

CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡初号機に搭載する読み出し回路の設計と性能評価

谷川 俊介 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画は大中小 100 台程度の望遠鏡群を設置することで、従来より一桁良い感度で 20 GeV から 100 TeV 以上の超高エネルギーガンマ線を観測する計画であり、世界 29ヶ国の国際協力により進められている。その中で、日本グループは主に低エネルギー側の観測を行う大口径望遠鏡 (LST) の開発に大きく関わっている。LST では、超高エネルギーガンマ線が大気中を通過するときに発生するチェレンコフ光を望遠鏡の鏡で集光し、集光面にある光電子増倍管 (PMT) を用いたカメラで検出する。チェレンコフ光によるパルスの時間幅は数 ns と非常に短いため、夜光などのバックグラウンドからチェレンコフ光のみを分離して検出するには数 GHz 程度の非常に速いサンプリングスピードが要求される。さらに LST のカメラでは、約 2000 本の PMT を用いるので、カメラ内の発熱をなるべく小さくするよう回路の消費電力を小さくすることも求められる。我々はアナログメモリの ASIC である DRS4 を用いて、このような要求を満たす LST の読み出し回路を開発した。現在、読み出し回路は LST の初号機に搭載する版が完成しており、その性能評価が行われている。現在までに半数が量産されており、今後残りの 150 枚が量産される予定である。また、性能評価とは別に全数性能評価 (QC) も進められている。QC では、周波数帯域の測定、テストパルスを用いたリニアリティの評価、ノイズレベルの測定、クロストークレベルの測定などが行われている。本講演では、搭載される読み出し回路の設計と、性能評価の進捗状況について発表する。

1 チェレンコフ望遠鏡

高エネルギーガンマ線が大気に入射すると、大気中の原子核と相互作用して電子・陽電子対生成を起こす。この電子・陽電子が原子核とのクーロン相互作用により、制動放射を起こし再びガンマ線が放射される。ガンマ線の持つエネルギーが電子・陽電子対生成の閾値に達するまでこの過程が繰り返され、大気中には多数の電子と陽電子が生成される。この現象は空気シャワーと呼ばれている。この電子・陽電子が大気中での光速を超えた場合にチェレンコフ光が放射される。チェレンコフ望遠鏡では、このチェレンコフ光を鏡で集光して集光面で検出することでガンマ線の到来方向を決定する。空気シャワーからのチェレンコフ光は、地上では半径 130 m 程度の円形内に様に降り注ぐので、この範囲内に複数のチェレンコフ望遠鏡を置くことにより、より精度良くガンマ線の到来方向を決めることができる。(ステレオ観測) また、このチェレンコフ光の光量を測定するこ

とにより、到来したガンマ線のエネルギーを見積もることが出来る。

2 CTA 計画

現在稼動しているチェレンコフ望遠鏡には、MAGIC、VERITAS、H.E.S.S. がある。CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画はこれに続く次世代のチェレンコフ望遠鏡で世界 29ヶ国の協力により進められている。南北 2 箇所には口径の異なる大、中、小 3 種類の望遠鏡を計 100 台近く建設することで、現行の望遠鏡に比べて格段に有効面積を大きくし、さらに一桁良い感度で 20 GeV から 100 TeV の超高エネルギーガンマ線を観測することを目標としている。日本グループは主に大口径望遠鏡 (LST) の開発に関わっており、本講演では LST に搭載される読み出し回路について発表する。

3 大口径チェレンコフ望遠鏡の読み出し回路

3.1 読み出し回路への要求

LST カメラには、観測対象であるチェレンコフ光だけでなく、夜光によるノイズが入射する。ノイズが入射するレートは最大で 400 MHz ほどで、それに対してチェレンコフ光によるパルスの時間幅は、2-3 ns と短い。よってチェレンコフ光の光量を良い精度で求めるには、積分する時間幅はチェレンコフ光による信号のみを含むような短いものであることが求められる。また 2-3 ns の短いパルスの情報を得るには、サンプリング速度は GHz 程度の速さでなければならない。さらに、一枚の読み出し回路には 7 本の PMT が接続され、ひとつの LST には約 2000 本の PMT が使用されるため、安定した動作のため回路の消費電力による発熱をなるべく小さくする必要もある。消費電力に対する具体的な要求値は 2 W/ch 以下である。この他にも、0.2-1000p.e. 以上のダイナミックレンジ、300 MHz 以上の周波数帯域、0.2p.e. 以下のノイズレベル、0.1% のクロストークレベルなどが要求されている。p.e. は、読み出したパルスの波高値を光子の個数に置き換えたものである。

