

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05025

研究課題名(和文) 100～300GHz帯広帯域同時観測のための導波管型周波数分配器の実用化

研究課題名(英文) Development of the super wide band waveguide devices to achieve the wideband radio observation in 100-300 GHz

研究代表者

小川 英夫 (Hideo, Ogawa)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：20022717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：星間分子雲全域に渡る大きなスケールで、様々な微量分子が分布している事が近年判明した。この詳細観測のため、多種多様な輝線スペクトルを広範囲、広周波数帯域、高感度高効率な観測装置が必要である。これを実現するための観測装置として、特に導波管型周波数帯域「多」分配器FSFBと直交偏波分離器OMTの組み合わせが非常に効果的であると考えられる。本研究では、従来狭帯域であったOMT、FSFBの広帯域化、製造精度の向上に取り組んだ。結果、ALMA Band 2+3, 7+8 相当帯域をカバー可能な比帯域 60% 程度が得られる新型OMT開発に成功するなど、広帯域導波管デバイスの開発体制を整備できた。

研究成果の概要(英文)：Thanks to the radio observations using ALMA etc., the distributions of the various minor molecules were found over the entire molecular cloud. To reveal its details, observing lots of line spectra in a wide area, wide frequency band of submm, with high efficiency is necessary. For such observation, a combination of a waveguide frequency band multiple splitter called FSFB and an orthogonal polarization splitter of OMT is considered to be very effective; however, the conventional waveguide devices are narrowband. In addition, applying these in submm band is difficult due to problems of machining error.

In this research, we worked to broaden the bandwidth of OMT & FSFB, and developed new techniques to improve fabrication accuracy. As a result, we succeeded in developing a new type OMT that has the fractional bandwidth of over 60%, where capable of ALMA Band 2+3, 7+8. In addition, new techniques of low fabrication error were obtained for fabrication the OMT, FSFB etc. in submm band.

研究分野：電波天文学、観測機器

キーワード：天文学 電波 広帯域 導波管 周波数分配器 直交偏波分離器 ALMA band 7+8

1. 研究開始当初の背景

電波天文分野におけるヘテロダイン分光観測装置について、ALMA などの大規模開発計画における先進的な技術開発が達成され始めていた。ところがそれらの単純性能（低雑音性、広帯域性など）は物理限界に達しつつあり、例えば単純限界以上に広い周波数帯域をまとめて観測可能な装置を開発する場合などでは未開拓の新技術が必須となるが、そうした未開拓領域の進展は乏しかった。

こうした状況に対して我々は、従来は実現困難とされた導波管型周波数帯域 2 分配器 FSFB を実用化し、さらにこれを応用する事で分配損失がほとんど生じない導波管型周波数帯域「多」分配器 FSFB が実現可能であることを突き止めた。FSFB の実用化により、非常に広い帯域に分布を持つ多数の観測対象（分子輝線など）を同時観測可能な受信機を実現できる。このような装置は、電波天文や惑星大気モニタリングにおいて需要が高まりつつあった「多周波数帯域同時観測」に対して、非常に有効であると考えられた。

また、微弱な電波信号しか放出していない微量分子輝線などを観測対象とする場合には、到達すべき感度を得るための観測積分時間が本質的な問題となる。もし、観測帯域全域で動作する超広帯域直交両偏波分離器 OMT を実現できれば、それを FSFB の前段に設置する事で、所要観測時間をおよそ半分まで短縮することが出来る。さらに、偏波毎に異なる観測帯域を振り分けることで、非常に広い帯域を連続的に観測する従来に無い観測装置を実現する事も可能となる（図 1：68-116 GHz ALMA band 2+3 相当帯域にて）。このように、OMT + FSFB 受信機は広帯域観測需要に非常にマッチしており、この実現のために必要となる開発技術を整備する必要がある。

