

# ALMA Band 10低雑音広帯域 SIS ミキサの開発

小嶋 崇文

〈国立天文台 先端技術センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: t.kojima@nao.ac.jp



開発当初は技術的課題が山積していたが、ALMAの厳しい仕様を満たした73台のBand 10カートリッジ受信機の出荷が2014年2月に完了した。Band 10はALMAの最高周波数帯であり、低雑音性能を得るのが最も難しい周波数帯と考えられていた。受信機の雑音性能を決定する最も重要な部品がSISミキサである。本稿では当時存在したSISミキサに関する技術的困難をどのような思想・手法で解決していったのか紹介させていただきたい。

## 1. はじめに

ALMA望遠鏡(Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)は南米チリの標高5,000 mのアタカマ高地に建設された巨大電波干渉計である。ALMAは66基の電波望遠鏡からなり、ミリ波-サブミリ波と呼ばれる波長帯を高空間分解能かつ高感度に観測することが可能になる<sup>1)</sup>。ALMAで可能な観測周波数帯は、31.5-950 GHzである。その全帯域をカバーする受信機を実現することは難しいので、大気窓を10個の周波数帯に分割し、それぞれの周波数帯に最適化された受信機が一つの望遠鏡に搭載されている。現在、一部の周波数を除いて本格稼働が始まっており、すでに多くの観測成果が上がり始めている<sup>2)</sup>。

ALMAでは個々の望遠鏡で取得した振幅と位相情報を合成開口処理することで、0.01秒角の最高空間分解能を得ることが可能である。空間分解能は望遠鏡間の最長距離に反比例し、観測波長に比例するから、この最高分解能で観測するためにはALMAで最も波長の短いBand 10 (787-950 GHz) 受信機の実現が必要であった。一方、ALMAでは高度な観測要求に応えるため、観測

装置には非常に厳しい仕様定められている。当初、Band 10は、雑音に関する仕様を満たすのが最も困難な周波数帯と考えられていた。すでに、世界を代表する大学・研究機関であるカルフォルニア工科大学やSRON (Netherlands Institute for Space Research) も当周波数帯の受信機開発に取り組んでいたが、ALMAの仕様を満たす低雑音受信機の実証例がなかったのである<sup>3),4)</sup>。したがって、Band 10受信機開発チームでは、研究レベルでの検討をしながら開発-量産を短時間で完遂する必要があり、非常に厳しいスケジュールが要求された。しかし、国立天文台・鶴澤佳徳准教授(現、情報通信研究機構)の強力なリーダーシップにより、量産までの課題を次々解決し、2014年2月に66台とスペア7台すべての受信機カートリッジの量産・納品が完了した。

国立天文台におけるBand 10受信機の開発は2005年に本格的にスタートした。私事になるが、筆者は2007年に博士後期課程に進学し、幸運にもBand 10の受信機開発に参加させていただけるチャンスがあった。当受信機開発は、先端技術に触れるだけでなく、チームとしての研究開発に携わる貴重な機会であると考え、参加させていただ

くことにした。筆者の世代はALMAという大規模プロジェクトの受信機開発期が学生のときに巡り合う、非常に恵まれた環境にあったように思う。当時、受信機光学系・機械設計・SISミキサ(Superconductor-Insulator-Superconductor)など開発課題が山積していたが、学生としてはある意味で研究テーマの宝庫でもあったのである。筆者が取り組んだのは導波管回路や広帯域中間周波数帯(IF)回路などを含めたSISミキサの低雑音広帯域実証という受信機開発の一部分である。SISミキサとは、後に説明するSIS接合を用いた周波数変換機能を有する部品のことであり、受信機の雑音性能を決定する最も重要な部品である。本稿では当時存在したSISミキサ開発の課題をどのような思想・手法で解決していったのか、技術的観点で紹介させていただきたい。

## 2. ALMA Band 10 SIS ミキサの開発

### 2.1 ALMA Band 10カートリッジ型受信機

図1(a)はALMAの最高周波数帯であるBand 10のカートリッジ型低雑音受信機である。天体からの信号(RF信号)は主鏡であるパラボラアンテナおよび副鏡の双曲面鏡で反射・集光され、4 Kに冷却される受信機へと導かれる。Band 10受信機では2枚の楕円鏡およびワイヤグリッドを用いて垂直・水平偏波を分離し、RF信号は各々のコルゲートホーンアンテナに入力され、サイズ0.152 mm×0.304 mmの導波管モードに変換される。導波管回路内では方向性結合器を用いてRF信号と局部発振器(LO)波を結合し、導波管-マイクロストリップ変換回路へと導かれる(図1(b))。この変換回路にはボウタイアンテナが用いられ、給電部から4分の1波長のインピー

