

TAO6.5m 望遠鏡用近赤外線観測装置 SWIMS のための検出器評価試験

西嶋 颯哉 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

TAO 6.5m 望遠鏡が設置される南米チリ・アタカマ高地のチャナンツール山は、標高が高く (5,640m) 上空の水蒸気量も極めて少ない (可降水量 0.5mm) ために近赤外線波長域 (0.9–2.5 μm) においてほぼ連続的な大気の窓が得られる。この利点を活かした観測を行うために、我々は近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) の開発を 2009 年度から進めている。

SWIMS に搭載する検出器は、Teledyne Scientific & Imaging 社の CMOS センサ、HAWAII-2RG である。これまでに、同社の技術者の協力の下、専用読み出し回路 SIDECAR ASIC と JADE2 Card を用いて、常温での駆動に問題がないことを確認できた。次に、真空 ($< 10^{-6}$ torr) 冷却 (液体窒素温度; 77K) 下で試験を行える環境づくりを行った。デュワーの補修・改修を行い、また初めての試みとして ASIC・JADE2 Card 間を結ぶフラットケーブルをデュワー外部に導くためのケーブルスルーの設計・製作を行い、真空冷却化で十分に評価試験ができる環境が構築できたことを確認した。この環境下で、SWIMS に搭載する HAWAII-2RG 4 台のうち 1 台について駆動試験を実施した。さらに、読み出しノイズ、暗電流、ADU-エレクトロン変換係数、リニアリティを測定し、読み出しモードによる検出器の特性変化についても実験した。

1 Introduction

南米チリ共和国北部のアタカマ高地にあるチャナンツール山頂は、5,640m と標高が高く、可降水量 (Precipitable Water Vapor; PWV) も 0.5mm と非常に小さいために、大気の赤外線吸収量がマウナケア山頂と比べても非常に小さい (Miyata et al. (2008))。東京大学天文センターでは、ここに 6.5m 赤外線望遠鏡 (The University of Tokyo Atacama Observatory; TAO, P.I.: Yuzuru Yoshii) の建設を計画している (Yoshii et al. (2010))。

この TAO 望遠鏡に搭載する近赤外線観測装置が SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) である (Konishi et al. (2012))。SWIMS は、ダイクロミックミラーを使うことで 0.9–1.4 μm と 1.4–2.5 μm の 2 色という、近赤外線のほぼ全波長領域を同時に撮像または他天体分光することが可能である。また、面分光モードも搭載予定であり、非常にコンパクトな面分光ユニット (Integral Field Unit; IFU) をスリットマスク交換機構に入れ込むことで、簡単に面分光モードと撮像または他天体分光モードを切り替えて観測することが

できる。

SWIMS は、すばる望遠鏡のカセグレン装置として利用することも可能になるように設計されており、TAO 望遠鏡の建設・運用開始前にすばる望遠鏡で試験観測と科学観測を行う予定である。

SWIMS の検出器には、2K×2K フォーマット、ピクセルサイズ 18 μm の CMOS センサ HAWAII-2RG (HgCdTe Astronomy Wide Area Infrared Imager with 2K x 2K resolution, Reference pixels and Guide mode) を使用する。HAWAII-2RG は HgCdTe の結晶を使った裏面照射型の CMOS センサであり、カットオフ波長は 2.5 μm である。専用の読み出し回路 SIDECAR ASIC と JADE2 Card を使い、PC と USB2.0 ポートで 1 本接続するだけで駆動することができる。PC (Windows) からの制御には専用のソフトウェアを使い、GUI による直接制御やソケット通信によるリモート制御が可能である。

HAWAII-2RG の駆動温度は液体窒素温度 (77K) である。そのため、検出器全体をクライオスタット中に収める必要がある。AD 変換などを担う SIDECAR

ASIC も同じく窒素温度まで冷却する必要があるが、JADE2 Card は常温常圧下で駆動する。これらの基板間は 140 ピンのフラットケーブルで接続する。また、駆動電圧は PC からの USB2.0 ポート経由での供給以外に、外部電源による供給とすることも可能である。

2 Instruments

真空冷却試験のためのクライオスタットは、JAXA/ISAS から借用したデュワーを使用した。このデュワーは長年使用されていなかったため、Oリングを選定して交換し、全ての Oリング面を磨くなどの補修・改修を施した。この結果、真空 ($< 10^{-6}$ torr) 冷却 (77K) 環境をデュワー内に構築できることが確認できた。

また、SIDE CAR ASIC と JADE2 Card 間を接続するフラットケーブルを真空冷却下から常温常圧下に通すためのケーブルスルーの設計・製作を行った (図 1)。ケーブルスルーは、フラットケーブルをアルミのパーツで挟み込み、隙間をエポキシ樹脂で埋めるという方法を採用した。

