

マイクロ波センシング

1. はじめに

いわゆる電波を利用すれば、通信や放送などの情報伝送だけでなく、レーダーや大気観測など、人間の目には見えないセンシングが可能である。例えば、大気中の水蒸気、酸素、オゾンその他微量物質が発するミリ波、サブミリ波などの電磁波を観測すれば、それら物質の存在量、温度、風速などの環境計測を行うことが可能である。これによりゲリラ豪雨などの突発気象の予測や気候モデルの高精度化などに役立つことが期待されている。また宇宙空間においては、冷たい塵やガスなどからミリ波、サブミリ波が発せられており、これらを観測することによって星や惑星系、銀河の誕生のみならず、宇宙の中で生命につながる物質の形成など宇宙物理学、天文学、惑星科学における重要な問題を次々と解き明かすことが期待されている。このように、電磁波を用いたセンシングは従来見えなかったものを可視化する有益なツールであり、人類に大きな恩恵をもたらす。しかしながら、大気や宇宙から発せられるミリ波、サブミリ波は非常に微弱であるため、高感度電磁波検出技術が必要である。本稿では、宇宙観測用電波望遠鏡の高感度受信機を例に、電波センシングに関連する技術や最新の研究などを紹介する。

2. 電波の観測技術

2.1. 電磁波検出方法

1931年にアメリカ人無線技術者の K. Jansky が銀河中心からの電波を捉えて始まった宇宙電波観測は、1960年代にパルサー、クエーサー、宇宙背景放射の発見、1970年代の星間分子雲の発見など、爆発的な広がりを見せた。この背景には真空管に代わってエレクトロニクス技術が進展し、電磁波検出装置が高性能化したことが伴っている。1980年代以降になると、SIS 接合などによる超伝導エレクトロニクス技術や HEMT に代表される超高速エレクトロニクス技術が加わるこ

とによってミリ波、サブミリ波の観測精度が飛躍的に向上し、星や惑星の形成、宇宙の進化の理解などが大きく進展した。

ここで言う電磁波の検出方法は、大別すると 2 つある。電磁波の性質に粒子性と波動性があることから、電磁波を「光子」として検出する方法と、「波」として検出する方法がある。前者については直接検出、後者はヘテロダイン検出という方法で実現できる。大気や宇宙からのミリ波、サブミリ波は、光子としてのエネルギーが非常に小さく、また微弱であるために超伝導技術を用いた高感度検出が広く使われている。以下に示す。

2.2. 直接検出

超伝導技術を用いた高感度直接検出器は以下の 3 つに大別される。超伝導遷移端センサ (Transition Edge Sensor: TES)、マイクロ波力学的インダクタンス検出器 (Microwave Kinetic Inductance Detector: MKID)、そして超伝導トンネル接合検出器 (Superconducting Tunnel Junction Detector: STJ) である。

TES は、超伝導体を素子として使い、電磁波の入射、吸収によって生じる温度変化を、超伝導薄膜の超伝導状態から常伝導状態への遷移領域を利用して電磁波を検出する。通常、その遷移幅は mK 以内であり、電気抵抗が急激に変化することから極めて高い電磁波検出感度を実現できる (図 1)。1941年に D.H. Andrews が最初の原理実証に成功したものの[1]、実用化にはインピーダンス

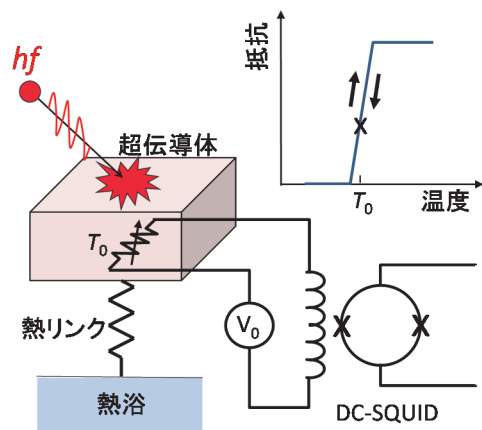


図 1 TES の動作原理

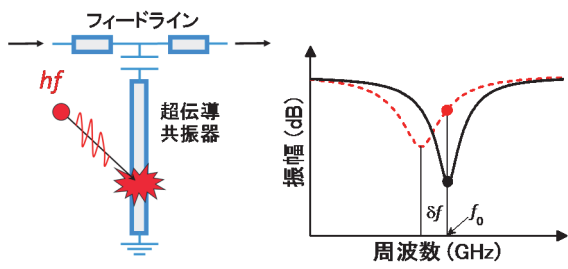


図2 MKIDの動作原理

の低い TES 検出器に整合する増幅器の出現を約半世紀待たなければならなかった。超伝導量子干渉デバイス (SQUID) 電流増幅器がそれで、時分割、周波数分割などの様々な手法で TES 検出器からの信号を多重化することが可能となっている。したがって、検出器をアレイにした場合に読み出し配線数を少なくできるため、大規模な検出器アレイが可能となる[2]。

MKID は、約 15 年前に米カリフォルニア工科大学の J. Zmuidzinas らによって考案された比較的歴史の浅い電磁波検出器である[3]。超伝導体の超伝導ギャップエネルギーよりも大きなエネルギーの光子が入射されると、超伝導電子対 (クーパー対) が解離され、このクーパー対に起因する力学的インダクタンスが変化する現象を利用したものである。超伝導体を用いた周波数共振回路 (マイクロ波帯) にミリ波やサブミリ波受信用アンテナを結合させておき、電磁波入射に伴う共振特性 (振幅、位相) の変化を読むことで高感度の検出器として動作させる (図 2)。この際、共振回路毎に、共振周波数を僅かに変えておけば、複数の共振回路を 1 本のマイクロ波伝送線路に結合させることで同時読み出しが可能となる。DC バイアスも不要なため、大規模なアレイ検出器が容易に実現可能である。

STJ は、超伝導体-絶縁体-超伝導体 (SIS) の 3 層構造からなるトンネル接合を検出素子とする。理想的な SIS 接合においては、その両方の超伝導体電極材料のエネルギーギャップを Δ とすると、温度 $T = 0 \text{ K}$ の場合にギャップ電圧 $2\Delta/e$ 以下のバイアス電圧領域では準粒子トンネル電流が流れない。ここに電磁波を照射するとクーパー対が壊れて生じた準粒子が光子のエネルギーを吸収

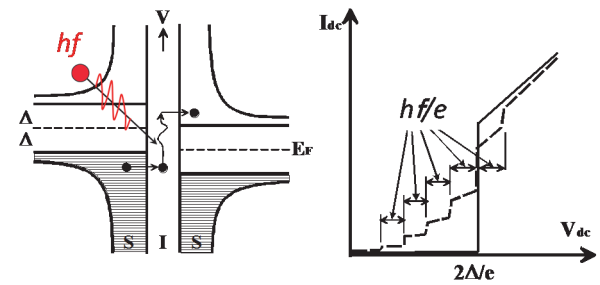


図3 SIS接合におけるPAT現象

してトンネルし、電流が流れる。この際、電流-電圧 ($I-V$) 特性においてギャップ電圧の両側に hf/e の間隔で準粒子トンネルによるステップ状の構造が現れる。これは、光子誘起トンネル (Photon-Assisted Tunneling: PAT) ステップと呼ばれ、この量子効果による $I-V$ 特性の変化を利用して電磁波を検出する (図 3)。この現象は 1962 年に A. H. Dayem と R. J. Martin によって初めて観測され[4]、翌年に P. K. Tien と J. P. Gordon によって理論的に説明された[5]。感度は、量子極限においては光子 1 個当たり 1 個の電子がトンネルするため、光子検出が可能となる。しかしながら、検出素子毎に配線が必要であるため、大規模アレイを構成することが困難である。