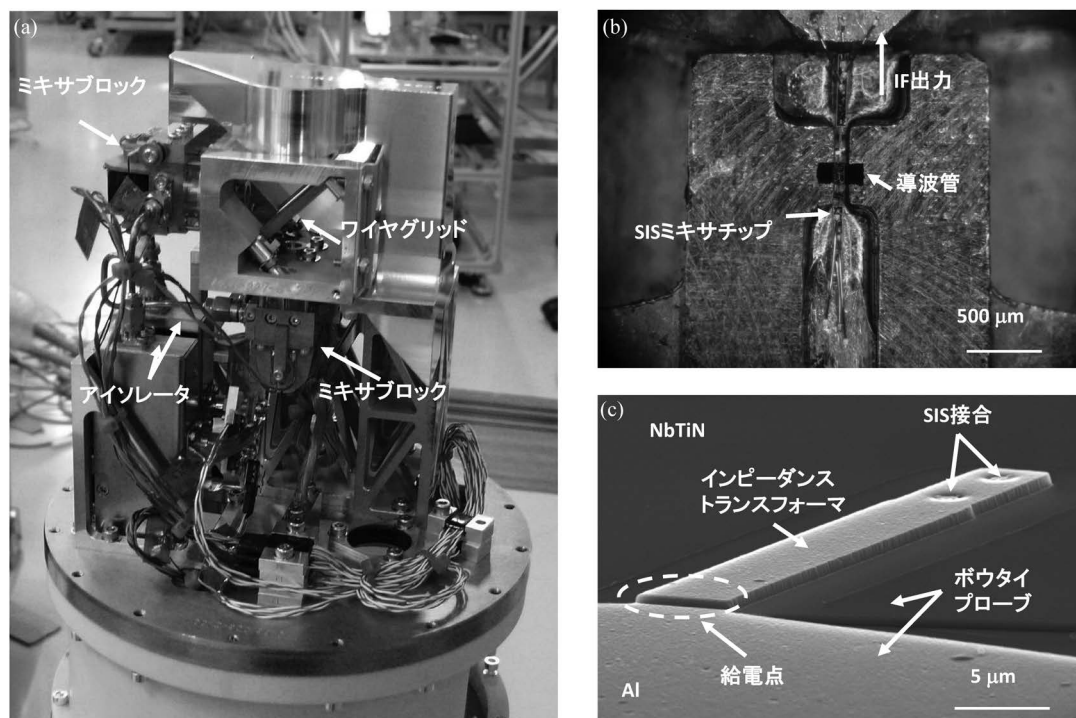


図1 (a) ALMA Band 10受信機カートリッジの4 Kステージ上の写真 (b) ミキサブロック内の写真 (c) SISミキサ同調回路の走査型電子顕微鏡写真。ミキサ回路は石英基板上に作製されている。

ダストランスフォーマーを介してSIS接合へと送られる(図1(c)). RF信号はSIS接合の非線形電流電圧特性によってマイクロ波帯のIF信号に変換され, アイソレーターを介して4-12 GHz帯低雑音HEMTアンプで増幅される.

## 2.2 低雑音広帯域SISミキサ開発の課題

前述のようにALMAの受信機は観測的要求を基に非常に厳しい受信機仕様が定められ, Band 10受信機はRF周波数の80%帯域で量子限界雑音温度の5倍である230 K以下を, また, RF全帯域で344 K以下を達成する必要があった\*. 上記仕様を達成するのに最も重要なのがSISミキサと呼ばれる周波数変換部品であるが, 低雑音かつ広帯域という二つの課題を解決する必要があった. また, 当周波数帯は産業的にも未開拓であり, ミキサ開発に重要な要素技術である導波管回路やその測定技術の構築も課題の一つであった. さらに, 各々の受信機にはSISミキサが二つ必要であり, ALMAは66台+スペア7台の受信機が必要であるから, 最低146個のSISミキサが必要となる. Band 10チームはSISミキサおよび受信機の低雑音動作実証, そして受信機の量産という前人未踏の挑戦をしようとしていた.

SIS接合は超伝導体で絶縁体をサンドイッチした構造を有している. 700 GHz以下のミリ波・サブミリ波帯では, 材料にはNb(ニオブ)という超伝導材料が用いられ, Nb/AlO<sub>x</sub>/Nbの原理的な動作周波数の限界は約1.4 THzであり, Band 10の周波数でも十分に使用可能である. 一方, SIS接合は絶縁体が数nmと非常に薄く, 構造上非常に大きなキャパシタンスC<sub>J</sub>をもつため, RF信号が見る接合のインピーダンスZ<sub>J</sub>が非常に小さくなり, 高周波信号がショートされて効率的にミキシングすることができない. ここで, Z<sub>J</sub>=(1/R<sub>N</sub>+jωC<sub>J</sub>)<sup>-1</sup>, R<sub>N</sub>は接合の常伝導抵抗, ωは角周波数である. したがって, 同調回路を用いて

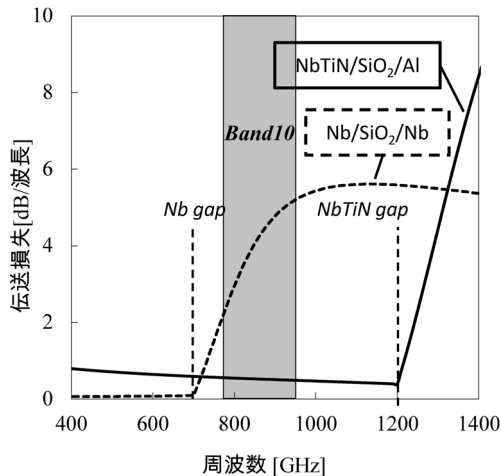


図2 伝送線路(マイクロストリップライン)損失の理論計算値の比較. 700 GHz以下ではほぼ無損失のNb線路は当周波数帯ではもはや使用できない. Band 10ではNbTiNを採用して高品質化に取り組み, 低雑音化が可能となった.

