

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01945

研究課題名（和文）超伝導素子と超伝導回路を融合した受信分光システム

研究課題名（英文）Receiver system combining SIS mixer and SFQ circuit

研究代表者

鎌崎 剛（KAMAZAKI, Takeshi）

国立天文台・アルマプロジェクト・助教

研究者番号：00413956

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,500,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙電波観測における将来を見据えた広視野化と広帯域化のため、従来システムでは常温回路で行われているデジタル化およびデジタル相関処理の回路を超伝導回路の一つである単一磁束量子（Single Flux Quantum）回路に置き換えることを本研究は目指している。今回、超伝導回路の一つである単一磁束量子回路を用いてデジタル化を行うA/D変換器および相関処理を担う自己相関器の設計と作製を行い、実際に作製された回路の正常動作を示すことで提案している方式の基礎的な実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、将来の宇宙電波観測における広視野化および広帯域化を見据え、超伝導素子であるSIS素子からの受信出力を超伝導回路の一つである単一磁束量子回路を用いて処理することを目指した基礎的な試験である。単一磁束量子回路で設計・作製されたA/D変換器および自己相関器の動作確認により、単一磁束量子回路が将来の宇宙電波観測における広視野化および広帯域化の要素技術の一つになりえることを示すことができた。また、単一磁束量子回路を用いることで消費電力の削減が可能となるので、将来の大規模処理システムにおける低消費電力化に対して一つの可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：For future observations with wider fields and broader bandwidths in radio astronomy, our research aims at replacing normal temperature circuit for digitization and digital correlation processing with single flux quantum (SFQ) circuit, which is one of the superconducting circuits.

In this experiment, we designed and manufactured A/D converters for the digitization and autocorrelators for the correlation processing using the SFQ circuit, and then, showed that the actually manufactured circuits correctly worked. This demonstration supports that the SFQ circuits are basically usable for the processing in radio astronomy.

研究分野：宇宙電波観測

キーワード：超伝導回路 超伝導素子 受信分光システム 宇宙電波観測

1. 研究開始当初の背景

1931年の宇宙電波の発見以来、宇宙電波の観測は天文学に多大な貢献をしてきた。特に他波長では観測することが困難な中性水素原子や数 10 K 程度の極低温分子ガスのヘテロダイン方式を用いた電波観測は観測天文学において必要不可欠な道具となっており、星形成領域、天の川銀河、系外・遠方銀河等の物理・化学状態およびそれらの運動に関する重要な情報をもたらしてきた。現在では、この電波観測装置の究極の形の一つとしてアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) が南米チリに建設され、新しい科学的成果が次々と生み出されている。これらの成果を踏まえ、ALMA を含む電波望遠鏡の次のステップとして、広視野化による観測範囲とサンプル天体数の拡大と広帯域化による多数の分子スペクトル線の効率的な同時観測が切望されている。

2. 研究の目的

広視野化の為に、高感度(低雑音)の受信素子を集積化して撮像素子のように空間的に並べて同時観測できる点(ビーム)の数を増やす必要がある。すなわち、受信素子である超伝導 SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)ミキサの集積化とマルチビーム化である。また、ビーム数に応じて受信信号の処理回路の並列化も必要となる。広帯域化の為に、SIS ミキサの周波数帯域の拡大と A/D(Analog-to-Digital)変換器を含む信号処理回路の高速化が必要である。しかし、これらを実現するための大きな障害として、SIS ミキサ直後の増幅器の周波数帯域と消費電力、A/D 変換器のサンプリング速度があげられる。現在、ALMA で使用されている増幅器の消費電力はおよそ 0.1 mW 程度、周波数帯域は 4 GHz である。マルチビームの為にこの増幅器を数個並べるだけならばそれによる消費電力の増加は些細である。しかし、将来の全天にまたがるような広域観測の為に 1000 ビーム以上の拡張性を見据えた場合には消費電力を最低でも 1/10 以下にする必要がある。また、ALMA で使用されている A/D 変換器のサンプリング速度は 4 G サンプル毎秒である。しかし、ALMA で観測されているミリ波・サブミリ波帯の大気窓を効率的にカバーする為には少なくとも 10 GHz 以上の周波数帯域が必要となる。よって、サンプリング定率より 20 G サンプル毎秒以上のサンプリング速度が必要となる。

これらの要求に応えられると期待されるのが超伝導素子と超伝導回路を結合した受信分光システムである。従来システムは、超伝導素子である SIS ミキサからの出力を常温回路である A/D 変換器および専用計算機を用いてデジタル演算処理を行う。この常温回路を超伝導回路に置き換えることで低消費電力にもかかわらず高速演算可能な受信分光システムを実現することが本研究の将来的な目標である。今回その手始めとして、常温回路内の基礎的な処理を超伝導回路で実現すると共に超伝導素子からの信号をその超伝導回路で処理することで、超伝導回路を用いた受信分光処理が実現可能なことを実証する。

