

DIOS衛星搭載に向けた TES型X線マイクロカロリメータ読み出し系の開発

○千葉旭、酒井和広、山本亮、竹井洋、満田和久、山崎典子、関谷典央、永吉賢一郎、林佑 (ISAS/JAXA)、日高睦夫、永沢秀一、神代暁 (産業技術総合研究所)、宮崎利行 (金沢大学)



E - mail : chiba@astro.isas.jaxa.jp

DIOS 衛星への搭載にむけて、我々は TES 型 X 線マイクロカロリメータ読み出し系の開発を行っている。DIOS では TES カロリメータを 400 ピクセル程度アレイ化する。読み出しに必要な信号多重化の手段として我々は周波数分割方式による研究を進めてきており、位相補償回路としてベースバンドフィードバック (BBFB) 回路を用いている。アナログ回路で構成された BBFB 回路において TES カロリメータの信号多重化に成功しており、現在は実際の衛星搭載にむけて BBFB 回路のデジタル化の開発と実証実験を行っている。本発表では BBFB 回路を用いた読み出し系の開発と実験の現状について報告する。

1. Introduction

DIOS 衛星では、0.1 K 以下という極低温で高い分光性能を発揮する TES 型 X 線マイクロカロリメータ (以下、TES カロリメータ) を 400 ピクセル程度アレイ化する (ポスター P2-29)。我々は要求されるエネルギー分解能とアレイ数および有効面積の確保のために、吸収体の製作や積層配線の構築 (ポスター P2-31)、読み出し系の開発を行っている。特に読み出し系においては、冷凍機の冷却能力の観点から **低発熱型 SQUID の使用と TES カロリメータの信号多重化技術**が必要であり、その研究開発を進めている。

2. BBFB を用いた FDM による読み出し

TES カロリメータの微小な抵抗変化を読み出すためには、高感度磁気センサ SQUID をコイルとともに負のフィードバックで用いる。また、信号多重化によって複数の TES カロリメータの信号を1つの SQUID でまとめて読み出す。

我々は周波数分割信号多重化 (FDM) により読み出しを行っている。FDM では各 TES カロリメータごとに異なる周波数 (~ MHz) で交流駆動することで信号に振幅変調をかけ、複数の TES カロリメータの信号 (~ 10 kHz) を多重化し、多入力 SQUID で読み出す。

また、室温部で一度信号を復調し、MHz 帯である搬送波の位相遅れを補償した上で再び信号を変調しフィードバックをかけるベースバンドフィードバック (BBFB) を用いる。**BBFB 回路を用いて DIOS では 8 チャンネル以上の信号多重化**をする。