C<sub>J</sub>を打ち消す必要がある. 700 GHz以下ではこの同調回路には低損失特性の期待できるNbを用いた「超伝導伝送線路」が用いられてきた. しかしながら, Nbは700 GHz付近にギャップ周波数を持ち, 700 GHz以上では電磁波のエネルギーによって超伝導が壊れて伝送損失が増大する(図2). Nbは30年以上前から用いられてきた超伝導材料であるが従来のSISミキサの設計・作製技術のすべてを踏襲できるわけではないのである.

また, 同調回路の動作比帯域(Δf/f<sub>c</sub>, Δf: 帯域幅, f<sub>c</sub>: 中心周波数)はおおよそ1/ωR<sub>N</sub>C<sub>J</sub>で制限されると考えられてきた. したがって, Band 10周波数の比帯域約20%を達成するにはωR<sub>N</sub>C<sub>J</sub>=5程度が必要である. また, SIS接合のパラメータとしてI<sub>C</sub>R<sub>N</sub>積があり, ωR<sub>N</sub>C<sub>J</sub>=ωI<sub>C</sub>R<sub>N</sub>C<sub>S</sub>/J<sub>C</sub>の関係で結ばれている. ここで, I<sub>C</sub>, J<sub>C</sub>とC<sub>S</sub>はそれぞれ, 臨界電流, 臨界電流密度, 単位面積当たりの接合容量である. Nb接合の場合はI<sub>C</sub>R<sub>N</sub>~約

\* 受信機製造上の歩留りを確保し, 納期達成を優先するために, 「RF周波数787-905 GHzのうち80%帯域で230 K以下, 全帯域で344 K以下」が最終的な仕様となった.

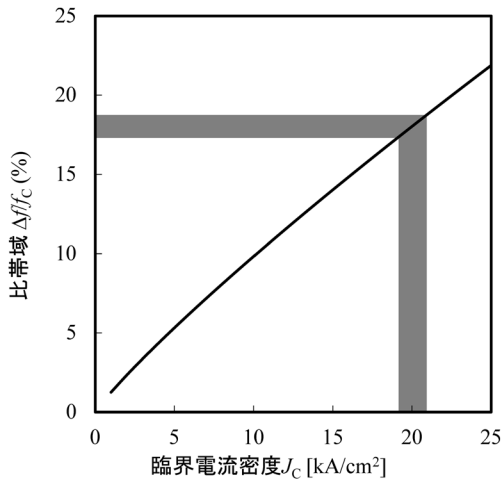


図3  $\omega R_N C_J$  積に基づいて見積もった臨界電流密度  $J_C$  と比帯域  $\Delta f/f_C$  の関係。Band 10 の比帯域を達成するには  $J_C > 20 \text{ kA/cm}^2$  が必要ということになるが、当時は  $J_C > 10 \text{ kA/cm}^2$  で高品質接合を歩留まりよく作製するのは困難であった。

2.1 mV であり 900 GHz 帯で  $\omega R_N C_J = 5$  を達成するには  $J_C$  は  $20 \text{ kA/cm}^2$  以上が必要ということになる (図3)。一方、当時の技術では  $10 \text{ kA/cm}^2$  以上の接合を作製すると品質が低下し、理想的な SIS 接合を得ることが困難であった。

### 2.3 SIS ミキサの低雑音化

Band 10 では、従来から用いられてきた超伝導材料 Nb を用いて同調回路を構成することができないこと、広帯域化のための高品質・高臨界電流密度の接合を得ることが難しいことが技術的問題点であった。したがって、伝送線路材料を変え、高い  $J_C$  に頼った広帯域化の方法を見直す必要があった。

Band 10 チームでは、ミキシング素子には Nb/AIO<sub>x</sub>/Nb 接合、同調回路には Nb に代わる超伝導体として NbTiN (ギャップ周波数 1.2 THz) および常伝導体 Al を伝送線路材料とした SIS ミキサの開発に取り組んできた (図4)。受信機の低雑音化には NbTiN による低損失伝送線路実現が鍵を握っており、情報通信研究機構と協力して膜の高品質化に取り組んできた。開発当初は、(1) MgO 基板上で NbTiN を成膜、(2) 石英基板上で