2.3. ヘテロダイン検出

電波観測において、電波の「波」の性質を利用すると、信号強度 (振幅) だけでなく、位相情報を得ることが出来る。ミリ波やサブミリ波などの高周波信号は直接増幅することは難しい。そこで観測信号と人工的に発生した局部発振波 (LO) 信号を非線形素子に通して、数 GHz-10 GHz 程度の低い周波数に変換する (図 4)。これをヘテロダイン変換と言う。このようにすることで、信号の「波」としての位相情報を保つことができる。ただ

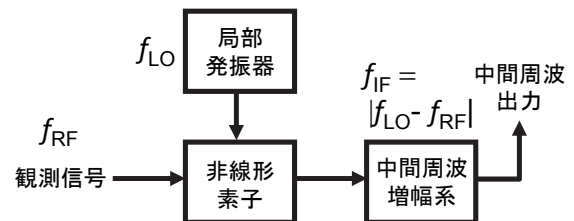


図4 ヘテロダイン検波のブロック図

し、量子力学における不確定性原理による「量子雑音」呼ばれる理論的な感度の限界が存在し、その値は hf/k_B である。

変換された信号は、中間周波 (Intermediate Frequency: IF) 信号と呼ばれ、通常のマイクロ波技術で増幅される。このヘテロダイン変換に用いられる非線形素子がミキサ (周波数混合器) であり、金属と半導体とを接合させたショットキーバリア・ダイオードや、先の直接検出器で述べた SIS 接合、微小な超伝導細線を利用した超伝導ホットエレクトロンボロメータ (HEB) などがある。このうち SIS ミキサは、準粒子トンネリングによる I - V 特性において半導体では実現不可能な強い非線形性が現れるため、量子雑音限界に迫る究極の感度を達成可能である。1980 年代に超伝導 Nb による SIS ミキサが電波望遠鏡に搭載されて以来、その優れた低雑音性能からミリ波・サブミリ波の観測装置に広く用いられてきた。

ヘテロダイン検出では、直接検出では得ることが困難な非常に高い周波数分解能を比較的容易に実現できる。これに加え、位相情報を得ることが可能であることから、複数のアンテナで受信した信号を「干渉」させ、あたかも 1 つの大きなアンテナとして動作させることが可能である。これを「開口合成」と呼び、ケンブリッジ大学の天文学者 M. Ryle によって考案された。これにより、彼は 1974 年にノーベル物理学賞を受賞している [6]。その集大成ともいえる人類史上最大の開口合成望遠鏡が、2013 年に誕生したアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA) である [7]。

2.4. 地上最大の電波望遠鏡 ALMA の概要

ALMA は、国立天文台 (NAOJ) を代表とする東アジア、米国国立電波天文台 (NRAO) を代表とする北米連合、ヨーロッパ南天天文台 (ESO) を代表とする欧州の国際共同プロジェクトで、南米のチリ共和国北部にある標高 5000 m のアタカマ砂漠に建設した地上最大の電波望遠鏡である (図 5)。この場所は、水蒸気による電波吸収の影響を受けにくい上、広く平坦なため、合計 66 台のパラボラアンテナ (直径 12-m アンテナ 54 台 + 直径 7-m アンテナ 12 台) を配置するには地球上で最も適している。観測周波数は、35 GHz (ミリ波) から 950 GHz (サブミリ波) であり、ヘテロダイン検出により観測する。

先に述べたように、各アンテナで受信した天体からの電波信号を「干渉」させることによって、66 台のアンテナ群をあたかも 1 つの大きな望遠鏡として動作させているため、「干渉計」と呼ばれている。干渉計の性能は、望遠鏡の視力 (解像度) で表現され、最も離れたアンテナ間の間隔 (基線長 D) と観測波長 λ の比 (λ/D) で決まる。ALMA は「大型」という名前の通り、最大基線長が 18.5 km (東京の山手線サイズ) であり、また観測電波信号の最小波長は約 300 μm となるため、0.01 秒角の解像度を実現可能とする。これは、高解像度を誇る「すばる望遠鏡」や「ハッブル宇宙望遠鏡」の約 10 倍高い解像度となる。感度については、アンテナの総開口面積、受信機感度、大気透過度で決まり、やはり既存の電波望遠鏡を 1 桁以上上回ることになる。ALMA 望遠鏡の圧倒的に優れた性能によって画期的な成果を提供している。



図 6 南米チリ、標高 5,000 m のアタカマ砂漠で順調に稼働している ALMA 望遠鏡

3. ALMA 搭載受信機

3.1. 受信機システムの概要

66 台の各アンテナには、観測周波数 35-950 GHz の大気の窓に対応する 10 個のバンドに分けたヘテロダイン受信機が搭載されている。天体における磁場などに影響される偏光情報を取り出すなどのために、直交する 2 つの直線偏波を同時に観測する。10 バンド分の受信機は、4 K まで冷却可能な 3 段式ギフォード・マクマフオン (GM) 冷凍機を用いた直径約 1 m の大型クライオスタット中で冷却される。図 6 は、ALMA クライオスタットに装填された受信機群の写真であり、4 K ステージ部が見えている。各受信機の上部には、15 K 及び 110 K に冷却された赤外線フィルタ、常温の真空窓が取り付けられる（通常これらはクライオスタットから取り外されることはない）。表 1 に各受信機の雑音温度仕様と開発担当国を示す。各受信機は、「カートリッジ」とよばれる ALMA で共通の構造体を用いており、受信機単位でクライオスタット底部から抜き差しできる列線交換ユニット (LRU) となっている（図 9 も参照）。

低い周波数帯のバンド 1、2 については、直接信号を増幅可能な高電子移動度トランジスタ (HEMT) が用いられることになっており、現在開発が進められている。HEMT は 4 K までの冷却が必要でないため、図のように 1 段低い 15 K ス

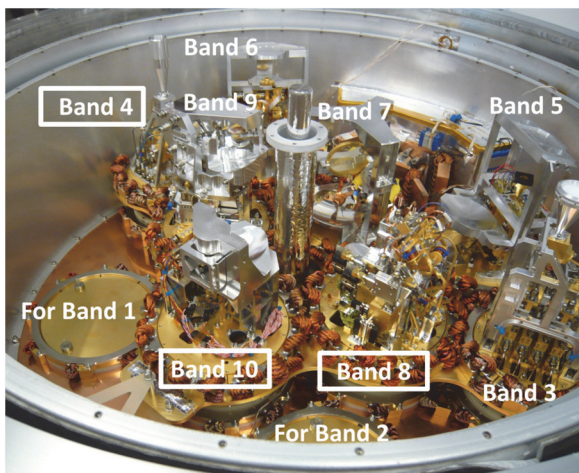


図 6 ALMA クライオスタットに搭載された受信機群

表 1 ALMA 受信機仕様と開発担当国

バンド	周波数帯域 (GHz)	雑音温度 (K)	受信方式	開発担当国	受信機技術
1	35 - 50	17	SSB	台湾	HEMT
2	67 - 90	30	SSB	未決定	HEMT
3	84 - 116	37	2SB	カナダ	SIS
4	125 - 163	51	2SB	日本	SIS
5	163 - 211	65	2SB	スウェーデン/オランダ	SIS
6	211 - 275	83	2SB	米国	SIS
7	275 - 373	147	2SB	フランス	SIS
8	385 - 500	196	2SB	日本	SIS
9	602 - 720	175	DSB	オランダ	SIS
10	787 - 950	230	DSB	日本	SIS

