

CTA 計画に向けた高速波形サンプリング回路の開発

京都大学宇宙線研究室 今野裕介 青野正裕* 栗根悠介* 池野正弘†
内田智久† 大岡秀行‡ 片桐秀明§ 株木重人¶ 窪秀利* 郡司修一||
田中真伸† 手嶋政廣‡ 中森健之** 萩原亮太|| 他 CTA-Japan Consortium

2011年8月30日

Abstract

CTA (Cherenkov Telescope Array) は大規模な地上チェレンコフ望遠鏡群を建設する国際的プロジェクトであり、2015年の建設開始に向けて準備が進められている。

チェレンコフ望遠鏡がとらえた光は鏡により焦点面の光電子増倍管 (PMT) に集められ、電気的信号へと変換される。大気チェレンコフ光を捉えた際に出力される信号の幅は数 nsec であるため、高速の読み出しエレクトロニクスが必要となる。

そこで我々は、PSI の開発したアナログメモリの ASIC である DRS4 を用いた高速波形サンプリング回路を開発した。この回路では7本の PMT からの信号を同時に最大 5GHz でサンプリングすることが可能である。取得したデータは KEK で開発された SiTCP プロセッサを用いて GbitEthernet で転送される。

本講演ではこれらの回路の構成と試験結果について発表する。

1 CTA 計画

TeV ガンマ線が地球大気に入射すると大気中の原子核と相互作用を起こし、電子陽電子対の生成と制動放射を次々と繰り返して電子のシャワー

(空気シャワー) を形成する。こうしてできたシャワー中の電子は大気中の光速よりも大きい速度で走ることによりチェレンコフ光を放射する。大気チェレンコフ望遠鏡はこうして放射されたチェレンコフ光を地上で検出することにより天体より到来する TeV ガンマ線の観測を行う。

空気シャワーは望遠鏡の視野内で楕円形のイメージとしてとらえられ、楕円の長軸方向がシャワーの発達方向に対応する。複数の望遠鏡でチェレンコフ光をとらえ、視野内でシャワーのイメージの交点をとることによりガンマ線の到来方向を再構成することができる (ステレオ観測)。宇宙線陽子も大気と相互作用を起こしシャワーを形成するためバックグラウンドとなるが、ステレオ観測を行うことによりランダムな方向より到来する宇宙線陽子と天体より到来するガンマ線を区別することが可能となる。

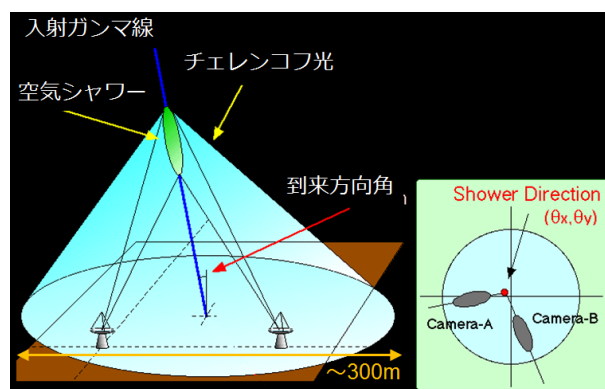


Figure 1: 大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線の観測

大口径のステレオ観測を行う大気チェレンコフ望遠鏡は代表的なものとしてこれまでに MAGIC (欧州)、H.E.S.S. (欧州)、VERITAS

*京大理
†高エ研
‡東大宇宙線研
§茨城大理
¶東海大医
||山形大理
**早大理工

(米)、CANGAROO (日豪) が建設されてきた。これらのチェレンコフ望遠鏡に続く次世代の望遠鏡建設計画が CTA (Cherenkov Telescope Array) である [1]。CTA では南半球と北半球の 2 サイトに総数約 100 台のチェレンコフ望遠鏡群を建設する。多数の望遠鏡を 3-10km² の面積にアレイ状に並べることによって有効面積を大幅に増加させ、TeV 領域で現行の観測装置の 10 倍の感度を達成することを目指している。

