

広帯域低雑音低消費電力動作を可能とする 超伝導マイクロ波方向性増幅器

自然科学研究機構 国立天文台
先端技術センター 准教授 小嶋 崇文

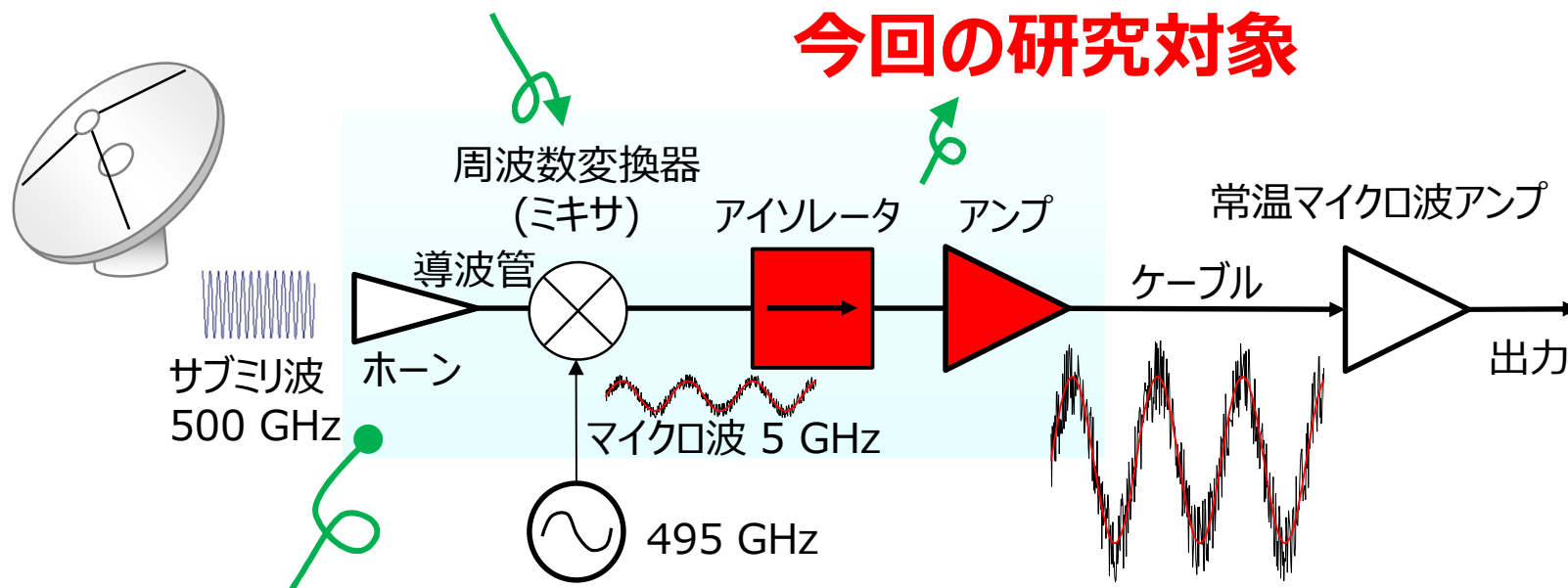
2024年1月23日

電波天文の受信機システム -冷却型低雑音ヘテロダイン受信-

周波数変換器(ミキサ)自体が低雑音・高い変換効率を有する必要がある。

=> 超伝導SISミキサを利用 (国立天文台で開発)

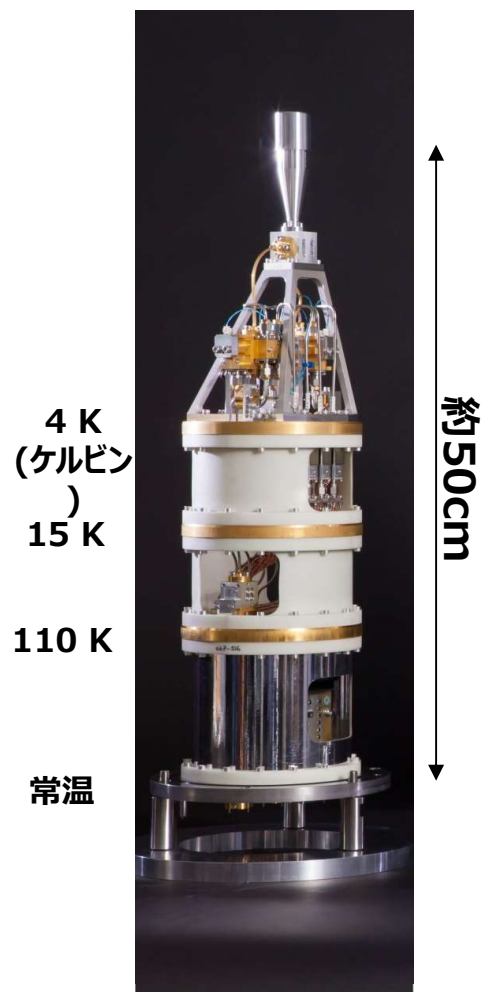
今回の研究対象



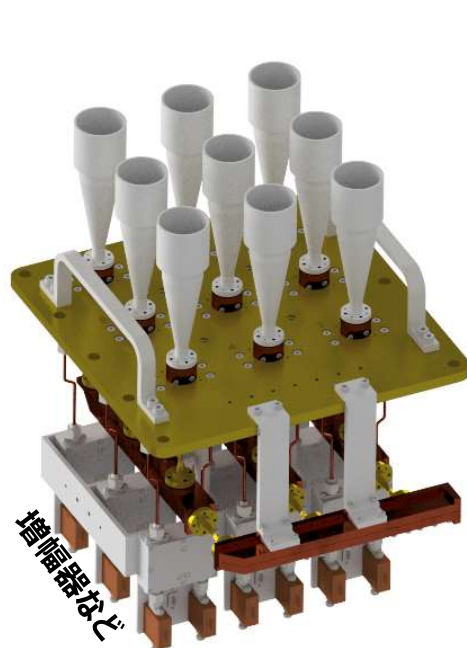
超伝導体の利用と熱雑音低減のため、
デバイスを冷却 (-269℃ = 4ケルビン)