テージまでの冷却となる。それ以上のバンドについては、ALMA が要求する雑音性能で増幅することが困難なことから、SIS ミキサが用いられている。

ALMA 受信機では、受信方式として次の 3 種類が認められている。1) LO 信号周波数の高周波側となる上側波帯 (USB) と低周波側となる下側波帯 (LSB) を分離して独立に受信する 2SB 方式、2) どちらかの側波帯を受信する SSB 方式、そして 3) 両側波帯を重畳して受信する DSB 方式がある。2SB 及び SSB 方式のサイドバンド分離型受信機は、DSB 方式の受信機に比べ観測上のメリットが大きい。図 7 に DSB 方式と 2SB 方式での輝線観測例を示す。DSB 方式では、観測したい周波数帯だけでなく不要な周波数帯からも大気の大気電波吸収による雑音が入り込み、観測効率の劣化を招く。2SB 方式は、これを避けることが可能なため、表 1 に記載されているように、多くのバンドでサイドバンド分離型受信方式を採用している。デメリットとしては回路が複雑な点が挙げられる。図 8 に SIS ミキサを用いた導波管型

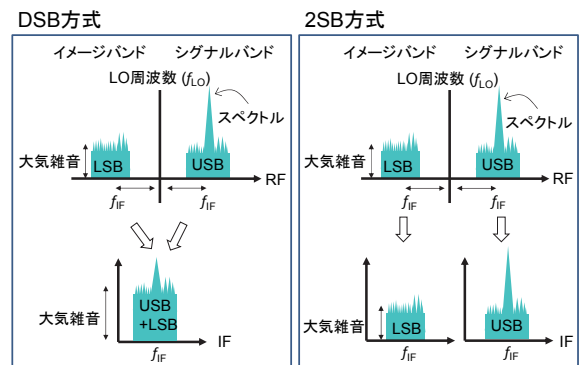


図 7 DSB 方式と 2SB 方式での信号検出感度

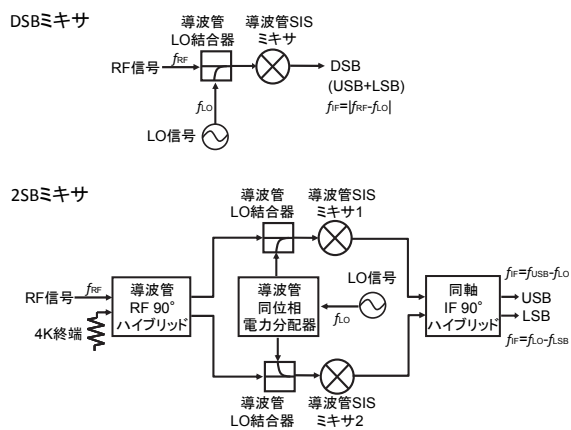


図 8 SIS ミキサを用いた導波管型 DSB 方式と 2SB 方式のブロック図

DSB 受信方式と 2SB 受信方式のブロック図を示す[8]。単純な DSB 方式に比べ、2SB 方式では RF 信号を等分配かつ 90 度の位相差をつけるための導波管ハイブリッドカップラや、特性の揃った 2 つの SIS ミキサが必要になるなど複雑な構成となる。動作周波数が高くなると導波管損失が大きくなるなどのため、バンド 9、10 では DSB 方式を採用している。ただし、高周波帯では水蒸気の電波吸収による大気雑音が増加することから、観測効率を上げるために 2SB 方式化が求められている。なお、ALMA の仕様では、2SB 方式の受信機には IF 帯域として 4-8 GHz を要求しているが、SSB 及び DSB 方式の受信機の場合は、その 2 倍の 4-12 GHz の帯域となる。

3.2. バンド 10 受信機

バンド 10 は ALMA の最高周波数帯であり、ALMA の受信機開発の中で、技術的に最難関と言われていた。受信機は、表 1 に示す雑音温度仕様や入力光学特性、偏波特性、振幅・位相安定性、利得特性など多数の電氣的仕様を全て満たす必要がある[9]。加えて、機械的強度に対しても仕様が定められている。これは受信機の輸送やアンテナ搭載時に掛かる機械的負荷にも耐える構造になっている必要があるためである。これらの中で最も厳しい仕様は、やはり世界最高性能を要求する雑音温度仕様をバンド 10 帯域内（比帯域約 20%）で実現することであった。以下に最新の技

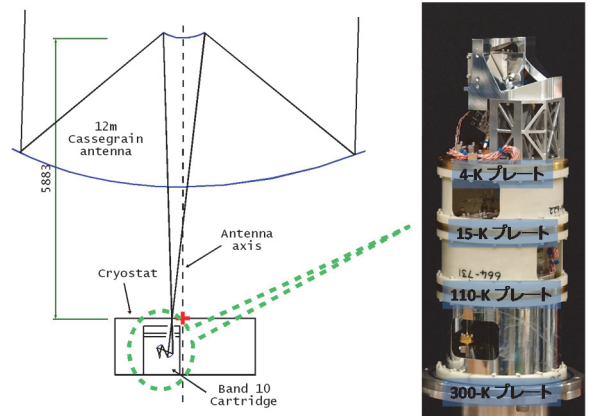


図 9 ALMA バンド 10 アンテナ光学系の概略図 (左) とバンド 10 受信機写真 (右)

術を駆使して完成したバンド 10 受信機について、雑音性能を左右する SIS ミキサを中心に説明する。

3.2.1. 受信機構成

図 9 にアンテナ光学系とバンド 10 受信機の写真を示す。直径 12 m のパラボラアンテナの副鏡からのビームは、受信機を冷却するクライオスタットの取り付けられた直径 20 mm の真空窓、110 K と 15 K の赤外フィルタを通して受信機に入射される。受信機は、英国ラザフォードアップルトン研究所 (RAL) から供給された構造体を用いており、4-K、15-K、110-K 冷却プレート（銅またはアルミ製）と、室温の真空シールプレート（ステンレス製）、そしてこれらを支持する熱伝導率の低いガラス繊維強化プラスチック (GFRP) 製の円筒形構造体を有する。4-K プレートには、楕円鏡、偏波分離ワイヤグリッド、コルゲートホーンなどの光学系や導波管 SIS ミキサ、4-12-GHz 帯冷却アイソレータ、4-12-GHz 帯冷却低雑音増幅器などが配置されている。楕円鏡は、2 枚用いることによって交差偏波の発生を抑えながら、パラボラアンテナの副鏡からのビームをコルゲートホーンに集光する役割を果たす。2 枚の楕円鏡で集光されたビームは、金メッキされた直径 10 μm のタングステン線を 25 μm ピッチで張った自立グリッドによって、直交する 2 つの偏波に分離され（偏波 0 及び偏波 1 と呼ぶ）、それぞれの偏

