

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13568

研究課題名（和文）ダイレクトRFによる超伝導リードアウト CMB観測メガピクセル時代に向けて

研究課題名（英文）Multiplexing readout using direct RF towards mega-pixel operation of superconducting detectors

研究代表者

鈴木 惇也（Suzuki, Junya）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：90795014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：高速データコンバータを用いた超伝導検出器の多重化読み出しシステムを開発した。宇宙背景放射の観測では多数の超伝導検出器を運用する必要があり、読み出し線を減らすために一对の線で多数の検出器を読み出す多重化システムが必要となる。本研究ではマイクロ波を用いた周波数多重化読み出しシステムの開発を行なった。高速データコンバータ（ADC/DAC）を用いることで帯域を広げられ、一对の線で読み出す数を増やすことができる。本研究では最終的に2ギガヘルツの帯域で多重化読み出しを行うことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙背景放射の精密観測により宇宙の始まりや素粒子の謎について解明することができる。多数の検出器を読み出すことが感度向上のうえで必須だが、これが本研究で開発したマイクロ波多重化システムにより容易になる。宇宙観測により我々の知的好奇心を満たしてくれるだけでなく、本研究のシステムは将来的に実生活にも役立つ。空港のセキュリティチェックでは現在、感度の高い超伝導ミリ波受信機を用いた実証試験が進んでいるが、こうした受信機の読み出しに転用できると期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a multiplexing readout system for superconducting detectors using a high-speed data converter. Since observation of cosmic microwave background radiation (CMB) requires the operation of a large number of superconducting detectors, readout multiplexing system is necessary to reduce the number of readout lines. In this study, we developed a microwave multiplexing readout system. A high-speed data converter (ADC/DAC) can be used to increase the bandwidth and the number of detectors readable on a single pair of lines. In this study, we finally succeeded in developing multiplexed readout with 2 GHz bandwidth.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：超伝導 FPGA RFSoc CMB 宇宙 素粒子

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測は宇宙初期を記述する有力な仮説「インフレーション理論」を検証できる稀有なプローブである。高感度の測定によるインフレーション理論の検証を目指して現行実験や将来計画が複数立ち上がっている。検出器単体での感度は理論的な限界に達しているため、実験としての感度を向上させるためには多数の検出器を同時に動かして実効的な観測時間を増やす必要がある。

検出器の数を増やす際に、その読み出しがもっとも問題となる。読み出しのための配線が多くなると複雑になるだけでなく、極低温に冷やす必要のある検出器がその線を伝った熱流入のせいで温まってしまうという根本的な問題がある。これを解決するために一本の線で複数の検出器を読み出す「多重化」の手法が開発された。

多重化には複数の方式が提案されているが、現状最も有力なのはマイクロ波を用いた多重化である(右図)。この方式では各検出器を超伝導マイクロ波共振器に結合させて、周波数方向での多重化を行う。それぞれの共振器の共振周波数に対応する波を足し合わせた合成波を生成してクライオスタット内の検出器へと送る。その波は共振器チップ内で各共振へと周波数分解され、それぞれの周波数の波は検出器への入力に応じて振幅と位相が変化する。共振器チップ内を出た後は再度合成された波となるが、これをデータコンバータでデジタルデータにした後、計算により周波数分解をして出した波との位相・振幅を比較して検出器にどのような入力が起こったかを導き出す。

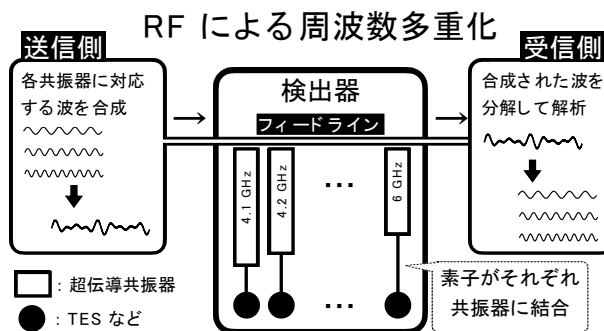


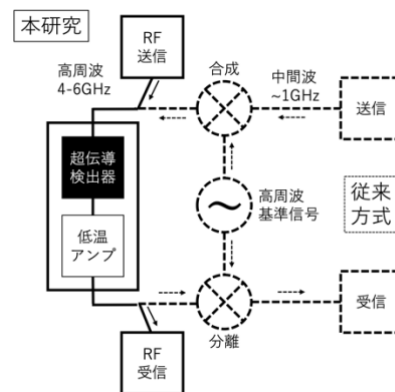
図1 RFによる周波数多重化。各共振器に対応する周波数の波を合成・分解するデータ取得システムが必要となる。

