

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540234

研究課題名(和文) 100～500GHz帯VLBIに用いる高効率円偏波受信機の開発および搭載

研究課題名(英文) Development and installing High-effective circular polarized receiver for 100-500GHz VLBI observation

研究代表者

小川 英夫(Ogawa, Hideo)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20022717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：電波天文観測において最も高い角度分解能を得られる VLBI 観測を実現するために必要となる円偏波ポラライザーについて、従来問題となっていた対応帯域幅の狭さ、および86GHz帯以上の高周波化における各特性の劣化の原因追求と解決策を検討した。

この結果、C-X、Ka Band における比帯域 10%、24% の広帯域化達成に加え、セプタムと呼ばれる階段状金属障壁部を4段目で分割する新たな製作手法を考案したことで86、230GHz 帯ポラライザーの特性安定化、及び天文観測への実用化を達成した。これにより各帯域における VLBI 観測の実現・発展への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Waveguide-Septum type Circular Polarizer, which is needed on VLBI Observation - the way to achieve the highest angular resolution -, has some defects; narrowness of usable frequency band-width, and the degradation of its frequency characteristics at over 80 GHz Band. In our study, we have addressed to improve, resolve those defects, and the results are; 1. Broaden 10% to 24% of fractional bandwidth (bandwidth / center freq.) at CX and Ka Band (6-9 GHz, 22-32 GHz), 2. Invent the solution to suppress causing degradation, and stabilize its frequency characteristics at 80 and 230 GHz band, 3. Put 230GHz band deliverables into practical use on radio-observation. We expect that these results are led to improve and expand VLBI observation on each band, especially not possible until now.

研究分野：電波天文観測機器開発

キーワード：電波天文学 導波管 セプタム型 円偏波 ポラライザー VLBI観測 広帯域化 高周波化

1. 研究開始当初の背景

電波天文学において、複数の望遠鏡の観測結果の相関を検出することで極めて高い角度分解能が得られる VLBI 観測技術は、ブラックホールシャドウや AGN といった極小天体の観測に対して非常に有効な手法である。ただし VLBI 観測を実現するためには観測信号の受信偏波面をすべての望遠鏡で統一する必要があり、左右円偏波を分離受信することが半ば必須である。ところが電波信号の検波器（受信機）は通常、直線1偏波にしか感度を持たない。従って VLBI 受信機には円偏波→直線偏波への変換機構が必要である（図1）。

我々はいくつかの変換機構のうち ① 左右円偏波をそれぞれ分離出力でき、② 部品点数が1点でよく ③ 導波管回路であるため信号伝送損失が少ない「導波管セプタム型円偏波ポラライザー」の採用が最も有利であると考えた。しかしながら、この円偏波ポラライザーは申請時点では 40 GHz 帯程度までの実用に留まっており、100 GHz 以上の高周波数帯域では開発例が皆無という状況であった。また比帯域（対応周波数帯域幅）も 10% 以下と狭く、観測周波数の多様性に対していくつもの専用受信機を要していた。このため VLBI 観測望遠鏡では、観測及び受信機運用の効率が軒並み低い状況であった。

