

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18057

研究課題名(和文) オクターブ帯域同時受信を可能とするマルチバンド型ヘテロダイン受信技術の研究

研究課題名(英文) Study on multiband heterodyne receiver technologies aiming at octave instantaneous bandwidth

研究代表者

小嶋 崇文(Kojima, Takafumi)

国立天文台・先端技術センター・助教

研究者番号：00617417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、受信機フロントエンド部分をフィルタバンクによって分割する、マルチバンド型受信機の開発研究を進めた。その要素技術として、400 GHz帯周波数マルチプレクサ、および、従来比3倍以上の広帯域IF(中間周波数)帯域幅を有する超伝導ミキサの開発に成功した。また、それらを組み合わせて3バンド受信機評価系を構築し、原理実験を実施した。その結果、約200 Kという低雑音特性が得られ、受信機がほぼ設計通りに動作していることを確認した。また、回路の集積化や最適化によってさらなる性能向上が可能であることも示した。以上の結果から、マルチバンド型受信機が同時受信帯域の広帯域化に有効である見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：We have successfully developed a radio frequency (RF) filter and low-noise heterodyne mixer-preamplifier modules for a multiband receiver at 400 GHz band. The RF filter adopted a hybrid-coupled type of the multiplexer to divide the frequency range of 405-480 GHz into 3 bands. The measurement result showed excellent agreement with the simulation. The heterodyne module integrates a superconductor-insulator-superconductor (SIS) mixer with a cryogenic low-noise pre-amplifier. The measurement demonstrates 3 times wider bandwidth than the one in current existing receivers maintaining low-noise temperature. By combining the multiplexer and the modules, we demonstrated noise temperature of 200 K for a 3-band receiver. The result indicates that this approach is promising for future low-noise and wideband receiver applications.

研究分野：超伝導および高周波エレクトロニクス

キーワード：低雑音 ヘテロダイン 超伝導ミキサ 周波数マルチプレクサ マルチバンド 広帯域

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯は、現在急速に技術が進展している。これらの多くは、テラヘルツ波発振器の高出力化の恩恵をうけており、時間領域分光法などに代表されるように、高い信号対雑音(S/N)比でアクティブに広帯域分光を行うことが可能となってきた。一方で、観測対象自らが放射するテラヘルツ波をパッシブに広帯域受信する技術もきわめて重要である。たとえば、宇宙初期に形成された銀河等からの放射スペクトルは赤方偏移してミリ波テラヘルツ波に広く分布する。これらがいつ・どのように誕生したのかという問いに答えるためには、できるだけ多くの天体を観測し、詳細かつ統計的に検証しなければならない。一方、観測信号は極めて微弱であり、有限時間内に多くのサンプルを観測するためには、高感度かつ広帯域な分光観測装置が必要不可欠である。また、星間空間などに存在するダストからの連続波を高空間分解能観測する場合においても、感度向上の観点から広帯域な受信装置が必要である。したがって、電波天文分野では、観測効率や感度の観点から、極めて低雑音なヘテロダイン広帯域受信技術を必要としている。