CTA は日米欧 25ヶ国が参加する大規模な国際プロジェクトであり、150 以上の研究機関から 800 名以上が参加している。現在は 2015 年の建設開始に向けた準備の段階であり、2017 年部分的観測開始、2020 年フル観測開始の予定である。そうした中で日本は PHYS(物理)、MC(Monte Carlo)、FPI(光検出器)、ELEC (読み出し回路)、MIR(分割鏡) といった部分での貢献を目指して各グループが活動を行っており、本講演では日本 ELEC グループの回路開発の状況について述べる。

2 日本グループの回路開発

望遠鏡で集光されたチェレンコフ光は焦点面に並べられた光電子増倍管 (PMT) によって電気信号として検出される。ELEC グループではこの光電子増倍管からの信号を読み出す回路系の開発を行っている。現在までに試作品の version1 の回路を経て version2 の読み出し回路が製作されている。

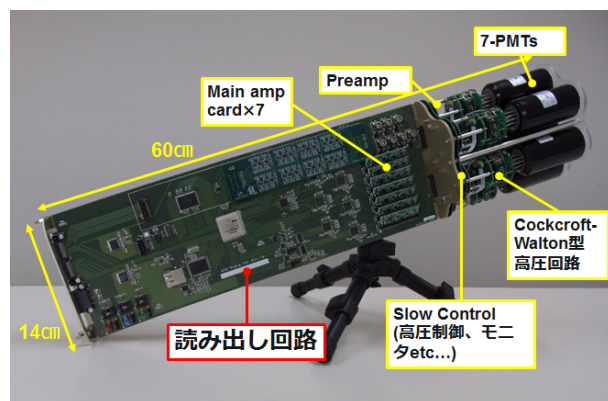


Figure 2: 日本グループが開発した回路

2.1 読み出し回路の構成

PMT からの信号には数百 MHz で発生する夜光バックグラウンドが存在する。これを効果的に除去するためには固定時間幅で積分した電荷量のみでの測定では不十分であり、PMT からの信号波形をそのまま記録することが必要となる。PMT が大気チェレンコフ光を捉えた際に出力される信号の幅は数 nsec であり、この波形を記録するためには毎秒数ギガ回で高速にサンプリングを行うことが読み出し回路に要求される。

このような高速の波形サンプリングは Flash ADC を用いることによっても可能だが、日本グループが開発している回路では高速サンプリングをさらに低消費電力、低コストで行うことができるアナログメモリサンプリング方式を採用している。この回路では DRS4(Domino Ring Sampler) という Switched Capacitor Array の ASIC を用いてアナログメモリサンプリングを行う [2]。DRS4 にはキャパシタが 1024セル並んだものが 8ch あり、波形を記録するキャパシタを毎秒数ギガの速度でスイッチ切り替えることによりサンプリングを行う。各キャパシタに記録されたアナログ電圧情報は後から約 30MHz の速度でデジタル変換して読み出すことができるため、比較的消費電力、低コストで高速サンプリングを実現することができる。

この DRS4 を用いた読み出し回路の構成を Figure 3 に示す。一枚の読み出し回路基板に対し 7 本の PMT が接続される。PMT からの信号は DRS4 で 2GHz でサンプリングされたのち、デジタル変換されてイーサネットでデータ送信される。データ転送は KEK で開発された SiTCP プロセッサにより行われる [3]。SiTCP は TCP を用いたデータ転送をハードウェアで処理することによりイーサネットの転送上限値で行うことができる技術であり、回路中の FPGA に実装されている。