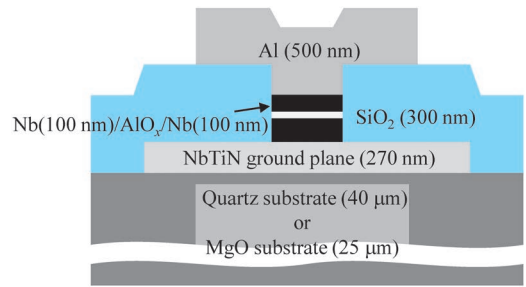


図4 検討した SIS ミキサの断面構造図。NbTiN は石英基板上で多結晶成長し、MgO 基板上では単結晶成長する。両ミキサともに低雑音性能を示したが、基板厚の制御やハンドリングを考慮し、最終的に石英基板が採用された。

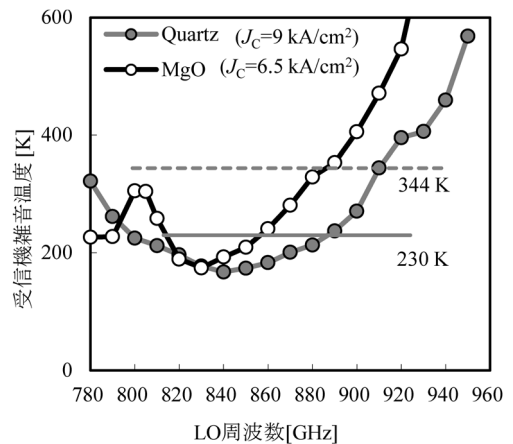


図5 石英基板あるいは MgO 基板上の NbTiN 膜を使用した SIS ミキサの雑音温度測定結果。

NbTiN 膜を成膜する方法の二つを検討した。(1) の方法では NbTiN 膜が単結晶成長し、スパッタ条件によらず理想的な高品質膜が得られる。筆者らは超伝導転移温度  $T_c = 15.4 \text{ K}$ 、常伝導時の抵抗率  $\rho_{20 \text{ K}} = 62 \mu\Omega\text{cm}$  の NbTiN 膜を用いて SIS ミキサを作製し、物理温度 4 K における雑音温度の評価を試みた。作製した Nb 接合の臨界電流密度は、 $J_C = 6.5 \text{ kA/cm}^2$  と低いが、評価用光学系の損失を補正した雑音温度は 200 K 以下という非常に低雑音な性能を得た (図5)。一方、800 GHz 付近で雑音温度の上昇が見られた。これは MgO 基板が比較的高い比誘電率  $\epsilon_r = 9.6$  をもち、基板がや

や厚いと不要な高次モードが発生して損失が大きくなったと推測される<sup>5),6)</sup>。高次モードに対して、よりロバスタな設計をするには基板厚を  $20\ \mu\text{m}$  以下にする必要があり、基板厚の制御とハンドリングが難しくなってくる。MgO 基板と NbTiN 膜を用いた SIS ミキサは低雑音性能を実証した一方で、ALMA のような量産には不向きであることがわかった。筆者らは並行して (2) 石英基板を用いたミキサも検討した。石英は従来から用いられてきた基板材料であり、厚みの制御方法やカッティング方法などのポストプロセスが確立されており、比誘電率  $\epsilon_r \sim 4$  と比較的低いことから基板厚は  $40\ \mu\text{m}$  と厚くでき、ハンドリングも MgO よりは容易である。一方、石英基板上では NbTiN が多結晶膜となるため、スパッタ条件により膜質が変化する。高品質な膜を作製するためには、膜の組成比や結晶性を精密に分析し、最適条件で成膜する必要があった。われわれは、石英基板上で高周波損失が最小となるように、NbTiN 膜の超伝導転移温度  $T_c$  が高くなり、常伝導時の抵抗率  $\rho$  ができるだけ小さくなるように、スパッタリング条件を最適化するように試みた。その結果、 $T_c \geq 14.5\ \text{K}$ 、 $\rho_{20\ \text{K}} < 100\ \mu\Omega\text{cm}$  という高品質な膜を得ることに成功した。この NbTiN 膜を用いて SIS ミキサを作製し、Nb 接合の臨界電流密度は  $J_c = 9\ \text{kA}/\text{cm}^2$  を得た。この SIS ミキサを評価したところ、最小雑音温度は  $200\ \text{K}$  を切る非常に低い雑音温度を達成した<sup>7)</sup>。しかしながら、ALMA の仕様を全帯域で満たすような結果を得ることはできず、広帯域化は依然課題として残った。

## 2.4 SIS ミキサの広帯域化

これ以上の広帯域化を図るためにはより高い  $J_c$  をもつ SIS 接合の作製が必要になると考えられていた。しかし、 $J_c > 20\ \text{kA}/\text{cm}^2$  を得るには、より絶縁層を薄くしても高品質膜ができる条件を探るか、同じ厚みでも高い  $J_c$  を得るために AlN などのトンネル障壁の低い絶縁層材料を使用するなど、いずれも研究段階のアプローチが必要であっ

