

## TES 型 X 線マイクロカロリメータ読み出し系のデジタル化に向けた研究

千葉 旭 (東京大学大学院 理学系研究科)

### Abstract

我々は次世代 X 線天文衛星、DIOS 衛星に搭載する観測機器の開発を行っている。DIOS は dark baryon を直接観測し、その空間分布を求めることを目的としている。そのためには数 eV という高いエネルギー分解能を実現できる超伝導遷移端温度計 (TES) を用いた TES カロリメータを  $16 \times 16$  素子ほど並べる必要がある。TES カロリメータの信号は超伝導量子干渉計 (SQUID) で負のフィードバックのもとで読み出す。TES カロリメータは  $\sim 100$  mK で動作させるため、多素子化に伴う読み出し配線群からの熱流入が大きな問題となる。したがって複数素子からの信号を 1 つの SQUID で読み出す信号多重化が必須課題である。我々は各 TES を異なる周波数 (MHz 帯) で駆動して振幅変調をかけた信号を多重化する研究開発を進めてきた。しかし位相回りによって正常にフィードバックがかからないという課題があった。我々は位相調整をした外部信号を参照することによって復調と再変調をする BBFB 回路を実用化することでこれを解決した。BBFB 回路はアナログ回路で構成されているが、読み出し系の小型化や再現性の確保のみならず、位相調整の自動化のために将来的にはデジタル化する。BBFB 回路のデジタル化では、復調時に位相調整が不要な 2 位相フィードバックの開発を視野に入れている。本講演ではこれまでの TES カロリメータ読み出し系の研究経緯を説明し、BBFB 回路のデジタル化に向けた 2 位相フィードバックの検証実験の結果について発表する。

## 1 DIOS ミッション

我々は 2010 年代に打ち上げ予定の DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 衛星の実現に向けて観測機器の開発を行っている。宇宙を構成する baryon は半分ほどしか検出されておらず、残りの正体は dark baryon と呼ばれ  $10^5 - 10^7$  K の高温ガスとなって銀河団の間でフィラメント状に分布していることが示唆されている [1]。この希薄なガスを総じて中高温銀

河間物質という。  $10^5 - 10^7$  K のガスにおいては電離酸素の組成比が最も大きく、酸素輝線検出を通じて dark baryon の正体と空間分布を明らかにするのが DIOS の目的である。高温ガスの熱運動を正確に知り、プラズマの状態の精密を知るためには数 eV のエネルギー分解能が必要で、広い視野で dark baryon の空間分布を明らかにするためには  $16 \times 16$  素子ほど検出器をアレイ化する必要がある。我々はこの要求に応えるため TES 型 X 線マイクロカロリメータ (TES カロリメータ) の開発を行っている。X 線マイクロカロリメータとは、個々の入射 X 線光子のエネルギーを素子の温度上昇として測定する検出器で、極低温 ( $\sim 100$  mK) において高いエネルギー分解能を達成することができる。我々は超伝導 - 常伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用した超伝導遷移端温度計 (TES) を用いた X 線マイクロカロリメータの研究開発を行っている。我々のグループが開発した素子でエネルギー分解能においては 5.9 keV の X 線に対して 2.8eV のエネルギー分解能が得られている [2]。一方で数百素子を読み出しシステムは開発段階である。

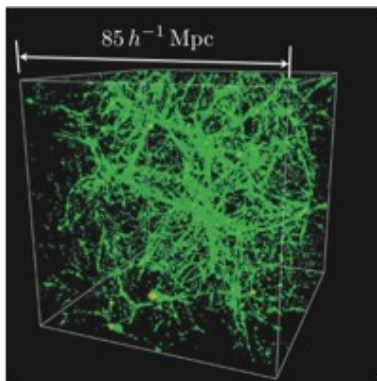


図 1: 中高温銀河間物質の空間分布 [1]

