

CTA 計画に向けた波形サンプリング回路の開発

京都大学宇宙線研究室 岸本哲朗 栗根悠介^A 池野正弘^{BC} 上野遥^D
内田智久^{BC} 梅原克典^E 大岡秀行^F 折戸玲子^G 片桐秀明^E
株木重人^H 窪秀利^{AC} 郡司修一^I 今野裕介^A 小山志勇^D
田中真伸^{BC} 手嶋政廣^{FJ} 中森健之^K 萩原亮太^I 畑中謙一郎^A
山本常夏^L 他 CTA-Japan Consortium

2012/08/31

1 概要

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は国際協力のもとに進められている大気チェレンコフ望遠鏡を用いた次世代の高エネルギー γ 線観測プロジェクトである。100 台程度の大小様々なチェレンコフ望遠鏡により 20 GeV から 100 TeV 以上のエネルギー領域における観測を現行の望遠鏡よりも一桁よい感度で行うことを目標としている。チェレンコフ望遠鏡では宇宙線が大気に入射した結果発生する大気チェレンコフ光をとらえる。このとき、出力される信号幅は数ナノ秒と非常に短いため高速のサンプリング回路が必要とされる。日本グループでは CTA に対して様々な形で貢献しており、このサンプリング回路の開発もその一つである。日本グループでは、DRS4 と呼ばれる ASIC(特定用途向集積回路)を用いた高速波形サンプリング回路を開発し、

2 GHz のサンプリングレートを実現している。本講演は日本グループで開発中の回路について紹介する。

2 CTA 計画

2.1 チェレンコフ望遠鏡

高エネルギーの γ 線が大気に入射するとき、大気中の原子核が持つクーロン場と相互作用を起こして、電子陽電子対を生成する。生成された電子と陽電子が制動放射を起こしてさらに γ 線を生成し、その γ 線がまた電子陽電子対を生成する。この過程を繰り返すことにより大気中に電子のシャワーが発生し、シャワー中の電子が高速で大気中を走ることにより、チェレンコフ光を放射する。チェレンコフ望遠鏡ではこの時に発生したチェレンコフ光を地上で検出することにより γ 線を観測し、到来方向を決定する。

2.2 CTA

現在までに HESS や MAGIC といったチェレンコフ望遠鏡があるが、この次のものとして計画されているのが CTA である。CTA では 20 GeV から 1 TeV のエネルギー領域を観測する口径 23 m の大口径望遠鏡 4 台、100 GeV から 10 TeV のエネルギー領域を観測する口径 12m の中口径望遠鏡 23 台、1 TeV から 100 TeV 以上のエネルギー領域を観測する口径 6m の小口径望遠鏡 32 台を数 km^2 に

A 京大理

B KEK 素粒核研

C Open-It

D 埼玉大理工

E 茨城大理工

F 東大宇宙線研究

G 徳島大総科

H 東海大医

I 山形大理

J Max-Planck-Institute for Physics

K 早大理工

L 甲南大理工

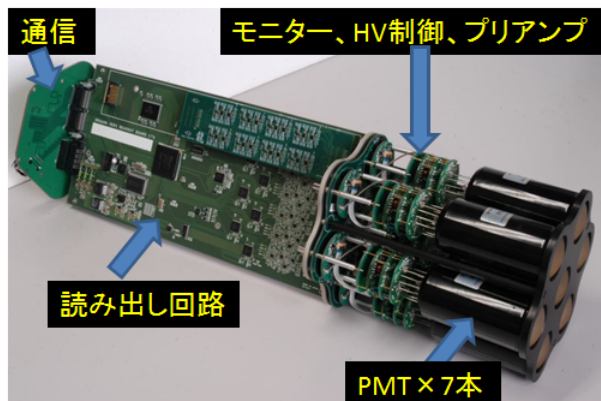


図1 日本で開発中のカメラシステム

わたって並べ巨大な有効面積を確保し、現行の望遠鏡の約 10 倍の感度を目指す。2015 年の建設開始予定に向けて、日本グループはこのうちの大口径望遠鏡の開発を中心として貢献している。

3 大口径望遠鏡のカメラシステム

大口径望遠鏡の焦点には 1885 本の光電子増倍管 (PMT) が光検出器として設置される。これらは 7 本を 1 クラスタとして、図 1 のようなカメラとなっている。PMT の後ろには PMT の制御用回路があり、その後ろには PMT からの信号を読み出すための回路がついている。さらに後ろにデータ通信用ボードがついている。今回はこの読み出し回路について紹介する。