た。また、仮に実証できたとしても量産のために製造上の歩留まりも保障する必要があり、技術が確立されているわけではなかった。

当時筆者は設計・評価を担当していたが、デバイスの特性向上を待つのは、非常に歯がゆかった。筆者は博士前期課程でマイクロ波帯低雑音アンプの開発に取り組んでいたことから<sup>8)</sup>、能動素子の回路設計のアプローチでミキサの性能向上ができないか検討した。実は、SIS ミキサは量子力学的な取り扱いによると変換利得を有することが知られており<sup>9)</sup>、SIS ミキサは能動素子として動作していると考えられるのである。

低雑音アンプの設計では以下の2点が重要である。すなわち、(1) 低雑音な増幅素子を使用すること、(2) (1) の増幅素子が低雑音動作するように回路設計すること、である。SIS ミキサに当てはめると、(1) はできるだけ  $J_c$  が高く、リーク電流の低い理想的な接合を用いることに相当する。実はこの理想的な接合を用いるということが今回の開発のキーである。達成すべきことは  $787\text{--}950\ \text{GHz}$  の帯域で雑音温度を要求仕様値以内に収めることあって、極端に言えば、雑音のないミキサができれば仕様は満足できるのである。実際には量子限界雑音温度以下にはできないが、 $J_c$  の向上に固執するよりも、理想的な接合を用い

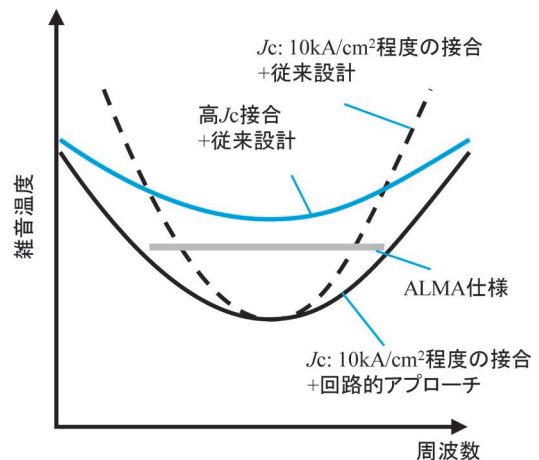


図6 SIS ミキサの広帯域化へのアプローチ。

ることでミキサ自体の雑音を下げて仕様を満たす雑音の帯域幅を広げられないかという発想である(図6)。では、高い $J_C$ は必要ないのかという疑問が生じるがそうではなく、ミキサ自体の雑音 $T_{\text{mix}}$ の帯域に少なからず影響し、利得 $G_{\text{mix}}$ の帯域幅に密接に関係している。受信機雑音温度が $T_{\text{mix}} + T_{\text{IF}}/G_{\text{mix}}$ で決まっていることから、 $J_C$ は受信機の低雑音動作帯域には重要なパラメーターである。(2)は、アンプのような能動素子の場合、最小雑音の得られるインピーダンス $Z_{T_{\text{min}}}$ と利得を最大化するインピーダンス $Z_{G_{\text{max}}}$ が異なっていることが知られている。SISミキサにも同様のことが言える。SISミキサの主な雑音は、LO電力印加時のフォトンアシステッドトンネリングによって誘起される接合間電流の揺らぎに起因する。それをショット雑音と言い、雑音の大きさはその平均電流値に比例する<sup>9)</sup>。通常、インピーダンス整合とは対象とする回路の入力インピーダンス $Z_I$ と信号源インピーダンス $Z_S$ が互いに複素共役値を取ることを指す。この条件では、利得は向上するが、出力される雑音電流が大きくなってしまい、

ミキサ自体の雑音が増えてしまうのである。一方、 $Z_I$ よりも $Z_S$ を下げれば不整合が生じるが、出力される雑音電流は抑えられるので、ミキサの雑音が下がることになる。しかしながら、不整合を大きくしすぎると利得が下がり、受信機雑音温度が上昇する。つまり、ミキサの利得と雑音にはトレードオフがあり、信号源インピーダンスを制御することによって受信機雑音温度と雑音の帯域幅を最適化する必要があるということである。

そこで、理想的な接合が得られ、製造上の歩留まりも比較的安定する、できるだけ高い $J_C = 10 \text{ kA/cm}^2$ の接合を用いて広帯域化が可能か検討し