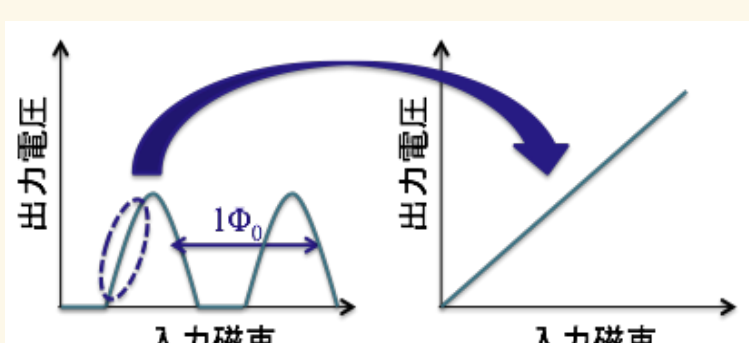


図 1 SQUID の応答

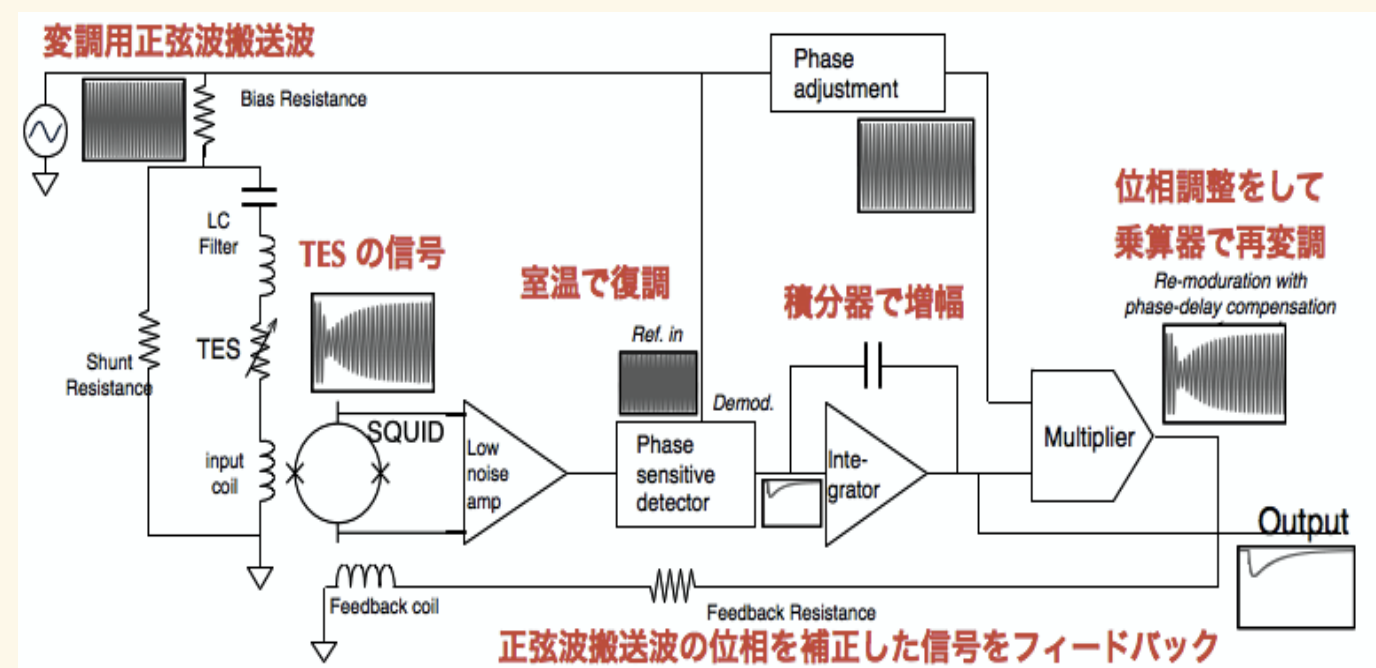


図 2 BBFB回路の概念図

3. 低発熱型 SQUID の開発

DIOS で SQUID に要求される発熱は 20 nW 以下 (@ 8 ch Mux) と非常に小さい。我々はその**許容値を達成する低発熱型 SQUID を設計・製作した。発熱以外のパラメータについても許容値を達成し目標値に近づきつつある。**

また、FDM での読み出しに用いる多入力 SQUID として、4 入力 SQUID チップを製作した。現在は LC バンドパスフィルタに使用するキャパシタンスを搭載した SQUID チップを製作中である。今後このチップの動作試験および 8 入力 SQUID チップの設計を行っている。