当初信号より100万倍程度増幅

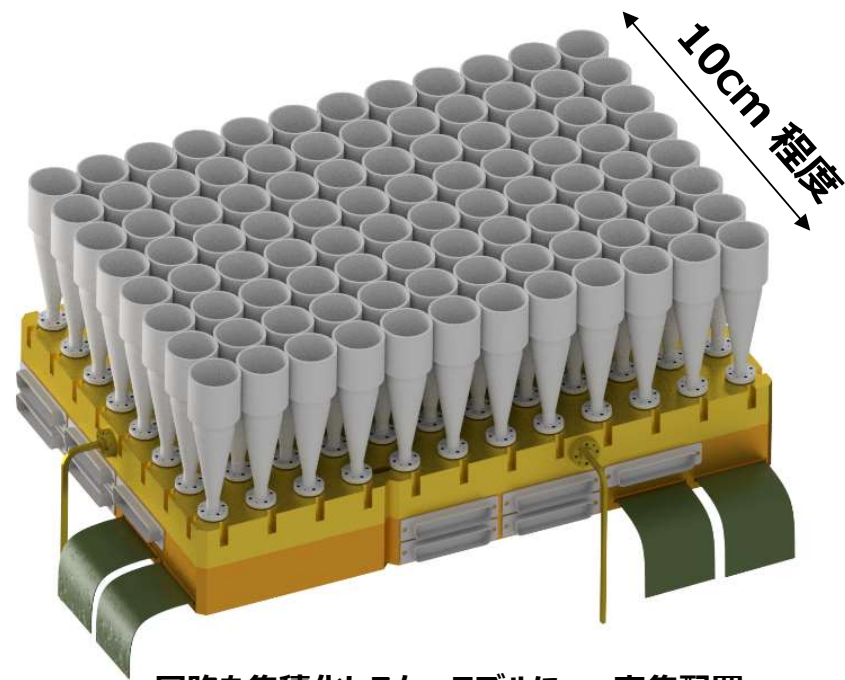
受信機の大規模化に向けた課題



フェライト型アイソレータ



モジュール部品を効率的に配置しても限界がある



回路を集積化しスケラブルに=>密集配置

1. 4K冷却ステージ上の消費電力の低減

冷却型マイクロ波帯半導体低雑音増幅器1つの消費電力：10 mW程度
x100ビームで1 Wとなり、冷却能力をオーバーする。

=>同等の性能で低消費電力化が必要！

2. 4K(ケルビン)冷却ステージ上の部品コンパクト化

部品の物理サイズにより、100以上アレイ化することは困難

=>別途、集積化によるスケラブルなデバイス研究開発を進めているが(右上),
マイクロ波コンポーネント・アイソレータの小型化も大きな課題(左)



60 mm

マイクロ波帯低消費電力広帯域低雑音アンプの比較

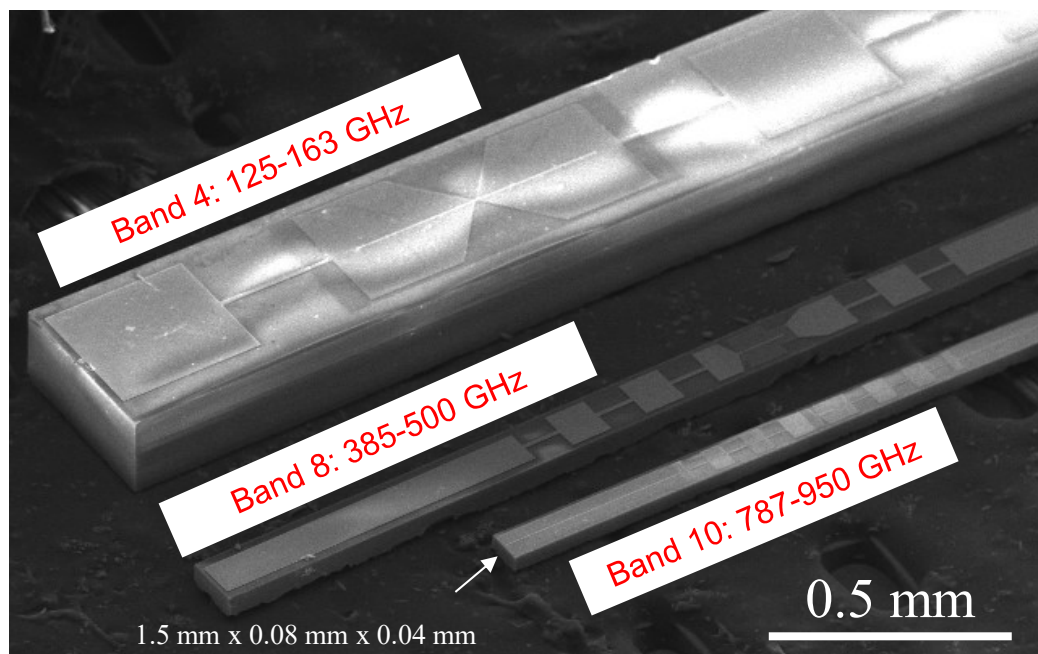
アンプの種類	動作温度	消費電力	大規模化における課題
半導体アンプ (HEMTやHBT)	4-15 K	典型的に10 mW程度(ミリワット) 動作最小値0.3 mW	低消費電力化
超伝導アンプ (パラメトリック進行波型)	< 1 K	ほぼ無視できる	歩留まりの高い均一なデバイス作製

