

論文内容の要旨

論文題目 Development of a Submillimeter Ortho-Mode Transducer and Sideband-Separating SIS Mixers for Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

(アルマ サブミリ波導波管型偏波分離器およびサイドバンド分離 SIS ミクサの開発)

氏名 神蔵 護

究極のミリ波サブミリ波干渉計として建設が進められている ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) の Band 8 (385-500 GHz: 波長 0.7 mm 帯) 用受信機の主要部品である導波管型偏波分離器 (OMT) とサイドバンド分離 (2SB) SIS ミクサを開発した。サブミリ波において、OMT は世界で初めての技術であり、2SB SIS ミクサは望遠鏡に搭載されるものとして世界最高性能のものである。

ALMA は日本・北米・欧州およびチリ共和国の国際協力のもと、チリの標高 5000 m のアタカマ砂漠に建設が進められている 80 台の高精度アンテナで構成される史上最大の電波干渉計である。ミリ波からサブミリ波に存在する大気の窓を 10 の周波数帯にわけて受信し、直交する 2 つの直線偏波成分を同時受信する。

OMT は直交二偏波を分離する導波管回路である。従来型である準光学型のワイヤーグリッドに比べて、2 つの偏波からのビームパターンが一致し、かつ、受信機光学系を小型化できるメリットを持つ。2SB ミクサは、ヘテロダイン受信機において、upper sideband (USB) と lower sideband (LSB) を分離したのちに同時に取り出す。これは、大気からの雑音を減らすとともに強度較正の精度を高めるといふ、天文学にとって重要な開発要素である。サブミリ波帯では受信機部品だけでなく測定システムも発展途上であるため、サブ

ミリ波の振幅と位相を同時に測定できるシステムの開発も平行しておこなった。開発した受信機は、従来型受信機と比べて雑音温度やサイドバンド分離性能が優れており、ALMAの厳しい仕様を満たすことを実証した。第1章では導入、第2章では OMT について、第3章では 2SB SIS ミクサについて、第4章ではより低損失化を目指した一体型 OMT/2SB 導波管回路について、設計および評価結果を詳述し、第5章でまとめている。

第2章では、OMTの加工誤差を考慮した詳細設計、常温および4 K 冷却時における性能測定の結果を述べた。OMTの電磁界設計として、1) 可動部分がないこと、2) ミリ波帯で高い性能が報告 (Moorey *et al.* 2006, Asayama and Kamikura 2008) されていることから、片偏波に対して導波管中央に隆起を設けたダブルリッジタイプを採用した。385-500 GHz 帯の OMT はミリ波帯のものに比べ、1) 導波管による伝送損失を最低限におさえるために、水平偏波の導波管長さを最小限にした点、2) ダブルリッジ導波管やインピーダンス変換器などの導波管ステップの数を、加工誤差に対するロバストさを考慮して最適化した点、が工夫されている。シミュレーションには市販されている電磁界解析ソフトウェア (Ansoft 社, High Frequency Structure Simulator (HFSS)) を用いた。最適化した設計は、典型的な切削加工での機械加工誤差である 10 μm の誤差があっても性能が大きく変化しないロバストなものだった。これまでミリ波帯で一般的だった OMT は、偏波分離のために薄い金属板 (septum) を用いており (Wollack *et al.* 2002), 211-320 GHz 帯のもの (Wollack and Grammer 2003) がこれまでに開発された最高周波数帯のものである。これらの偏波分離器は金属板が固定できない構造になっているため、1) 冷却時と常温時で性能が変わってしまうことや、2) 金属板のアラインメント誤差による影響を受けやすいなどの欠点があった。