近年アルマ (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) に代表されるミリ波-テラヘルツ帯の望遠鏡には量子雑音限界に迫るヘテロダイン受信機が搭載されている。特に、我々が開発した SIS (超伝導体-絶縁体-超伝導体) 受信機は世界最高性能を示している。しかしながら、例えば、アルマ望遠鏡のバンド 8 受信機は、観測可能周波数 (RF) が 385-500 GHz ( $\Delta f_{RF} = 115$  GHz) に対して両側波帯の中間周波 (IF) 帯域は 4-8 GHz ( $\Delta f_{IF} = 4$  GHz) であり、RF に対して 7% ( $2\Delta f_{IF} / \Delta f_{RF} = 0.07$ ) しか同時受信ができない。その一方で、受信機 IF 部分のみに着目し、RF と同等の帯域幅を目指すことは現在の技術では非現実的である。これは IF 帯初段に用いる「冷却アンプの低雑音性能を確保できる帯域」と「SIS ミキサと IF アンプ間に用いてきたアイソレータの帯域」が 10 GHz 程度に留まっていたためである。そのため、本研究で目指す  $f_{IF} / f_{RF} \sim 100\%$  は、技術的障壁が高く、実現が困難であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、低雑音な特性を確保したまま  $\Delta f_{IF} / \Delta f_{RF} \sim 100\%$  を目指すために新たな受信システムとしてマルチバンド受信機を提案する (図 1)。RF 信号は周波数マルチプレクサを用いることによって、複数のチャンネルに分割し、それぞれの SIS ミキサに入力される。また、複数の周波数からなる局部発振器電力 (LO) を各々の SIS ミキサに入力することによって、各チャンネルから  $\Delta f_{IF} = \Delta f_{RF}$  の帯域幅を持つ IF 信号が出力される。各チャンネルから出力された IF 信号は、 $\Delta f_{IF}$  と同等の帯域幅を持つ冷却型広帯域アンプによってそれぞれ低雑

音増幅され、常温の増幅系へと伝送される。

本研究では、マルチバンド受信機のフロントエンド部に焦点を当て、その技術的課題の多い要素部品の検討を詳細に行い、受信機システムの実現可能性を検討することを目的とした。特に、低損失 RF マルチプレクサ回路の実現、1 チャンネルあたりの帯域を広げるためのヘテロダインモジュールを検討対象とした。

また、評価システムを構築して原理実証を進め、従来のヘテロダイン受信機に対する優位性を明らかにするとともに課題抽出し、オクターブ受信機実現への指針を得ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、400 GHz 帯で原理実証を目指し、要素部品開発と原理実証用受信機システム構築を進めた。要素部品は 2 つのキーデバイスとして、「RF マルチプレクサ回路」と「SIS ミキサ-IF アンプモジュール」に分けて研究を進めた。最終的にそれらを組み合わせることによって受信機フロントエンドを構成し、評価系を構築した。具体的な成果については次の項に示す。

### 4. 研究成果

#### (1) マルチプレクサの設計指針の考察とその開発

RF 帯マルチプレクサは低損失かつチャンネル間の周波数ギャップができるだけ小さいなどの特性が必要である。また、バンドパスフィルタは入出力回路の整合が取れていない場合、フィルタ特性が劣化することが懸念される。そのため、マルチプレクサの出力部分にいかなる負荷がついたとして他のチャンネルに影響を与えない、チャンネルの高い独立性が求められる。そこで本研究では、導波管型ハイブリッドカップル型マルチプレクサを採用した。ハイブリッドカップル型マルチプレクサは 90 度ハイブリッドカップラとバンドパスフィルタをそれぞれ 2 つずつ用いた構成となっており、当周波数帯においては我々の知る限り実現された例はない。本研究で開発したマルチプレクサは、405-480 GHz を 25 GHz 間隔で 3 つの周波数帯に分割する。すなわち、Ch. 1: 455-480 GHz、Ch. 2: 430-455 GHz、Ch. 3: 405-430 GHz である。導波管サイズは