HEMT：高電子移動度トランジスタ

HBT：ヘテロジャンクションバイポーラトランジスタ

SISミキサ

SIS: Superconductor-Insulator-Superconductor

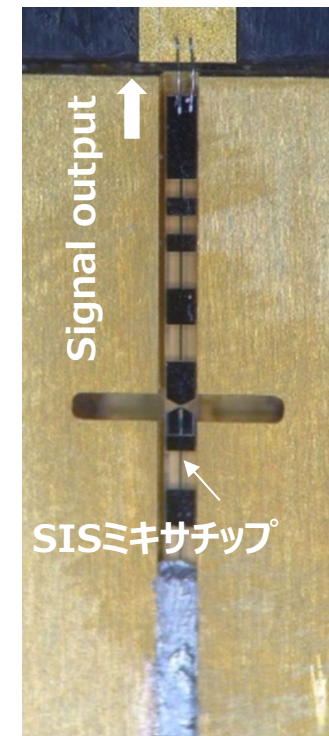
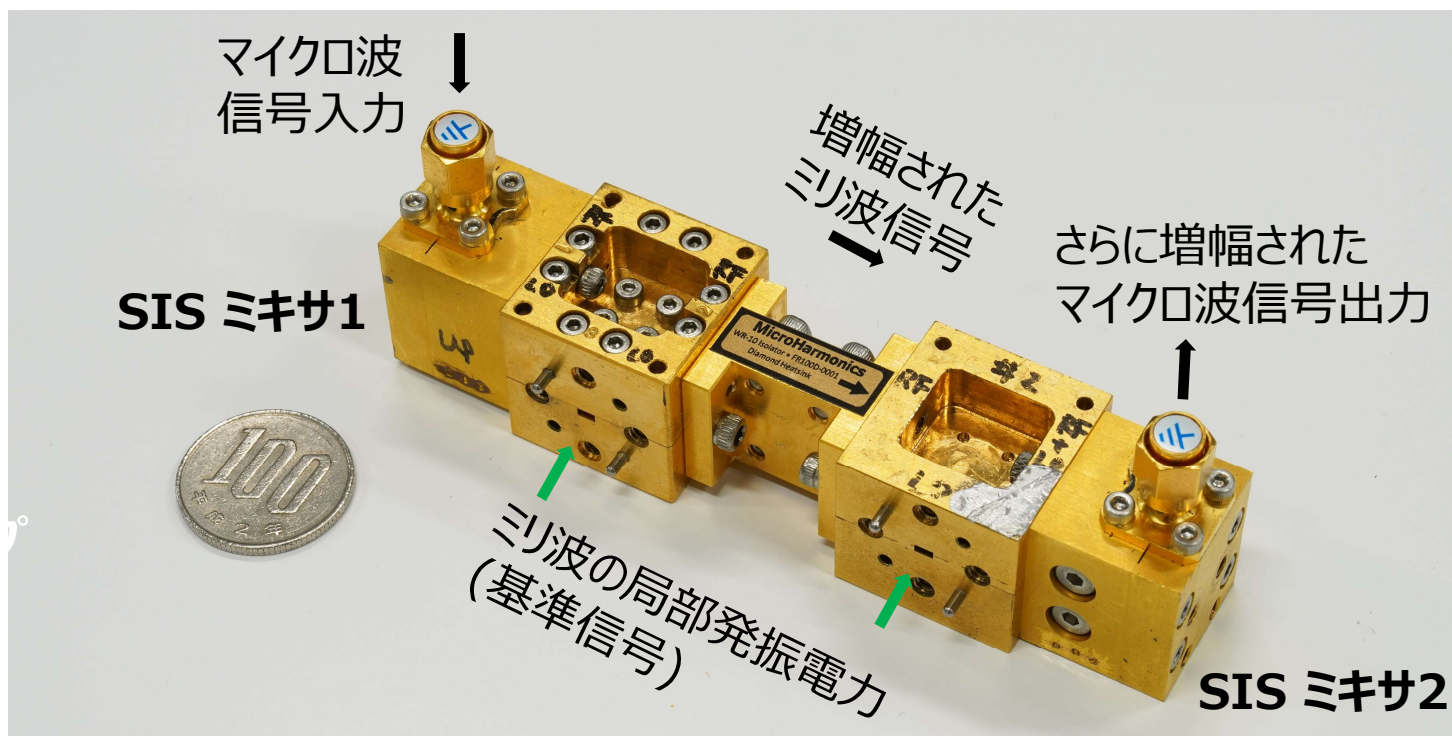
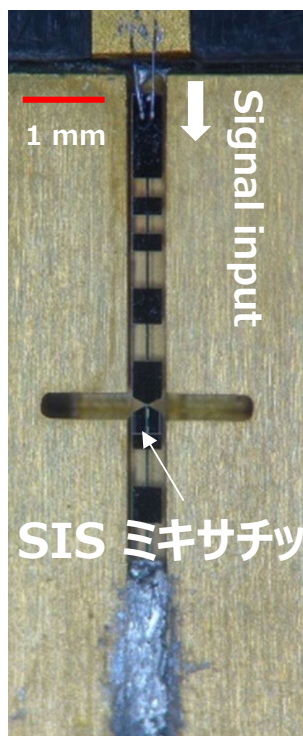


国立天文台のクリーンルームで作製したアルマ望遠鏡用SISミキサの電子顕微鏡写真

テラヘルツ信号を扱いやすいマイクロ波帯に変換するために用いられ、アルマ望遠鏡受信機に搭載されている。

- ・マイクロワット程度の超低消費電力
- ・量子雑音限界に迫る低雑音性能
- ・20 GHz程度の広帯域特性
- ・周波数変換時に信号を増幅する働きもある

新しい原理の超低消費電力・低雑音マイクロ波増幅器: SISアンプ[®]

