

論文内容の要旨

論文題目 **Development of a Submillimeter Sideband-Separating Balanced SIS Mixer**

(サブミリ波帯サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの開発)

氏名 芹澤 靖隆

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) で動作可能なサイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの開発に成功した。雑音温度で ~ 200 K、サイドバンド分離比は ~ 10 dB であり、サブミリ波帯の天文観測用に実現されている世界最高性能のサイドバンド分離ミクサ (2SB) 受信機 (Kamikura et al. 2007) とほぼ同程度の性能を達成した。SIS ミクサは DSB 量子雑音限界の 3 倍に到達するような低雑音性能を達成している。一方、雑音が下がるにつれ、局部発振源 (LO) のパワーや LO 自身の雑音が受信機雑音を制限することになる。この制限を打破し、テラヘルツ受信機やアレイ受信機のさらなる低雑音化を目指すためには (サイドバンド分離) バランスド SIS ミクサが非常に有用である。マイクロ波・ミリ波での研究例は存在するが、サブミリ波帯のサイドバンド分離型バランスドミクサは世界初の技術であると同時に、天文学用サイドバンド分離型バランスドミクサは初の研究例である。

サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサは従来の非バランスタイプミクサに比べて (1) : 動作させるのに必要な局部発振源 (LO) の入力電力が非バランスタイプミクサの約 1/30 程度に抑えられる、(2) : LO 信号に必然的に付随し、受信機雑音温度の上昇に繋がる LO サイドバンドノイズを除去することができる、などの天文学的に重要な利点がある。次

世代のサブミリ波・テラヘルツ観測天文学では、低雑音サブミリ波・テラヘルツ受信機や、大規模（多ピクセル）ヘテロダイナレイ受信機がその重要性を有力視されているが、(1)、(2)などの利点を生かすことで、サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサは、その基礎的な技術として非常に重要な位置を占める。さらに、サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサは、ヘテロダイナレイ受信機において天体信号の upper sideband (USB) 成分と lower sideband (LSB) 成分を分離したのちに同時に取り出すことができる。USB と LSB の分離は、受信機が大気から受ける雑音の影響を減らすとともに、強度較正の精度を高めるだけでなく、観測効率を向上させるというサブミリ波天文観測にとって重要な開発要素である。開発したサイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの高性能を正確に評価するために、同時に冷却評価システムの開発も行った。開発した冷却評価システムで評価した結果、開発したサイドバンド分離型バランスド SIS ミクサは低雑音（ ~ 200 K）・高サイドバンド分離比（ ~ 10 dB）を達成していることを確認した。また、動作に必要な LO 電力は従来型のミクサと比較して $1/30$ 程度に抑えることに成功した。この成果は、本研究の技術は高いサイドバンド分離機能を有するヘテロダイナレイ受信機のピクセル数を従来の ~ 30 倍にする可能性をもつことを示唆する重要な結論である。第一章で本論文の導入、第二章では本研究における冷却試験を可能にした冷却測定システムおよび評価方法についてまとめている。第三章ではサブミリ波サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサ開発の前段階として開発を行ったサブミリ波シングルバランスド SIS ミクサについて記述している。高周波・低雑音・広帯域のバランスドミクサは本研究が世界初の例である。また、バランスドミクサは LO サイドバンドノイズを出力することができることに着目しその測定を行い、第三章にまとめている。第四章では、サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサのデザイン・シミュレーション・計算・および評価結果について述べている。

第三章では、シングルバランスド SIS ミクサの詳細な理論計算、それに基づく各コンポーネントの仕様、RF 帯の導波管回路設計・製作、常温での評価結果、および 4K 冷却時における性能評価結果などを述べた。シングルバランスド SIS ミクサの RF 帯は導波管回路（WR2: $508\mu\text{m} \times 254\mu\text{m}$ ）で構成されており、中でも 90 度位相遅延+等分配器においては、もっとも簡単な構造を持つブランチライン型結合器を採用した。サブミリ波帯での広帯域な電磁界性能を得るために細い（ $\sim 60\mu\text{m}$ ）ブランチラインを複数（7 ブランチ）施しており、結合器の各パラメータは 4K での動作を最適にするように設計されている。結合器はス

プリントブロック型として設計・製作されたが、実験のしやすさを考慮して直方体の各側面にフランジを 1 つずつ配置するだけでなく、導波管同士のミスアライメントによる損失を考慮して導波管の中央ではなく端で分割する方法を採用した。製作した結合器は顕微鏡による寸法測定の結果、加工誤差 $\pm 5\mu\text{m}$ で製作されていることを確認し、さらに常温にてサブミリ波ネットワークアナライザを用いて性能評価した結果、強度不平衡 1.5dB 以内、位相不平衡 10 度以内という仕様を満たすことを確認した。シングルバランスド SIS ミクサは DSB ミクサを 2 個要するが、比較的性能が似通ったペアを選び出し、それらと結合器と合わせてシングルバランスド SIS ミクサを構成した。その結果、DSB 雑音温度で量子雑音限界の 5 倍以下という低雑音性能を達成することができた。また、動作に必要な LO 電力は従来型 SIS ミクサの $\sim 1/20$ であった。また、バランスドミクサは LO サイドバンドノイズを出力することに着目し、その測定を試みた。その結果用いた LO 発振源のサイドバンドノイズとして $1\text{K}/\mu\text{W}$ (0.8–1.6 GHz オフセット) という値を得た。これは E. W. Bryerton et al. 2000 や A. Hati et al. 2004 からの示唆と矛盾しない。