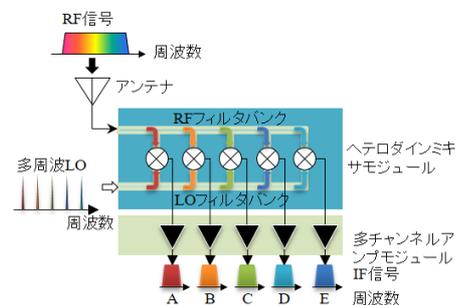


図 1 マルチバンド受信機概念図

WR-2.2 (280  $\mu\text{m}$  x 560  $\mu\text{m}$ )を採用した。

設計では、反射損失や他のチャンネルへの漏れ込みによる信号損失を低減するためにシグナルフローグラフを利用し、高周波回路の設計について考察した。その考察の結果、信号損失を抑えるためには、ハイブリッドカップル型マルチプレクサに用いる 90 度ハイブリッドの反射損失と 2 つの出力振幅比がマルチプレクサの特性に極めて重要であることが判明した。たとえば、マルチプレクサの反射損失(フィルタの反射帯域)あるいは信号漏れ込み損失(フィルタ通過帯域)を-20dB 以内に抑えるためには振幅比を 0.83 dB に留める必要がある。本研究では、8 分岐のプランチライン型 90 度ハイブリッドを採用し、最大の振幅比を 0.63dB、反射損失は-24.5 dB に抑えた。各チャンネルのフィルタは、アイリス窓を用いたバンドパスフィルタを採用し、5 段のチェビシェフ型フィルタを設計した。これらを組み合わせ、電磁界解析ソフト HFSS によるシミュレーションを実行した結果、マルチプレクサの通過特性は、25 GHz 間隔で 3 バンドに分割できており、設計目標を満たしていることを確認した(図 2 (b))。また、図 2(a)と(b)に製作したマルチプレクサの写真と SEM 画像を示す。当部品は 2 つ割りで製作されており、組み立て時は一辺 20 mm の立方体で、入出力部 4 面は UG 規格のフランジとなっている。図 2(b)にはシミュレーション結果と併せて測定結果も示しており、各チャンネル

の通過特性は設計値に対して 2 GHz 以内の精度で 25 GHz 間隔に分割され、少なくとも 0 から-40 dB のレベルにおいてシミュレーションと非常によく一致している。また、図が複雑となるため表示はしていないが、入力反射損失についても所望の帯域において-15 dB 以下となっていることも確認した。これらのことから当マルチプレクサはほぼ設計通りに動作しており、本研究におけるキーコンポーネントである周波数分波器の開発が完了した。

## (2) SIS ミキサ IF アンプモジュールの開発と広帯域化検討

マルチバンド受信機を実現する際の課題の一つは、受信機を構成する個々のチャンネルの IF 広帯域幅化である。個々のチャンネルの IF 帯域幅を広くできれば、マルチバンド受信機を構成するチャンネル数を減らすことができ、RF 損失の低減やシステム構成の簡素化・コンパクト化する観点から有利である。前述の通り、IF 広帯域幅化の課題となっていたのは、IF アンプの帯域と、SIS ミキサと冷却低雑音 IF アンプ間に挿入していたアイソレータの帯域である。そこで本研究ではアイソレータを取除き、SIS ミキサと広帯域 IF アンプの集積化を試みた。そのために、SIS ミキサと一体実装できるように設計を施した 3-21 GHz 帯アンプ(Low Noise Factory 社)を入手し、両者を一体化した SIS ミキサ-IF プリアンプモジュールを開発した。課題の一つとして両者の整合があげられるが、IF アンプ側は 50  $\Omega$  にて設計されており、SIS ミキサ側は高臨界電流密度接合を用いて両者の整合をとるなど設計上の工夫を行った。その結果、従来の 4-8 GHz に対して 3-18 GHz という 3 倍以上の広帯域幅化に成功した。他方、18-21 GHz では利得の低下と雑音温度の上昇が見られ、IF プリアンプのフル帯域(3-21 GHz)を低雑音に取り出すには至っていない。そこで、モジュールを構成するミキサチップと IF プリアンプを個別に評価し、モジュールを等価回路モデリングすることによって課題を抽出し、性能向上の可能性について検討した。モジュールの特性をモデリングするために、SIS ミキサチップおよび IF アンプの S パラメータをいずれも冷却状態で評価した。図 3(a)は、LO 電力を印加していない場合の各バイアス電圧における SIS ミキサチップの出力インピーダンスの周波数特性をスミスチャート上で示したものである。インピーダンスの軌跡のうち、インピーダンスの実部が低い場合は低周波側で誘導性の振る舞いをするが、周波数が高くなるにしたがって容量性に移り、反射係数が増大していくことが見てとれる。これは、並列の RC 回路に直列の L が接続された典型的な回路と考えられる。図 3(b)に示すようにミキサチップに対して等価回路モデルを作成し、SIS ミキサ同調回路部のキャパシタンスやワイヤーボンディング部の回路パ