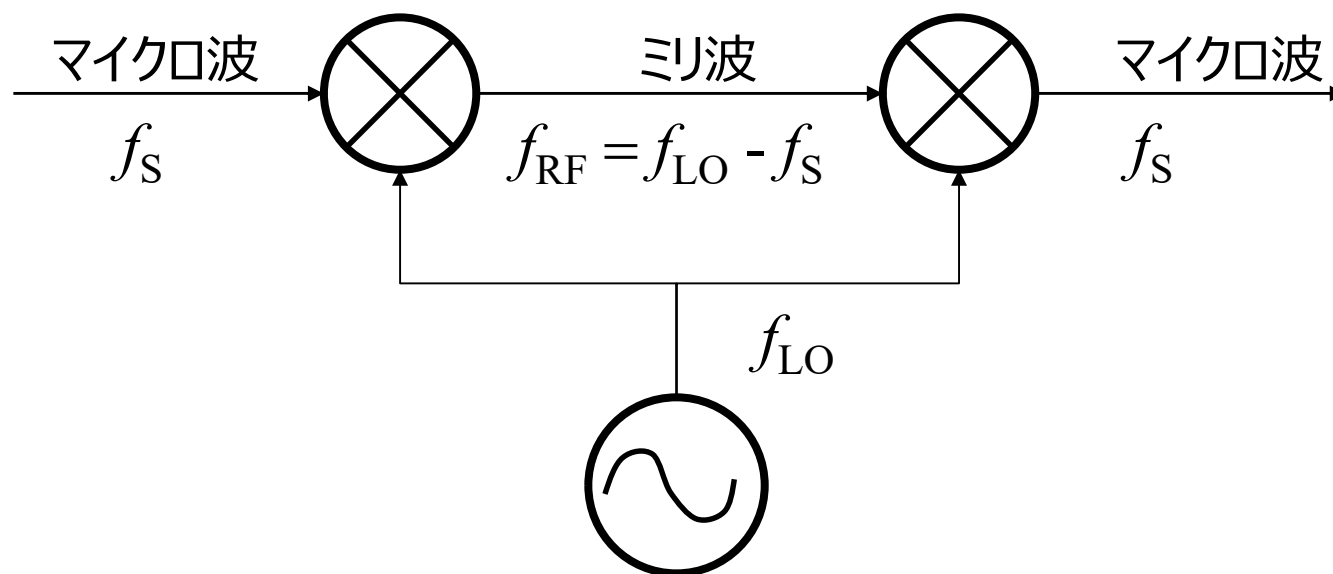


SISアンプの原理

ポイント：

1. 2つのSISミキサを使うことで入出力の周波数が同一に
2. 双方の周波数変換過程で正の利得が生じれば、増幅器に！

SISアップコンバータ SISダウンコンバータ



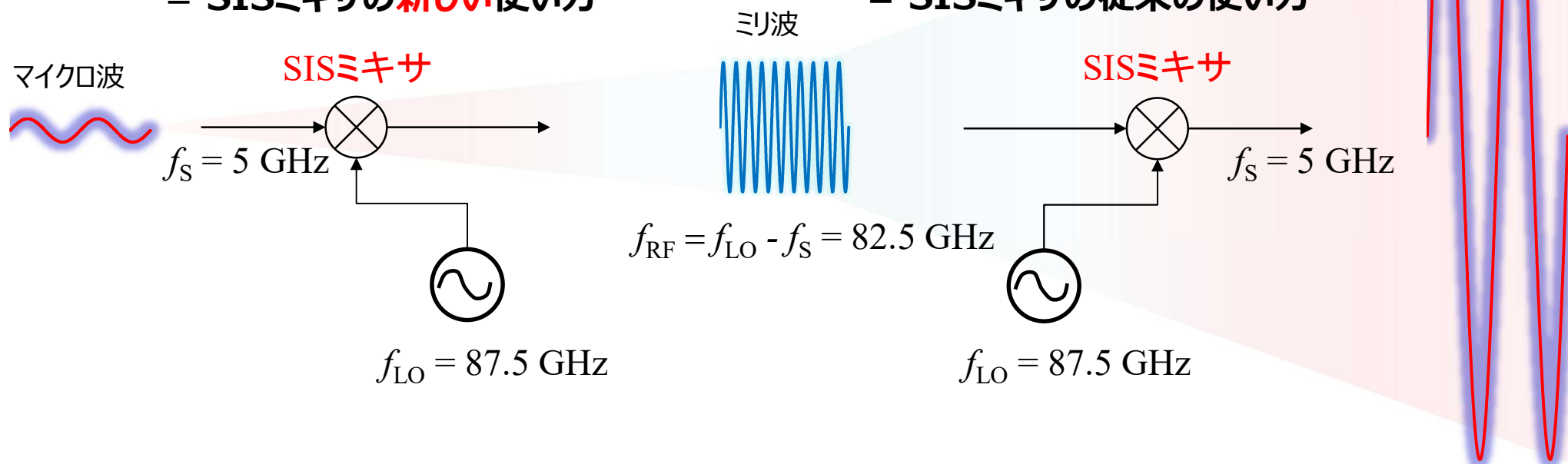
SISアンプの原理

ポイント：

1. 2つのSISミキサを使うことで入出力の周波数が同一に
2. 双方の周波数変換過程で正の利得が生じれば、増幅器に！

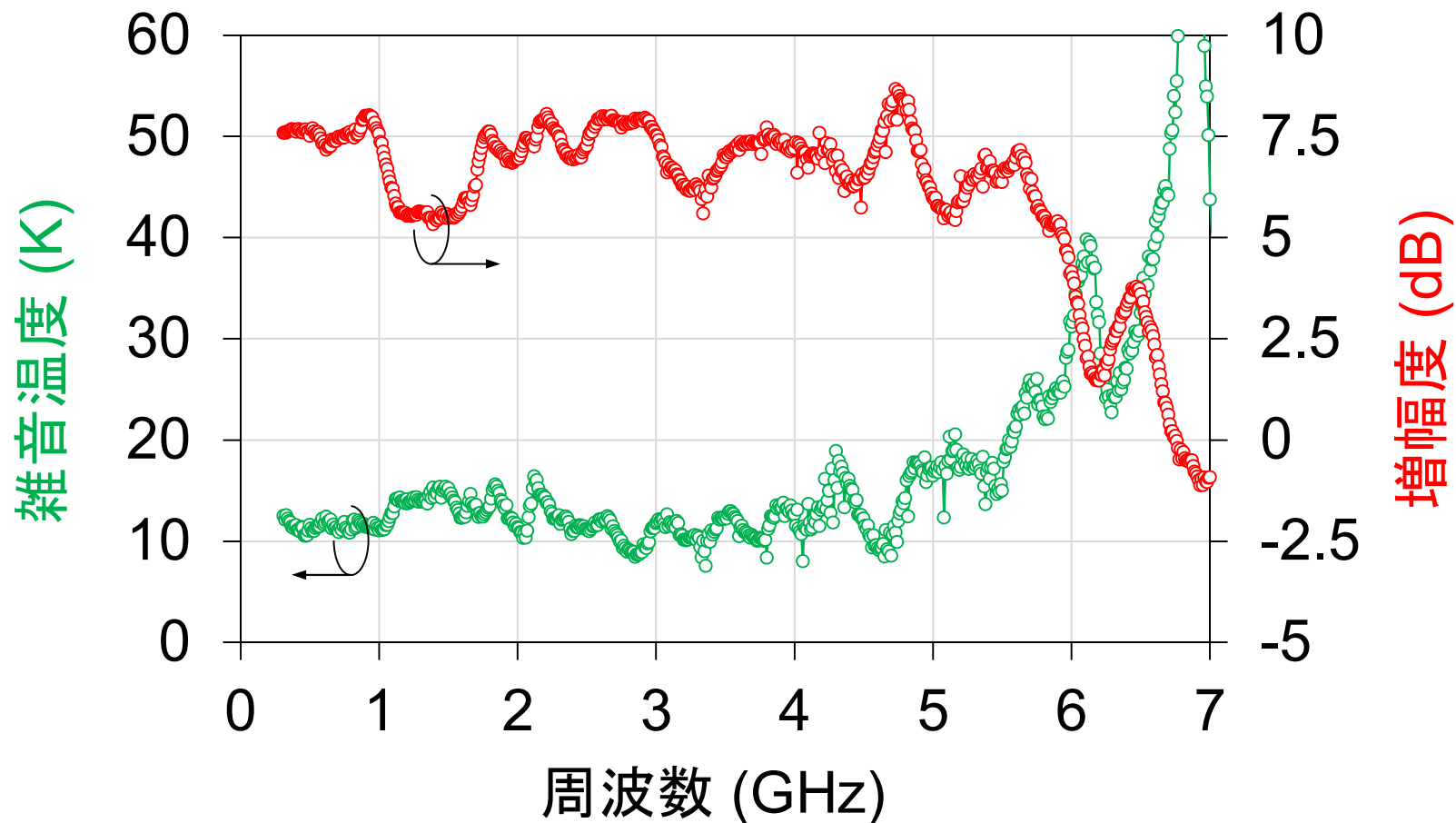
周波数を**上げる**：アップコンバージョン
= SISミキサの**新しい**使い方