波用のコルゲートホーンに結合される。コルゲートホーン内部は、幅 $56\ \mu\text{m}$ 、溝深さ $132\text{-}86\ \mu\text{m}$ の凹凸が 100 以上ある構造を持つ。これにより天文観測に理想的なガウス効率の高いビーム特性が得られる。これら光学系は、ガウシアン光学および物理光学手法により設計・評価され、仕様を満たすことが明らかになった[10]。各ホーンには SIS ミキサが取り付けられており、ホーンで受信した信号を IF 信号に周波数変換する。IF 信号は、冷却アイソレータを介して、冷却低雑音増幅器で増幅され、受信機外に取り出される。

観測周波数 $787\text{-}950\ \text{GHz}$ に対する LO 信号の周波数範囲は $799\text{-}938\ \text{GHz}$ となり、 $110\ \text{K}$ プレートに設置された周波数 9 通倍器で発生させる。これを「ホーン-to-ホーン結合」という準光学的手法で $4\ \text{K}$ に設置した SIS ミキサブロックに導入する[11]。すなわち、9 通倍器と SIS ミキサブロックのそれぞれに同一のダイアゴナルホーンを集積し、通倍器側のホーンから放射された LO 信号を 2 枚の同一の楕円鏡でビームを整形して SIS ミキサ側のホーンに空間的に高効率で結合するのである。LO 信号が通る途中の $15\ \text{K}$ プレートには、赤外線フィルタと準光学減衰器が設置されている[12]。SIS ミキサブロックには、LO 信号を RF 信号に弱く結合させるために、 $13\ \text{dB}$ 導波管方向性結合器が集積化されており、両信号は SIS ミキサチップまで達する[13]。

3.2.2. バンド 10 SIS ミキサ

図 10 に開発した SIS ミキサチップの電子顕微鏡写真を示す。i 線ステッパーなどを用いることによって作製精度を高めている[14]。2 つの Nb/AlOx/Nb 接合に NbTiN/SiO₂/Al マイクロストリップ線路が集積化されている。先に述べたように理想的な SIS 接合では、その両方の超伝導電極材料のエネルギーギャップを Δ とすると、 $2\Delta/e$ の電圧（ギャップ電圧）において急激に準粒子トンネル電流が流れ、強い非線形性が現れる。ミリ波やサブミリ波帯の電磁波が入力されると、ギャップ電圧の両側に hf/e の間隔で、PAT による準粒子ステップが現れるため、この量子効果を非線形

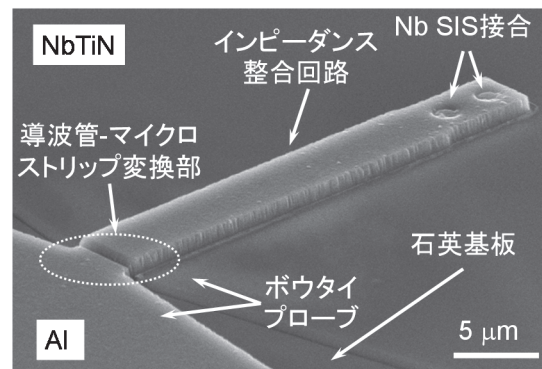


図 10 バンド 10 受信機用に開発した SIS ミキサチップの走査型電子顕微鏡写真

ダイオードミキシング理論に取り入れた結果、有限の変換利得と量子雑音限界に迫る感度を達成でき[15]、その周波数限界はおよそ $f = 4\Delta/h$ までとなることが示された[16]。これは、SIS 接合の非線形性が保たれる電圧範囲が $4\Delta/e$ のためである (I - V 特性が正負の電圧に対して対称のため)。従って、理想的な I - V 特性が得られる Nb/AlOx/Nb 接合を用いたミキサの動作周波数限界は約 $1.4\ \text{THz}$ となり、バンド 10 受信機に十分適用可能であることがわかる。

一方、SIS 接合の絶縁層の厚さは、量子力学的なトンネル効果が起こるほど非常に薄いため ($1\text{-}2\ \text{nm}$ 程度)、単位面積当たりの静電容量が非常に大きい。例えば Nb/AlOx/Nb 接合の場合には $60\text{-}90\ \text{fF}/\mu\text{m}^2$ 程度である。 $1\ \mu\text{m}^2$ 程度の小さな接合を用いても、その接合容量によってサブミリ波信号の大部分は短絡され、効率的にミキシングが出来ない。そこで図 10 のように伝送線路による同調回路を形成し、誘導性負荷により接合容量を除去する。また、インピーダンス整合回路にも利用する。ALMA バンド 9 ($600\text{-}720\ \text{GHz}$) までは、極めて低損失な Nb/SiO₂/Nb マイクロストリップ線路を用いることが可能である。しかし、周波数が Nb のギャップ周波数以上となるバンド 10 では、フォトンによるクーパ対の破壊が起こり、急激に損失が増大する。このため、従来用いられてきた Nb 技術を伝送線路に利用することができない。

この問題を克服するために、我々は Nb より臨界温度 (T_c) の高い金属系化合物超伝導体の NbTiN に着目した。窒化ニオブ系超伝導体を古くから研究してきた情報通信研究機構と協力して、NbTi ターゲットを用いた反応性 DC マグネトロンスパッタ法による高品質薄膜の作製方法を検討した。超伝導特性に重要なパラメータである T_c と 20 K での導電率 (ρ_{20K}) に着目し、ミキサチップに用いる石英基板上で両者が同時に最も高くなる薄膜作製条件を見いだした。この結果、厚さ約 300 nm の NbTiN 薄膜に対し、約 15 K の T_c と $1 \times 10^6 \Omega^{-1}m^{-1}$ 程度の ρ_{20K} を有する特性を得た。結晶性や組成比の分析などから NbTiN 薄膜中の窒素量が超伝導特性に重要な役割を果たしていることが分かってきた[17]。この優れた NbTiN 薄膜を伝送線路の両電極に用いれば、超低損失伝送線路を構成できる。しかし、本ミキサのように NbTiN 薄膜に直接 Nb 接合を接続する場合には、両者のエネルギーギャップの大きさの違いによってポテンシャル井戸が形成され、トンネルしてきた準粒子が閉じこめられる[18]。この非平衡状態が等価的に接合の温度上昇をもたらし、低雑音動作を妨げる。そこで、伝送線路の一方を低損失な常伝導金属の Al にし、この問題を回避している。

もう一つの課題は、バンド 10 帯域で確実に動作させるための同調回路設計であった。量産に向けて動作マージンを広げるために回路の最適化は必須であるが、このためには回路に用いる伝送線路の特性インピーダンスや位相速度などを正確に把握している必要がある。伝送線路パラメータは NbTiN 膜の表面インピーダンスに強く依存する。これまでの設計では、薄膜の T_c から経験的にギャップ周波数を仮定し、dirty limit に対する Mattis-Bardeen (M-B) 理論を用いた複素導電率から算出していた[19]。我々は、設計精度を高めるためにテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いて NbTiN 薄膜の複素導電率を実験的に求めた。用意したサンプルは、膜厚 45 nm の NbTiN で、厚さ 1 mm の石英基板上に成膜している。薄膜の T_c 、20 K での直流抵抗率 ρ_{20K} は、それぞれ