## 2 TES カロリメータの読み出し系

### 2.1 SQUID による読み出し

TES カロリメータの抵抗変化は定電圧をかけることによって微小な電流変化として読み出す。そのためには低インピーダンスの電流計として超伝導量子干渉計 (SQUID: Super QUantum Interference Device) を用いる。SQUID は磁束量子 ( $\sim 2.07$  fWb) 程度の磁束を検出できる高感度の磁束計で、コイルと共に使う事で電流計として用いる事ができる。また磁束固定ループ (FLL) と呼ばれる負のフィードバックのもとで使用することで電流 - 電圧変換増幅器とみなせる。

FLL の場合 1 つの素子につき 8 本の配線が必要となる。よって数百素子をアレイ化したときには数千本の配線が必要である。極低温で動作する TES カロリメータにとってはその配線群からの熱流入が大きな問題なため、複数素子の信号を 1 つの SQUID で読み出す信号多重化が必須課題となる。

### 2.2 周波数分割方式による信号多重化

SQUID は  $\sim$ GHz という広帯域の特徴をもっていて、これは TES カロリメータの信号帯域 (数 10 kHz) と比べて非常に広い。我々はこの広い帯域を利用し、周波数分割方式 (FDM; Frequency Division Multiplexing) によって MHz 帯での信号多重化を進めている。FDM とは複数の素子を異なる周波数で駆動させ振幅変調をかける方式である。これは素子と直列にコイルとコンデンサをつなぎ、LC フィルタの共振周波数が駆動周波数となるように調整する。FDM では低温部で信号 (ベースバンド) を加算して一つの SQUID で読み出し、加算された信号を室温において復調される。我々は FDM の中でも電流を加算して SQUID に入力をする電流加算方式を現在研究している。我々は信号多重化の研究を続けてきたが、MHz 帯でフィードバックを正常にかけられないという課題があった。その要因は室温回路および冷凍機配線による位相回りであった。

### 2.3 BBFB 回路の概要

この問題を解決し MHz 帯域でも正確なフィードバックを実現する回路が BBFB (Base Band Feed-Back) 回路である。そのダイアグラムを図 2 に示す。位相検波部では波形発生装置から外部信号を参照し、100 kHz のローパスフィルタを通る事で搬送波 (キャリア) を除去、ベースバンドのみを取り出す (復調)。再変調部では外部信号を参照する事でキャリアの印加を行う。いずれも各素子をバイアスするキャリアと同じ周波数の外部信号を参照する。BBFB 回路の特徴は位相の遅れの情報をなくし再変調部でキャリアの位相を調整することで、位相の遅れを補償できることである。BBFB 回路の場合、キャリアの位相

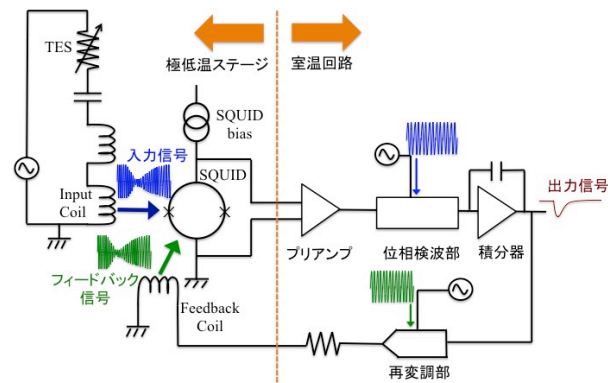


図 2: 1 素子駆動の BBFB 回路のダイアグラム。

の遅れを  $\alpha$  とすると、出力値はベースバンドの  $\cos\alpha$  倍である。回路のゲインを最大にするために  $\alpha$  が 0 になるよう位相検波部での外部信号の位相調整をする。位相がずれてしまうとゲインの大きな損失につながる可能性があり、オシロスコープでモニタリングしながら手動で行う。

### 2.4 2 位相フィードバック

2.3 で紹介した BBFB 回路は位相検波部と再変調部で参照する外部信号は 1 つ (1 位相) であった。これに対して図 3 のように sin 波と cos 波という 2 位相の外部信号を参照する方式を 2 位相フィードバックと呼ぶ。2 位相フィードバックの場合、BBFB 回路の出力にはベースバンドの  $\sin\alpha$  倍と  $\cos\alpha$  倍の 2 つ