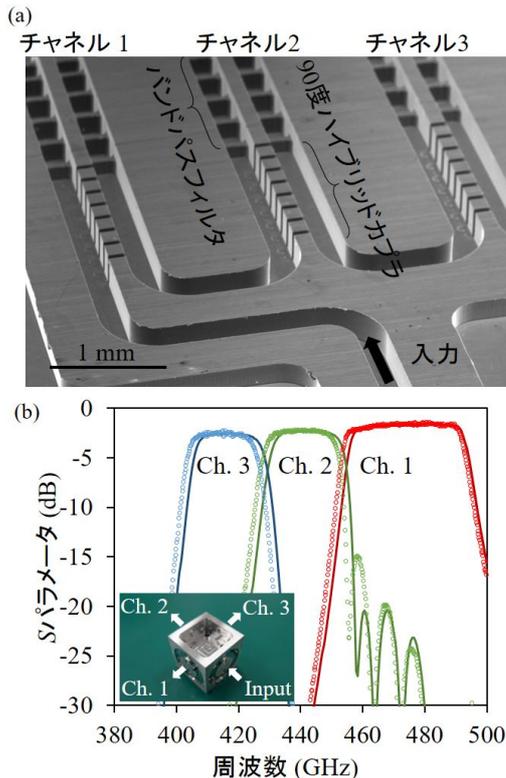


図 2 (a)マルチプレクサ内の導波管回路の SEM 画像。(b)ネットワークアナライザを用いた S パラメータのシミュレーション(実践線)と測定結果(白抜き丸)。

ラメータをフィッティングにより求めた。図 3 (b)にはフィッティング結果も示している。この結果、いずれのバイアス電圧においてもインピーダンスの軌跡は非常によく一致している。

図 3(a)と(b)で示した SIS ミキサチップのモデリング結果と IF アンプの S パラメータを用いて、LO 440 GHz におけるミキサ-プリアンプモジュールの雑音温度と利得の周波数特性を計算した。RF 損失を含めたミキサの利得を -0.9 dB と仮定すると雑音温度および利得の周波数特性が非常によく一致することがわかった(図 3(c))。この結果から、今回開発した SIS ミキサ-IF プリアンプモジュールが高精度にモデリングできていると考えられる。また、18 GHz 以上の利得の低下と雑音温度の上昇は、ミキサチップ内に集積化されている同調回路内のキャパシタンスとミキ

