

これは結果として、読み出し多重度を制限する。

概要

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の温度異方性の精密測定により、ビッグバン宇宙模型は宇宙の標準模型として今日定着している。しかし、この模型には「地平線問題」・「平坦性問題」・「残存粒子問題」などの未解決な問題がある。これらを解決する有力な理論が、インフレーション理論である。インフレーション理論は、宇宙初期の時空の指数関数的な膨張によって、これらの問題を一挙に解決する。この急激な膨張は、原始重力波を生成し、その痕跡は CMB の偏光地図上の非対称パターン「 B モード」として観測できる。

GroundBIRD 実験はこの原始重力波による B モードの検出を目的とした地上実験である。一般に、観測領域を制限するのは検出器の $1/f$ ノイズである。GroundBIRD はこのノイズの影響を受けない観測を行うために、望遠鏡自身が高速で回転 (20 RPM) しながら測定を行う。超伝導検出器 MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) は、時間応答性が比較的良く、この高速回転観測に適した検出器である。

CMB 観測用の MKID は、極低温 ($\lesssim 250$ mK) で動作するため、冷却光学系への熱流入を抑えることが肝要である。MKID は一本の読み出し線を用いて多数の素子を読み出すことが容易なため、配線数を大幅に低減することができる。現在、市販の ADC/DAC 基板 (アナログ基板) と FPGA (Field-Programmable Gate Array) 評価基板を組み合わせ、比較的簡単に読み出し系を構成している。しかしながら、この市販品にはローパスフィルターが実装されている。そのため透過特性が悪く、使用帯域が制限されている。また、クロック生成器の周辺が必要以上に複雑であり、かつ、消費電力が大きく動作が不安定という致命的な問題がある。これら三つの問題を解決するために、広帯域かつシンプル・省電力な構成のアナログ基板の開発を行った。

本研究で開発した RHEA は、MKID の読み出しに最適化したアナログ基板である。帯域を制限していた原因であるローパスフィルターを排除して、帯域をおよそ 30% 広げること成功した。消費電力も大きく、現在の用途に不釣り合いな位相同期回路 (PLL) の代わりに必要最低限の機能をもったクロック・ファンアウト・バッファを搭載し、回路の簡素化と省電力性を向上した。その他種々の IC を選定しなおし、さらに電源回路を見直すことで、フロントエンド回路全体の消費電力は従来の半分に抑えることができた。これらの改善は、回路全体の簡素化と同時に、ユーザーによる制御ファームウェアのコーディングの容易さをもたらす。

以上より、MKID の読み出しに最適化した試作アナログ基板 RHEA は、策定した仕様通りに完成した。今後、実際の MKID を使った使用実績を積み重ねるという課題は残るものの、GroundBIRD 実験で用いる MKID の読み出し系として満足することを確認した。また、クロック・アップによる帯域の拡大、デジタル基板と分離した構成のため FPGA 商品の性能向上の恩恵を直ちに反映できる等の魅力的な伸びしろも有する。

第6章 まとめ

次世代の CMB 偏光観測において、検出器の多素子化とその多重読み出しは重要な要素である。MKID は多素子化、多重読み出しに優れた検出器であり、その特性を最大化する読み出し系の開発が急務である。

日本国内において、既存の読み出し系は、汎用通信機用の市販品を組み合わせ構成しており、実際にそれを使って MKID の開発研究を行っている。しかしながら、その構成要素であるアナログ基板 (FMC150) には、以下の解決すべき課題が存在する:

1. LPF (ローパス・フィルター) による帯域の制限 (つまり読み出し多重度の制限)
2. 消費電力・発熱の過大
3. ユーザビリティの毀損

これらの課題を解決するために、MKID の読み出しに最適化した新しいアナログ基板「RHEA」の開発を行った。RHEA は、次のような方法で課題の解決を図った:

- ・ 帯域を制限している LPF の排除
- ・ クロック分配方式の簡素化 (PLL からクロック・ファンアウト・バッファへの変更)
- ・ 水晶発振器の周波数の変更
- ・ コネクター規格の統一

そして、これらの解決方法を実装した RHEA はを試作した。その特性を評価し、以下のことを確認した:

1. 帯域 ± 100 MHz
2. 消費電力 7.9 W (読み出し多重度 32 での使用時)
3. 外部冷却装置不要に代表される、高いユーザビリティの実現

帯域は、従来のアナログ基板と比較しておよそ 30% 拡大した。消費電力は、従来のおよそ半分之一になり、必須であった USB 扇風機も不要となった。ユーザビリティの向上は、今後のユーザーからの反応が待たれるが、一ユーザーとして、このフロントエンド回路の定性的な評価を述べると、読み出し系の状態制御や装置構成の変更等、従来のフロントエンド回路と比べると使いやすくなったといえる。

以上より、MKID の読み出しに最適化した試作アナログ基板 RHEA は、策定した仕様通りに完成した。今後、実際の MKID を使っての使用実績を積み重ねるといふ課題は残るもの