3.2 読み出し回路の設計

3.1 節で示した要求を満たすために、LST の読み出し回路にはアナログメモリの ASIC である DRS4 を使用している。アナログメモリでは、図 1 のように並列に並んだ多数のキャパシタにアナログ信号がスイッチを介して入力される。各スイッチを高速で切り替えることにより、各時点でのアナログ信号の電圧値がキャパシタに保存されていく。サンプリング後は、出力側のスイッチを順次切り替えることで、ADC でデジタル変換する。サンプリングを GHz 程度で行い、ADC による変換を MHz 程度で行うことにより、高速 ADC を使わず消費電力も抑えられる。DRS4 には差動入力のチャンネルが 8 つあり、各チャンネルにパルス波をサンプリングする 1024 個のキャパシタが並んでいる。サンプリング速度は 0.7-5 GHz で可変であり、消費電力は 2 GHz サンプリング時に

1 つのチャンネルあたり 17.5 mW となっており、省電力である。

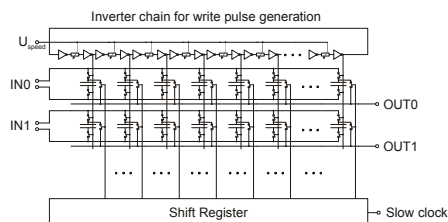


図 1: アナログメモリの回路図 (S.Ritt 2010)

図 2 にその読み出し回路を示す。スローコントロールボード (SCB) には、PMT に高電圧をかけるコッククロフト・ウォルトン回路 (CW 回路) と PMT を接続したもの (ピクセルユニット) が取り付けられる。また、SCB はテストパルスを生成するなどの機能も持っている。バックプレーンボードは読み出し回路への電源供給 (24 V)、周りの読み出し回路や PC との接続という役割を担っている。また、読み出し回路の裏側にはトリガーを生成する回路が取り付けられる。

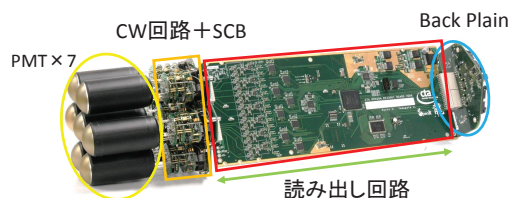


図 2: 読み出し回路とその周辺機器

一枚の読み出し回路には 7 つの PMT ユニットが SCB を通してつながれており、入力信号はプリアンプを通して読み出し回路に入る。読み出し回路では、メインアンプで High Gain、Low Gain のサンプリングする系統とトリガを生成する系統の 3 つに分けられる。High Gain、Low Gain の 2 種類の Gain を用意することで、広いダイナミックレンジを実現する。2 つの信号は DRS4 でサンプリングされたあと、ADC によってデジタル変換され最終的にバックプレーンボードから Gigabit Ethernet でストレージへ転送される。読み出し回路とその周辺のブロック図を図 3

に示す。

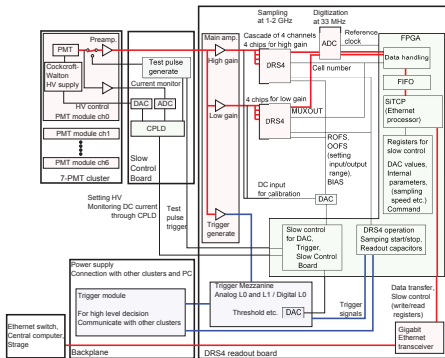


図 3: 読み出し回路とその周辺回路のブロック図 (Y.Konno 2013)

4 読み出し回路の性能評価

今回の性能評価では、読み出し回路の周波数帯域と、リニアリティを測定した。以下では、その測定方法と結果を示す。

4.1 周波数帯域の測定・結果

4.1.1 測定方法

実験装置は図 4 に示す。

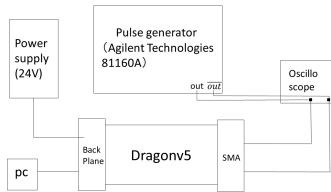


図 4: 周波数帯域測定の実験図

pulse generator からは $\pm 50 \text{ mV}$ 、 $\pm 200 \text{ mV}$ の sin 波を出力し、これを読み出し回路の入力電圧とした。周波数は 1-500 MHz と変えて測定した。

回路上のアンプの入出力部ををそれぞれ差動プローブでさわり、オシロスコープに表示される波形からそれぞれの箇所での振幅を読み取った。また、DRS4 でサンプリングした入力パルスのデータをフィッティングすることにより、サンプリング後の振幅を得た。

4.1.2 結果

上の実験で得た数値と入力電圧の値の比を dB 単位で表したものを縦軸にとり、入力パルスの周波数を横軸にとったグラフを作成し、周波数帯域を求めたものを図 5 に示す。周波数帯域は普通帯域振幅が -3 dB となる周波数のことを表すので、図 5 から DRS4 でサンプリングした後の帯域は、High Gain では 300-400 MHz 程度、Low Gain では 170-200 MHz であることがわかる。