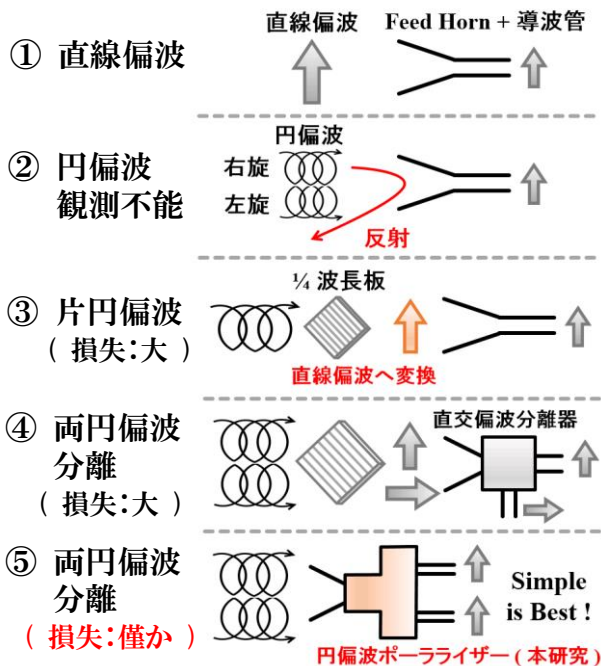


図1: 円偏波分離手法一覧

①: 通常の実受信機では、直線1偏波しか検出できない。②: 左右円偏波を通常受信機に入力しても受信効率が悪く、左右分離も出来ない。③: テフロン等の誘電体で出来た薄板を加工した 1/4 波長版という光学素子を用いると、特定帯域にて左右円偏波が水平・垂直偏波に変換されるので左旋・右旋どちらかの円

偏波を検出可能。④: 1/4 波長版と直交偏波分離器を組み合わせることで、左右円偏波を分離検出可能であるが、損失が大きい。⑤: 円偏波ポラライザーを用いれば、僅かな損失でシンプルに左右円偏波を分離できる。

2. 研究の目的

本研究ではまず比帯域の向上を狙い、20%程度を目標とした 43 ~ 230 GHz 円偏波ポラライザーの開発を進め、この成果を応用することで C+X Band を始めとしたいくつかの専用受信機を統合することが出来ると考えた。また、86 GHz 以上の比較的高周波数帯域用の円偏波ポラライザーを実用化することで、ブラックホールシャドウの検出等に必須といわれる 230 GHz 帯以上での Sub-mm VLBI 観測の早期実現に貢献する事を狙った。

3. 研究の方法

我々は 3D-FEM 電磁界解析ソフト HFSS を用いた、各種導波管回路の設計について一定の経験を持っており、導波管回路である円偏波ポラライザーの設計に対してはこれを最大限活用した。また、導波管回路を切削加工する業者・技術者との綿密な打ち合わせを重ねることで加工上問題となる要素を特定し、これをシミュレーション解析にフィードバックする事で、製作物の周波数特性を従来以上に設計値に近づくようにした。

一方で、製作した導波管回路の周波数特性測定手法については、国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT) が所有する 100 GHz 帯以上で高精度に通過・反射量を測定可能なベクトルネットワークアナライザー (VNA) を利用させていただいた。

4. 研究成果

VNA による周波数特性評価が可能となったことで、我々はシミュレーション設計・切削加工の工夫及び技術向上をより科学的に評価・分析できるようになり、研究開始以前とは比較にならないほど高効率・高精度での導波管回路設計が可能となった（図2）。

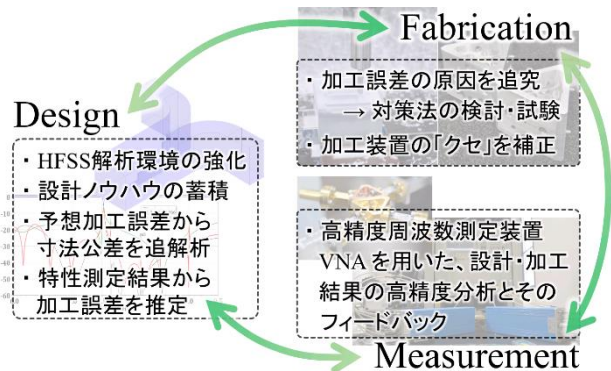


図2: 設計・加工・評価の相互向上ループ

この結果、我々は 86 GHz 帯以上の高周波円偏波ポーラライザの実現を困難にする原因が、セプタムと呼ばれる階段状の金属障壁の最上面と蓋との間に生じてしまう僅かな隙間であることを突き止めた。加えてこの解決策として、図 3 に示すように導波管回路の分割方法を回路/蓋 → セプタム 4 段目/4 段目～蓋と変更し、問題となる隙間が生じる位置をずらすことで、周波数特性の劣化を非常に大きく抑制できることを 86, 230 GHz 帯にて実証できた (図 4,5)。