OMT の評価として、1) 電気特性測定、2) 電磁ホーンを用いた準光学測定系による二偏波分離度測定、3) SIS ミクサを用いた冷却雑音温度測定をおこなった。OMT を組み込んだ場合と組み込まない場合の受信機の冷却雑音温度を比較することから、4 K における透過損失が 0.4-0.5 dB /25 mm と非常に低損失であることが実証できた。電気特性測定から、二偏波分離度、出力ポート間アイソレーションは比帯域 26 % の広帯域にわたってそれぞれ 29 dB, -30 dB 程度と、非常に良好な結果が得られた。実測値と寸法測定に基づいた加工誤差を考慮したシミュレーションの結果は測定誤差の範囲内で一致した。

第3章では、2SB SIS ミクサの 4 K 冷却時における性能評価、およびサイドバンド分離のための導波管回路 (2SB 導波管回路) の詳細設計、常温での性能評価、の結果を述

べた. 2SB 導波管回路の構成部品である 90 度位相遅延+等分配器, および局部発振信号 (LO) 結合器には, 最も単純な構造を持つブランチライン型結合器を採用し, ブランチラインの数および寸法・間隔を最適化した. 電磁界的な観点からサブミリ波帯で広帯域の性能を得るためには, 非常に細く ($< 100 \mu\text{m}$) アスペクト比の高い (3 ~ 8) 複数のブランチライン加工が必要であることがわかった. そのため通常の切削加工では加工が難しく, 電気放電を利用した放電加工技術が必要となる. 放電加工は比較的高い難度を要することから加工を容易にするために全ての並列ブランチは幅が一定になっており, また切削加工を容易にするために直列ブランチも幅が一定となっている (Claude *et al.* 2000, Asayama *et al.* 2003). 最適化した設計は, 典型的な放電加工の加工誤差である $5 \mu\text{m}$ の誤差があっても性能が大きく変化しないことが, シミュレーションにより確認できた. 2SB 導波管回路の電気特性測定系による透過損失と, 加工された寸法を考慮したシミュレーションは測定誤差の範囲内で一致した. 2SB 導波管回路および SIS ミクサを組み込んだ受信機の SSB 雑音温度は 6-12 倍の量子雑音限界であり, サイドバンド分離比は 10 dB と, 良好な結果が得られた.

第 4 章では, 一体型 OMT/2SB 導波管回路 (図 1) の設計, 常温における性能評価, および 4 K における評価結果を述べた. 一体型にすることで, 別々の場合に比べて経路長を水平偏波では 51 mm ($60 \lambda_g$, λ_g : 導波管内での波長) から 32.75 mm ($38 \lambda_g$), 垂直偏波では 50 mm ($59 \lambda_g$) から 38.5 mm ($45 \lambda_g$) へと短縮することに成功した. 常温における電気特性評価から透過損失の減少が確かめられ, 減少分は水平偏波で約 1.1 dB (22 %), 垂直偏波で約 0.6 dB (13 %) だった. 二偏波分離度, 出力ポート間アイソレーションの性能は, それぞれ 22 dB, -28 dB 程度と良好であり, 別々の場合と遜色ない測定結果が得られた. この一体型を組み込んだ受信機の SSB 雑音温度は, 比帯域 26 % のほぼ全域にわたって両偏波ともに 4-8 倍の量子雑音限界という, 同波長帯で世界最高レベルの低雑音の性能を達成し, 15 dB 程度の非常に高いサイドバンド分離比も持ち合わせていることが実証された (図 2). 導波管回路内および電磁ホーン-副鏡間の定在波を減らすために, 一体型 OMT/2SB 導波管回路に工夫を施した. 定在波は受信機出力に急峻な周波数特性を生じさせるなど, 観測の大きな妨げの要因となる. LO 信号は天体の信号強度に比べて非常に大きく, LO 信号から天体信号 (RF) への漏れこみは通常 -30 dB 程度と比較的大きいため, LO 信号が RF ポートに漏れこみ定在波の原因となる. 導波管回路の LO カプラーの位置を, 片側のみ導波管内波長の $1/8$ だけオフセットさせることで, LO から天体信号への漏れこみを -45 dB 程度に低減することができて定在波を軽減できることを見出し, 設計に採

