

次世代ガンマ線天文台 CTA における 波形記録回路 TARGET の時間応答特性

重中 茜 (茨城大学大学院 理工学研究科)

Abstract

次世代ガンマ線天文台 CTA における小口径望遠鏡では、その光学系の 1 つとして、向かい合う 2 枚の反射鏡を用いた Schwarzschild-Couder 光学系を提案している。この光学系は、副鏡により焦点面でのイメージを圧縮できるため、多チャンネル光検出器を用いたカメラの小型化、コスト抑制が期待できる。TARGET は、この Schwarzschild-Couder 光学系用のカメラが検出した、チェレンコフ光由来の信号波形を記録する集積回路である。

カメラが観測するチェレンコフ光は数ナノ秒の長さであるため、波形記録はナノ秒単位で行う必要がある。TARGET は波形記録セルと呼ばれるコンデンサを多数並べた構造を持っており、入力信号に対してこの記録セルを次々と切り替えることで、ナノ秒単位の波形サンプリングを行っている。しかしこの周期的なサンプリングは、セル毎に切り替えタイミングの揺らぎ（ジッター）が存在する。タイミングが重要になってくる例として、チェレンコフ光子の観測時間と光子数の関係からガンマ線の到来方向を推定することで、望遠鏡の観測精度を向上させる方法がある。カメラから取得した波形データをこの解析に使用するには、ジッターによる波形記録タイミングのずれを、サブナノ秒単位の精度で補正することが必要である。

本研究では、TARGET のバージョン 5 におけるジッター測定を行うとともに、疑似的に作成したジッターを用い、その測定精度を評価した。その結果、TARGET のジッター測定からは 64 セル周期のジッターが得られた。また今回のジッター測定方法では、0.13 ナノ秒の精度でジッターの測定が可能であることを検証した。本講演では、TARGET のジッター測定を行った結果について報告するとともに、疑似ジッターによる測定方法の最適化と期待される精度について述べる。

1 CTA 計画における SCT

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画では、観測エネルギー帯の異なる大中小のチェレンコフ望遠鏡を南北のサイトに設置する。これにより 20 GeV から 100 TeV 以上の広いエネルギー領域において、従来よりも高い感度、角度分解能で宇宙から到来するガンマ線を観測することを目的としている。特に小口径望遠鏡は高エネルギー帯 (1 TeV-100 TeV 以上) での観測を目的としている。

チェレンコフ望遠鏡では、宇宙からのガンマ線が大気中で相互作用して生じる電磁カスケードシャワーからのチェレンコフ光を集光し、焦点面のカメラで観測する。ガンマ線のエネルギーは、観測したチェレンコフ光量から測定する。また、ガンマ線の到来

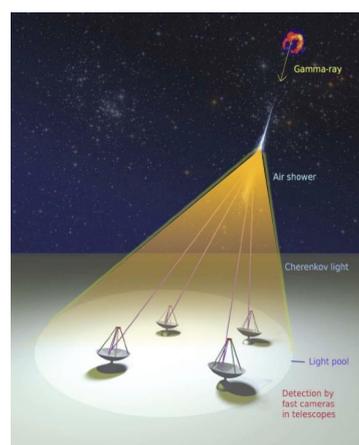


図 1: 複数の望遠鏡によるシャワーの観測 [1]

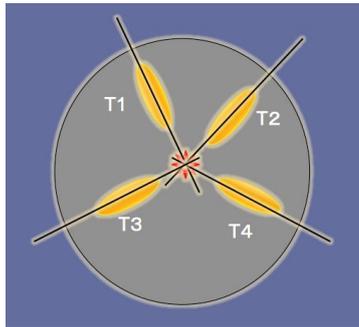


図 2: 観測したチェレンコフ光イメージ [2]

方向は、複数台の望遠鏡で観測したチェレンコフ光イメージの長軸を伸ばした交点となる。

宇宙からのガンマ線のスペクトルは $E^{-\alpha}$ ($\alpha \sim 2$) の形をしており、高エネルギーほど検出数は少なくなる。したがって、小口径望遠鏡の観測するエネルギー帯での感度の向上には、望遠鏡を広範囲に多数設置し、ガンマ線検出の有効面積を広げてガンマ線検出数を増加させることが有効である。そのため小口径望遠鏡にはコストの低減が要求される。

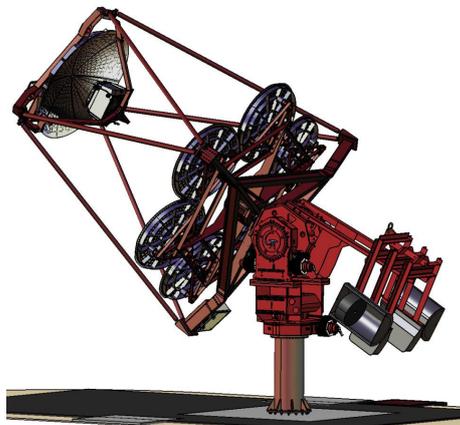


図 3: Schwarzschild-Couder 型望遠鏡 [2]