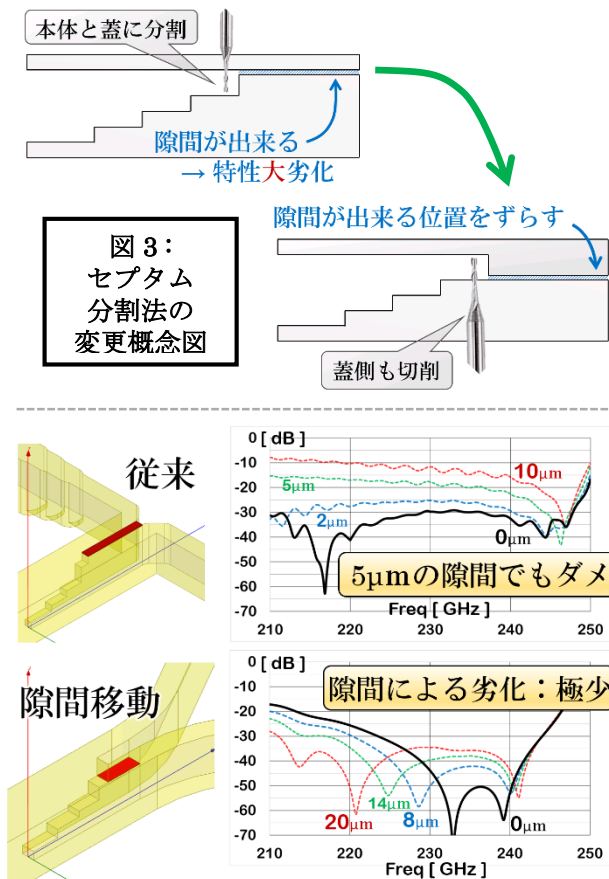


図 4: 230GHz 帯円偏波ポーラライザのセプタム隙間の大きさに対する交差偏波分離特性劣化の比較グラフ

従来手法では、5 μ mの隙間でも顕著な劣化が見られ、この回避は極めて困難であった。本研究における隙間移動モデルでは、隙間が大きくなると-20dB以下の帯域幅がむしろ広くなり、隙間が生じることを許容している。

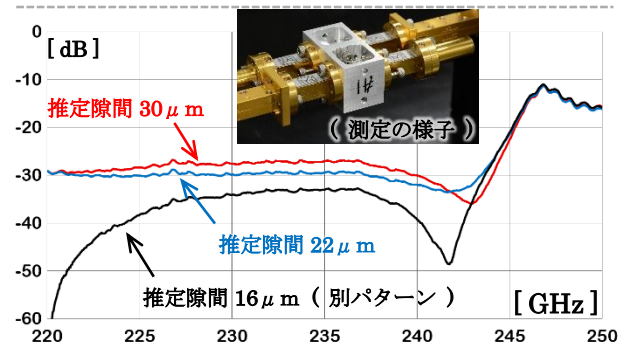


図 5: 230GHz 帯円偏波ポーラライザの交差偏波分離特性の実測結果

(図 5 の解説) 製作した 230GHz 帯ポーラライザの交差偏波分離特性を VNA で実測した結果。いずれも設計値とは相違が見られたが、目標とする帯域にて-25dB以下を維持しており、隙間による特性劣化を充分抑制できている。それぞれの推定値は、測定結果について隙間の出来方の違いまで考慮したフィッティング解析した結果である。