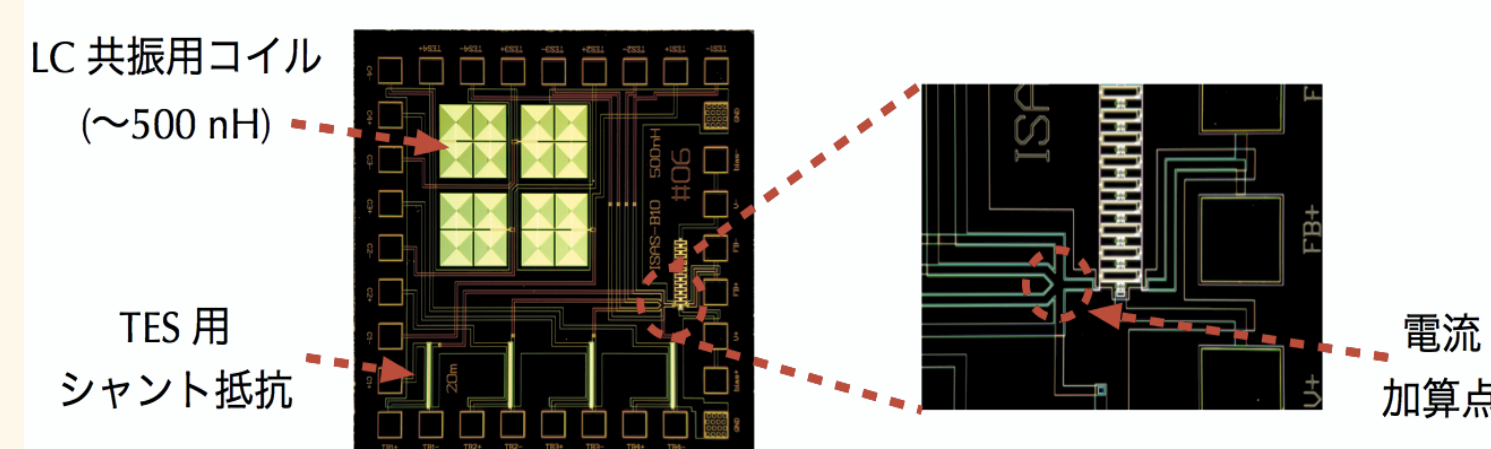


図 3 多入力型 SQUID チップ

4. アナログ BBFB 回路を用いた同時交流駆動実験

我々は BBFB 回路の原理実証をするために、nF 社と共同でアナログ 回路を開発し、TES カロリメータの 2 素子同時交流駆動を試みた。結果、**2 チャンネル同時読み出しに成功し、原理実証をした。** エネルギー分解能は数十 eV で要求を満たさなかったものの、十分な成果であった。

取得したパルスにはクロストークが確認された。この要因を特定するため検証実験を行った結果、**SQUID の非線形性がクロストークの一因**であることが判明した(図 5、図 6)。信号を多重化した際、SQUID に実質的に入力される磁束は BBFB 回路のループゲインに反比例する。そのため SQUID の非線形性がエネルギー分解能の劣化につながらないよう、**BBFB 回路の設計においてループゲインを最大限大きくする必要**があるという知見を得た。