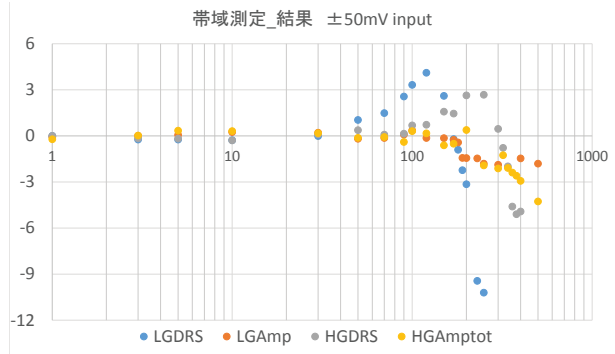


図 5: 帯域測定の結果 (HGDRS と LGDRS は High Gain、Low Gain の出力を DRS4 でサンプリングした値、LGAmpl は Low Gain 側の Amp を通ったあとの値、HGAmptot は High Gain 側の Amp を両方まとめたときの値を表す。)

4.2 リニアリティの測定・結果

4.2.1 測定方法

実験装置は図 6 に示す。

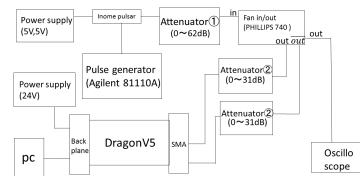


図 6: リニアリティ測定の実験図

パルサーからの出力波高値を attenuator1、2 で調整して、それぞれのサンプリングデータから ADC 値

のピークをよみだし、ピーク付近の 5 つのサンプリング点を積分して電荷量の値を求めた。入力電圧値を以下の式を用いて変換し、p.e. 数とした。

High Gain : 波高値/2.65

Low Gain : (波高値/2.65) × (80/1200)

上式にある 80(Ω) と 1200(Ω) はそれぞれ PMT プリアンプの Low Gain、High Gain のトランスインピーダンスゲインを表す。また、High Gain 側では 1p.e. に対応するパルスの波高値が 2.65 mV であることを用いた。

4.2.2 結果

図 7 に横軸を p.e. 数、縦軸を電荷量に取ったダイナミックレンジのグラフを示す。図 7 から、0.5-2000 p.e. の範囲では ± 5% のリニアリティを保っている。

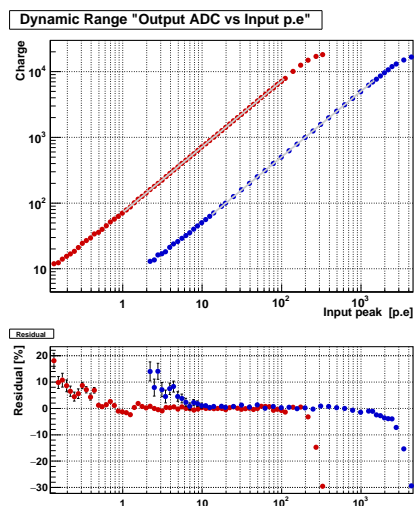


図 7: リニアリティの測定結果

5 全数性能評価 (QC) の結果

図 8、図 9 に QC で測定されたノイズレベル、およびクロストークの測定結果を示す。QC は現在、70 枚の読み出し回路に対して評価が終わっている。図 8、図 9 から読み出し回路のノイズレベルは 0.2p.e. 以下、クロストークレベルは 0.6% 以下であることがわかる。

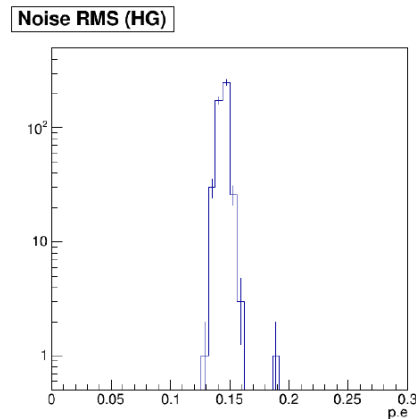


図 8: QC を終えた 70 枚のボードのノイズの RMS の分布 (S.Masuda 2015)

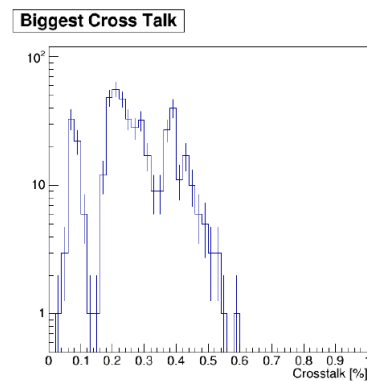


図 9: 全 70 ボードの各チャンネルのクロストークレベルの最大値の分布 (S.Masuda 2015)

Reference

Stefan Ritt 2010, Development of high speed waveform sampling ASICs.

Y.Konno 2013, Master Thesis Kyoto University

S.Masuda 2015, ICRC "Development of the photo-multiplier tube readout system for the first Large-Sized Telescope of the Vherenkov Telescope Array" proceeding