また、230 GHz 帯ポーラライザに関しては、我々が開発・運用している府大 1.85m 望遠鏡受信機への搭載と半年間の科学運用において全く問題が無いことを実証できたため、世界初の 230 GHz 帯ポーラライザの天文実用例となった。また、この成果により台湾中央科学院がグリーンランドに建設中の Sub-mm VLBI 観測用 GLT 望遠鏡受信機への搭載が決定し、他の Sub-mm VLBI 望遠鏡への採用も検討される状況であり、既に実用展開まで進めることが出来ている (図 6,7)。

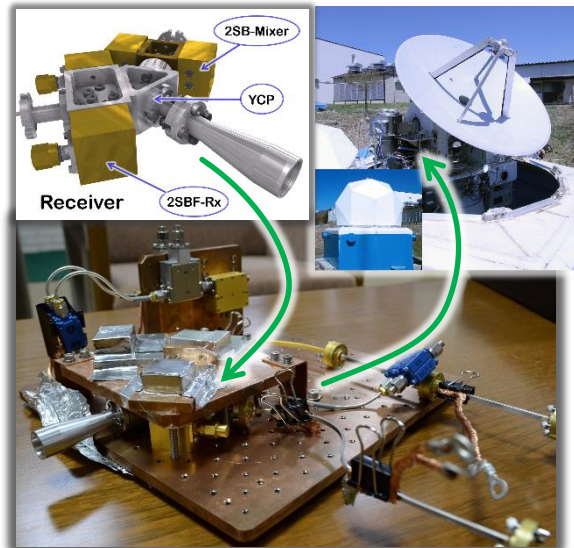


図 6: 1.85m 望遠鏡搭載 円偏波分離受信機

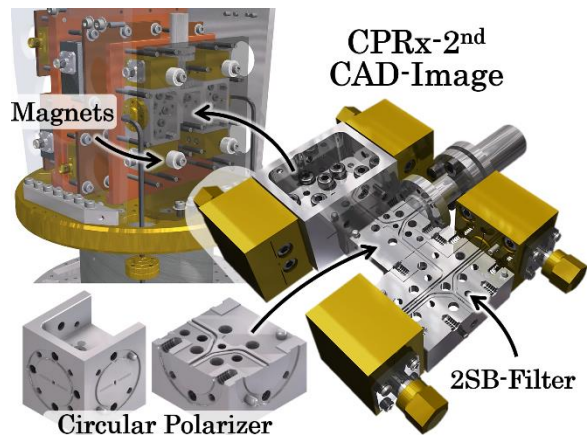


図 7: GLT 望遠鏡搭載 円偏波分離受信機

上記の図はすべて CAD イメージであるがコンポーネントは既にほぼ揃っており現在は受信機の組み立て段階にある。

一方で比帯域の拡張についても、図 8 に示したように 21.4-27.3 GHz (比帯域 24%) と目標値を超える広帯域ポーラライザーを設計できた。これは、共振無しの方形導波管セブタム型円偏波ポーラライザーの理論限界値に近く、ポーラライザーの広帯域化は十分に達成できたと考えている。また、本ポーラライザーでは 30.5-33.0 GHz (8%) でも実用可能である。これを利用することで、例えばこれまでは 32GHz 帯受信機のみを持っていた望遠鏡でも 22-25GHz 帯での VLBI 観測が可能となるため、これまで想定していなかった望遠鏡との VLBI 基線増加に寄与できる。

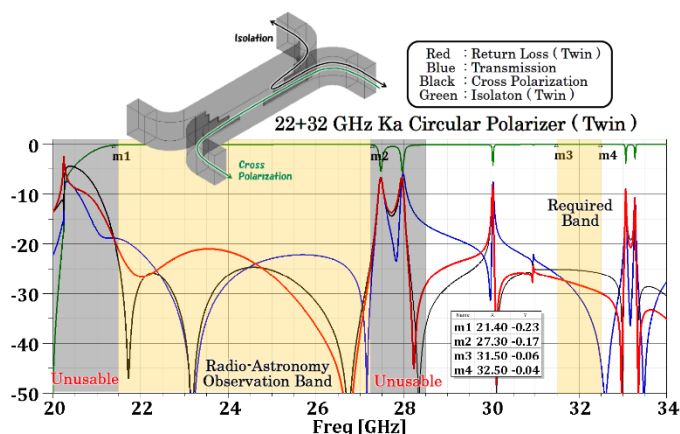


図 8 : 22-26 + 32 GHz 帯ポーラライザーの設計結果 (2 個反転直結の場合)