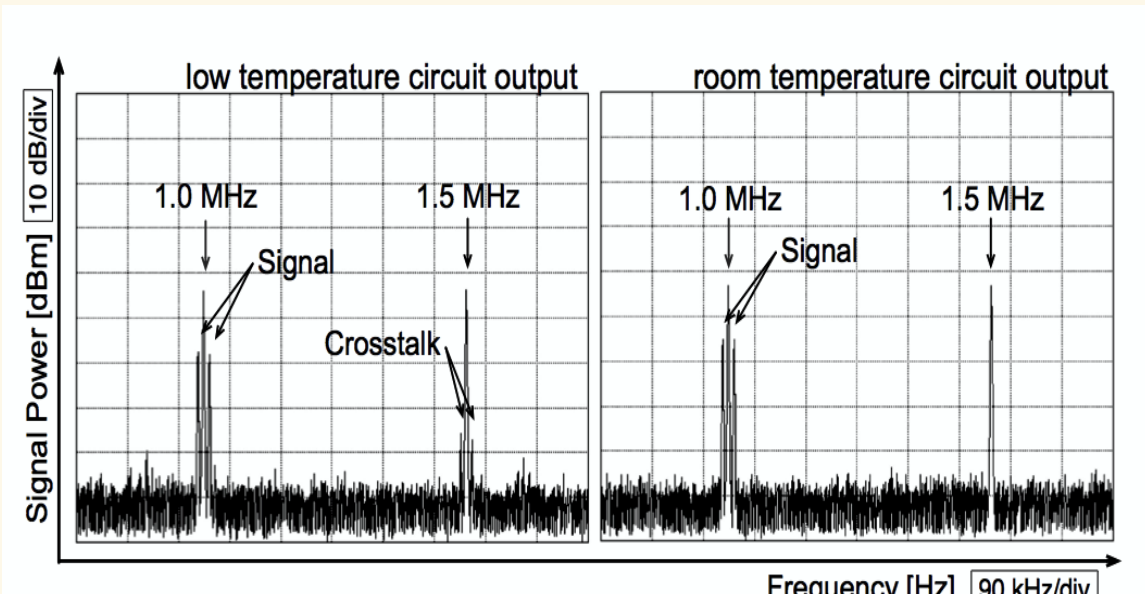


図 5 10 kHz の信号を 1.0, 1.5 MHz で変調し読み出したときのスペクトル。(左: F.B.なしのSQUID を読み出した場合。右: 固定抵抗で読み出した場合。)

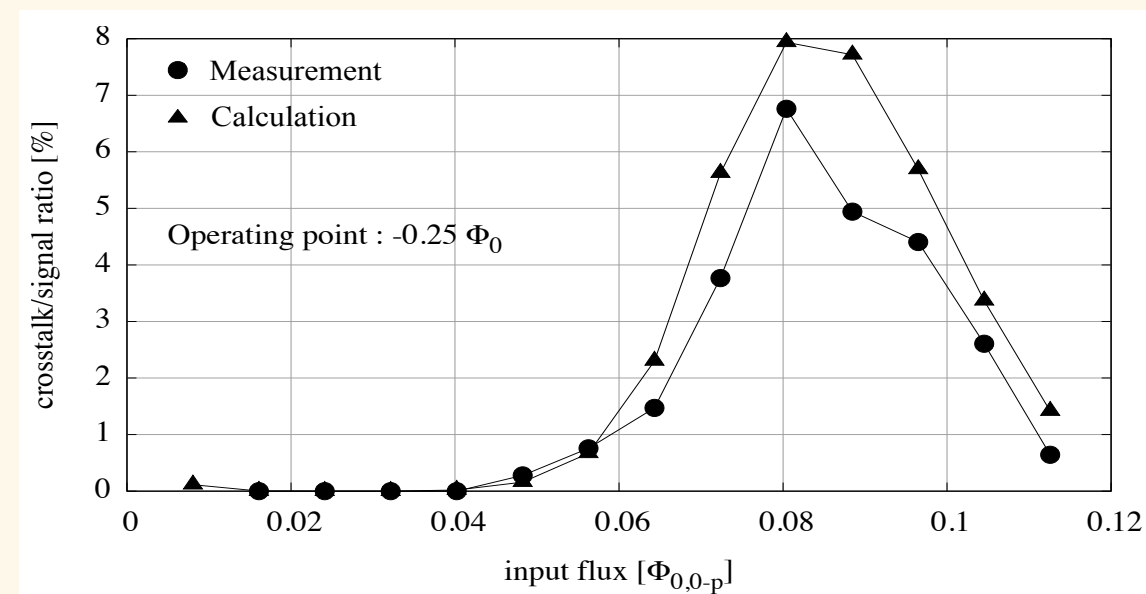


図 6 入力磁束とクロストークのレベルの関係性についての計算値と実測値の比較

5. デジタル BBFB 回路の開発

BBFB 回路の原理実証に成功したために、アナログ BBFB 回路の改善点である**ノイズの軽減とスケーラビリティの向上、クロストークの低減を目指し**、BBFB 回路のデジタル化の開発を行った。図 2 の BBFB 回路の原理を FPGA に実装した。