2. 研究の目的

- (1) 従来に無い導波管デバイスである FSFB 自体の実用化、及び FSFB による広帯域電波観測装置の実用化を目指し、FSFB 製作の壁となる諸問題（加工誤差、切削加工手法等）の解決に取り組んだ。
- (2) FSFB 観測装置の観測効率を飛躍的に高める、超広帯域 OMT の実現を目指した。具体的には、広帯域観測装置として開発が進められている ALMA band 7+8 受信機への搭載を念頭に置いて、275-500 GHz（比帯域幅 58.5%）全帯域をカバーする OMT 開発を目指した。

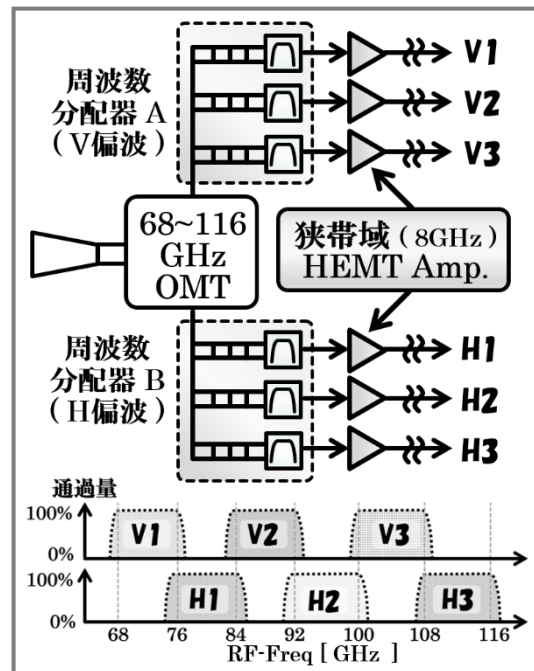


図 1. 67-116 GHz OMT+FSFB 受信機 の 概 念 図

3. 研究の方法

(1) FSFB 製作手法の開発

FSFB は、Branch-Line Coupler (BLC) と周波数フィルタを直結した構造を持つ。このうち BLC に関しては寸法ズレによる周波数特性のズレは比較的少なく、近年の切削加工精度であれば十分満足できる。一方で周波数フィルタについては、周波数特性と共振器の寸法の関係性が強いので、非常に寸法誤差に弱い。そこで本研究では、切削加工寸法誤差の要因のうち、従来十分に考慮されていなかった事項としての、1. 応力歪みによる三次元寸法ズレ、2. 加工面平坦度・平行度不足による深さ方向寸法ズレ・軸ズレ、の 2 点について、検証・解決に取り組んだ。

1. 応力歪みの問題について、従来は圧延された合金素材を購入後、そのまま粗加工→仕上げ加工としていた。これにより得られる加工平面度を精密測定したところ、30 x 20 mm の平面中央部に 10 μm 程度の窪みが生じるなど、応力歪みによる平面度への問題発生が確認できた。これは、周波数フィルタなどのサブミリ波デバイスにおいては非常に大きな問題となる。そこで、より高い剛性を持つ合金や、一般品よりも細かな結晶構造を有する合金素材にて同様の実験を実施した。

2. 加工面平坦度・平行度問題については、1.の応力歪みのほか、研磨工程の精度不足が大きな原因となる。特に平行度については、研磨工程でのエラーがそのまま切削工程に継承されるため、研磨工程が支配的である。サブミリ波帯導波管デバイスは概ね、導波管を上下2分割にして製作することが必要になる「都合」があるため、平行度の不足は立体的な寸法誤差に繋がり、その影響を設計段階では補正できない。よって、研磨精度の改善が重要であり、本研究でこの解決に取り組んだ。平行度問題が生じない理想的な研磨手法として、2枚の完全平行な研磨板で研磨対象を緩く挟み込み、両側から研磨する手法が考えられるが、この実現は容易ではない。そこで、次善策として、研磨板に対して十分な垂直度を持つ支柱を通じて、研磨対象物を一意に固定するための硬樹脂治具を設置し、これに研磨物をたたき込んで、研磨角度を一意に定めてから研磨することで、上下面を十分に水平に近い同一の研磨角度で研磨する手法を検証した(図2)。