小口径望遠鏡で提案されている Schwarzschild-Couder Telescope (SCT) は、主鏡と副鏡の 2 枚の反射鏡を持つ望遠鏡である。これは副鏡により焦点距離の短縮ができるため、焦点面でのイメージの圧縮が可能となる。そのためカメラの小型化と、これに伴って焦点面に多チャンネルの光検出器が使用できるため、チャンネル当たりのコスト削減が可能と

なる。

2 TARGET のジッター測定

TARGET (TeV Array Readout with GSa/s sampling and Event Trigger) は、SCT 用のカメラにおける波形記録のための集積回路である [3]。TARGET は入力されるチェレンコフ光由来の信号に対し、波形記録セルと呼ばれる多数のコンデンサを次々と切り替えることにより、ナノ秒単位の波形記録を行っている。しかしこの周期的な切り替えは、セル毎に早くなったり、遅くなったりといった揺らぎ（ジッター）が生じる。

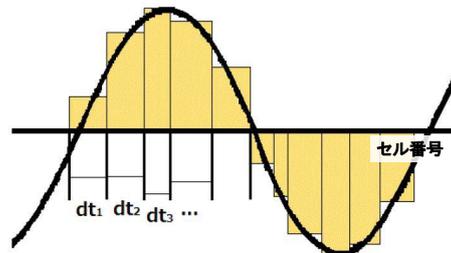


図 4: ジッターによるサンプリング時間幅 dt の揺らぎ

本研究では、CTA 大口径望遠鏡のカメラに使用されるアナログメモリ DRS4 で活用されたジッター測定方法 [4] を参考に、TARGET のバージョン 5 評価ボードを用いてジッター測定を行った。今回は TARGET のサンプリング周期を 2.5 ナノ秒として、50 MHz のサイン波を入力し、出力した波形データを用いて以下の手順でジッターを測定した。

1. TARGET から出力したサイン波の振幅はデジタル値（ADC 値）として出力されるため、まずは出力サイン波の振幅を電圧値に変換する必要がある。TARGET-5 評価ボードでは直流電圧を各チャンネルに入力できる機能を利用して、セル毎の入力電圧値と出力 ADC 値の関係をあらかじめ測定しておいた。
2. 電圧値変換した波形データに対し、各セルのサンプリング時刻の初期値を、サンプリング周期である 2.5 ナノ秒にセル番号をかけた値と定める。

3. 出力サイン波の周期を 1 周期ずつ、入力サイン波の周期と比較し、その差をとる。
4. 3. で求めた差を、サイン波 1 周期をサンプリングしたセルに等分配し、出力サイン波の各周期が入力サイン波の周期である 20 ナノ秒に近くように、各セルのサンプリング時刻を伸び縮みさせる。
 ここで、伸び縮みさせる幅には damping という factor をかけて 1000 分の 1 程度の値にする。これはサンプリング時刻を、徐々に求めるジッターを持つ値に近づけることで、出力されるジッター値の振動を防ぐためである。
5. 一つの波形データに含まれる全ての波について伸び縮みの補正が終わったら、補正されたサンプリング時刻を用い、二つ目以降の波形データについても 2. から 4. を繰り返す。
6. 全波形データについてサンプリング時刻のジッター補正が終了したら、この時点の各セルにおいてジッター補正された時刻から初期値を引き、これをジッターとする。

3 ジッター測定結果

今回の実験では、TARGET のバージョン 5 を用いた。また、ジッター測定に用いた波形データ数は 30000、1 データあたりの記録時間は 1280 ナノ秒 (512 セル)、damping factor の値は 0.0008 とした。

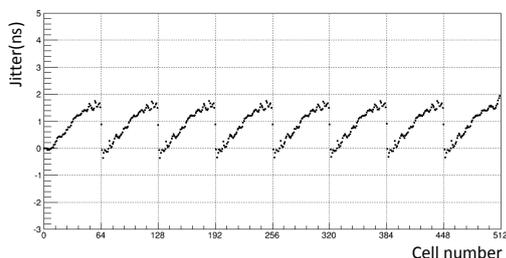


図 5: TARGET-5 のジッター測定結果

図 5 は、TARGET-5 の各セルのサンプリングする時刻の、理想的な時刻との差である。また図 6 は、隣り合うセル同士のサンプリング間隔の 2.5 ns との差

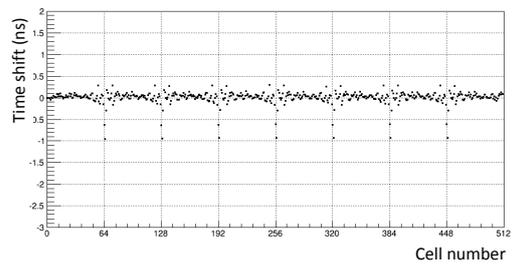


図 6: 各セルにおける理想時間幅 2.5 ns からのズレ (Time shift) である。30000 データに対しジッター測定を行った結果、ジッターは 64 セル周期で変動する様子が見られた。TARGET-5 は 64 個の記録セルをループさせてサンプリングを行っており、これは TARGET-5 の構造から予測できる結果と言える。

