

衛星搭載CCDカメラ用高速低雑音アナログASIC素子の開発



中嶋大、井上翔太、薙野綾、穴吹直久、林田清、常深博 (大阪大学)、
John P. Doty (Noqsi Aerospace Ltd.)、池田博一 (ISAS/JAXA)

nakajima@ess.sci.osaka-u.ac.jp



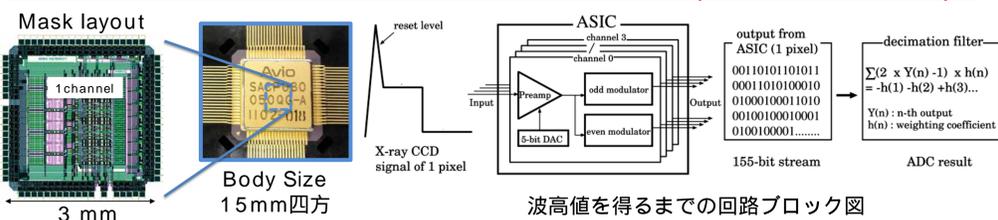
衛星搭載CCDカメラに向けた信号処理用アナログASICの開発状況を報告する。信号増幅率が可変であり、X線CCDのみでなく光赤外用の素子にも適用可能である。申請者らがこれまで開発したASICは、地上実験で十分な低雑音性能(入力等価雑音 $30 \mu V$ @ pixel rate $128 kHz$)と放射線耐性を実証出来たことから、ASTRO-H衛星搭載CCDカメラへの採用が決まっているが、高速(ピクセルレート $500 kHz$ 超)で動作させると雑音が大きかった($>100 \mu V$)。そこで我々は四次の型ADCを採用することにより、ピクセルレート $1 MHz$ 以上での低雑音動作を実現する。現在ADC部分の回路設計中であり、本年度中にレイアウト設計及びポストレイアウトシミュレーションを行い、来年度初めにベアチップを製作する予定である。回路パラメータの最適化を含めた開発状況を詳述する。

新規ASIC開発の目的 - 硬X線精密撮像分光観測 -

硬X線まで感度を持たせたCCDセンサと高速低雑音のアナログASICを用いて、位置分解能と検出感度を両立させた硬X線観測用撮像分光検出器を開発する。従来のX線CCDにシンチレータを密着させた素子(SDCCD: scintillator-deposited CCD、薙野+ P2-019参照)を用いることで、軟X線($<10 keV$)に限られていたダイナミックレンジを硬X線($80 keV$)まで広げる。SDCCDカメラへの新規ASICの導入により、従来比10倍速の画像処理を可能にする。これにより現状不可能である、ブラックホールやガンマ線バースト等の明るいX線天体の連続観測を可能にし、極限環境における物理の解明につなげる。

そのために我々は読み出し速度 $1 MHz$ での低雑音読み出しを目指す。

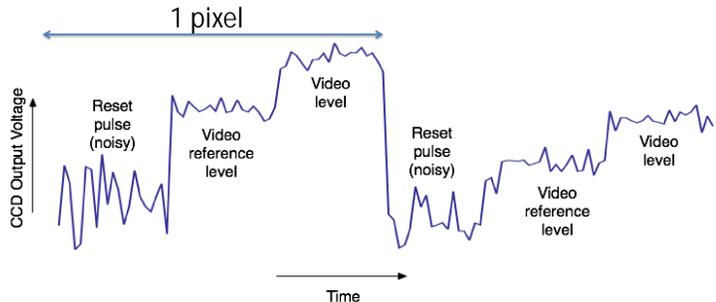
過去の実績 - ASTRO-H/SXI 用 ASIC (P2-020参照) -



- 入力等価雑音 $30 \mu V$ @ ピクセルレート $78 kHz$ [1]
- 読み出し雑音 $4.3e^{-}$ r.m.s. (CCDゲイン $5 \mu V/e^{-}$ の場合。2出力平均) [2]
- Latch-up immune @ $57.9 MeV/cm^2 \cdot mg$ [3]
- $140 krad$ までのトータルドーズ耐性 [1]
- 宇宙用カスタムセラミックパッケージ開発済み
- しかし読み出し速度 $625 kHz$ では $100 \mu V$ 超 [4]