第四章では、シングルバランスド SIS ミクサで得た技術をもとにして開発した、サブミリ波帯サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの設計・製作・評価について述べた。機械設計では、マイクロ波帯・ミリ波帯ではコンポーネントをインテグレーションして一体型にする方法が主流である一方、本研究ではモジュラー型を採用して各コンポーネントを分離できるようにした。これにより、性能のよいコンポーネントだけを選出して用いることができるだけでなく、不具合があった場合、不具合箇所だけを交換することが可能になった。本研究の成功のカギの一つはこのモジュラーデザインにある。サイドバンド分離バランスドミクサの詳細な理論計算を行い、そこから各コンポーネントに必要な性能を求め、仕様として開発の指針とした。RF 回路設計ではコンポーネントのサイズと電磁界損失を考慮して導波管型の回路でデザインしている。8 ブランチ 90 度位相遅延+等分配結合器は RF 帯に 3 つ必要であるためこれらは一体型として設計・製作し、寸法測定の結果 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内の加工誤差であることを確認している。サイドバンド分離バランスド SIS ミクサでは DSB SIS ミクサを 4 つ要するが、20 個以上の DSB ミクサを評価し、それら候補の中から雑音性能が揃っていて量子雑音限界の 5 倍以下、かつコンバージョンゲインの差が全ての RF 周波数 (385–500 GHz) で 3dB 以内 (仕様) に入る 4 つのミクサを選び出た。IF 帯の 180 度および 90 度位相結合器についても評価をし、仕様を満たすことを確認してサイドバンド分

離型バランスド SIS ミクサを構成した。その結果、SSB 雑音温度は $\sim 200\text{K}$ （量子雑音限界の約 10 倍）、サイドバンド分離比 $\sim 10\text{dB}$ という世界最高レベルの性能をバランスドミクサにて達成した。各コンポーネントの評価結果から予想される SSB 雑音温度・サイドバンド分離比を計算し、実測値と一致している。また、サイドバンド分離型バランスド SIS ミクサを動作するのに要した LO 電力は従来型ミクサに比べて、 $1/30$ 程度であった。このことは、次世代の大規模ヘテロダイナレイ受信機において素子数を ~ 30 倍程度にすることができる可能性を示唆している。また IF 周波数におけるスペクトルも非常にフラットな特性を得ており、LO サイドバンドノイズが除去されていることが示唆された。

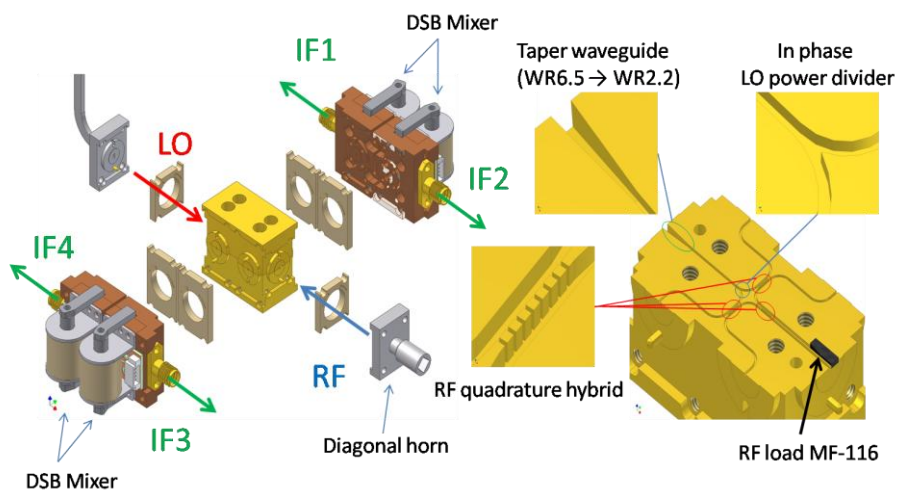


図 1. (左) サイドバンド分離型バランスドミクサ。各コンポーネントが分離できるようにモジュラー型を採用している。(右) 90 度位相結合器の導波管回路。

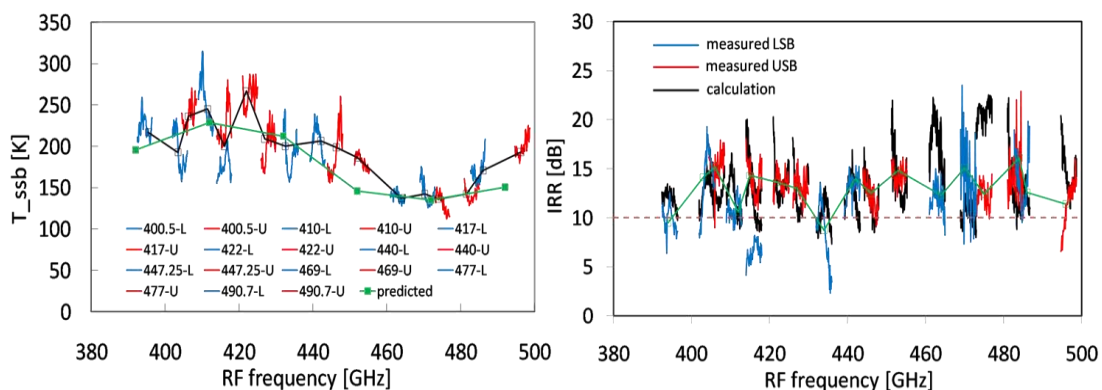


図 2. 本研究で開発したサイドバンド分離型バランスド SIS ミクサの (左) SSB 雑音温度、(右) サイドバンド分離比。比帯域 26% に渡って SSB 雑音温度で $\sim 200\text{K}$ 、サイドバンド分離比 $\sim 10\text{dB}$ 以上という世界最高レベルの性能をバランスドミクサで達成。