周波数を**下げる**：ダウンコンバージョン
= SISミキサの**従来の**使い方



マイクロ波性能：雑音温度と増幅度の測定結果

- 増幅度 6-8 dB (4-6倍)、半導体アンプと同等の低雑音性能
- 消費電力は約 0.005 mW

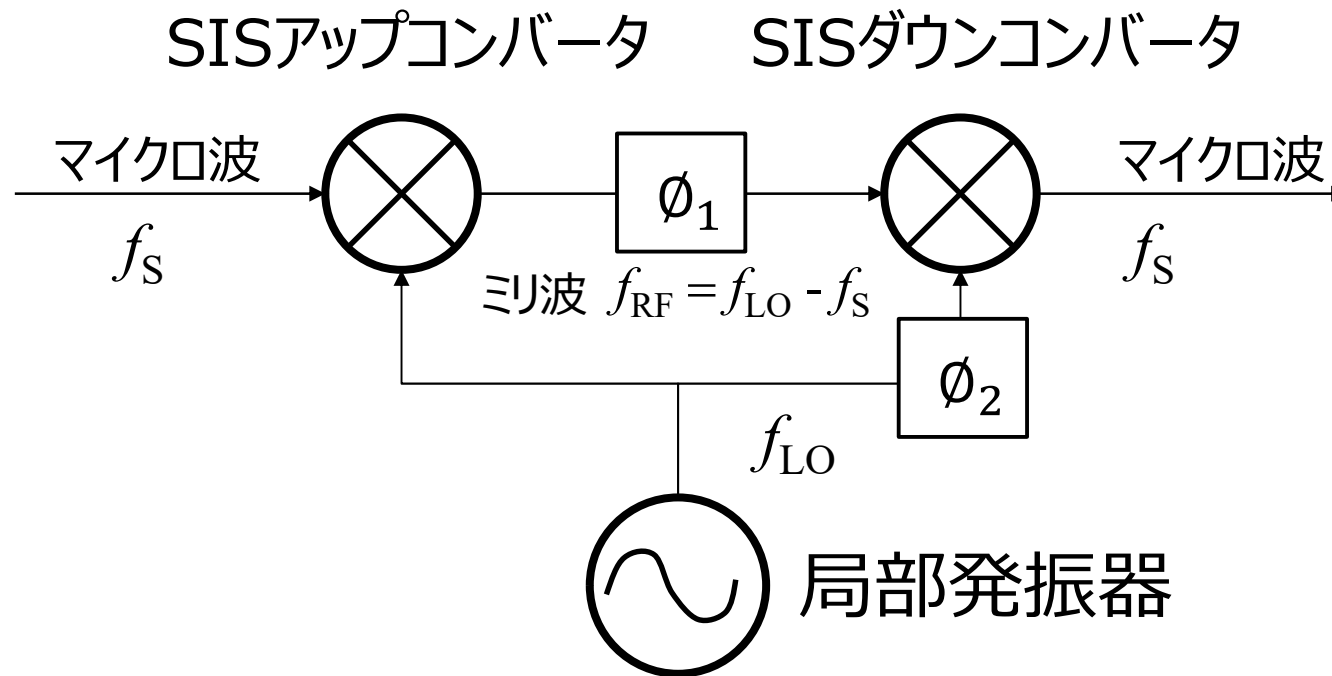


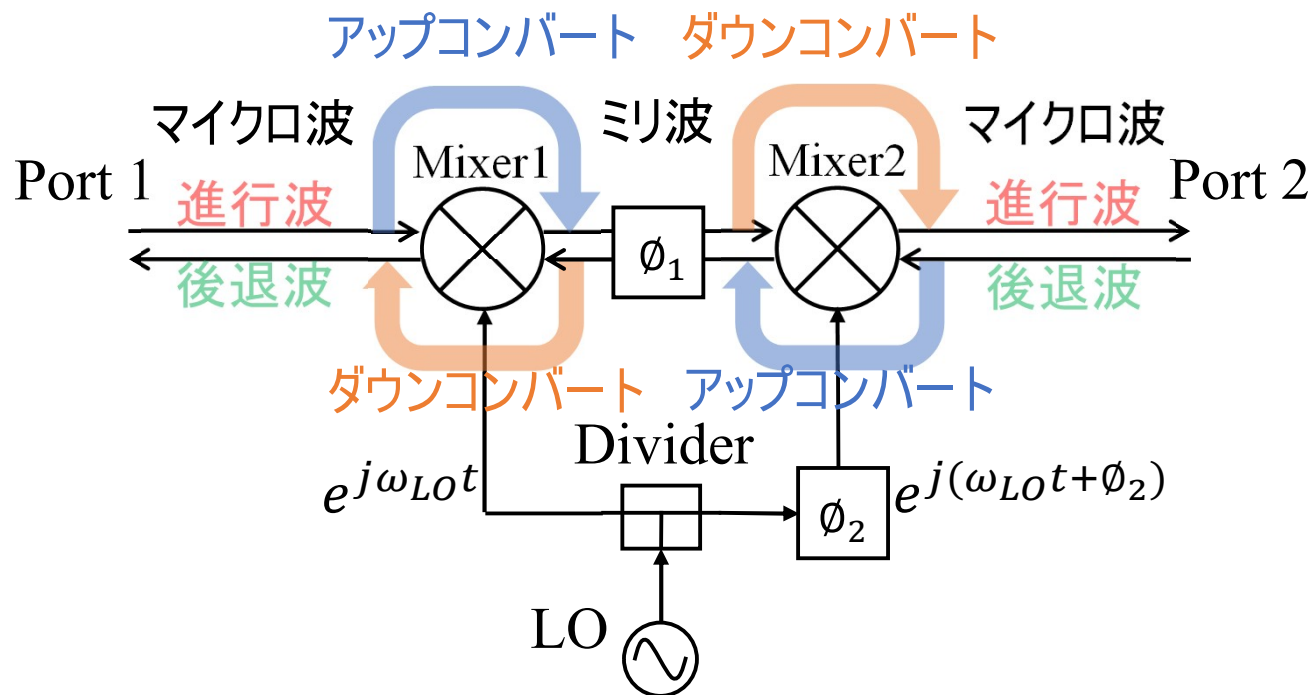
SISアンプの単方向化

SISアンプは増幅を単方向化させることが可能.