2.2 動作試験

実際に読み出し回路を動作させ、Figure 4 に示すように PMT からの 5nsec という速い信号の波形をサンプリングすることができた。

また、前述したように読み出し回路には 7 本の PMT が接続される。7 本の PMT に LED の光を照射し、取得できた信号波形を Figure 5 に

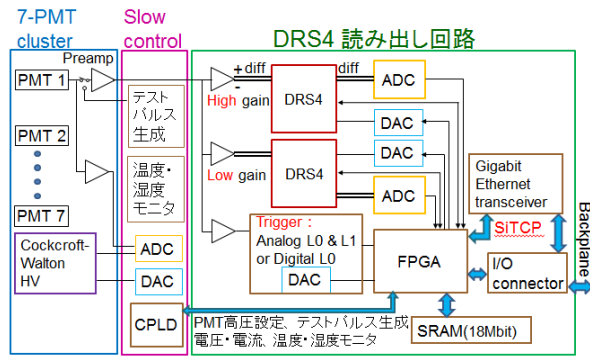


Figure 3: 読み出し回路のブロック図

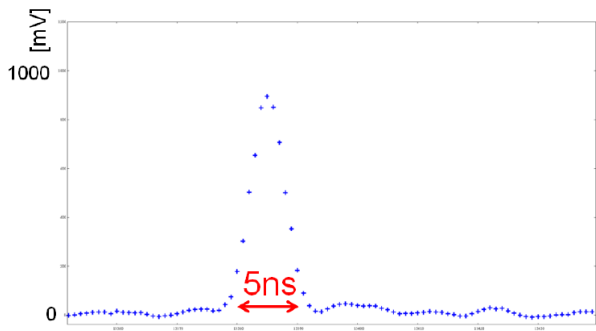


Figure 4: 取得した PMT 信号の波形 1

示す。

Figure 6 は PMT の信号を積分してヒストグラムをつくり、1 光電子のピークを pedestal から分離したスペクトルが得られたものである。PMT にかける高圧電源を小さくして小さいゲインで動作させたほうが PMT の寿命が延びるため、CTA では読み出し回路に対して PMT のゲイン 4 万程度で 1 光電子を検出できることが要求されている。動作試験でこの要求値を達成することができた。

3 今後の開発予定

現在は量産、実際の運用に向けて改良した読み出し回路 version3 の開発を進めている。今回の改良ではコストダウンを達成し、また、トリガー分配回路との接続ができるように設計される。各 PMT ピクセル毎のトリガー信号（1 次トリガー）はトリガー分配回路を通して望遠鏡内に

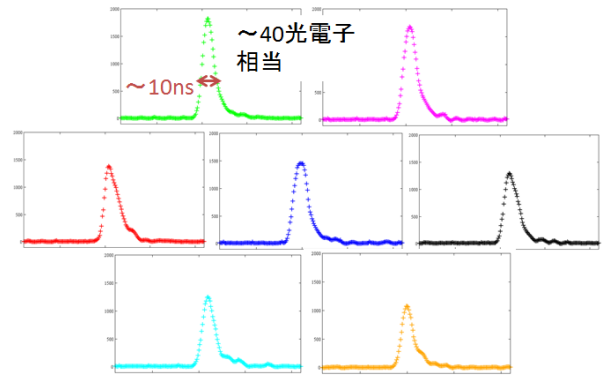


Figure 5: 取得した PMT 信号の波形 2

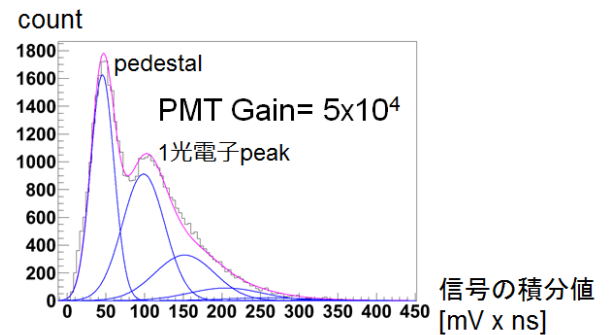


Figure 6: 1 光電子スペクトル

分配され、1 次トリガーのピクセル位置分布などから 2 次トリガーが生成される。今後こうしたトリガーシステムとの接続試験も行う予定である。

References

- [1] The CTA Consortium, arXiv:1008.3703.
- [2] S.Ritt, R.Dinapoli, U.Hartmann, NIMA, 2010, 623: 486-488
- [3] T.Uchida, IEEE TNS, 2008, 55:1631-1637