形導波管へと導く事にある。

今回我々が提案したロータリージョイントは、2 台の円偏波分離器を直列に接続する方式である (図 5)。この方式は広く用いられている TM 方式と比較した場合大きく 2 つの利点がある。(1) 帯域が最大 20% (今回は約 15%) と TM 方式の 10% よりも広くとれる。(2)

(a)

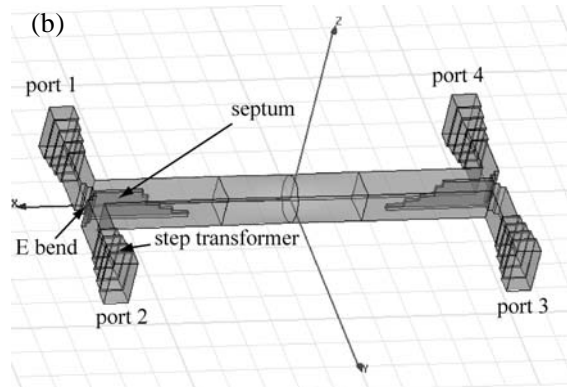
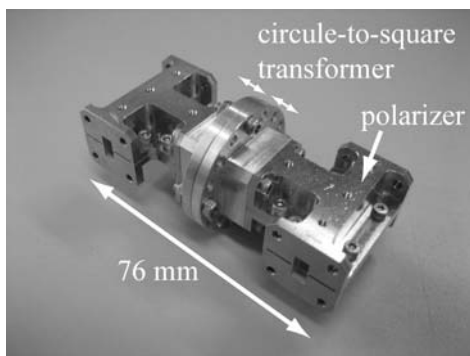


図 5 (a) 直列に接続したポーライザーの写真。(b) H 方式ロータリージョイントの構成。

1 系統の信号しか扱えない TM 方式に対して、独立した 2 系統の信号を伝送する事ができるという点である。但し放射状の電界分布ではないため回転に伴い位相が変化する。よって後に位相の補正が必要になる。

製作したロータリージョイントは、帯域 35–41 GHz において、インサーションロス 0.8 dB 以下、リターンロス 15 dB 以上、アイソレーション 17 dB 以上、位相変動 2° p-p 以下の性能を得た (図 6)。これは従来一般的であった TM_{01} 方式と比べ、帯域は約 1.5 倍取れており、2 信号を独立に伝送できる他の型では実現不可能な特性を持つことに成功した (これを H 方式という)。

4 まとめ

本研究の成果について、以下にまとめる。

1. VSOP-2 の地上電波望遠鏡に搭載する 22 GHz 帯のポーライザーの開発を行った。VSOP-2

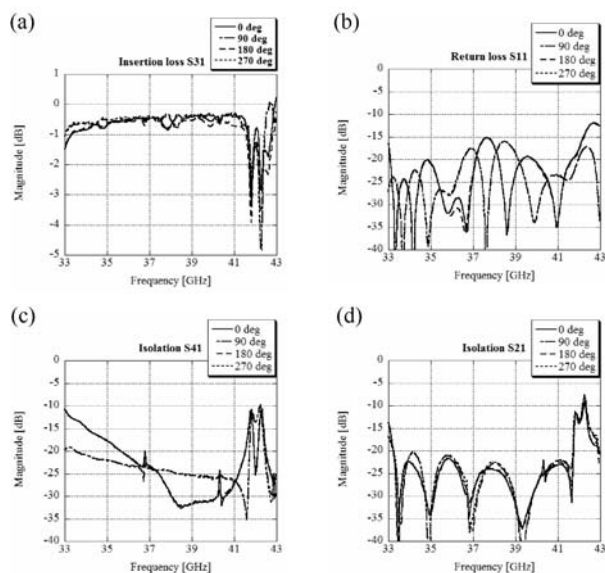


図 6 各回転角時の性能測定の結果 (a) インサーションロス S31 (b) リターンロス S11 (c) アイソレーション S41 (d) アイソレーション S21。

では磁場の三次元構造の解明が重要な観測テーマであり、そのためには右旋、左旋の両円偏波観測を可能とするポーライザーの開発は不可欠である。開発の結果、今迄に得られていない 20%の広帯域周波数性能を持つポーライザーの開発に成功した。これは VSOP-2 の性能目標を満たす性能であり、また地上電波望遠鏡の観測要求を満たす帯域を同時に得る事ができた。

2. VSOP-2 に搭載するセプタム型のポーライザーを用いた 40 GHz 帯 H 方式ロータリージョイントを新たに提案した。40 GHz 帯において製作・評価を行った結果、従来一般的であった TM_{01} 方式と比べ、帯域は約 1.5 倍の広帯域化に成功し、2 信号を独立に伝送できる他の型では実現不可能な特性を持つことに初めて成功した。

審査結果の要旨

本論文はブラックホール等の観測を目的としている人工衛星搭載電波干渉計 VSOP-2 (VLBI Space Observatory Programme-2) に用いられる広帯域円偏波ポーライザーの開発に成功し、さらにこのポーライザーを応用することにより新型のマイクロ波ロータリージョイントの開発を可能にしたもので、その内容は以下の通りである。

VSOP-2 では、その存在が間接的証拠で確実視されているブラックホールの大きさ、構造を直接観測することを主な目的とする。さらに前回の人工衛星搭載電波干渉計「はるか」では片円偏波しか観測できなかったのに対し、今回は両偏波同時観測を可能とし、高エネルギー現象生成のもとと考えられている磁場、プラズマの構造を観測する予定である。

本論文が提案している円偏波ポーライザーはこの磁場観測を目的としている。従来の円偏波ポーライザーの帯域幅、挿入損失、アイソレーション等の特性は、電波望遠鏡の仕様を満足するものではなかった。本論文ではセプタムと呼ばれる導波管内回路の電磁界解析を行うことで、周波数帯比では 2 倍の 20%を得ることに成功した。さらに挿入損失、アイソレーション等について VSOP-2 観測を可能とする特性を得ることができた。本論文ではその構造、製作方法についても提案している。この方法は従来の電鑄方式とは異なる切削方式によるものであり、安価で迅速に製作が出来ることを特徴としている。

さらに本論文では広帯域円偏波ポーライザーを直列に 2 つ接続することで新型のマイクロ波ロータリージョイントの開発に成功した。これは既存の円形 TM_{01} 方式や同軸 TEM 方式と比べると 2 周波の信号を独自に通過させることができ、さらに従来の 2 倍の広帯域性を得ている。この方式は VLBI 観測では現在未開拓であるミリ波周波数帯への拡張性をも備えており今後多くの応用が期待される。

今回開発された 20GHz 帯セプタム型円偏波ポーライザーは VSOP-2 地上観測局である山口 32m、高萩 32m 電波望遠鏡への搭載が既に予定されている。40GHz 帯の新型ロータリージョイントの提案は VSOP-2 搭載の地上交信用アンテナのマイクロ波ジョイントの候補として現在検討されている。この新たに開発された円偏波ポーライザーは多くの可能性から注目を集めているテラヘルツ帯での応用が期待される。円偏波ロータリージョイントの開発は、全く新しいマイクロ波立体回路として世界に先駆けて行われたものであり高く評価できる。

これらの成果はこれからの電波天文学ばかりではなく、プラズマ診断、分子分光、リモートセンシング、通信工学等幅広い応用が期待される。

本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものと判断した。