したがってこのマイクロ波多重化を実現するためには、(1) デジタル信号とアナログ信号を相互変換するデータコンバータ (ADC, DAC)、(2) 超伝導マイクロ波共振器、(3) 波の合成・分解を行う計算機能、の3つが必要となる。(1) に関して、単位時間あたりに変換できる数の指標である「サンプリング速度」が高ければ、共振器を並べられる周波数幅が増え、結果的に多数の検出器を読み出すことができるようになる。また、「アナログ帯域幅」の大きいものを使用すればマイクロ波を直接サンプルすることが可能となり、別回路を用いた周波数のアップ・ダウンコンバージョンが必要なくなる。

こうしたことから、「サンプリング速度」「アナログ帯域幅」の大きいデータコンバータを用いた読み出しシステムの開発が求められていた。サンプリング速度が大きくなることによってデータ量も増えるため、(3) の計算回路についても工夫が必要になる。こうした開発を成し遂げることによって性能が上がるだけでなく、システムの総数や部品点数を減らすことができ、100万素子以上を取り扱う必要のある将来実験に向けた基礎を構築することができる。

2. 研究の目的

本研究は、「アナログ帯域幅」の大きいデータコンバータを用いることで周波数のアップ・ダウンコンバージョンの回路を減らすことを目的とした。従来は RF 信号発生器とミキサーを用いて、データコンバータから出た後・入る前に低周波・高周波の変換を行っていた。アナログ帯域幅の大きいデータコンバータを用いると、直接 RF 信号を取り扱うことができるため、この信号発生器とミキサーが不要になり、コストダウンにつながる(右図)。さらに、ミキサーの特性上発生してしまう「漏れ」などを避けられるため、性能の向上にもつながる。



こうした性能の高いデータコンバータの入手は過去には困難だったが、半導体技術の発展により比較的容易に手に入るようになってきた。こうした背景を踏まえ、本研究ではアナログ帯域幅の広いデータコンバータを用いて高性能かつ安価なデータ取得システムを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究ではアナログ帯域幅の広いデータ取得システムの構築を行う。データ取得システムは上記(1)と(3)の組み合わせにより構築される。本研究では(1)のデータコンバータの特性評

価、および (3) のプログラム作成を行い、データ取得システムの構築を行なうこととした。

特性評価はデータコンバータのメーカーが提供している評価ボードを用いて行い、十分なアナログ帯域幅が確保できているか、ノイズが十分に低いかなどを確認する。

デジタル信号処理については FPGA で行う。サンプリング速度は秒間 10 億回以上になるため通常の CPU での処理では間に合わず、パイプライン処理が得意な FPGA を用いる必要がある。FPGA はルックアップテーブル・フリップフロップ、DSP、ブロック RAM などの素子が搭載されたチップで、各素子間を配線して論理回路を作成することができる。この回路素子の数や配線には限界があるため、なるべく減らすための工夫が必要となる。本研究では波の生成部分を、外部に用意した DDR4 メモリを用いることで部品点数を極小化させる工夫を行なう。また、周波数分解部分では単純な DDC (デジタルダウンコンバージョン) ではなく FFT 方式を用いることで容量を削減する。

4. 研究成果

(1) のデータコンバータについて、評価ボードを用いて試験を行なった様子を図 2 に示す。従来用いられてきたシステムでは数百 MHz 程度の信号しか直接生成はできなかったが、この評価ボードでは 6 GHz の周波数の波を直接合成できることを確認した。

当初の計画では ADC や DAC、クロック生成ボードなどを備えたアナログボードを製作してシステムを構築する予定だったが、研究期間内に RFSoc が発売され、計画の見直しを行なった。RFSoc は一つのチップ内にデータコンバータ、FPGA、CPU を搭載したものになっており、これの採用により部品点数をさらに削減できると期待される。そのため、本研究ではアナログボード製作は行わず、RFSoc の採用を行うこととした。