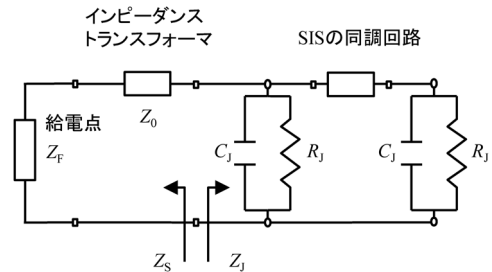


図7 SISミキサの等価回路。

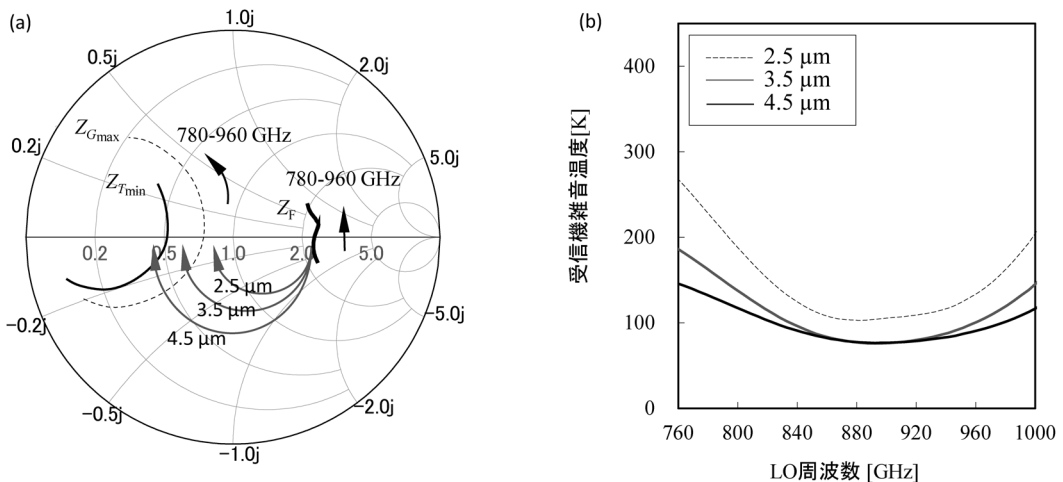


図8 (a)  $J_C = 10 \text{ kA/cm}^2$ と直径 $1.0 \mu\text{m}\phi$ の接合を用いた共振回路の最小雑音の得られるインピーダンス $Z_{T_{\text{min}}}$ と最大利得の得られるインピーダンス $Z_{G_{\text{max}}}$ およびボウタイアンテナの給電点のインピーダンス $Z_F$ の軌跡。インピーダンストランスフォーマーの幅によってどのように $Z_F$ が変換されるかを示している。スミスチャートはSISの常伝導抵抗値で正規化されている。(b) 異なる幅をもつインピーダンストランスフォーマーを用いた場合の予想される受信機雑音温度のLO周波数依存性。受信機前段の損失は無視している。

た. 図7は二つのSIS接合を用いた共振回路の等価回路である. 筆者はまず, この共振回路モデルに対して信号源インピーダンス $Z_S$ を掃引させた場合のSISミキサの $Z_{T_{min}}$ および $Z_{G_{max}}$ の周波数特性を調べた(図8). 接合径は $1.0\ \mu\text{m}\phi$ を仮定し, この場合のSIS接合の常伝導抵抗は $R_N=26.7\ \Omega$ である. 図8より $Z_{T_{min}}$ のほうが $Z_{G_{max}}$ よりもインピーダンスの実部が小さく, ややキャパシティブであるということがわかった. これに対して受信機雑音温度を計算すると $Z_S=0.5R_{N_{total}}$ と設計すれば最も低雑音かつ広帯域特性が得られることがわかった<sup>10)</sup>. ここで,  $R_{N_{total}}$ は二つの接合の合成抵抗値 $R_N/2$ である.

この理論計算によれば, 受信機雑音温度を劣化させずに広帯域でできることが判明したが, 問題はこれをどのように実験的に検証するかということである. マイクロ波-ミリ波ではインピーダンスチューナという, 信号源インピーダンスを連続的に変化させられるコンポーネントが市販されているが, 当周波数帯ではもちろん存在しない.

筆者らは, 次のような手法で検証実験を企画した. 前述のとおり, 導波管-マイクロストリップ変換回路にはボウタイアンテナが用いられる. ア

ンテナ給電部のインピーダンスは $Z_F=35\ \Omega$ に設計されている. この給電部と共振回路との間は特性インピーダンス $Z_0$ を有する4分の1波長のインピーダンストランスフォーマーでつながれており, この場合, 共振回路が信号源側を見る入力インピーダンスはよく知られた関係 $Z_S=Z_0^2/Z_F$ で結ばれる. われわれが見たいのは $Z_S$ に対する雑音温度特性の変化であるから,  $Z_F$ を固定して $Z_0$ を変化させることができれば,  $Z_S$ の制御が可能である.  $Z_0$ の変化はトランスフォーマの幅を変えることに相当する. そこで, ボウタイアンテナと共振回路は固定し,  $2.5\ \mu\text{m}$  (A),  $3.5\ \mu\text{m}$  (B),  $4.5\ \mu\text{m}$  (C) というトランスフォーマの幅だけが異なる3種類のミキサを設計し, 理論計算を行った. 給電部のインピーダンス $Z_F=35\ \Omega$ はそれぞれ,  $Z_S=17\ \Omega, 10\ \Omega, 7\ \Omega$ に変換することに相当する. 図8(b)より,  $Z_S=0.5R_{N_{total}}$ に最も近いミキサCが最小雑音かつ広帯域特性を得られていることがわかる. 一方, ミキサAは従来型的设计に近いが全体的にやや雑音温度が上昇し帯域も最も狭くなるという計算結果が得られた.