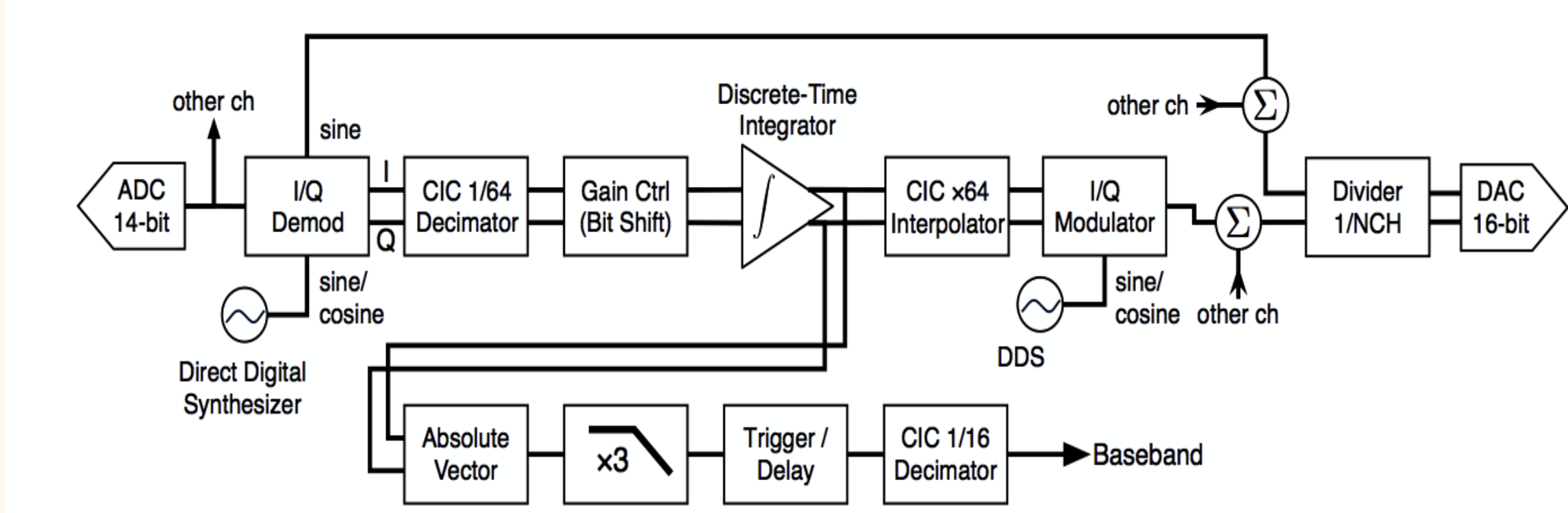


図 7 デジタルBBFB 回路のブロック図

開発には Xilinx 社 Virtex-6 が搭載された FPGA 評価ボード ML605 と AD/DA のインターフェースとして 4DSP 社 FMC150 を用いた。このセットで**最大 16 チャンネルの信号多重化が可能**である。400 チャンネル程度を読み出す DIOS に向けて FPGA と AD/DA インターフェースが一体となった専用ボードを設計製作することも今後は行っていく。

6. デジタル BBFB 回路を用いた信号多重化試験

デジタル BBFB 回路の内部ロジック実証のため、TES カロリメータを模したダミー抵抗 56 mΩ (@ 4 K) 4 つと多入力 SQUID を液体ヘリウム環境下に置いて 4 チャンネルでの同時交流駆動を試みた(図 8)。LC フィルタの各共振周波数は 3.291, 3.538, 3.769, 3.987 MHz となるように設計した。