ポイント:

1. 2つのSISミキサを使う (SISアンプと同じ)
2. 2つのミキサ間に位相遅延回路 ϕ_1 , 局部発振器の片側に位相制御回路 ϕ_2 を挿入





アップコンバート

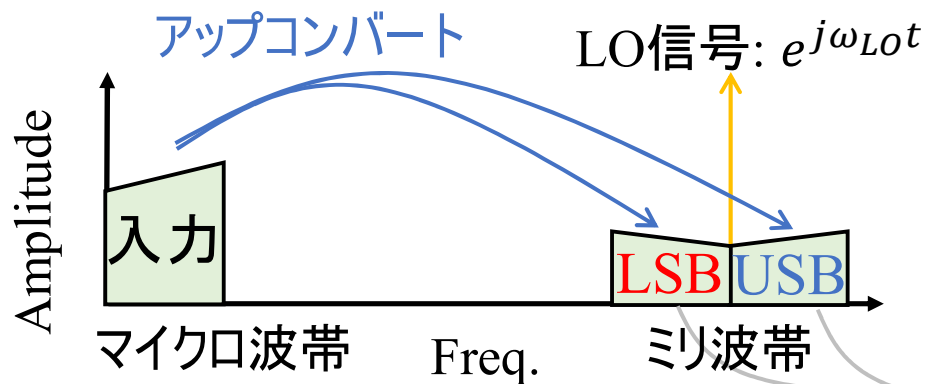
$$f_{up} = f_{LO} \pm f_{IN}$$

ダウンコンバート

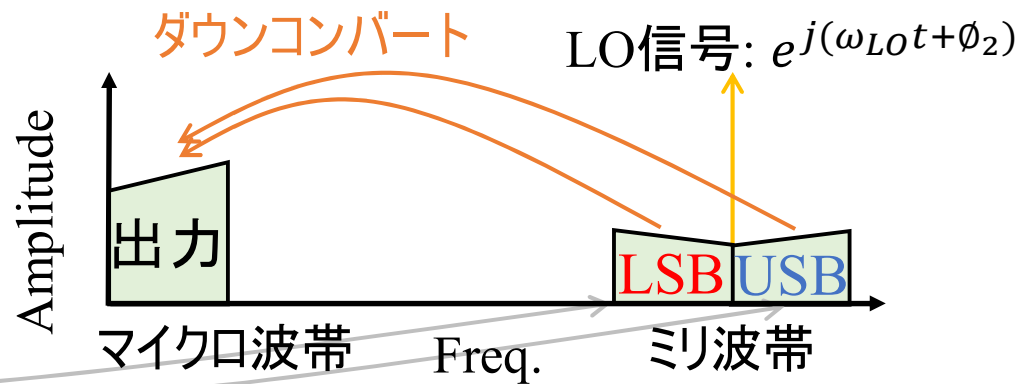
$$f_{down} = |f_{IN} - f_{LO}|$$

2つのサイドバンド
Lower Sideband (LSB)と
Upper Sideband (USB)
を考慮する必要がある

進行波の場合



$e^{j\omega_{IN}t}$ splits into:
 USB: $e^{j(\omega_{LO} + \omega_{IN})t}$
 LSB: $e^{j(\omega_{LO} - \omega_{IN})t}$