4 読み出し回路

4.1 要求

PMT には夜光と呼ばれるバックグラウンドが数百 MHz で入射する。これを除去するためには信号を積分して電荷量をみるだけでは不十分で PMT からの信号の波形をそのまま記録することが必要である。入射する大気チェレンコフ光の時間幅は数ナノ秒であり、この波形を記録するためには高速にサンプリングを行うことが要求される。また、一つの大口径望遠鏡には 1885 本の PMT が使用されるため、PMT からの信号を読み出す回路には非常に低消費電力 (1 チャンネルあたり 2 W) が要求される。

このほかにも、広いダイナミックレンジで信号が読めること (1 から 1000 光電子相当)、高い S/N 比 (1 光電子に対して)、低いクロストーク (チャンネル間の干渉)、幅広い周波数帯域などが要求される。

4.2 アナログメモリサンプリング

日本グループでは Domino Ring Sampler 4 (DRS4) と呼ばれるスイスの Paul Scherrer Institute で開発された ASIC を用いてアナログメモリサンプリングを行うことによりこれら要求を実現している。DRS4 は 1024 個のキャパシターが並んだもの 8 チャンネルから成っており、波形記録時にキャパシターを数 GHz で切り替えることにより、波形をサンプリングする。キャパシターに保存された電荷情報は後から好きな速度で読み出すことができるため、高速な読み出しを必要とせず、低消費電力で高速なサンプリングを実現する。

4.3 信号読み出しの流れ

この DRS4 を用いて作ったシステムの概略図を図 2 に示す。PMT からの入力を三系統のゲインで増幅し、一つはトリガー生成回路へ、残り二つは DRS4 へと信号を送る。トリガー生成回路で生成されたトリガー信号は FPGA で処理され、それに合わせて読み出されたサンプリング波形が Ethernet でデータとして転送される。DRS4 に送る信号のゲインが二系統用意されているのは、広いダイナミックレンジで信号を読むためである。大きなゲインで信号を増幅すると入力信号が大きくなるにつれて、読み取り上限に達してしまい、それ以上大きな信号は読めなくなってしまう。これを避けるために大きすぎる入力信号は逆に小さくしてやることにより広いダイナミックレンジで入力信号を読み取ることができる。

4.4 性能

実際に PMT の信号を読み出して確認したのが図 3 である。幅 5 nsec の信号に対し 10 点程度のサンプリング点が取れており、2 GHz でのサンプリングができている。消費電力は 2.04 W/ch まで抑えられていることが確認されており、目標 (2 W/ch) はほぼ達成できている。また、DRS4 に入力する信号に対するゲインを二系統に分けたことにより、1

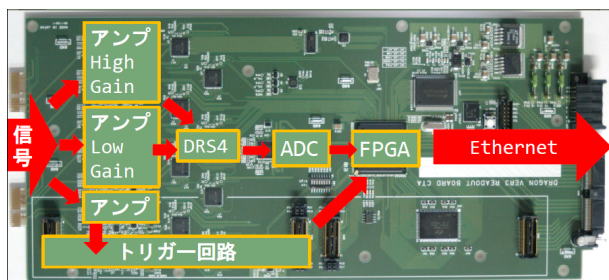


図 2 信号読み出しのシステム

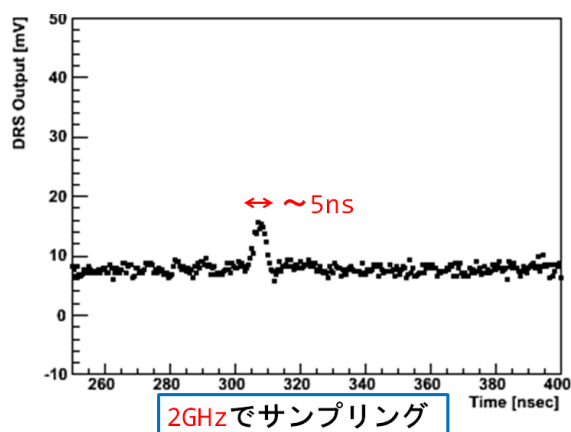


図 3 サンプリングの確認。LED の光を PMT にあてた時の信号をサンプリングした。

から 2500 光電子相当という広いダイナミックレンジを実現していることを確認している。

4.5 分かっている問題点

おおむね要求仕様に近いものが出来上がってきているが、チャンネル間での干渉と帯域にすこし問題があり改良せねばならないことが分かっている。

5 今後

現在、1 光電子分の信号に対しての S/N 比を測定中である。また、次のバージョンが計画されており、問題点を克服した上で、最終形に近いものを開発し、大口径望遠鏡のプロトタイプに搭載することを目指す。