3. 研究の方法

最初に超伝導素子と超伝導回路間の接続の検討、超伝導回路による基礎的な信号処理回路の開発と評価を行う。その後、両者を結合して一つの受信分光システムとして組み上げてシステムとしての総合評価を行う。具体的には以下の検討と開発・評価を行う。

(1) 超伝導 SIS ミキサと超伝導回路間の接続の検討

従来の SIS ミキサは、その後段に接続する(冷却)半導体増幅器との結合を最大にするように中間周波数信号の出力インピーダンスを最適化してきた。しかし、本研究で提案する超伝導 A/D 変換器を接続する場合には従来とは異なる出力インピーダンスでの接続が必要となるので、その整合性の取り方を検討する。

(2) 超伝導回路を用いた A/D 変換器の開発・評価

超伝導 A/D 変換器としては高いサンプリング周波数の実現が可能なシグマ・デルタ型が本システムには最適と考えている。A/D 変換の出力多ビット化により量子化雑音を低減し、信号雑音比を向上させることができるが、回路規模は増大し電力消費は増える。性能と電力のバランスすなわち電力効率を考慮し、将来システムへの応用も考えながら最適な出力ビット数を決定する。

(3) 超伝導回路を用いた自己相関器の開発・評価

受信信号のスペクトルの解析のため、A/D 変換器からの多ビット出力信号列から自己相関を計算する自己相関器の設計、試作を行う。2つのデータ間の相関の計算には排他的論理和ゲートを用いることで、効率的に自己相関器が実現できる。排他的論理和を積極的に用いる論理合成法を開発し、自己相関器の設計に用いる。

(4) 受信分光システムとして総合評価

SIS ミキサと超伝導 A/D 変換器と超伝導自己相関器を結合して一つの受信分光システムとしての動作実証を行う。

4. 研究成果

(1) 超伝導 SIS ミキサと超伝導回路間の接続の検討

SIS ミキサと超伝導 A/D 変換器間のインピーダンスマッチングについては、A/D 変換器側の入力側に適当な抵抗を入れることで対応した。これにより既存の SIS ミキサを使用することを可能にした。

(2) 超伝導 A/D 変換器の開発・評価

A/D 変換器には、超伝導回路の一つであり高速・低消費電力駆動可能な単一磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)回路を用いた 1-bit A/D 変換器を採用して設計・作製を行った。当初、2-bit で検討を進めていたが、より確実な動作のために実績あるレイアウトをベースにした 1-bit に変更した。作製した 1-bit A/D 変換器は評価時に不具合が判明して設計の修正と再作製が必要となったが、最終的に正常動作を確認した。