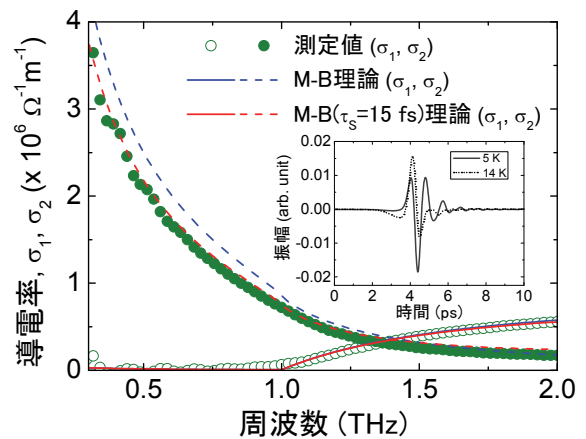


図 11 透過型 THz-TDS で測定した NbTiN 薄膜の複素導電率。挿入図は常伝導状態と超伝導状態での時間領域波形を示す。

12.1 K、 $117 \mu\Omega cm$ であった。このサンプルを透過型 THz-TDS 装置に取り付け、ヘリウムガスによる間接冷却によって 5 K まで冷却した。図 11 の挿入図に温度 5 K (超伝導状態) と 14 K (常伝導状態) での時間領域波形を示す。常伝導状態をリファレンスとして、超伝導状態の複素導電率 $\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) - j\sigma_2(\omega)$ を求めた[20]。実部 $\sigma_1(\omega)$ において、約 1 THz に明瞭な超伝導ギャップ (2Δ) が観測されることから、我々の NbTiN 膜の超伝導ギャップと転移温度の関係は、 $2\Delta/k_B T_c \approx 4.0$ となる。これは、これまで知られていたエピタキシャル成長の NbN (≈ 4.2) より小さく[21]、BCS 理論による 3.52 よりも大きな値であった。また虚部 $\sigma_2(\omega)$ においては、同図に示されるように従来設計に用いてきた M-B 理論と一致しないという新たな知見が得られた。我々はこの差異をモデル化するために、電子系の有限の散乱時間 τ_s を導入した拡張 M-B 理論[22]によってフィッティングを試みた。その結果、図に示すように、 $\tau_s = 15$ fs で最適解が得られた。設計においては、ミキサで用いる厚さ 300 nm 程度の薄膜の $\Delta (= 4k_B T_c/2)$ 、 ρ_{20K} 、 τ_s から複素導電率を求めている。さらに、複素導電率から導出した表面インピーダンスを電磁界シミュレータに取り込み、同調回路部における 2 つの SIS 接合間に流れる高周波電流分布による余剰インダクタンスを考慮した回路設計を行って

いる[23]。設計で仮定した Nb/AlOx/Nb 接合の臨界電流密度は 10 kA/cm^2 であり、これは国立天文台の標準作製プロセスで理想的な I - V 特性が得られる上限の値となる。

3.2.3. 受信機性能

製造した 73 台のすべての受信機で、性能評価試験が行われた。評価試験装置の詳細については文[9]を参照されたい。本稿では、最も達成が困難とされた雑音温度性能について記述する。図 12 にその評価システムのブロック図を示す。受信機は ALMA クライオスタットと同じ 3 段 GM 冷凍機で冷却される。各温度ステージは、ヒーターによってコントロールされている。RF 信号源は、室温および液体窒素に浸されたテラヘルツ帯電波吸収体 (TK-RAM) [24]を用いている。この信号がテフロン反射防止膜付石英真空窓を通り、110 K シールドに設置された厚さ 0.13 mm の Mupor と厚さ 0.56 mm の Gore-Tex の赤外線フィルタ、そして 15 K シールドに設置された厚さ 0.25 mm の Mupor の赤外線フィルタを通過して、受信機に入力される。LO 信号に用いる源振は、14.8-17.4 GHz を発生するイットリウム鉄ガーネット (YIG) 発振器であり、この出力を能動周波数 6 通倍器と 100 GHz 帯増幅器によって、出力 100 mW 程度を持つ 88.8-104.2 GHz の信号を得る。この部分は米国 NRAO で開発され、室温カートリッジアセンブリ (WCA) と呼ばれる。WCA の出力

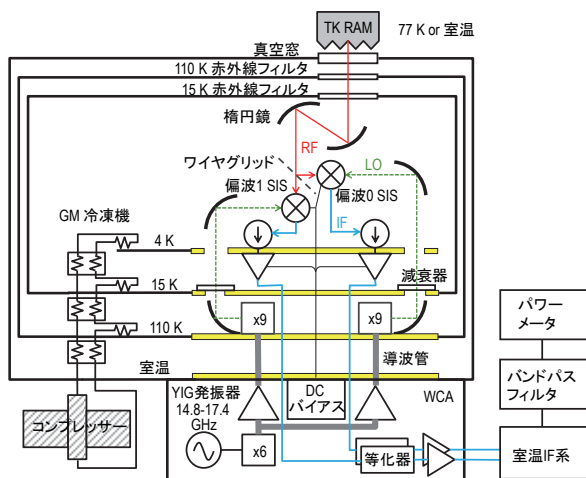


図 12 受信機雑音性能試験装置のブロック図

は受信機の真空導波管フランジから入力され、受信機内の断熱用の内面金メッキ薄肉ステンレス導波管などを経て、110 K ステージに設置された周波数 9 通倍器に導入される。ここで $20\text{-}30 \mu\text{W}$ 程度の電力を持つ 799-938 GHz の LO 信号に変換され、準光学的に SIS ミキサ部に入力される。

図 13 に動作温度 4 K におけるバンド 10 受信機のヘテロダイン応答特性例を示す。810 GHz の LO 信号を入力しないときには、 I - V 特性上に Nb 接合特有の約 2.65 mV のギャップ電圧が観測される。接合品質の指標であるギャップ電圧以下の抵抗値 (R_{SG}) とそれ以上の抵抗値 (R_N) の比 (R_{SG}/R_N) は 20 以上あり、NbTiN 薄膜上でも Nb/AlOx/Nb 接合が理想的に形成されていることがわかる。臨界電流密度は約 11 kA/cm^2 であり、設計値に極めて近い。LO を入力したとき、量子効果である PAT による電流ステップが明瞭に観測される。810 GHz に相当するステップ電圧幅は約 3.3 mV であり、負のギャップ電圧側からの電流ステップが重畳している影響のため約 0.65 mV にステップが現れている。295 K と 77 K の電波吸収体からの黒体輻射を受信機に入力したときに得られる IF 出力の比を用いて (標準的な Y 因子法)、受信機の雑音性能を評価した。受信機の真空窓などの入力光学系の損失をすべて含む受信機雑音温度は 125 K に達し、この値は量子雑音の 3 倍程度に相当する。