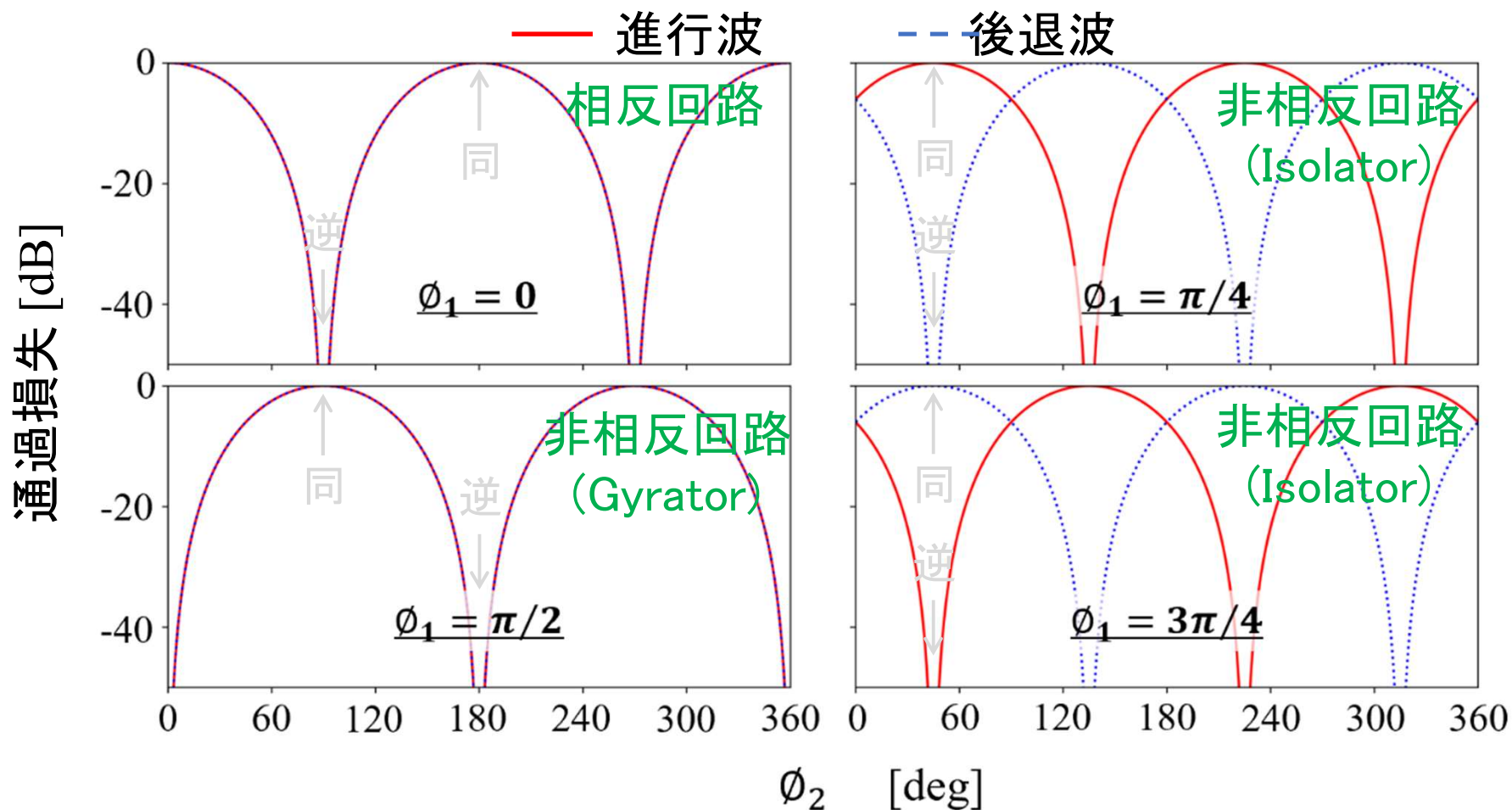


$e^{j(\omega_{IN}t + \phi_1 - \phi_2)}$ ← $e^{j\{(\omega_{LO} + \omega_{IN})t + \phi_1\}}$
 $e^{j(\omega_{IN}t - \phi_1 + \phi_2)}$ ← $e^{j\{(\omega_{LO} - \omega_{IN})t + \phi_1\}}$

新原理を用いたアイソレータ

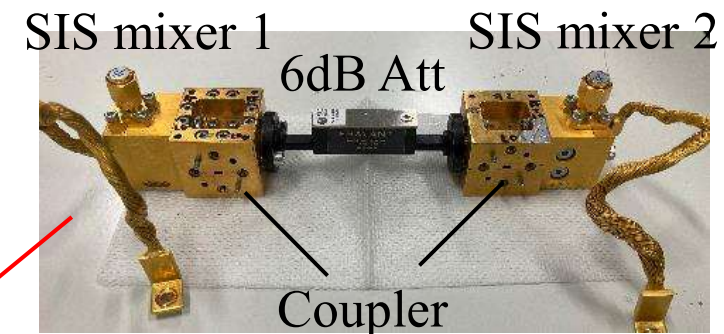
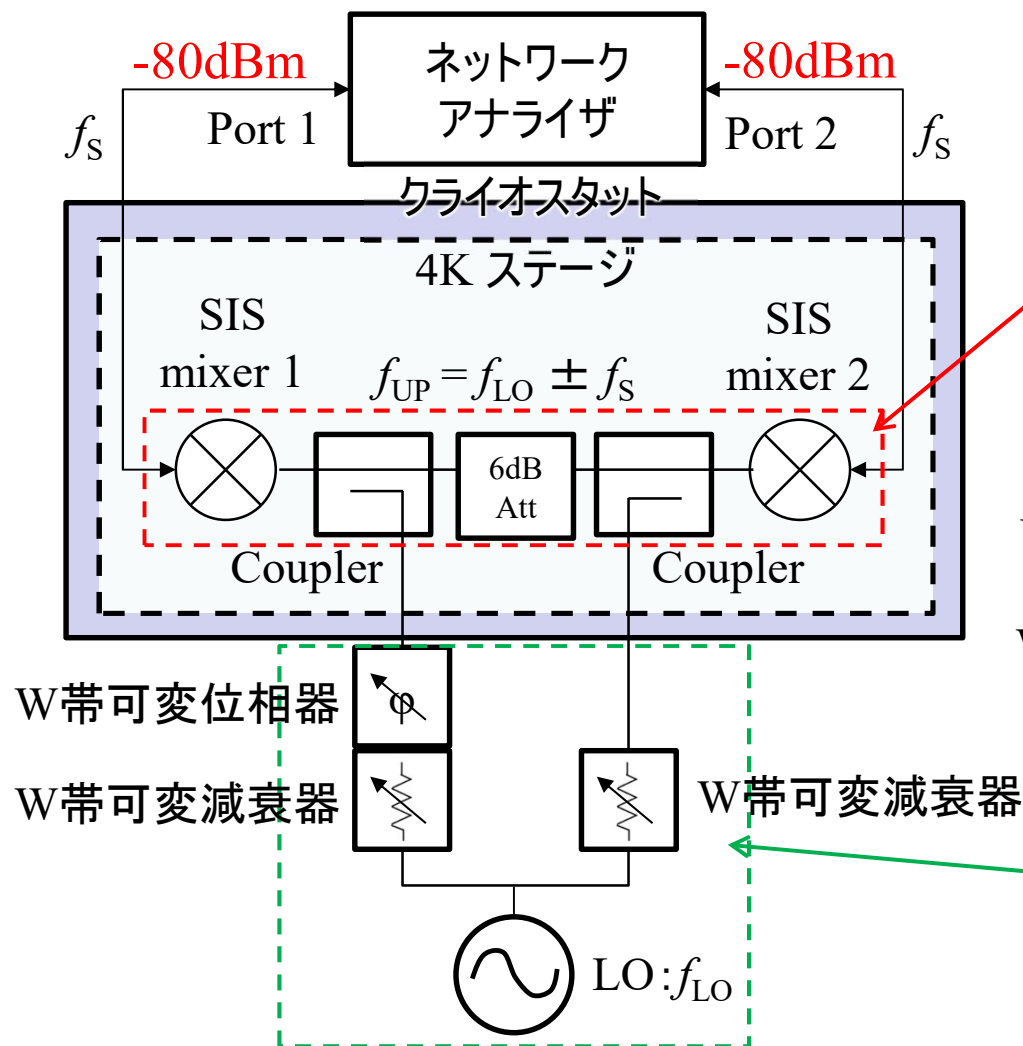
$$\begin{aligned} \text{進行波} &= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{j(\phi_1 - \phi_2)} + \frac{1}{\sqrt{2}} e^{j(-\phi_1 + \phi_2)} \\ \text{後退波} &= \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} e^{j(\phi_1 + \phi_2)}}_{\text{USB}} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} e^{j(-\phi_1 - \phi_2)}}_{\text{LSB}} \end{aligned}$$