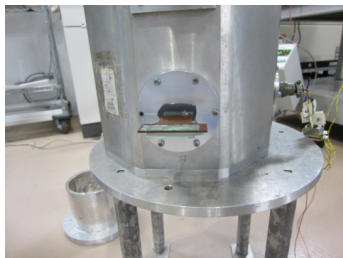


図 1: 写真中央の円形の物体が今回製作したケーブルスルー。デュワーに取り付けているところ。

接着時に 2 つのアルミパーツのアライメントが完全でなかったことが原因で Oリング面に段差が残ってしまったが、旋盤で表面を少し削って平面を出し、真空度を保つことに成功した。

今回、デュワー内の検出器と SIDE CAR ASIC は、図 2 のように配置した。Radiation Shield は黒アルマイト加工のアルミ製であり、液体窒素による冷却時には 79.4K まで冷えることが確認できている。ただし、

SIDE CAR ASIC と HAWAII-2RG 間も接続はフラットケーブルによるので、この面については放射遮蔽ができておらず、ここから迷光が入射してくる結果になっている。そのため、今回は暗電流については簡易的な測定をするにとどまった。厳密な測定のためには、この迷光対策について今後工夫していく必要がある。

また、今回行った種々の測定は不安定なこの迷光に依存するものになった。この不定性を除くために、デュワー内に近赤外域のフィルターを設置し、外部から安定な光源を入射して測定を行うことを検討しており、現在そのための治具などを設計・製作中である。

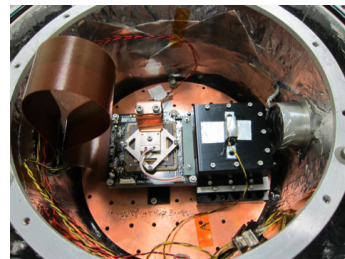


図 2: デュワー内に装置をインストールしたところ。右側の黒く四角い箱は Radiation Shield であり、この中に HAWAII-2RG が収まっている。左側でむき出しの基盤が SIDE CAR ASIC、さらに左側のフラットケーブルがケーブルスルーを通してデュワー外部につながっている。

検出器の駆動は、制御を Windows PC から USB2.0 ポートを通じて 1 本のケーブルで行い、駆動電圧としては外部の直流電源から 5.5V を供給した。また、必要に応じて LAN 内の別の PC(Linux) からソケット通信で制御ソフトウェアにアクセスし、リモート制御によるデータの取得も行った。

3 Experiments & Results

3.1 読み出しモード

HAWAII-2RG では、様々な読み出し方法が実装されている。今回の実験では、それぞれの設定方法と動作確認を行った。

Output チャンネルは、最大 32 本用意されており、独立に信号増幅と AD 変換を行う。この Output 数は変更することができ、数が多いほど早い読み出しができるが、読み出しノイズは増加する(表 1)。また、Window モードによってアレイの一部だけを読み出すこともできる。

表 1: Output モードごとの読み出し時間(ただし、ピクセルレート 5MHz)

Output モード	読み出し時間 t_f [sec]
1	42.1
4	10.6
32	1.45

読み出しモードは大別して次の 2 種類である。

- Up The Ramp
非破壊読み出しによる複数読み出しを行うモード。CDS(Correlated Double Sampling) モードでは連続して 2 フレームを読み出し、差分を出力フレームとする。差分をとるときに reference pixel を使って Output チャンネルと読み出し列ごとのゼロ点補正を行う。CDS Noise モードでは 2 回の CDS の差分をとることによって CDS の読み出しノイズを測定できる。Ramp Sampling モードではリセット回数、読み出し回数などを自由に設定して Samplig することができる。
- Fowler Sampling
初めに N 回読み出し、露出時間 t_{exp} を挟んでもう一度 N 回読み出すモード。出力フレームは N フレームそれぞれの平均の差分。差分をとるときにやはりゼロ点補正を行う。

3.2 ADU-エレクトロン変換係数

データの 1ADU に相当する電子数のコンバージョンファクター $\alpha[e^-/ADU]$ を求めた。測定は、入射光(ここでは迷光)の強度が一定と仮定し、同じ積分時間で複数のフレームを取得してピクセルごとに平均値と標準偏差を求め、 $m - \sigma^2$ プロットの傾きの逆数をとるという方法を採用した。ピクセル間の感度ムラ由来の α の差異は無視した。迷光の強度は必ずしも

一定とは言えないため、この方法では α の正確な値を求めることはできていない。しかし、目安の値として Output=1,gain=#4 のときに $\alpha = 2.5 \pm 0.1$ の値を得た。以降の測定値はすべてこの簡易的に求めた α の値を使っている。

3.3 読み出しノイズ

HAWAII-2RG のピクセルアレイ 2048 × 2048 のうち、各辺 4pix ずつはフォトダイオードを持たない reference pixel になっている。これらの reference pixel は光や暗電流による電子の生成はしないが、読み出し回路は共通なので読み出しノイズだけがのった値が出力されることになる。読み出しノイズは、CDS Noise を 5 回行い、各出力フレームについて全ての reference pixel の標準偏差を求めて r.m.s. をとったものを $\sigma_{CDS}[e^-]$ として算出する。ただし、一般的ないわゆる読み出しノイズは 1 フレームを読み出すときのノイズなので、ここでは $\sigma_{CDS}[e^-] = \sqrt{2}\sigma_{read}$ の関係となる。単純化のために、ノイズ量について Output ごとの依存性などは考えない。また、gain=#4 の設定で測定した。