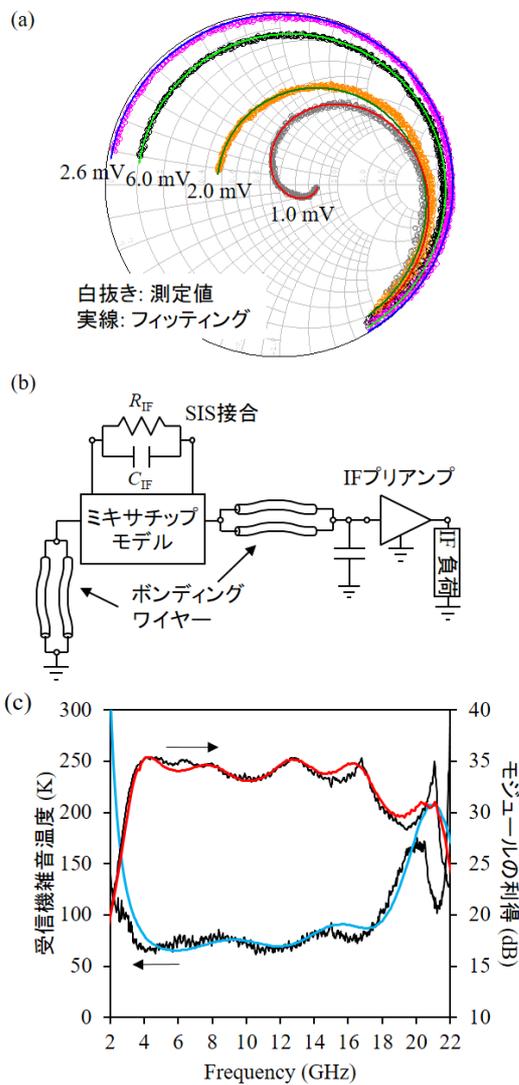


図 3 (a)ミキサチップの出力インピーダンス測定とフィッティング結果。(b)ミキサ プリアンプモジュールの等価回路モデル。(c) 受信機雑音温度とモジュール利得の測定と等価回路モデルによるシミュレーション結果。

サチップのフィルタ構造によるインダクタンス成分が高周波側のインピーダンス不整合を招いているためであることがわかった。

これらの結果や構築したモデリング手法に基づき、新たに SIS ミキサチップを設計した。当回路にはミキサ IF 部に広帯域整合回路を設けており、IF プリアンプのフル帯域である 3-21 GHz を低雑音に取り出せることを計算上確認し、さらなる広帯域化への見通しを得た。

### (3) マルチバンド受信機の原理実証実験

開発した RF マルチプレクサおよび SIS ミキサ-IF プリアンプモジュールを用い、マルチバンド受信機の原理確認実験を実施した。本実験では、3 バンド用の受信機測定系を準備した。受信機は、ホーンアンテナとマルチプレクサに加え、3 つの RF 出力ポートに各々 LO カプラとミキサ-アンプモジュールが取り付けられた構成となっている(図 4(a))。本研究では LO 系のシステム構築状況を勘案し、Ch2 のみを評価対象とした。

図 4(b)に、LO 454 GHz を入力した際の雑音温度の測定結果を示す。この場合、ミキサは RF : 432-452 GHz に対して SSB 動作し、IF : 3-17 GHz 上で約 200 K の雑音温度特性を得た。フィルタなどを用いない場合のミキサ単体での雑音温度測定結果は 80-90 K 程度であり、フィルタ内の導波管損失を考慮すると妥当