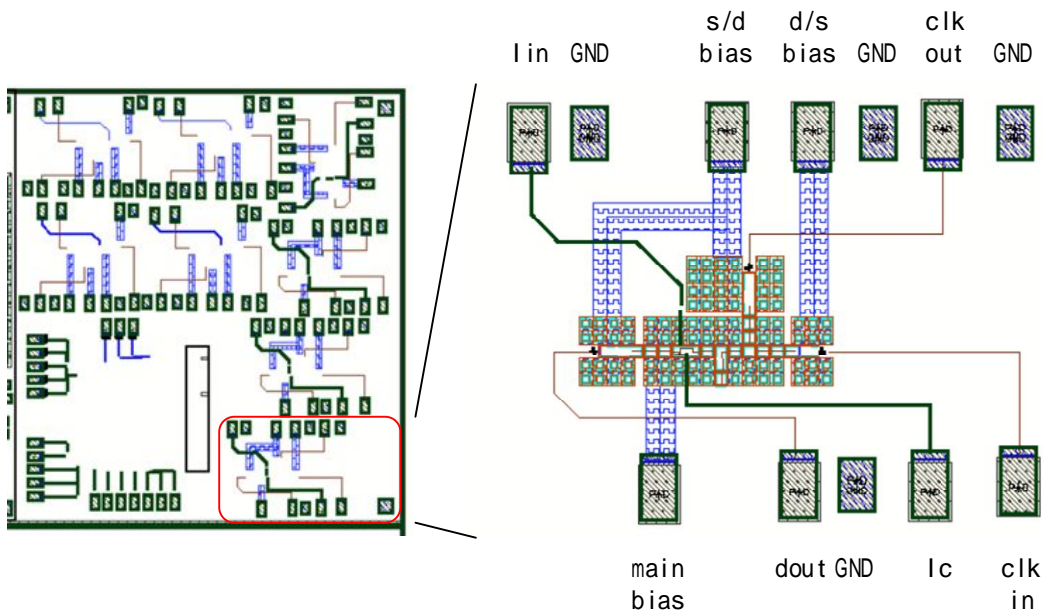


図 1. 1-bit A/D 変換器のレイアウトおよびその拡大図。入力値(lc)の閾値(lin)に対する比較結果が出力(dout)される。

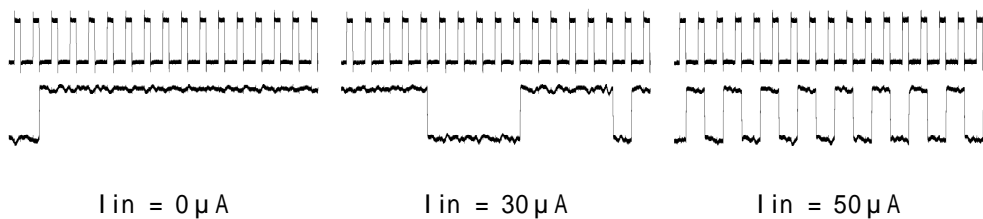


図 2. 入力された熱雑音の異なる閾値(I_{in})に対して比較された結果の出力。上に示される動作クロックに同期して比較結果が下に示される。閾値に応じて出力が変化していることから正常動作を確認した。

(3) 超伝導自己相関器の開発・評価

超伝導 A/D 変換器と同様に SFQ 回路を用いて 2-bit 自己相関器を設計・作製した。図 3(左)のレイアウト図に示されるようにこの超伝導自己相関器は、シフトレジスタ、2-bit 相関器、カウンタの要素回路から構成されており、使用されているジョセフソン結合の数は 5631 である。この回路は 1 クロック分の遅延を $\Delta\tau$ としたときに $\Delta\tau$ 、 $3\Delta\tau$ 、 $5\Delta\tau$ 、 $7\Delta\tau$ 、の 4 種類の遅延時間だけ離れたデータの相関関数の時間積分を出力する。図 3(右)は 2 ビット相関器の測定波形であり、これらの波形より超伝導回路で作製された自己相関器の正常動作を確認した。

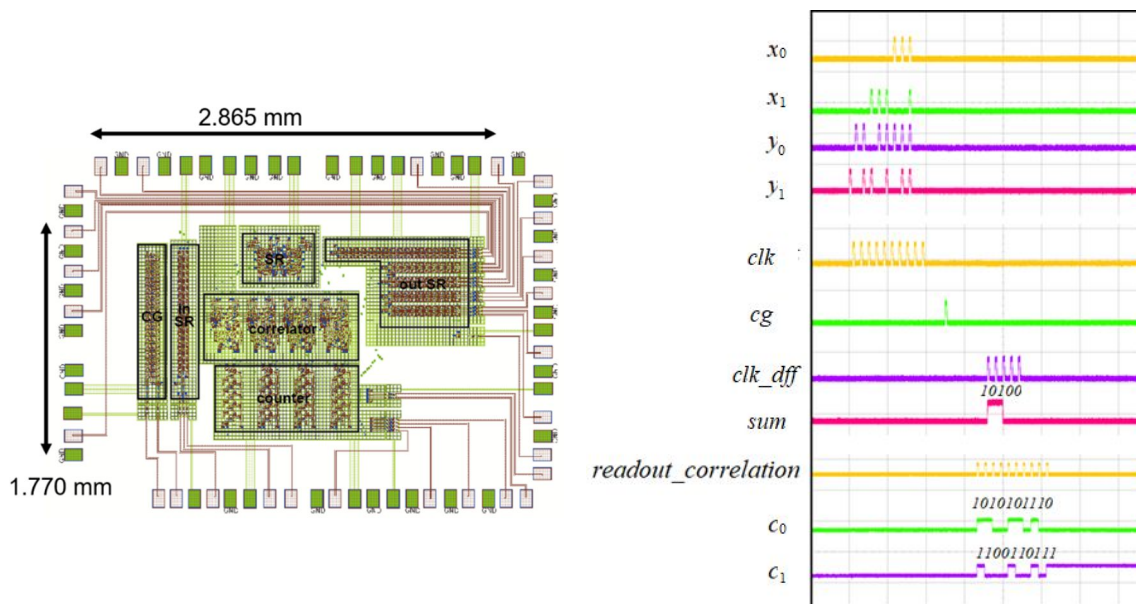


図 3. (左) 2-bit 自己相関器のレイアウト。CG、SR、out SR はそれぞれ 12-bit クロック発生器、入力用 10-bit シフトレジスタ、出力 10-bit シフトレジスタを示している。(右) 2-bit 自己相関器の動作波形。2-bit 入力信号から相関 c_0 、 c_1 が計算され、その積分結果が sum として出力されている。