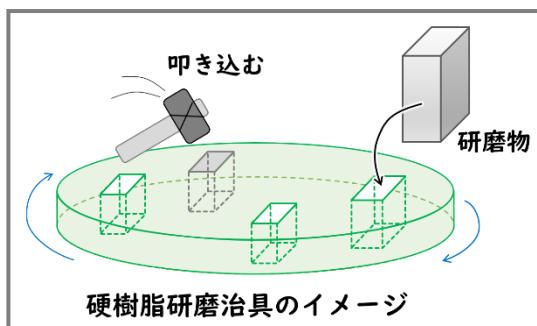


図2. 研磨治具の利用概念図

(2) 超広帯域 OMT の開発

従来実用実績のある OMT のうち、物理構造が単純 = 高周波帯域へのスケールダウンが比較的容易で、かつ対応帯域幅が広いモデルとして、Double-Ridged Bφ Junction (DR-BJ) モデルが挙げられる。特に、DR-BJ OMT の偏波分離機構それ単体では、比帯域 50% を超えるモデルが設計可能であることが分かっていた。ところが、従来の DR-BJ OMT の比帯域は最大でも 40% 超程度にとどまっていた。この原因は、前後の入出力回路が十分に広帯域では無いからである、と考えられた。そこで本研究では、この前後段回路の広帯域化による広帯域 DR-BJ OMT 設計を行った。

4. 研究成果

(1) FSFB 製作手法の開発

1. 応力歪み問題については、微細結晶合金・高剛性合金を用いることで、中央部の窪みは低減できる傾向にある事は分かったが、他方で微細結晶素材は 6mm 厚さ以上を入手することが出来ないと分かり、高剛性素材は電気抵抗率が大きくサブミリ波帯での損失量増加がかなり問題である(これが許容出来る案件では適用可能)と分かった。すなわち、これらをサブミリ波帯導波管デバイスに採用することは不都合な点が多く、根本的な解決が出来ないことが分かった。そこで、別アプローチとして電気抵抗率が小さいが柔らかい A6063 合金などを対象に、粗加工と仕上げ加工の間に焼鈍を挟むことでの工程中間応力除去を検討した。本手法ならばサブミリ波帯デバイスへの適用実績のあるあらゆる素材に対して効果が期待できると考えているが、期間の都合があり、本研究ではこの検証実験着手までは至らなかった。

2. 加工面平行度の問題について、研磨物の固定治具を用いた新たな研磨手法により、従来 15 μm / 10 mm 程度の研磨面傾斜であったのに対して、新手法では 6 μm / 10 mm 程度と、およそ 2.5 倍の水平度が得られる事が分かった。この水準であれば、概ね 500 GHz 帯程度までで FSFB を実現できる見込みである。なお、本手法の誤差要因は、治具への研磨物設置時の誤差程度であるので、このあたりを改善していくことで更なる精度向上が期待できると考えている。また、研磨面平面度については、研磨治具の利用により、図3に示したとおり大幅な改善が得られる事が分かった。これは、接続フランジ面など最終仕上げに研磨が適用できる製作物に対してはかなり有効であると考えられる。