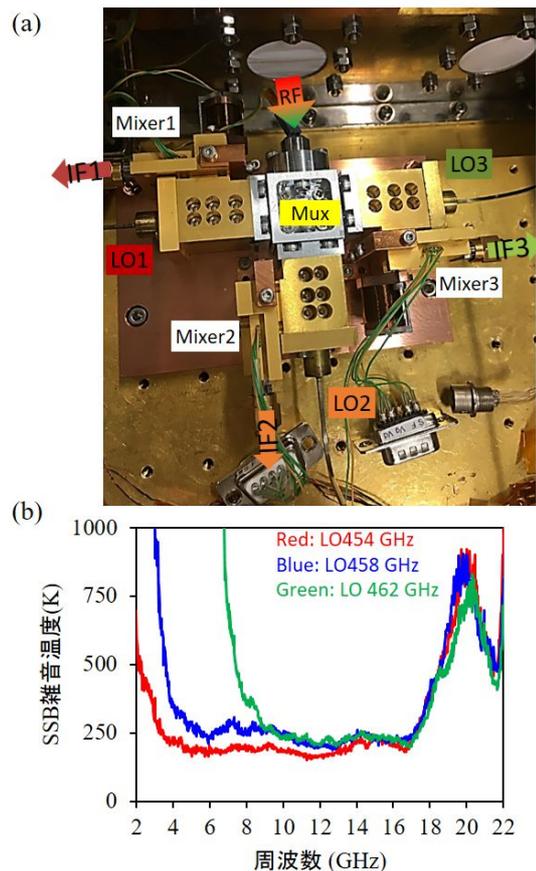


図 4 (a) 3 バンド受信機実験系の写真。(b) Ch2 の雑音温度測定結果。

な値である。また、LO を 458 GHz, 462 GHz とシフトさせると IF の低周波側から帯域が制限されている様子も見てとれる。以上より、開発したマルチプレクサや SIS ミキサ-アンプモジュールが受信機として適切に動作していることを確認できた。

#### (4)本研究成果のまとめ

・本研究では原理実証用に 405-480 GHz 用のマルチプレクサを開発した。RF マルチプレクサ方式としてハイブリッドカップル型を採用し、1 チャンネルあたり 25 GHz 幅で分割し、漏れ込みによる損失と反射損失の低い、マルチバンド受信機に理想的な特性を実証した。一方、オクターブバンドをカバーするためには、90 度ハイブリッド部が技術的な課題となることが考察によりわかっている。この課題については研究成果(A. Gonzalez, et al., 2017)で示すように、275-500 GHz 帯というほぼオクターブ帯域でハイブリッドカップル型ダイプレクサ回路をすでに開発しており、実現の見通しを得ている。

・従来方式を見直し、アイソレータを取除き、SIS ミキサと IF アンプを一体化することで 3-18 GHz を低雑音に取り出すことに成功した。詳細解析により、IF アンプのフルバンド 3-21 GHz を取り出すための設計解を得た。今後さらに広帯域な IF アンプを入手できれば、1 チャンネルあたりの帯域をさらに広帯域化することが可能となる。

・マルチバンド受信機の評価系を構築し、原理実験を実施した。雑音温度は 200 K 程度であり、量子雑音の 10 倍程度であった。これはアルマバンド 8 帯の現在の雑音温度仕様と同等の値であるが、フィルタ構造及び導波管長によるオーミックな回路損失が雑音温度上昇に影響していることも明らかになっている。したがって、ミキサ回路を含めてマルチバンド受信機のフロントエンド部分を集積化・コンパクト化することによって、さらなる高性能化が可能となる。

以上の検討により明らかになった課題を解決することで、既存システムを凌駕する受信機実現の見通しを得ることができた。

#### 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 6 件)

T. Kojima, M. Kroug, K. Uemizu, Y. Niizeki, H. Takahashi, Y. Uzawa, Performance and Characterization of a Wide IF SIS-Mixer-Preamplifier Module Employing High-Jc SIS Junctions, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 7, no. 6, pp. 694-703, Nov. 2017, doi: 10.1109/TTHZ.2017.2758260, 査読有

A. Gonzalez, T. Kojima, K. Kaneko, S.

Asayama, 275-500 GHz Waveguide Diplexer to Combine Local Oscillators for Different Frequency Bands, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 7, no. 6, pp. 669-676, Nov. 2017, doi: 10.1109/TTHZ.2017.2758789, 査読有

小嶋 崇文, アルマ受信機グループ、鶴澤 佳徳、アルマ望遠鏡を支えるミリ波・サブミリ波高感度受信機技術と将来開発、MWE2017 ワークショップダイジェスト WE2B-2、2017 年 11 月、査読無

T. Kojima, M. Kroug, K. Sato, T. Sakai, Y. Uzawa, On-Wafer Capacitance Measurement of Nb-Based SIS Junctions With a 4-K Probe Station, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 1-4, June 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2657693, 査読有

T. Kojima, M. Kroug, K. Uemizu, Y. Niizeki, H. Takahashi, Y. Uzawa, Performance of a Wide IF SIS-Mixer-Amplifier Module for ALMA Band 8 (385-500 GHz), in Proceedings of Twenty-Eighth International symposium on Space Terahertz Technology, Cologne, Germany, March 13-15, 2017, 査読無