同様の方法で、73 台すべての受信機の雑音温度の周波数特性が測定された。受信機あたり 2 個の

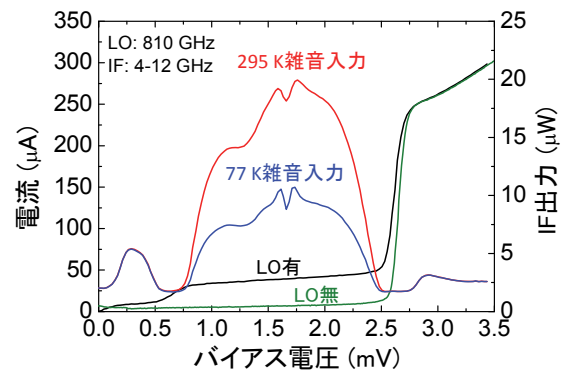


図 13 バンド 10 受信機のヘテロダイン応答特性。ジョセフソン電流は印可磁場によって抑圧されている。

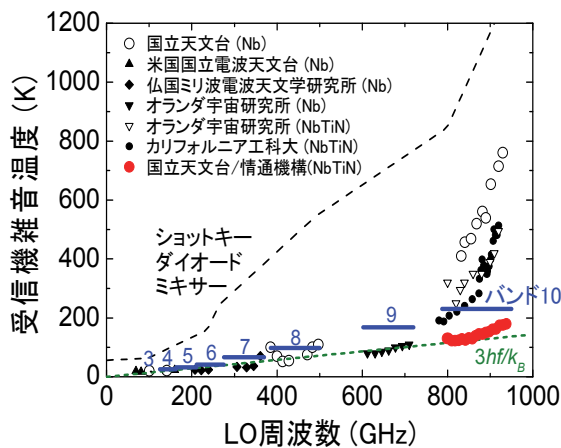


図 14 これまで報告されている代表的な SIS 受信機の雑音温度性能と ALMA の各バンドの SIS 受信機に対する雑音温度仕様。典型的な半導体ショットキーダイオードミキサの性能も示す。点線は量子雑音の 3 倍を示している。各研究機関のカッコ内はミキサチップの主な配線材料を示す。

SIS ミキサが搭載されているため、146 個の SIS ミキサを測定したことになる。この結果、我々の開発したすべての受信機が、これまで実現が困難とされた ALMA の仕様に適合した。図 14 は、これまで報告されている SIS 受信機雑音温度 [25-28] と ALMA で課されているバンド 3 から 10 の雑音温度仕様 (DSB 方式換算) であり、これにバンド 10 受信機 73 台の測定で得られた各測定周波数での最小雑音温度をプロットした。我々の開発した受信機は、他の低い周波数帯の全 Nb 受信機と同様に、量子雑音の 3 倍程度にまで到達しており、世界最高性能を誇る。この結果は、Nb のギャップ周波数を超えるテラヘルツ帯において伝送線路の NbTiN が極めて低損失であり、そして Nb/AlO_x/Nb 接合が理想的に量子雑音限界近くで動作していることを示唆している。

ただし、800 GHz 付近の低周波数領域で受信機雑音の増加傾向があることわかり、この原因を追究すると WCA のミリ波帯シンセサイザからの過剰雑音によるものであることが明らかになった。図 15 に 100 GHz 帯ガン発振器を用いた場合と比較した例を示す。低周波数領域において、シンセ

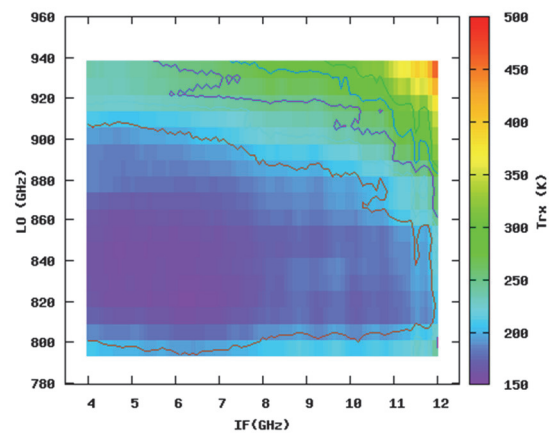
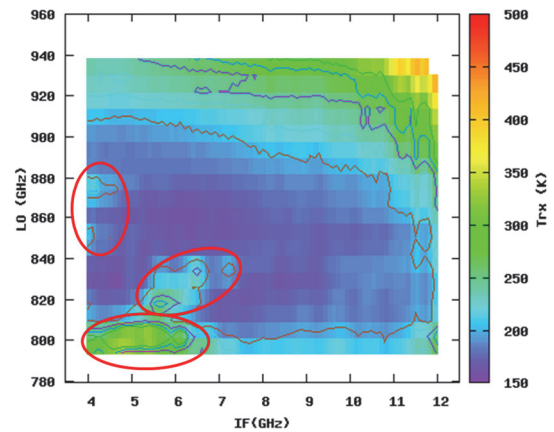


図 15 受信機雑音温度の IF/LO 周波数依存性 (上: WCA を用いた場合、下: ガン発振器を用いた場合)。丸で示された WCA の過剰雑音はガン発振器では見えない。

サイザを用いた場合に発生するスポット的に雑音温度が高い箇所 (図 9 上の丸で示した箇所) が、ガン発振器の場合には確認されない。バンド 10 受信機はすでに ALMA 望遠鏡に搭載され、観測が始まっており、現時点でこの過剰雑音は特に問題となっていないが、将来的に改善が必要と考えている。

4. 最新の研究紹介

最新技術を駆使した ALMA 望遠鏡は、天体からの電波の偏波、強度、周波数、位相情報を高解像度・高感度で観測するという、人類がこれまで持ち得なかった天体の情報取得を可能にした。これにより、次々と新たな科学的成果が生み出され

ている。一方で、次世代の望遠鏡を見え据えた基礎検討を進めておかなければならない。その一つが既存受信機の性能向上である。前項で示したように、ALMA バンド 10 では LO 系からの過剰雑音を要因とした性能劣化があり、さらなる低雑音化は課題の一つである。また、観測が進むにしたがって、既存装置では不可能な新たな観測要求が出てくるのは当然の流れである。例えば、現在の干渉計の弱点である「視野の狭さ」を克服するための広視野化が挙げられる。これには、受信機をマルチビーム化することが提案されている。また、同時受信周波数帯域の広帯域化や受信周波数の高周波化も必須の課題である。我々はこのような今後の ALMA のさらなる性能向上や高機能化を目指して基礎開発に着手しており、その一部を紹介する。

4.1. バランスドミキサ

バランスドミキサはテラヘルツ帯で顕著となる LO 系由来の課題を解決するのに有効なミキサ構成であるとされる。すなわち、先に述べた LO による過剰雑音を抑圧できると同時に、シングルエンドミキサに対して LO 電力が 1 桁程度少なくてもよいなど有利な点を持つ。そこで我々はバンド 10 で培った技術を用いてバランスド SIS ミキサの機能実証を目的とした実験を 900 GHz 帯で実施した[29]。本実験でのバランスド SIS ミキサ実験系の構成を図 16 に示す。バランスドミキサに

は、RF 帯での低損失広帯域な 3-dB 90° ハイブリッドカップラ、性能の揃った 2 つの SIS ミキサ、2 つのアイソレータ、IF カプラが必要となり、700 GHz 以上の周波数帯ではバランスド SIS ミキサの実証例はなかった。これは低雑音な SIS ミキサの実現が困難であっただけでなく高精度な導波管回路の作製やその評価が難しかったことにも由来している。本研究では、SIS ミキサとしてバンド 10 受信機の量産で用いた標準的なものを用いた。バランスド SIS ミキサを構成するコンポーネントは 4 K ステージ上に置かれる。IF 出力は常温のアンプで増幅した後にパワーメータを用いて測定した。LO 電力は、100 GHz 帯のガン発振器出力を源振として用い、WR-10 導波管 (1.27 mm×2.54 mm) を用いてクライオスタットの 4 K ステージ上に置かれる 3×3 通倍器に入力して 9 通倍することによって 900 GHz 帯の出力を得た。LO 電力は WR-1.2 導波管を用いた 90° ハイブリッドカップラを介して 2 つの SIS ミキサに入力した。