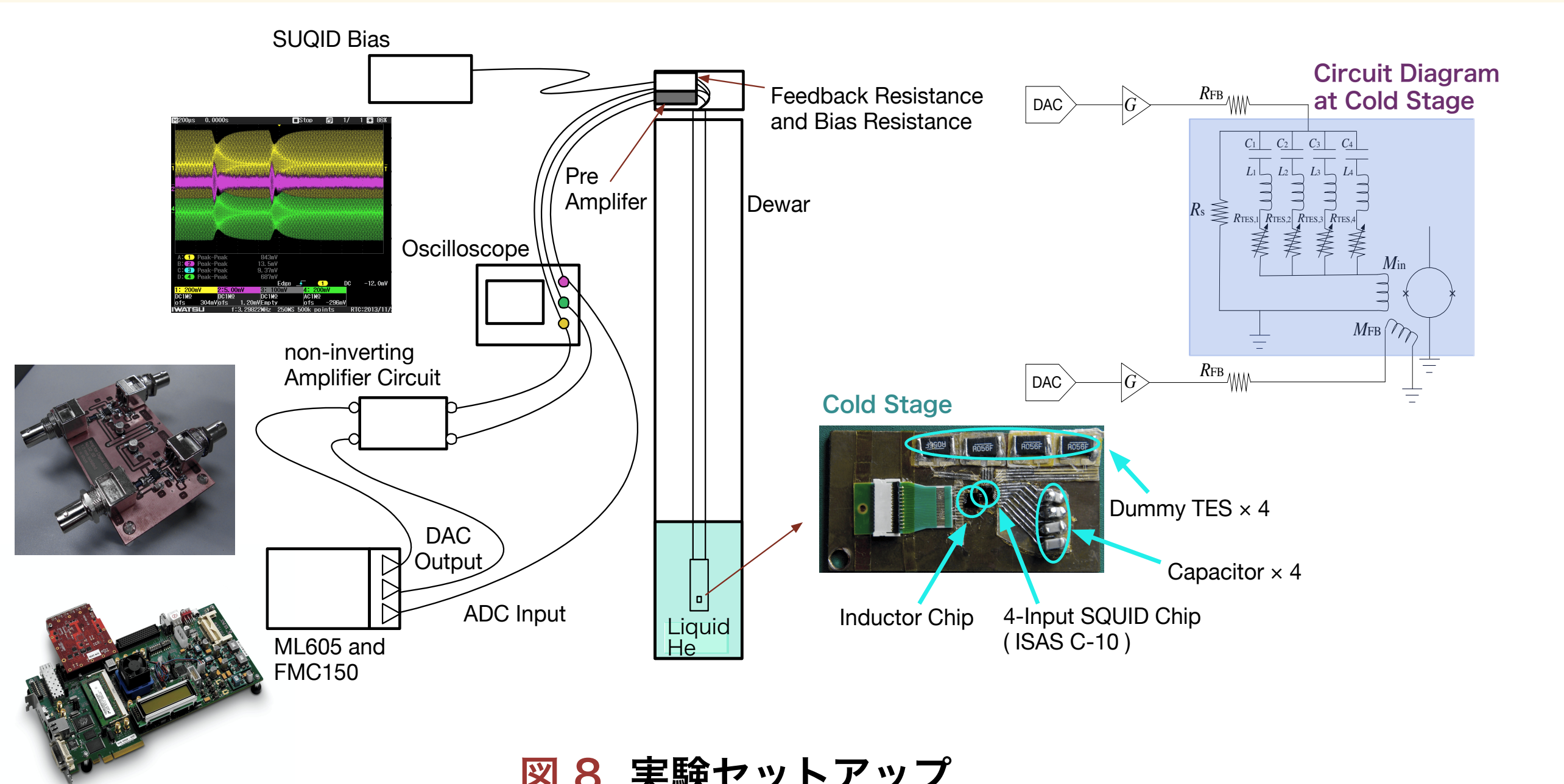


図 8 実験セットアップ

共振周波数を実測したところ、3.521, 3.813, 4.017 MHz であり、これを駆動周波数とした。1 チャンネルは断線によって測定できず 3 チャンネルの同時交流駆動となった。実験の結果**3 つの信号を多重化し、パルスの取得に成功した。**ノイズはダミー抵抗のジョンソンノイズが支配的であり、それ以外の要素に由来するノイズはエネルギー分解能に影響を与えないレベルであった。3.813 MHz で駆動したチャンネルでは、ベースライン分解能が 3.5 eV (5.9 keV 換算値)であった。