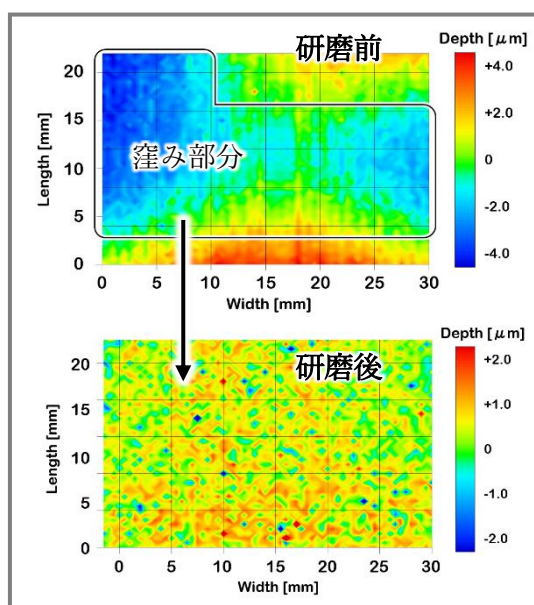


図3. 研磨前後の平面度測定結果例

(2). 超広帯域 OMT の開発

従来の DR-BJ OMT モデルの検証を進めた結果、従来モデルでは水平偏波の出力回路部にて、本来ならば侵入しないはずの垂直偏波信号が高次モード共振を起こしており、この影響で高周波数側の帯域幅を狭めている事が分かった。そこで、この高次モードをうまく抑制するような新たな出力回路を設計した結果、DR-BJ コア部の帯域幅に迫る比帯域 54% 超の新型モデルを設計できた。さらにその後 DR-BJ コア部の広帯域化を進めた結果、比帯域 60% という導波管帯域限界に迫る超広帯域モデルが設計できたが、新型の出力回路でも高次モードが抑制しきない事が分かった。そこで更なる改良として、出力回路部に導波管ハイパスフィルタ (HPF) を導入した (図4)。これにより、高次モード共振をより高い周波数帯域まで抑制できるようになり、コア部と同じ比帯域 60% という超広帯域 OMT を設計できた。また、この DR-BJ + HPF OMT モデルを 275-500 GHz に適用することで、目標成果物としての 275-500 GHz OMT は十分実現できる事を示せた (図5)。

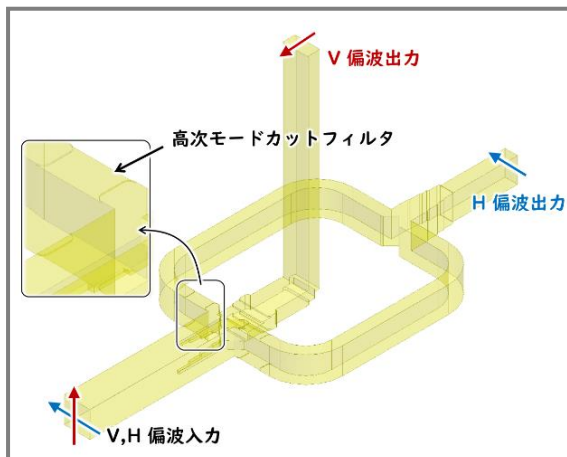


図 4. DR-BJ + HPF OMT 解析モデル図

これら(1),(2) の研究成果から、比帯域 60% という導波管帯域限界に迫る広い帯域にて、偏波分離+周波数分割/同時観測を行うための受信装置を開発可能とすることが出来た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1).

Y. Hasegawa, S. Asayama, H. Ogawa, K. Kimura, K. Tokuda, T. Ohichi,

“Observational demonstration of a high image rejection SIS mixer receiver using a new waveguide filter at 230 GHz”,

Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 69, Issue 6, 1 December 2017, 91, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx098>

(2).

Y. Hasegawa, R. Harada, K. Tokuda, K. Kimura, H. Ogawa, T. Ohichi, Han, Johnson, M. Inoue,

“A new approach to suppress the effect of machining error 1 for waveguide septum circular polarizer at 230 GHz band in radio astronomy”,

Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017

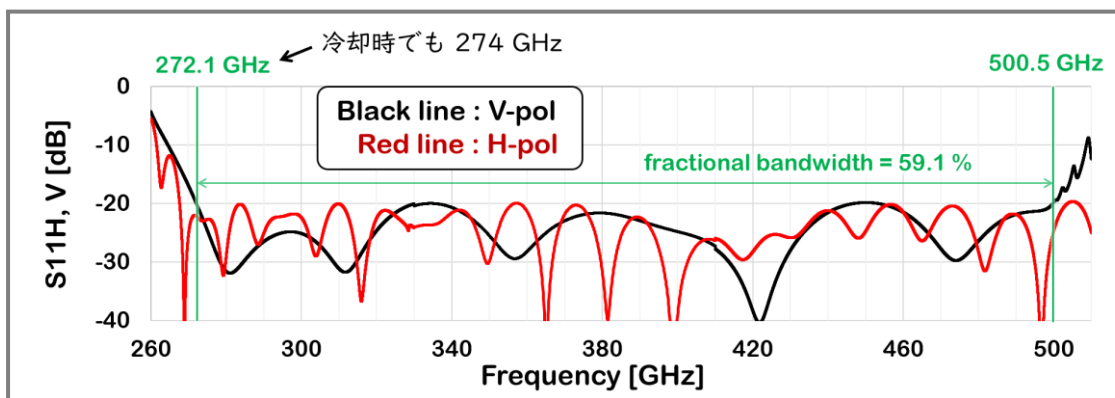


図 5. DR-BJ + HPF 型 ALMA Band 7+8 (275-500 GHz) OMT 設計結果

[学会発表] (計 13 件)