図 17 に Y 因子法によって測定した受信機雑音温度特性を示す。全帯域で 350 K 以下、RF 光学損失と導波管損失を補正した雑音温度はほぼ 200 K を切る性能を得た。本補正値はコンポーネントの個別評価による実測に基づく値である。当結果は当周波数帯のバランスド SIS ミキサとして初めての結果であり、ALMA バンド 10 で使用されているシングルエンドミキサと同等の低雑音性能

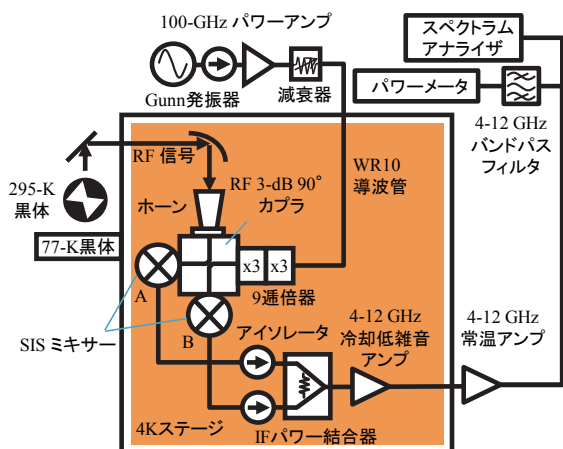


図 16 バランスド SIS ミキサ実験ブロック図

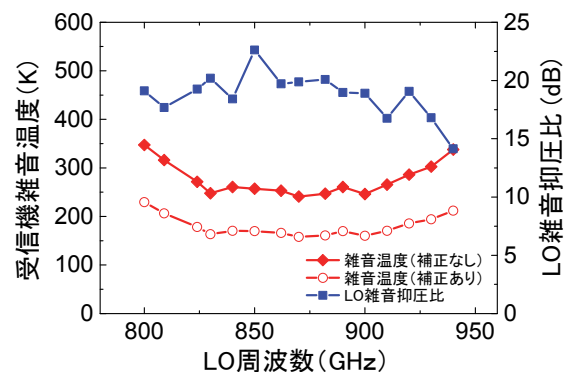


図 17 バランスド SIS ミキサの受信機雑音温度および LO 雑音抑圧比。雑音温度(補正有り)、RF 真空窓による反射損失と導波管の伝送損失の実測値に基づいて補正している。

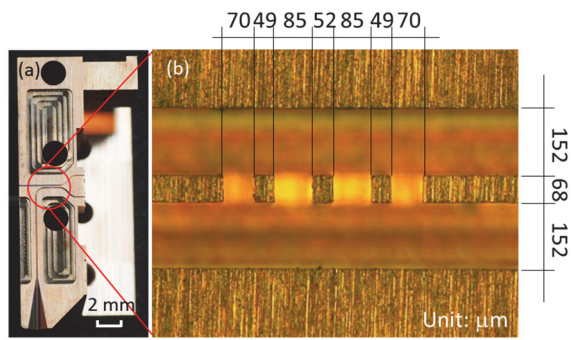


図 18 ハイブリッドカップラを内蔵したミキサブロックの光学顕微鏡写真。(a)ミキサブロック断面 (E 面)。(b)カップラ部の拡大図

である。また、バランスド SIS ミキサの性能として重要な LO 雑音抑圧比 (LNR) は典型的に 20 dB 程度が得られている。これは、シングルエンドミキサと比べて 5-10 倍程度 LO 雑音の高い抑圧効果を有するというを示している。この結果をもとに、図 18 に示すようなハイブリッドカップラ、2つの SIS ミキサ、バイアス回路、IF パワー結合器を一体化させたバンド 10 バランスド SIS ミキサを開発し、雑音温度特性も補正無しで ALMA 望遠鏡要求スペックを満たす結果を得た [30]。したがって、前項で述べた LO 系由来の受信機性能劣化は、本ミキサを用いることによって、受信機の性能改善が可能であるとの見通しを得た。また、本ミキサはスケールダウンすることによって LO 電力の不足が懸念される 1 THz 以上でも応用可能である。

4.2. マルチバンド型受信機

既存の受信機においては、同時観測可能な帯域は受信機の IF 帯域に制限されている。例えば ALMA バンド 10 では、8 GHz である。天体からの情報は広帯域に渡っているはずで、現在はそのうちのほんの一部しか観測できていない。すべて同時観測できれば、観測効率が飛躍的に上がる。受信機の同時観測周波数帯域を広帯域化するために、観測帯域をいくつかの帯域に等分割するフィルタバンクを用いてマルチバンド化し、それらを同時に観測することによって高速化を図る画期的な手法の実現を目指している [31]。図 19 に概

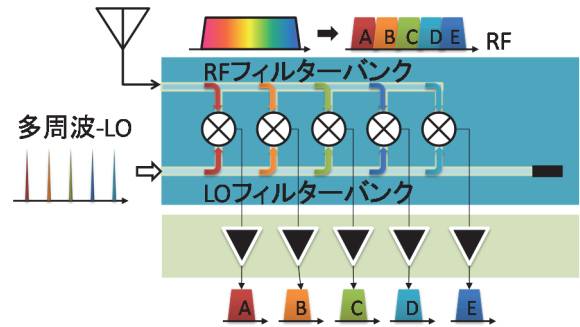


図 19 マルチバンド型ヘテロダイン受信機概念図

念図を示す。各周波数帯の信号は、それぞれ基本波ミキサによって低い IF 帯に高効率で周波数変換される。我々は、そのキーコンポーネントの 1 つであるフィルタバンクを実現するため、導波管回路により開発を進めている。

マルチバンド型受信機の入力回路としてのフィルタバンクの特性は、反射損失および通過損失が低く、チャンネル間の周波数ギャップによる信号損失をできるだけ抑える必要がある。また、フィルタバンクの出力部分にいかなる負荷がついたとしても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、ハイブリッドカップラを用いたフィルタバンクを開発した。90° 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いる。原理実証用の本試作では、405-480 GHz を 25 GHz 間隔で 3 つの周波数帯に分割する導波管型フィルタバンクを設計した。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 WR2.2 (280 μm x 560 μm)を用いた。

図 20 に製作したフィルタバンクと通過特性の評価の様子を示す。当コンポーネントは 2 つ割りで製作されており、組み立て時一辺 20 mm の立方体で、入出力部 4 面は UG フランジとなっている。前述と同様の方法で測定したフィルタバンクの Sパラメータを図 21 に示す。また、図 17 に前述のフィッティングパラメータを用いて計算した電磁界解析ソフト HFSS によるシミュレーション結果を示す。S₂₁、S₃₁、S₄₁の結果から、各チ