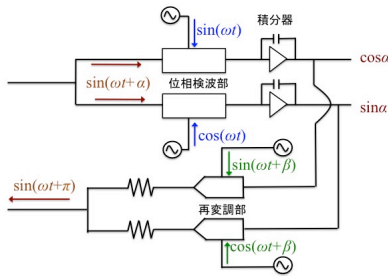


図 3: 2 位相フィードバックの概念図。α は位相回りを表し、β は位相調整の値を表している

が出力される。これらの 2 乗和の平方根をとることで 2.3 で懸念されたキャリアの位相のずれによるゲインの損失を克服でき、位相検波部での位相調整が原理的には不要になる。

### 2.5 BBFB 回路のデジタル化に向けて

BBFB 回路は小型化、再現性の確保のみならず、位相調整の自動化のために将来的にデジタル化する。位相調整は 1 位相、2 位相のいずれの場合もデジタル化することで自動化できる。しかし 1 位相の場合、位相検波部での位相調整は、位相のずれがゲインの大きな損失に繋がる恐れがあり非常にシビアである。2 位相の場合にはそれは必要ないので回路のゲインは安定しより正確なフィードバック系を実現すると考えられる。

そこで本実験では 2 位相フィードバックの検証実験を行った。まず、2 位相でフィードバックがかかるのかを入力 - 出力の線形性から確かめ、回路の安定性やノイズレベルなどについて定量的な理解を得ることを目的とした。その結果をふまえて BBFB 回路のデジタル化に向けて 2 位相フィードバックの開発の是非を考察した。

## 3 2 位相フィードバックの検証

本実験では SQUID の代わりに 100 Ω のダミー抵抗を用いて室温で測定を行った。TES カロリメータ

は用いずに波形発生装置 WF1974(nF 社) からパイアス抵抗 (10 kΩ) にキャリア (1.042 MHz) を入力した。

### 3.1 入力 - 出力線形性の確認

まず入力電流と出力電圧の関係が線形性を調べた。入力電流の実効値  $I_{in,rms}$  と出力電圧の実効値  $V_{out,rms}$  をプロットした。線形性が保たれている範囲で 1 次関数でフィッティングを行い、その傾きからそれぞれの電流 - 電圧変換係数 ( $\Xi_{1,rms}$  (1 位相),  $\Xi_{2,rms}$  (2 位相)) を求めた。結果を図 4 に示す。図 4 より 1 位相

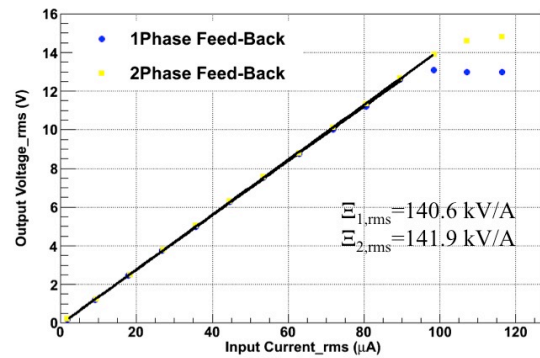


図 4: 入力 - 出力線形性

と比べて広い入力に対して線形性が保たれる事が分かった。フィッティングの結果  $\Xi_{2,rms}=141.9$  kV/A、 $\Xi_{1,rms}=140.6$  kV/A であった。1 位相の場合と 1% の範囲で一致しており、また BBFB 回路の設計から求まる電流 - 電圧変換係数 (144 kV/A) と 2% の範囲で一致している。位相検波部で外部信号の位相を変えてもこの結果は変わらなかった。

### 3.2 ループゲイン測定

ループゲインとは回路に入力する信号に対するフィードバック量の割合のことである。このループゲインと、入力 - 出力信号の位相差の周波数応答を測定した。BBFB 回路には積分器の静電容量 (C) を 100 pF, 200 pF, 500 pF, 1000 pF と変えられるようになっており C を変えて測定した。測定には TDS510A(Tektronix 社) を使用した。結果を図 5 に