円偏波ポーラライザーの設計・評価においては、ポーラライザー単体と、2 個を反転直結した場合の 2 種類を考慮する必要がある。図は 2 個直結の場合で、挿入損失・交差偏波分離度が評価できる。結果を見ると、21.4-27.3 GHz および 32GHz 周辺にて交差偏波分離度 -20dB 以下と、充分実用可能である。28GHz 付近の特性劣化は方形導波管の高次モード共振によるもので、現状では不可避の現象と考えられる。

(まとめ)

円偏波ポーラライザーの設計・加工・評価手法を洗練したことで、目標とした比帯域拡張、及び高周波化をほぼ完全に達成できた。また、230 GHz 帯ポーラライザーに関しては実際に科学運用に用いたことで世界初の実用例となり、Sub-mm VLBI 観測への貢献までを実際に達成することが出来た。これらの成果を元に、今後も各望遠鏡への貢献を深めていく所存である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 10 件、国際 5, 国内 5)

① 長谷川豊、小川英夫ほか「府大 1.85m 望遠鏡の受信機開発 2014」、日本天文学会 2015 年春季年会、2015/03/18, 大阪 大阪大学 (230 GHz ポーラライザー観測結果)

② Yutaka Hasegawa, Hideo Ogawa ほか、「Development of 230 GHz Band CPRx-W for GLT」, The 3rd WS on Large Aperture mm/submm Telescopes in the ALMA era, 2015/03/10-11, 東京 国立天文台 三鷹 (230GHz ポーラライザー)

③ Yutaka Hasegawa, Hideo Ogawa ほか、「Development of 230 GHz Band CPRx for GLT」, 15th WS on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, 2014/12/15-17, 三重 アクアヴィア伊勢志摩 (230GHz ポーラライザー)

④ Soon Kang Lou, 小川英夫ほか「VERA 搭載用 86 GHz 帯セブタム型円偏波ポーラライザーの開発」、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014/09/12, 山形 山形大学 (86 GHz ポーラライザー)

⑤ 長谷川豊、小川英夫ほか「GLT 搭載用 230GHz 帯両円偏波・両サイド分離受信機の開発」、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014/09/12, 山形 山形大学 (230 GHz ポーラライザー)

⑥ 長谷川豊、小川英夫ほか「GLT 搭載用 230GHz 帯両円偏波受信機の開発」、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013/09/11, 仙台 東北大学 (230 GHz ポーラライザー)

⑦ Soon Kang Lou, 小川英夫ほか「86GHz 帯円偏波ポーラライザーの開発」、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013/09/11, 仙台 東北大学 (86GHz ポーラライザー)

⑧ Yutaka Hasegawa, Hideo Ogawa ほか、「Development of 230GHz Circular-Polarization Receiver System on GLT」, East Asia VLBI Workshop 2013, 2013/06/17, 韓国 濟州島 (230GHz ポーラライザー)

⑨ Kimihiro Kimura, Hideo Ogawa ほか、「Developing a new 86 GHz band receiver for VERA」, East Asia VLBI Workshop 2013, 2013/06/17, 韓国 濟州島 (86GHz ポーラライザー)

⑩ Hideo Ogawa ほか、「230 GHz and 345 GHz VLBI receivers for 12m telescope」, East-Asia VLBI Workshop 2012, 2012/05/30, 台湾 台北 (230GHz ポーラライザー)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 英夫 (Ogawa Hideo)
大阪府立大学 理学系研究科 教授
研究者番号 : 20022717