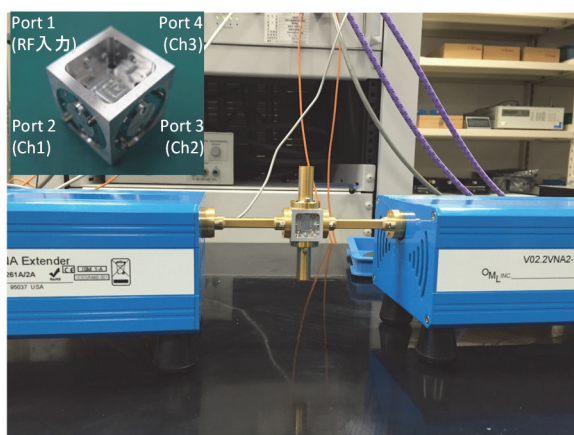


図 20 導波管フィルタバンクの VNA 評価の様子

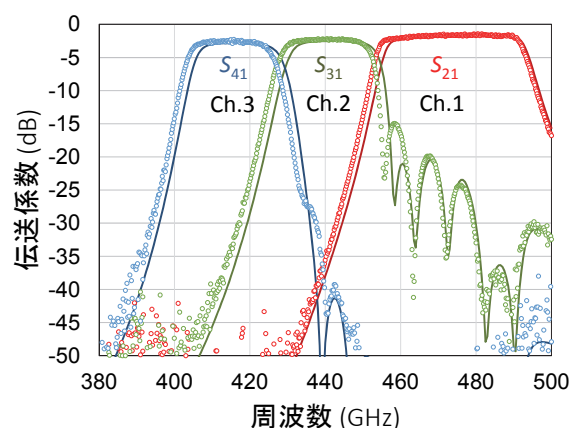


図 21 S パラメータの測定結果

チャンネルは 25 GHz 間隔で設計通りに分割されていることがわかる。これらの測定値は設計値に対して 2 GHz 以内、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ことがわかる。また、 S_{11} 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が確認できた。これらから当フィルタバンクはほぼ設計通りに動作し、マルチバンド受信機システムの RF フィルタ部に有用であると考えられる。各ミキサには周波数の異なる局部発振波が必要となる。このために、通信技術を利用した高精度光周波数コムによるサブミリ波帯周波数コム発生の開発に着手している。

5. まとめ

本稿では、ミリ波やサブミリ波、いわゆる電波の高感度検出技術について紹介した。ALMA 望遠鏡に見られるように、電波センシング技術は、人間の目には見えない被測定物の情報を大量かつ高速に取得する方向で発展してきた。一方、電波という媒体に情報を乗せる無線通信技術も、昨今の無線インターネットやスマートフォンの急速な普及に後押しされているように、大容量・高速化に向かっている。このような共通点があることを両研究分野で認識することで、学術領域を超えた研究連携が進み、結果として全く新しい観測装置や無線装置が実現することを期待している。

謝辞

本セミナーのために資料をご提供いただいた国立天文台の小嶋崇文氏、藤井泰範氏、大島泰氏、松尾宏氏、デルフト工科大学の遠藤光氏、情報通信研究機構の落合啓氏、その他 ALMA の関係諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] D. H. Andrews, W. F. Brucksch, W. T. Ziegler, and E. R. Blanchard, Rev. Sci. Instrum., 13, 281 (1942)
- [2] K. D. Irwin and G. C. Hilton, in Cryogenic Particle Detectors, Topics in Appl. Physics, Vol 99, Editor: Christian Enns, Springer Verlag (2005)
- [3] P. K. Day, H. G. LeDuc, B. A. Mazin, A. Vayonakis, and J. Zmuidzinas, Nature 425, 817 (2003)
- [4] A. Dayem and R. J. Martin, Phys. Rev. Lett. 8, 246 (1962)
- [5] P. K. Tien and J. P. Gordon, Phys. Rev. 129, 647 (1963)
- [6] M. Ryle, Science 188, 1071 (1975)
- [7] <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>
- [8] S. Claude, C. Cunningham, A.R. Kerr, and S.-K. Pan, ALMA Memo 316 (2000)
- [9] Y. Fujii, A. Gonzalez, M. Kroug, K. Kaneko, A. Miyachi, T. Yokoshima, K. Kuroiwa, H. Ogawa, K. Makise, Z. Wang, and Y. Uzawa, IEEE Trans. THz Sci. Technol. 3, 39 (2013)
- [10] A. Gonzalez, Y. Uzawa, Y. Fujii, K. Kaneko, Infrared Phys. And Technol. 54, 488 (2011)

- [11] A. Gonzalez, Y. Uzawa, Y. Fujii, K. Kaneko, and K. Kuroiwa, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 1, 416 (2011)
- [12] A. Gonzalez, Y. Fujii, K. Kaneko, and Y. Uzawa, *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2011*, 1977 (2011)
- [13] T. Kojima, K. Kuroiwa, Y. Uzawa, M. Kroug, M. Takeda, Y. Fujii, K. Kaneko, A. Miyach, Z. Wang and H. Ogawa, *J. Infrared Milli. THz Waves*, 31, 1321 (2010)
- [14] M. Kroug, A. Endo, T. Tamura, T. Noguchi, T. Kojima, Y. Uzawa, M. Takeda, Z. Wang, and W.-L. Shan, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19, 171 (2009)
- [15] J. R. Tucker: *IEEE J. Quantum Electron.* 15, 1234 (1979)
- [16] M. J. Feldman: *Int. J. IR&MM Waves* 8, 1239 (1987)
- [17] K. Makise, H. Terai, M. Takeda, Y. Uzawa, and Z. Wang, *IEEE Trans. Applied Supercond.* 21, 139 (2011)
- [18] B. Leona, B. D. Jackson, J. R. Gao, and T. M. Klapwijk, *Appl. Phys. Lett.* 76, 780 (2000)
- [19] D. C. Mattis and J. Bardeen, *Phys. Rev.* 111, 412 (1958)
- [20] Y. Uzawa, Y. Fujii, A. Gonzalez, K. Kaneko, M. Kroug, T. Kojima, K. Kuroiwa, A. Miyachi, S. Saito, and K. Makise, *Physica C* 494, 189 (2013)
- [21] Z. Wang, A. Kawakami, and Y. Uzawa, *J. Appl. Phys.* 79, 7837 (1996)
- [22] D. Karecki, *Phys. Rev. B* 25, 1565 (1982)
- [23] W.-L. Shan, S.-C. Shi, T. Matsunaga, M. Takizawa, A. Endo, T. Noguchi, and Y. Uzawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17, 363 (2007)
- [24] Thomas Keating Ltd, <http://www.terahertz.co.uk/>
- [25] L. Olssen, S. Rudner, E. Kollberg, and C. O. Lindstrom: *Int. J. IR & MM Waves*, 4, 847 (1983)
- [26] A. R. Kerr, S.-K. Pan and J. Webber: *MMA Receivers: SIS Mixers*, MMA Project Book (1999)
- [27] W.-L. Shan, S. Asayama, M. Kamikura, T. Noguchi, S.-C. Shi and Y. Sekimoto: *IEICE Trans. Electron.* E89-C, 170 (2006)
- [28] C. F. Lodewijk, E. van Zeijl, T. Zijstra, D. N. Loudkov, F. P. Mena, A. M. Baryshev, and T. M. Klapwijk: *Proc.19th ISSTT*, 86 (2008)
- [29] 小嶋崇文, 藤井泰範, 鶴澤佳徳, *低温工学* 49, 343(2014)
- [30] Y. Fujii, T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, M. Kroug, K. Kaneko, H. Ogawa, and Y. Uzawa, *Supercond. Sci. Technol.* 30, 024001 (2017)
- [31] T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, and Y. Uzawa, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 7, 10 (2017)