示す。2 位相のデータをプロットし 1 位相のデータ折れ線で表した。プロットと折れ線が同色の時は C の値が同じであることを示す。図 5 より 1 位相と 2

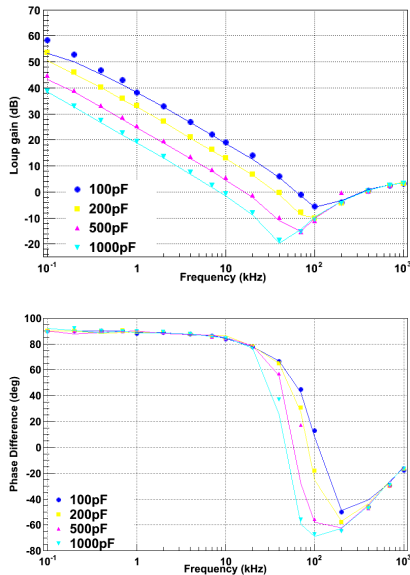


図 5: ループゲインと位相差の周波数応答

位相による場合とで回路の安定性において有意な違いは見られないという結論を得た。

### 3.3 ノイズレベル測定

2 位相による場合、BBFB 回路が作るノイズレベルは 1 位相によるものと比較して  $\sqrt{2}$  倍になることが予想される。これを確かめるためノイズスペクトルを FFT アナライザ 35670A (hp 社) で測定した。その後、図 4 の結果から得た入力 - 出力変換係数  $\Xi_{1,rms}$ ,  $\Xi_{2,rms}$  を用いて測定された電圧ノイズから入力電流間ノイズに換算した。結果を図 6 に示す。BBFB 回路の設計ノイズは入力電流換算すると  $27 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度である。100  $\Omega$  のダミー抵抗が作るジョンソンノイズは同様に換算すると  $13 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  と計算される。ここからノイズレベルは 1 位相の場合  $30 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、2 位相の場合  $42 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  であると計算される。図 6 より 1 位相の典型的なノイズレベルは  $\sim 32 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度、2 位相による場合は  $\sim 45 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度であり計算値とほぼ一致するという結果を得た。

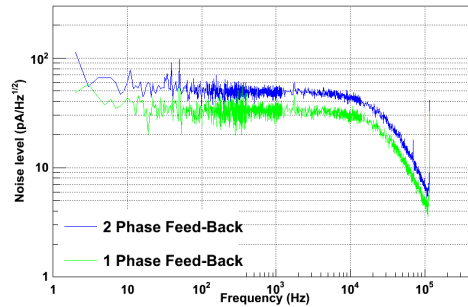


図 6: BBFB 回路のノイズレベル

## 4 まとめ

2 位相フィードバックによる BBFB 回路の評価を行った。入力電流に対する出力電圧の応答を測定し、線形性が保たれる範囲では電流 - 電圧変換係数が 142 kV/A と求まり 2% の範囲で計算値と一致した。ループゲインの測定を行い、ゲイン余裕が 1 位相による場合と変わらないという結論を得た。ノイズを測定することによってノイズレベルが 1 位相の場合の約  $\sqrt{2}$  倍大きかったが、計算値とほぼ一致することを確かめた。

ノイズレベルは 1 位相と比べて大きかったものの回路のゲインが 1 位相に比べて安定に保たれる 2 位相フィードバックは、1 位相とともに最適な BBFB 回路のデジタル化のために開発をしていく。

## Reference

- [1] Renyue Cen and Jeremiah P. Ostriker. Where Are the Baryons? II. Feedback Effects. The Astrophysical Journal, Vol. 650, No. 2, pp. 560-572, October 2006.
- [2] H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda, Betty Young, Blas Cabrera, and Aaron Miller. Impedance measurement and excess-noise behavior of a TiAu bilayer TES calorimeter. AIP Conference Proceedings, Vol. 1185, pp. 195-198, 2009.