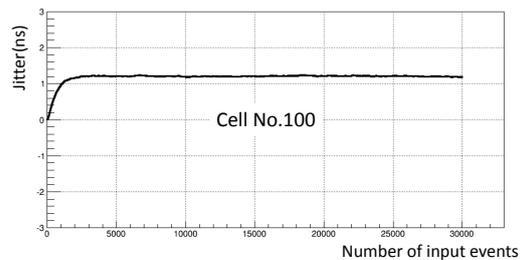


図 7: 100 番目のセルにおけるジッター収束の様子

更にセル毎のジッター値の収束の様子の例として、図 5 における 100 番目のセルの、波形データの積み重ねによるジッター値の変化を、図 7 に示す。30000 データの積み重ねの結果、ジッター値は十分に収束している。

4 ジッター測定精度の評価

ここでは、TARGET-5 のジッター形状に似せた 64 セル周期のノコギリ波ジッターを疑似的に作成し、これを含む 50 MHz の疑似サイン波データを生成して、TARGET-5 のジッター測定精度を評価した。

今回は TARGET-5 のジッター測定に合わせ、疑似サイン波 30000 データ、1 データあたりの記録時間を 1280 ナノ秒 (512 セル)、damping factor を 0.0008 として、疑似ジッターを測定した。

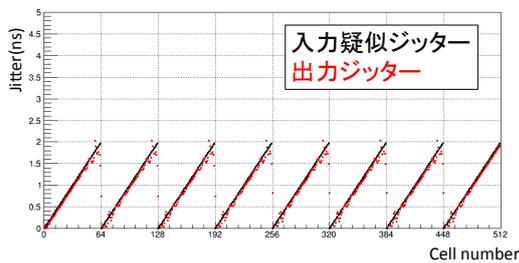


図 8: 疑似ジッターとその測定結果

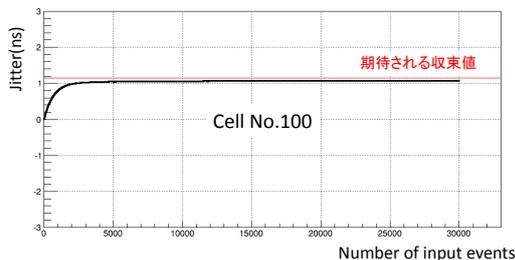


図 9: データ数に対する出力の収束の様子

図 8 は作成した疑似ジッターとその出力結果の比較である。出力したジッターは疑似ジッターによく一致しており、64 セル周期の形が見られることが分かる。一方、疑似ジッターの変化の大きい 64 セルの倍数セル付近では、出力が歪むという結果を得た。

また図 9 は、図 8 の 100 番目のセルにおける、データの積み重ねに対する出力の変化である。64 の倍数セルの間の番号のセルにおいて、出力は期待される値に収束していく様子が見られた。

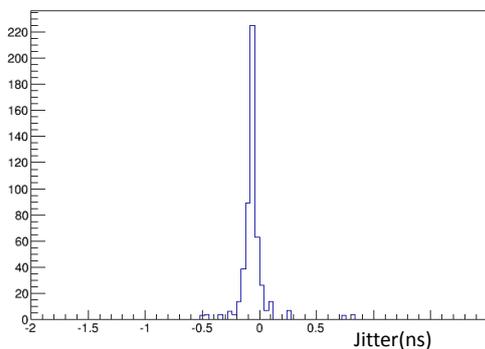


図 10: 疑似ジッターと出力ジッターの差

ここでジッターの測定精度は、疑似ジッターと出力

ジッターのセル毎の差のばらつき (RMS) で定義した。図 10 は図 8 の疑似ジッターと出力結果の差をヒストグラムに表したものである。データ数を 30000、damping factor を 0.0008 としたとき、ジッターは 0.13 ナノ秒程度のばらつきを持って測定された。

5 まとめ

TARGET-5 のジッター測定の結果、期待される 64 セル周期のジッターが見られた。また、ジッター値は最終的に収束するという結果が得られた。疑似ジッターの測定による測定精度の評価に関しては、出力波形データ数を 30000、damping factor を 0.0008 としたとき、0.13 ナノ秒の精度でジッター測定ができるという結果が得られた。これは、チェレンコフ光のタイミング解析に十分使用できる値であろうと考えられる。

今後は、現在 CTA にて性能測定、研究が行われている、TARGET-5 の次のバージョンの TARGET について、今回確立したジッター測定方法を適用する予定である。

Reference

- [1] Heinrich J. Voelk, Konrad Bernloehr (2009). "Imaging Very High Energy Gamma-Ray Telescopes", *Experimental Astronomy*, **25**, Issue 1-3, 173-191.
- [2] CTA Japan コンソーシアム, 計画書 2014 年版 (CTA-Japan 編)
- [3] K. Bechtol, S. Funk, A. Okumura, et al. (2012). "TARGET: A multi-channel digitizer chip for very-high-energy gamma-ray telescopes", *Astroparticle Physics*, **36**, 156-165.
- [4] 佐々木美佳 (2011), 次世代ガンマ線天文台 CTA のカメラに用いるアナログメモリ DRS4 チップの特性評価, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文 (未公開)