今回、市販の USB アイソレータによる読み出しノイズの軽減を測定した。USB アイソレータは、USB ポートの 4 端子 (D_+ , D_- ; デジタル信号, V_{cc} , GND; DC5V) のうち、 D_+ , D_- についてはクロック信号の整波をし、DC5V については PC からの電源供給を遮断して外部電源からの直流電流をデバイス側に供給する。これにより、PC の Noisy な電源由来のノイズが軽減できる。

測定結果を表 2 に示す。Output の設定に対しては、早い読み出しであるほど読み出しノイズが大きくなっており、予想通りの結果であった。また、USB アイソレータはわずかに有意($\sim 2\%$)なノイズ軽減効果を持つことがわかった。読み出しノイズは電源環境などによる変化が大きいことが考えられるので、今後、SWIMS 本体に搭載しての駆動試験および Subaru や TAO における値の変化についても調査する必要がある。

表 2: 読み出しノイズの測定結果

$\sigma_{CDS}[e^-]$	W/ Isolator	W/O Isolator
Output=1	12.5 ± 0.1	12.3 ± 0.1
Output=4	13.2 ± 0.1	13.1 ± 0.1
Output=32	14.1 ± 0.1	14.0 ± 0.2

3.4 リニアリティ

Fowler Sampling をしたとき、積分時間 t_{int} に対して出力がどの範囲まで線形性を保つかを調べた。ここでは、入射光は時間的に一定であると仮定している。現時点では定量的な評価には至っていないが、well の深さは $\sim 8 \times 10^4[e^-]$ 程度、gain=#4 の設定では線形性を保つ範囲が $\sim 1 \times 10^4[ADU]$ 程度であることが確認できている。今後より詳細な評価を行う必要がある。

リニアリティに関して、 $t_e \simeq 1[sec]$ のときにカウントが明らかに異常な振る舞いをすることが確認された(図 3)。詳細に調べると、この異常は $1.3105[sec] < t_e < 1.3110[sec]$ でカウント数が不連続になり、その前後で傾き $[ADU/sec]$ は変化しないという特徴を持つことがわかった。傾きが変化しないという事実から、ある t_e の値を超えると t_e は設定値に対して一定値だけ大きくなってしまふことが推定できる。この原因はいまだわかってはいないものの、 $t_e = 1.3107[sec]$ の前後で積分時間を指定するレジスタの使用アドレスが 1 つから 2 つになることが判明している。このあたりでレジスタに何らかの異常があるとみて調査中である。

3.5 暗電流

迷光対策が十分でないため、暗電流の定量的な評価には至っていない。現状で可能な限りの対策をしたときに迷光は $\sim 0.1[e^-/sec]$ であったが、このときにも暗電流のパターンは確認できなかった。仕様書によれば、暗電流の値は $< 0.01[e^-/sec]$ なので、これまでの結果はこの値と矛盾していないといえる。

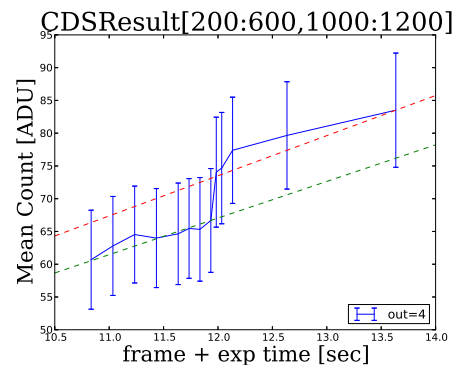


図 3: 積分時間が短いときのリニアリティ異常。横軸は $t_{int} = t_f + t_e[sec]$; 実質の積分時間、縦軸はフレーム内の $400 \times 200pix$ 領域の平均値。点線は $mean \propto (t_f + t_e)$ を仮定した線形性を表す。緑、赤はそれぞれ最小値と最大値に傾きを合わせたもの。

4 Conclusion & Future Works

今回の実験で、HAWAII-2RG を真空冷却下で JADE2 Card を使って読み出す手順を確立することができた。また、性能評価については、読み出しノイズ、ADU-エレクトロン変換係数の値を測定することができた。その一方で、リニアリティ、暗電流の測定については定量的な評価をするには至らなかった。検出器の性能評価としては、さらにヒステリシス、クロストーク、量子効率などについても定量的な評価を行う必要があり、そのためにデュワーの改良または新規デュワーの購入を検討中である。また、SWIMS への搭載と Subaru、TAO での観測に向けて、観測用ソフトウェアの準備と複数検出器同時駆動の環境整備を進める。

Reference

- Konishi, M., et al. 2012, Proc. SPIE, 7733, 773308-9
- Miyata, T., et al. 2008, Proc. SPIE, 7012, 701243
- Yoshii, Y., et al. 2010, Proc. SPIE, 7733, 773308-1