また、並行して FPGA のプログラム (ファームウェア) の作成を行なった。アナログ帯域幅の広いデータコンバータは通常サンプリング速度も速いため、その性能を活かせるようにスループットの大きいファームウェア作成を試みた。本研究では 1 GHz と 2 GHz のスループットを持つファームウェアをそれぞれ別の方式を採用して開発し、比較を行なった (図 3)。

1 GHz のファームウェアでは波の合成に DMA を、波の分解に FFT を採用した。FPGA は 1 GHz では動作しないため、分割して並列に計算を行う必要がある。そのためこのファームウェアでは 4 分割で計算することのできる FFT コアを作成し、実装することに成功した。作成したファームウェアを FPGA にプログラムし、1 GHz でのサンプリングが可能なデータコンバータを接続して試験を行なった。実際の超伝導共振器が読めることが確認でき、ノイズレベルも想定通りの低さに抑えることができた。

2 GHz のファームウェアでは、分解後に最終的に得られるデータの速度を高められるよう、DDC を用いたシステムの構築を行なった。こちらも実装に成功し、こちらは前述した RFSoc 上に実際に実装することに成功した。

今後 RFSoc の性能向上やさらなる発展 (Versal RF など) が見込まれている。本研究で試験したダイレクト RF 技術、開発した高いサンプリング速度を活かす高スループットファームウェアを活用することで、データ取得システムのさらなる性能向上・価値化をはかることができると見込まれる。



図 2 本研究で用いた評価ボードと得られたスペクトル。6 GHz の周波数を直接合成することができた。

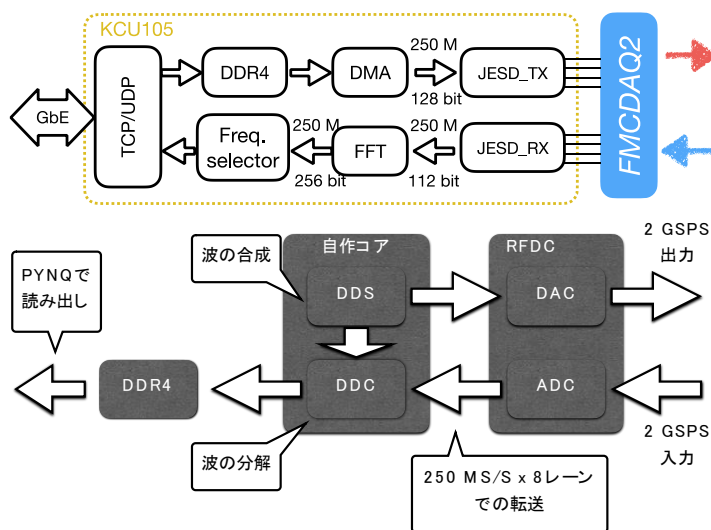


図 3 ファームウェアの概略図。上: DMA や FFT を採用した 1 GHz のスループットを持つファームウェア。下: DDS と DDC を採用した 2 GHz のスループットを持つファームウェア。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Junya SUZUKI
2. 発表標題 Development of low-cost readout electronics for resonator-based multiplexing detector arrays
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木惇也
2. 発表標題 超伝導検出器のマイクロ波読み出し--GHz 帯域の達成とさらなる拡張
3. 学会等名 日本物理学会 第76回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木惇也
2. 発表標題 超伝導検出器のマイクロ波読み出し技術開発
3. 学会等名 計測システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木惇也
2. 発表標題 RFSoc を用いた超伝導検出器のマイクロ波読み出し
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木惇也
2. 発表標題 広帯域で安価な超伝導検出器の多重化読み出しシステム -- ファームウェアの開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 第75回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junya SUZUKI
2. 発表標題 Development of a multiplexing readout system for superconducting detectors combining commercially available digital and analog boards
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木惇也
2. 発表標題 Readout electronics for CMB experiments
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木惇也
2. 発表標題 超伝導検出器 KID を用いた CMB 偏光観測実験 GroundBIRD
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」第1回低温技術研究会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------