

論文審査の結果の要旨

氏名 芹澤 靖隆

本論文は、広帯域・低雑音・高サイドバンド分離比を併せ持つ、サブミリ波帯(385 - 500 GHz)のサイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの開発研究に取り組んだものである。

本論文は 5 章からなる。第 1 章では、電波天文学における受信機や検出器の現状と課題を概観している。電波天文学に用いられる超伝導ヘテロダイン受信機は、受信機雑音を量子限界のわずか 3 倍にまで抑制するような優れた性能を達成しつつある。しかし、周波数が高くなるほど、局部発振源(LO)の電力不足や LO 自身の雑音によって、受信機雑音が制限されている。この問題を克服して、サブミリ波やテラヘルツ帯において、受信機のさらなる低雑音化やアレイ化などを実現するためには、バランスド SIS ミクサが有望であることを指摘している。その理由として、バランスドミクサは、従来のミクサに比べて、以下のような利点があることを述べている。第一に、ミクサを動作させるために必要な LO の入力電力は、従来型のミクサと比較して約 1/30 程度で済むこと。第二に、LO サイドバンド雑音を分離することができること。

第 2 章では、サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの性能を正確に評価するための冷却評価システムについて記述している。さらに、ヘテロダイン受信機の雑音やサイドバンド分離比の測定システムとその原理、および、測定系の誤差評価についてまとめている。

第 3 章では、バランスド SIS ミクサの開発について詳しく述べられている。まず、バランスドミクサの詳細な定式化を行い、それに基づいて、バランスドミクサを実現する方式の選択、および、必要となるコンポーネントの設計を行っている。さらに、各コンポーネントの、常温および 4K 冷却時における性能評価の結果が述べられている。ここでは、様々な工夫、すなわち、(1) 導波管長を最小限に抑えつつ、導波管ブランチライン型結合器によって広帯域化を図っている点、(2) モジュラー方式によって、雑音性能のみならず LO サイドバンド雑音の除去率を測定できるようにした点、(3) IF 帯アイソレーターを効率的に配置することにより平坦な IF スペクトルを取得できるようにした点、などの特色が認められる。また、導波管ブランチライン型結合器の設計では、分割された二つのブロックのミスアライメントによる損失が少なくなるように、導波管の端で分割する方式を採ったほか、4K で動作することや機械加工の誤差を

考慮しつつ、ブランチライン形状の最適化を行っている。その結果、動作に必要な LO 電力を従来型 SIS ミクサの約 1/20 に減らしつつ、広い周波数帯域で低雑音性能(DSB 雑音温度で量子雑音限界の 3~5 倍)を達成することに成功した。さらに、LO 発振源のサイドバンド雑音として $1\text{K}/\mu\text{W}$ (0.8 - 1.6 GHz オフセット) という実測値も得た。これは過去に行われた相対的な測定からの推測値と矛盾しない結果である。

第 4 章では、第 3 章の成果を踏まえ、サイドバンド分離機能を併せ持つバランスド SIS ミクサの開発について詳しく述べられている。導波管ブランチライン型結合器を 3 個使用して、機能を実現している。モジュラー方式を採用して、各コンポーネントを精度良く評価し、組合せの最適化を行っている。その結果、動作に必要な LO 電力を従来の 1/30 程度に減らしつつ、この周波数帯で世界最高水準の低雑音(約 200 K)や高サイドバンド分離比(約 10 dB)を達成することに成功した。これらの結果は、各コンポーネントの性能の組合せから予想される値と、誤差の範囲で整合していることも指摘されている。

最後に、第 5 章において、本論文の結論が、将来の展望、すなわち、本研究の成果の大規模アレイ受信機およびテラヘルツ帯受信機への応用の可能性に関する記述と共に、まとめられている。

本研究は、ヘテロダイン受信機のアレイ化や低雑音テラヘルツ受信機の実現に向けた要素技術の開発を世界に先駆けて行ったものと位置付けることができる。サイドバンド分離型バランスドミクサは、通信への応用として、マイクロ波帯では開発されているが、ミリ波帯では、高感度計測用としての開発例はなく、サブミリ波では先行研究が皆無であった。このような状況で、現在の最高水準である ALMA 受信機と同等の受信機雑音温度およびサイドバンド分離比を実現しつつ、サブミリ波帯におけるサイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの開発に世界に先駆けて成功したことは特筆に値する。高周波化・アレイ化という電波天文学における一つの世界的潮流への大きな貢献であり、高く評価するものである。

なお、本論文は、関本裕太郎、神蔵護、Wenlei Shan、伊藤哲也との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発研究を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。よって、博士(理学)の学位を授与できると認める。