- USBとLSBの位相状態によって強め合いと弱め合いが生じる
- 進行波と後退波でサイドバンドの強め合い、弱め合いの点が異なる



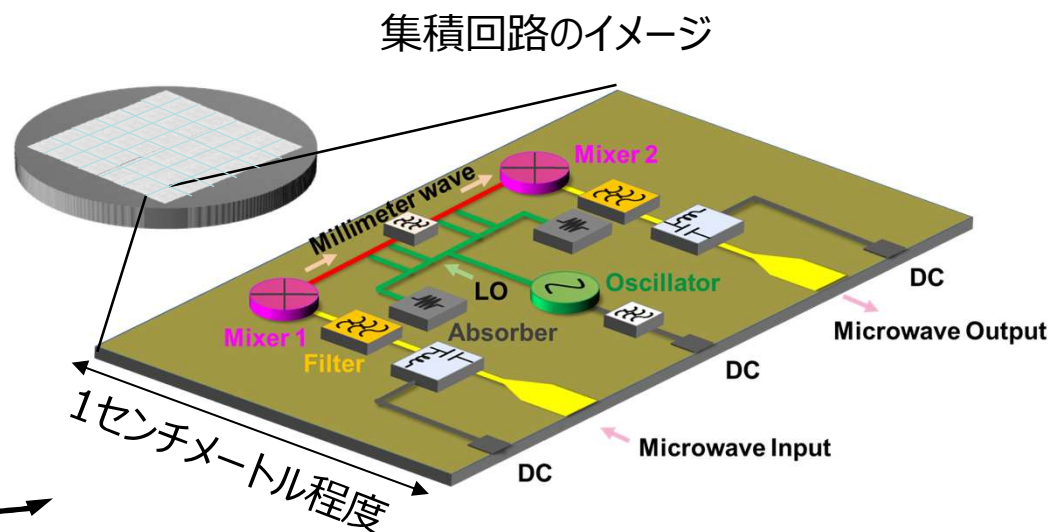
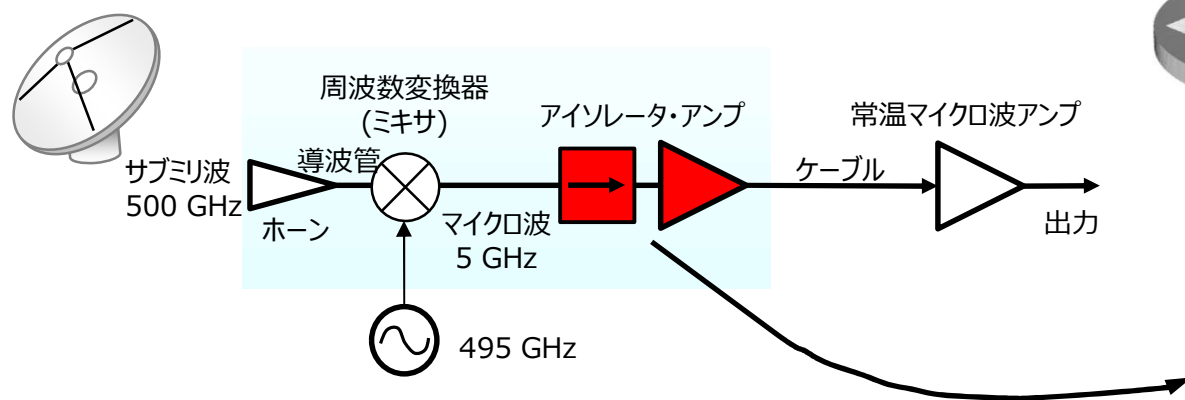
SISを用いた概念実証実験

- 変換利得を持つ超伝導SISミキサを本原理に応用することで、正利得を持つアイソレータを実現できる可能性がある。
- Wバンド(75-110 GHz)のSISミキサを用いて、アイソレータの概念実証を確認した。



実用化に向けた課題

- さらなる高性能化 (増幅度、雑音、帯域、単方向化)
(例: SISミキサ自身の性能最適化、段数の増加による利得の向上)
- 信号源の内部回路への組み込み
 - 直流電源のみで動作する超小型増幅器の実現を目指す (アイディア Y. Uzawa, et al., IEEE AS 2023).
- 小型化
 - すべてを超伝導回路素子で構成し集積回路化



従来技術と本技術の比較

冷却型低雑音アンプ

アンプの種類	動作温度	方向性	消費電力	大規模化における課題
半導体アンプ (HEMTやHBT)	< 15 K	単方向	典型的に10 mW程度(ミリワット) 動作最小値0.3 mW	低消費電力化
超伝導アンプ (パラメトリック進行波型)	< 1 K	単方向 (ただし、逆方向は透過)	ほぼ無視できる。	歩留まりの高い均一なデバイス作製
SISアンプ (本研究)	< 4 K	単方向も 双方向も可	0.005 mW (目標は半導体アンプの1/10000)	さらなる高性能化・小型化

冷却型アイソレータ

アンプの種類	動作温度	方向性	サイズ	帯域	課題
フェライトアイソレータ	< 15 K	20 dB	cm ³ オーダー	数オクターブ	磁場/サイズ
超伝導アイソレータ	< 4 K	20 dB	mm ³ オーダー	DCから10GHz程度	直流バイアス

想定される用途

- 電波天文用多素子カメラや誤り耐性型量子コンピュータの読み出し回路用増幅素子
 - － 低雑音低消費電力マイクロ波増幅器
 - － 磁性体フェライトを用いない小型アイソレータ (サーキュレータ)
- その他の特徴
 - － 直流付近から広帯域に動作
 - － 直流バイアスのみで動作可能 (開発中)
- 苦手なアプリケーション
 - － 大電力システム (アイソレータ用途として質問を受ける).

企業への期待

- 設計・作製・評価なども含めた設備は有しており、基本的には内製可能
 - 超伝導集積回路の作製（受動素子の作製など）
 - 低温におけるSパラメータや雑音温度評価
- 今後の課題と企業への期待
 - 下記を含めた共同研究
 - 受信機や量子ビットと組み合わせた実証実験
 - 具体的なアプリケーション探索

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 :
超伝導体-絶縁体-超伝導体接合を用いた低雑音マイクロ波増幅器
 - 登録番号 : 特許第7017752号、US10,680,567 B2
 - 出願人 : 情報通信研究機構、自然科学研究機構
 - 発明者 : 鵜澤佳徳、小嶋崇文
-
- 発明の名称 : アイソレータ
 - 出願番号 : 特願2022-172655号、US18/485,112
 - 出願人 : 情報通信研究機構、自然科学研究機構
 - 発明者 : 小嶋崇文、増井翔、鵜澤佳徳

お問い合わせ先

国立天文台産業連携室

e-mail:sangyo-renkei _atmark_ ml.nao.ac.jp



宇宙と社会をつなぐ

国立天文台産業連携室