用した。

以上の開発により、サブミリ波帯で世界初となる導波管型偏波分離器および、世界最高性能のサイドバンド分離 SIS ミクサの開発に成功した。これらを搭載した ALMA Band 8 受信機は、難しいと予想されていた厳しい仕様を満たすことができた。

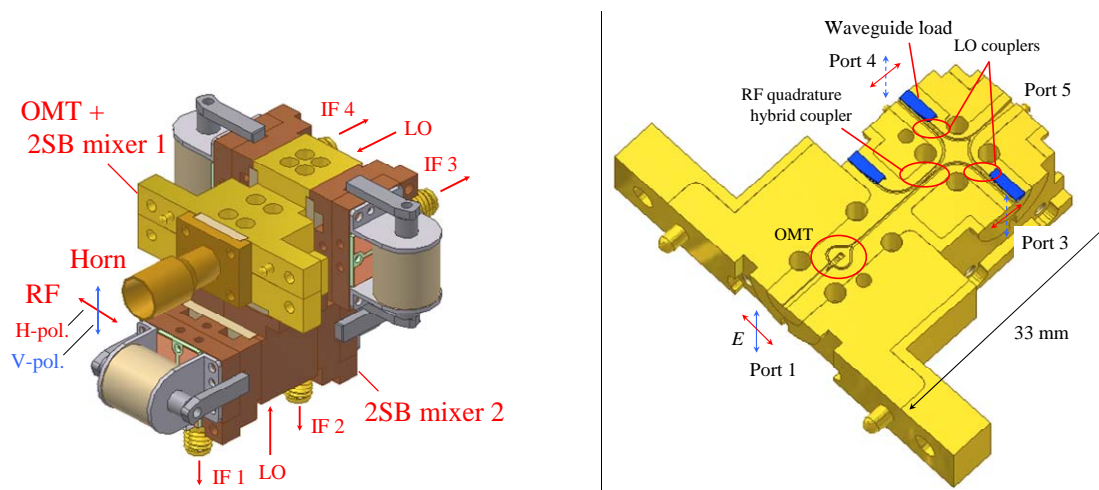


図 1: (左) 一体型 OMT/2SB 導波管回路, SIS ミクサ, およびホーンのアセンブリ. (右) 一体型 OMT/2SB 導波管回路.

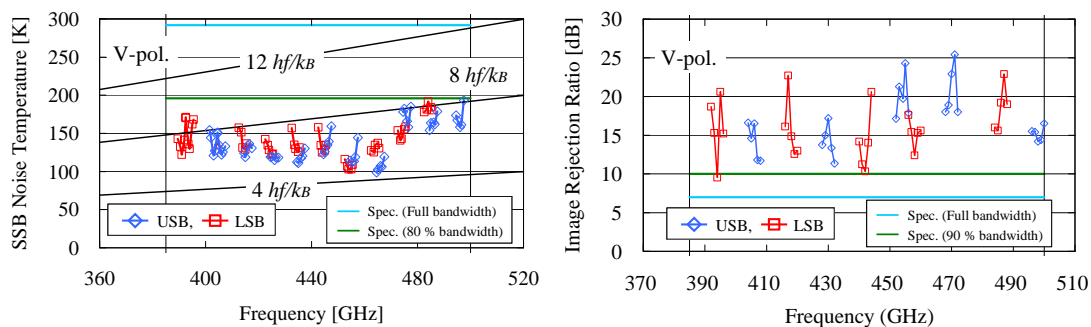


図 2: 一体型 OMT/2SB 導波管回路を組み込んだ, ALMA 搭載用受信機の (左) SSB 換算した雑音温度, (右) サイドバンド分離比. 雑音温度は, 比帯域 26% のほぼ全域にわたって 4-8 倍の量子雑音限界という同波長帯で世界最高レベルのものであり, サイドバンド分離比の典型値は 15 dB と, 高い分離比も持ち合わせている.