次に, これを実験的に検証するためにミキサを作製し, 雑音温度を比較した. 作製された三つの

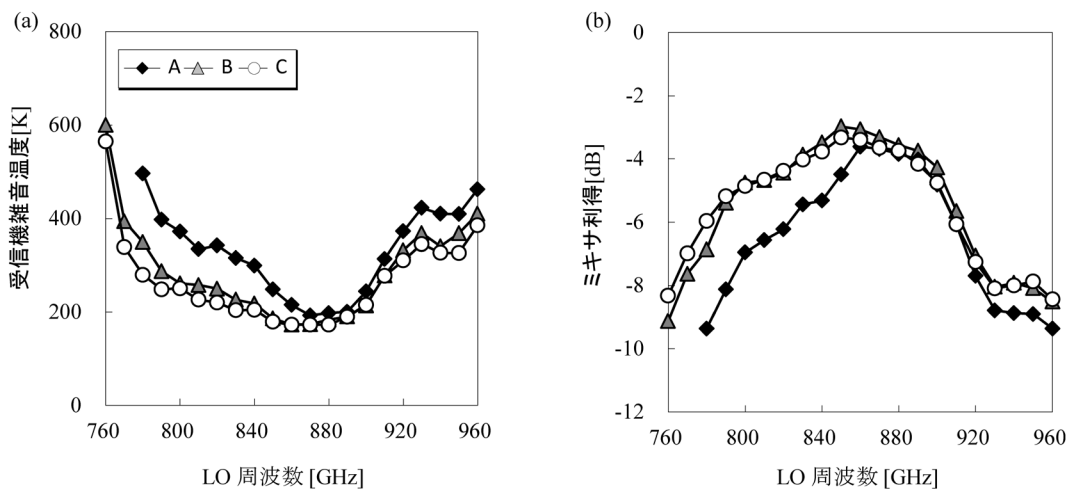


図9 異なる幅のインピーダンストランスフォーマーを用いたSISミキサを使用して測定した (a) 受信機雑音温度と (b) ミキサ利得のLO周波数依存性.

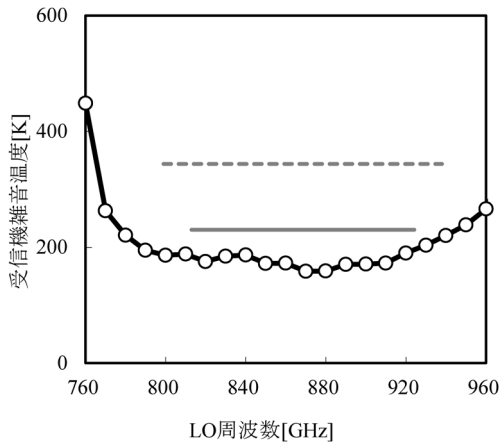


図10 SIS ミキサの広帯域低雑音動作実証.

SIS ミキサの  $J_C$  は設計値よりも若干低い  $8 \text{ kA/cm}^2$  であった。測定条件を揃えるために、ミキサブロックを含めて評価実験系はすべて同じものを使用し、LO 入力電力もすべて一定値とした。図9 (a) と (b) にミキサ A, B, C を用いた場合の受信機雑音温度およびミキサ利得の測定結果を示す。(a) より最も大きい  $Z_S$  をもつミキサ C が最小雑音および広帯域特性を示した。この結果は計算結果とよく一致している。興味深いのは、(b) の結果から、中心周波数付近では B に比べて C のミキサ利得が若干低下している点である。これは、 $Z_S$  の違いによって SIS ミキサの利得と雑音温度が変化するというを示しており、ミキサ B は  $Z_S$  が  $Z_{G_{\max}}$  に近く、C は  $Z_S$  が  $Z_{T_{\min}}$  に近いことを示唆している。これらの結果より、 $Z_S$  を  $Z_{T_{\min}}$  に近づけることで低雑音・広帯域特性が同時に得られることを実験的に確認した。SIS ミキサに関して実験的に直接この効果を確認したのは筆者の知る限り初めてである。

さらにミキサ C をベースにして回路を最適化したところ、評価系の光学損失を補正した受信機雑音温度は 780–920 GHz にわたって 200 K 以下を達成した (図10)。760 GHz 付近の雑音温度の上昇は、水蒸気による吸収が原因と考えられるので実際の帯域はさらに広いと考えられる。また、従

来型の設計である図5で示した  $J_C = 9 \text{ kA/cm}^2$  のミキサと比べても少なくとも2倍程度広帯域化されていることがわかる。この結果は、中心周波数の雑音温度を劣化させることなく、 $J_C$  が  $10 \text{ kA/cm}^2$  程度でも理想的な接合を用いれば Band 10 の帯域をカバーできることを実証した世界で始めての結果である<sup>10)</sup>。