また**クロストークは無視できるレベルであり**、ループゲインが十分大きい回路設計ができた。ノイズレベルとクロストークの有無の点より TES カロリメータをデジタル BBFB 回路で読み出した場合、**アナログ BBFB 回路に比べてエネルギー分解能の大幅な改善が見込める。**

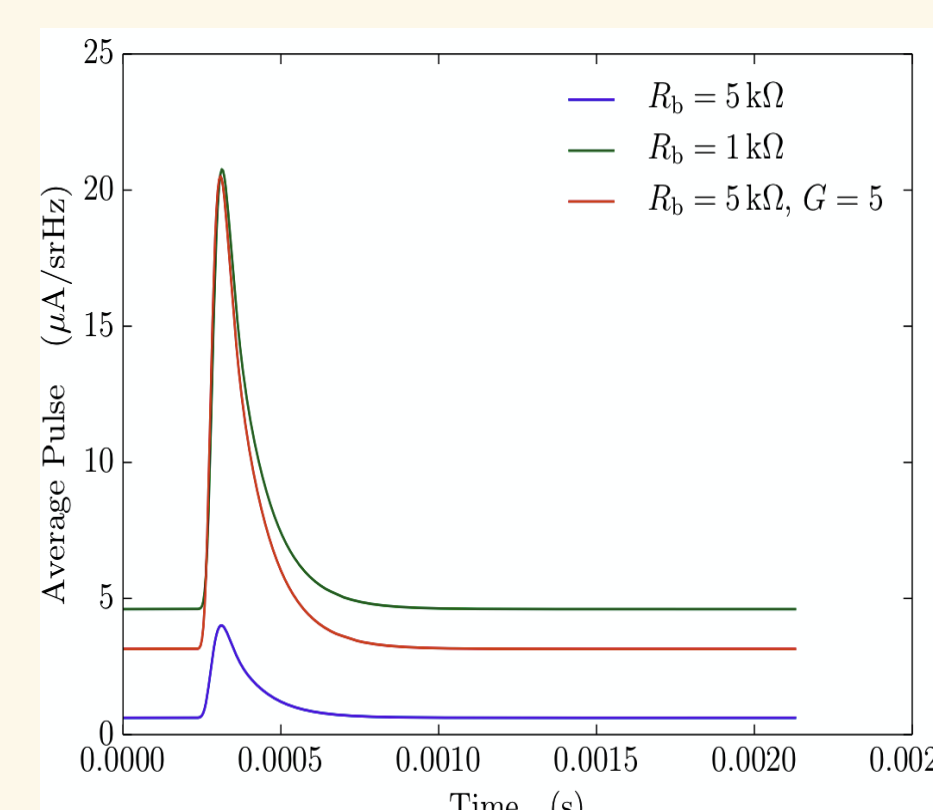


図 9 取得したパルス。 R_b はバイアス抵抗、 G は DAC 出力増幅回路のゲインを表す。

7. まとめと今後

- ◆ 我々は低発熱型 SQUID の開発を行うとともに、BBFB 回路を用いた FDM による TES カロリメータ読み出し系の研究開発を進めている。
- ◆ 製作した SQUID は要求される発熱値とその他のパラメータについて許容値を達成し、現在は LC バンドパスフィルタ用のキャパシタンスが載ったチップを製作中である。
- ◆ FPGA 評価ボードを用いてデジタル BBFB 回路を開発し、アナログ BBFB 回路に比べてエネルギー分解能で大幅な改善が見込める目処がたった。よって TES カロリメータの読み出し実験を早急に行う。
- ◆ DIOS への搭載に向けて専用読み出しボードの設計を今後行っていく。

References

Akamatsu+ 2009, AIP Conf. Proc. **1185**, 195 Sakai+ 2013, LTD-15, accepted.
Kiviranta+ 2002, AIP Conf. Proc., **605**, 295 Yamamoto+ 2013, LTD-15, inprep.