T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, Y. Uzawa, Design and Development of a Hybrid-Coupled Waveguide Multiplexer for a Multiband Receiver, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 7, no. 1, pp. 10-19, Jan. 2017, doi: 10.1109/TTHZ.2016.2627220, 査読有

[学会発表](計 15 件)

小嶋 崇文, ヘテロダイン受信機・技術の最新動向・将来展望、2017 年度 宇宙電波懇談会シンポジウム、2018-03-19、招待講演

小嶋 崇文, ミリ波・サブミリ波帯電波望遠鏡用高感度受信機と将来開発、2017 年度先端 ICT デバイスラボ研究交流会、2018-01-12、招待講演

小嶋 崇文, アルマ電波望遠鏡を支えるミリ波・サブミリ波高感度受信機技術と将来開発、Microwave Workshops & Exhibition MWE 2017、2017-11-29、招待講演

小嶋 崇文, M. Kroug, 上水 和典、新関 康昭、鶴澤 佳徳、高臨界電流密度接合を用いた IF 広帯域 SIS ミキサ プリアンプモジュール、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017-09-11

小嶋 崇文, 受信機の IF 広帯域化の検討、第

17 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、情報通信研究機構、東京、小金井、2017-02-27

小嶋 崇文、ミリ波サブミリ波帯受信機技術の研究と ALMA 受信機の将来技術開発、2016 年度宇宙電波懇談会シンポジウム、国立天文台、東京、三鷹、2017-02-22、招待講演

T. Kojima, A. Gonzalez, M. Kroug, Y. Fujii, K. Kaneko, W. Shan, S. Asayama, Y. Uzawa, K. Makise, H. Terai, Z. Wang, Superconducting Receiver for ALMA Radio Telescope and Future Development, 29th International Symposium on Superconductivity, 東京国際フォーラム、東京、千代田区、2016-12-13、招待講演

K. Sato, T. Kojima, M. Kroug, T. Sakai, Y. Uzawa, Capacitance Measurements of Niobium SIS Junctions at Microwave Frequencies, 東京国際フォーラム、東京、千代田区、2016-12-13

小嶋 崇文、A. Gonzalez、浅山 信一郎、鶴澤 佳徳、マルチバンド型受信機用 450 GHz 帯導波管型周波数分波器の開発、日本天文学会秋季年会、愛媛大学、愛媛、松山、2016-09-14

小嶋 崇文、M. Kroug、酒井 剛、鶴澤 佳徳、冷却プローブステーションを用いた SIS 接合のキャパシタンス測定、2016 年第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、中央区、2016-09-13

T. Kojima, M. Kroug, K. Sato, T. Sakai, Y. Uzawa, Capacitance Measurement of High Current Density Nb/AlN/Nb Junctions with a 4-K Probe Station, 2016 Applied Superconducting conference, Denver, Colorado, United States, 2016-09-04

T. Kojima, Feasibility Studies of a Wideband IF Receiver, NRO-ALMA Science/Development Workshop, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所、長野、南佐久、2016-07-20

T. Kojima, Development of SIS mixers for future receivers at NAOJ, ALMA Developer's workshop, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2016-05-25

T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, Y. Uzawa, Development of an RF Waveguide Frequency Multiplexer for a Multiband Heterodyne System, The 27th International Symposium on Space and Terahertz Technology, 中国、

江蘇省、南京、2016-04-12

小嶋 崇文、A. Gonzalez、M. Kroug、浅山 信一郎、鶴澤 佳徳、超広帯域ヘテロダイン同時受信技術構築に向けた周波数分波器の設計、日本天文学会 2015 年秋季年会、甲南大学、兵庫県、神戸、2015-09-09

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

小嶋 崇文 (KOJIMA Takafumi)

国立天文台・先端技術センター・助教

研究者番号 : 0 0 6 1 7 4 1 7