筆者は導波管損失をできるだけ低減したカップラ組込型導波管ミキサの開発<sup>11)</sup> や 4–12 GHz IF 系の詳細な特性解析と改善方法を提案し、カートリッジ受信機に使用可能なミキサ部品としての性能実証も進めた。最終的に、Band 10 チームは受信機カートリッジとして ALMA の仕様を満たす受信機の開発に成功した<sup>12)</sup>。これらの結果はカートリッジ型受信機を量産するうえでの重要な証拠となり、現在すべての Band 10 受信機の量産と出荷が完了している<sup>13)</sup>。さらにファーストライトに続き、世界初の干渉実験にも成功し<sup>14)</sup>、今後も世界を驚かせる成果が出ることを期待したい。

### 3. 今後の展開と受信機開発の課題

日本が開発した ALMA Band 4, 8, 10 受信機は従来からの技術や知見を結集して開発された。Band 10 受信機は開発のインパクトから、注目されることも多いが、Band 4 や Band 8 でもさまざまな技術的困難があり、その課題を克服したアイデアや方法が Band 10 受信機の開発にも生かされている。また、国立天文台で長年蓄積されてきた導波管や SIS ミキサの設計・作製技術、情報通信研究機構での超伝導デバイスの作製に関するさまざまな研究や技術的知見に基づいて開発されたということを忘れてはならないと思う。

情報通信技術が電波や光という媒体にさまざまな情報を乗せることによって高速大容量通信が実現されてきたように、天文観測装置も宇宙からの電波や光に乗った情報をできるだけ多く、効率的に取得するということが求められる。ALMA の建設によって電波の偏波、強度、周波数、位相情



報を高分解能・高感度に取得できるようになった。しかしながら、ALMAでは広範囲の空間情報を一度に取得することは難しいし、1 THzを超える周波数の観測はできない。前者を可能にするには、受信機のマルチビーム化が今後重要なテーマとなると考えられる。後者についても、Band 10受信機が稼動すればより高い周波数への観測欲求が高まる可能性が高い。しかし、これらは既存技術では実現ができず、より高度な技術が必要で、新しい技術開拓が必要となる。したがって、現時点でさまざまな観点から初期検討を始めることが重要である。一方、近年国際会議や研究会などでは、新規技術開発や開拓的研究に関する日本からの発表が少なく、残念ながら世界との差を感じることもある。今後の開発は、将来の天文学に役に立つ観測装置は何なのかを観測的研究者と慎重に議論しながら、超伝導技術にかかわらず産業界・他分野を巻き込んで開発を進め、技術提案ができればと考えている。

## 謝 辞

本研究は、国立天文台・先端技術センターおよびチリ観測所、情報通信研究機構・超伝導デバイスグループ、中国紫金山天文台、当時所属していた大阪府立大学・宇宙物理学研究室との共同で進められました。特に、Band 10リーダーで当時の指導教員で現・情報通信研究機構・テラヘルツ連携研究室の鶴澤佳徳室長と、学部から博士後期課程修了までご指導いただいた大阪府立大学・小川英夫教授に深く感謝いたします。また、Band 10受信機開発グループの皆様、先端技術センターの皆様にご感謝申し上げます。本研究は筆者の博士論文としてまとめることができました。この場を借りて関係者の皆様にご感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) <http://www.almaobservatory.org/>
- 2) 平松正顕, 長谷川哲夫, 井口 聖, 立松健一, 2013, 天文月報106, 648
- 3) Baryshev A. M., et al., 2006, Proc. Infrared Milli. Waves and 14th Int. Conf. on Terahertz Electron, 392
- 4) Kooi J., et al., 2000, Int. J. Infrared Milli. Waves 21, 1357
- 5) Kojima T., et al., 2009, IEEE AS 19, 405
- 6) Kojima T., et al., 2009, EUCAS, presented
- 7) Kroug M., et al., 2009, IEEE AS 19, 171
- 8) 小嶋崇文, 阿部安弘, 小川英夫, 2008, 電子情報通信学会論文誌J91-C, 658
- 9) Tucker J., Feldman M., 1985, Rev. Mod. Phys. 57, 1055
- 10) Kojima T., et al., 2009, Appl. Phys. Express 2, 102201
- 11) Kojima T., et al., 2010, J. Infrared Milli. Terahertz Waves 31, 1321
- 12) Fujii Y., et al., 2011, IEEE AS 21, 606
- 13) Gonzalez A., et al., 2014, SPIE, presented
- 14) Asayama S., et al., 2014, SPIE, presented

## Development of a Low-Noise and Wideband SIS Mixer for the ALMA Band 10

Takafumi KOJIMA

*Advanced Technology Center, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: We have successfully demonstrated a low-noise and wideband mixer based on Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb superconductor-insulator-superconductor (SIS) junctions and an NbTiN/SiO<sub>2</sub>/Al superconducting microstrip for the ALMA Band 10. As based on the results, 73 Band-10 cartridge receivers were manufactured. In this article, I would like to show that what difficulties exist in the development of the SIS mixer and how we could solve technical challenges.