- ① Y. Hasegawa, Kimihiko Kimura, Hideo Ogawa, et al. “Design of 100 GHz Multi-beam Heterodyne Receiver”, NRO Users Meeting 2015, 2015/07/28-30, 長野 / 国立天文台 野辺山宇宙電波観測所
 - ② 高橋 諒、長谷川 豊、木村 公洋、小川 英夫、大西 利和、浅山 信一郎、「300-500 GHz 広帯域直交偏波分離器 (OMT) の開発」、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015/09/09-11、兵庫 / 甲南大学
 - ③ 長谷川 豊、木村 公洋、小川 英夫、他 3 名、「NRO 45m 望遠鏡搭載 100 GHz 帯ヘテロダイナカメラ受信機の開発」、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015/09/09-11、兵庫 / 甲南大学
 - ④ Y. Hasegawa, Ryo Takahashi, H. Ogawa, Shinichiro Asayama, “Design of 67-116 GHz (ALMA Band 2+3) full-band OMT”, ALMA/45m/ASTE/Mopra Users Meeting 2015, 2015/10/20-22, 東京 / 国立天文台 三鷹キャンパス
 - ⑤ 長谷川 豊、小川 英夫、他 3 名、「電波望遠鏡搭載サブミリ波帯導波管回路の開発」、平成 27 年度 NICT 先端 ICT デバイスラボ交流会、2016/01/18, 東京 / 小金井
 - ⑥ 高橋 諒、長谷川 豊、小川 英夫、「300-500 GHz 広帯域直交偏波分離器の開発」、第 16 回 ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2016/03/07-08、東京 / 電気通信大学
 - ⑦ 長谷川 豊、小川 英夫、「大阪府立大学における受信機開発 2016」、第 16 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2016/03/07-08、東京 / 電気通信大学
 - ⑧ 高橋 諒、長谷川 豊、木村 公洋、大西 利和、小川 英夫、「300-500 GHz 広帯域直交偏波分離器 (OMT) の開発 (2)」、日本天文学会 2016 年春季年会、2016/03/14-17、東京 / 首都大学東京
 - ⑨ 長谷川 豊、木村 公洋、小川 英夫、大西 利和、ほか 9 名、「CO 分子輝線観測のための 109-117 GHz 集積導波管回路の開発」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016/09/15、愛媛 / 愛媛大学
 - ⑩ 長谷川 豊、高橋 亮、小川 英夫、ほか 5 名、「ALMA Band 2+3, 7+8 超広帯域受信機コンポーネントの開発」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016/09/14-16、愛媛 / 愛媛大学
 - ⑪ 長谷川 豊、小川 英夫、他 3 名、「電波天文観測のためのサブミリ波帯導波管回路の開発」、平成 29 年度 NICT 先端 ICT デバイスラボ交流会、2018/01/18, 東京 / 小金井
 - ⑫ 長谷川 豊、小川 英夫、ほか 6 名、「次世代サブミリ波帯導波管回路の開発」、ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ」および第 4 回「理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ、2018/02/22-23、東京 / 国立天文台 三鷹キャンパス
 - ⑬ 長谷川 豊、他 5 名、「SMILES-2 630/770 GHz SIS 受信機のための統合導波管回路の開発」、日本天文学会 2018 年春季年会、2018/03/16、千葉 / 千葉大学
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小川 英夫
(大阪府立大学大学院 理学系研究科 教授)
研究者番号：20022717
 - (2) 研究分担者：無し
 - (3) 連携研究者
木村 公洋
(大阪府立大学大学院 理学系研究科 研究員)
研究者番号：10565328