(4) 受信分光システムとして総合評価

前述のとおり作製した 1-bit A/D 変換器の不具合によりその設計修正および再作製が必要となり、さらにコロナ禍のために超伝導回路素子の作製に通常より時間がかかることから、当初予定していた結合試験は遅れることになった。

そこで予備試験として既存の簡単な超伝導回路を冷凍機環境下で動作させる確認試験を実施した。これまで、研究遂行者が超伝導回路の動作確認を行う際には回路そのものを液体ヘリウムに浸した状況下で行ってきた。しかし、SIS ミキサと超伝導回路を接続する結合試験においては、SIS ミキサの動作に不可欠となる基準信号を入力する必要があり、そのためには冷凍機環境を使用する必要がある。超伝導素子と超伝導回路の結合試験のために作製した基板付ケースに動作確認用の SIS ミキサと SFQ 回路で作製された超伝導コンパレータを搭載し、それぞれの素子の動作確認を行った。外部からの熱流入を避けるために細い配線材と蓋を用意することで素子付近の温度計から 4K 台まで冷えていること、SIS ミキサの電流-電圧特性からその動作を確認した。一方、超伝導コンパレータについては想定していた臨界電流値未満で電圧が発生していることから不十分な冷却等の不具合発生が疑われたのでその原因調査を進めた。

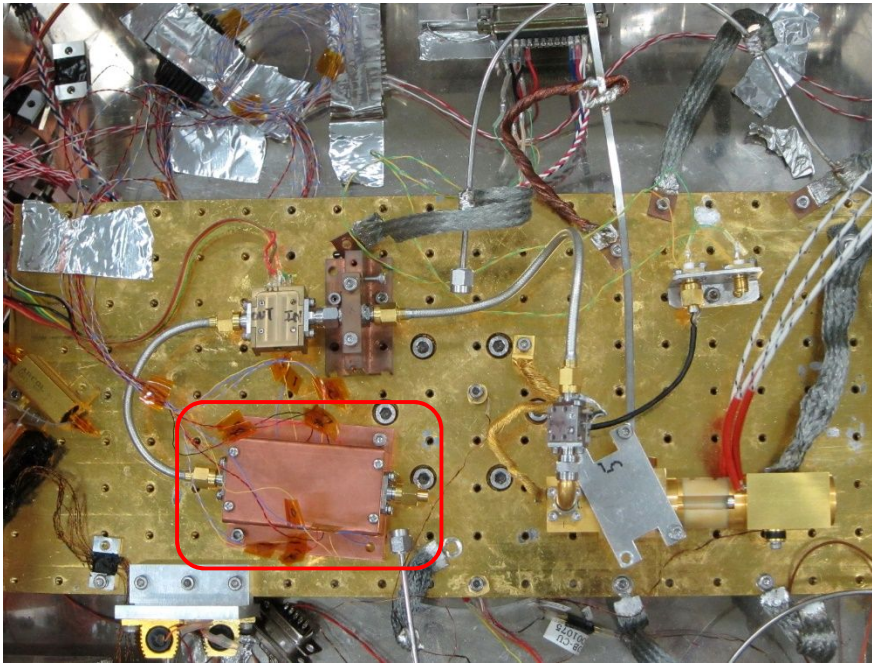


図 4. 冷凍機内に設置された超伝導回路基板(赤線で囲まれた箱)。周囲からの輻射を防ぐために金属製の箱に入れられている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1 . 発表者名 L. Shirakawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2 . 発表標題 Design and evaluation of 2-bit-input single-flux-quantum autocorrelator system for astronomical data analysis
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC) 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 白川琳沙, 山梨裕希, 吉川信行
2 . 発表標題 電波天文観測のための単一磁束量子回路による2ビット自己相関器の評価
3 . 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 L. Shirakawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2 . 発表標題 Design and evaluation of multi-bit-input single-flux-quantum autocorrelator system for astronomical data analysis
3 . 学会等名 32nd International Superconductivity Symposium (ISS 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 L. Shirakawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2 . 発表標題 Design and Evaluation of Superconducting 2-bit Autocorrelator System for Astronomical Data Analysis
3 . 学会等名 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 白川 琳沙 , 山梨 裕希 , 吉川 信行
2. 発表標題 電波天文観測のための単一磁束量子回路を用いた自己相関器の設計と評価
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白川琳沙, 山梨裕希, 吉川信行
2. 発表標題 電波天文観測のための単一磁束量子回路による2ビット自己相関器の測定
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	酒井 剛 (SAKAI Takeshi) (20469604)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授 (12612)	
研究分担者	山梨 裕希 (YAMANASHI Yuki) (70467059)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	
研究分担者	野口 卓 (NOGUCHI Takashi) (90237826)	国立天文台・先端技術センター・名誉教授 (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------