高速域での低雑音(入力等価雑音 $30 \mu V$ 未満)が課題であった

新規回路設計のphilosophy - 信号電荷量の精密測定 -

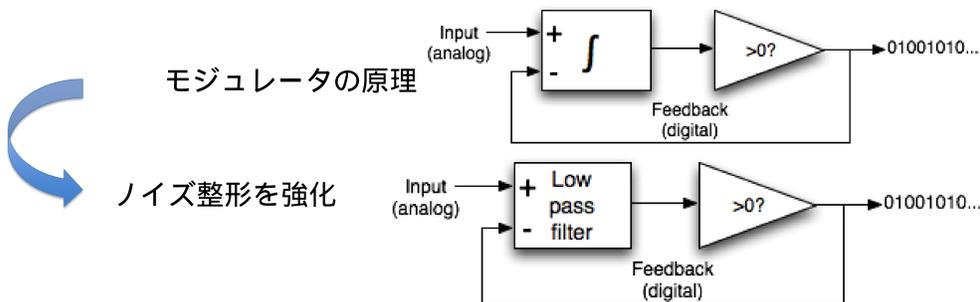


フィルタ後の Video level からフィルタ後の Reference level を差し引く (correlated double sampling) のが信号電荷量測定に最適

Reference level はピクセルごとに異なるies pixel to pixel (kTC 雑音)

Reset pulse はノイズなので無視する

CCD出力信号の高速低雑音処理 - 型ADC -



何故? 少ないトランジスタ数で高い分解能を得ることが可能

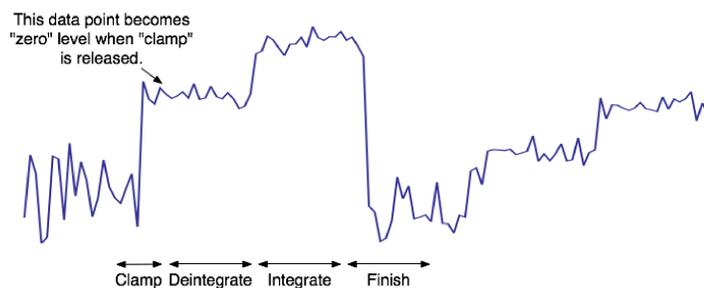
一次モジュレータの原理

- Integrate the difference between input and output.
- 出力ビットストリーム中の "1" の数が入力信号値に対応

ある出力ビット("1" or "0")と出力平均が"モジュレータ雑音"に相当
積分器を高次ローパスフィルタに置き換える

- 低周波数における強いフィードバックがモジュレータ雑音を高周波数帯に押しやる (ノイズ整形) 少ないサンプル回数で高分解能が実現可能
- ただし回路の不安定性に注意が必要

型ADCのCCD出力信号への応用



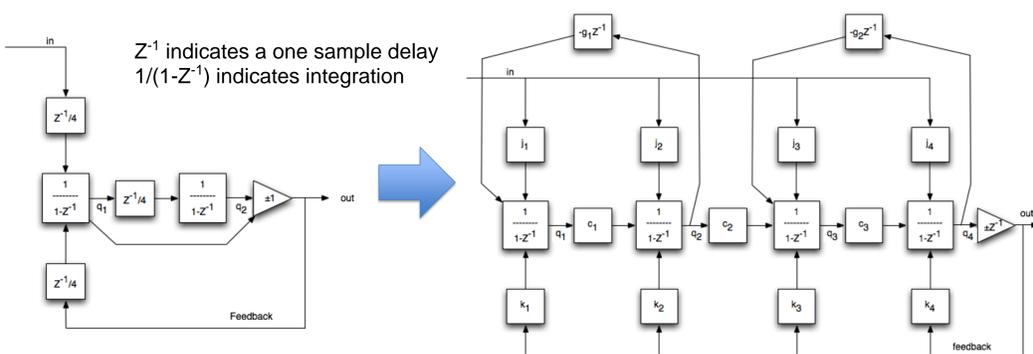
Clamp phase - モジュレータをリセットする

De-integrate phase - 負極性でサンプリング ("Video level" - "Reference level" の演算をするため)

Integrate phase - 正極性でサンプリング

Finish phase - 入力は無視し(zero weight)、モジュレータ量子化雑音レベルを評価するために、内部電位をサンプリング

新規ASICの改善点 - の高次化 -

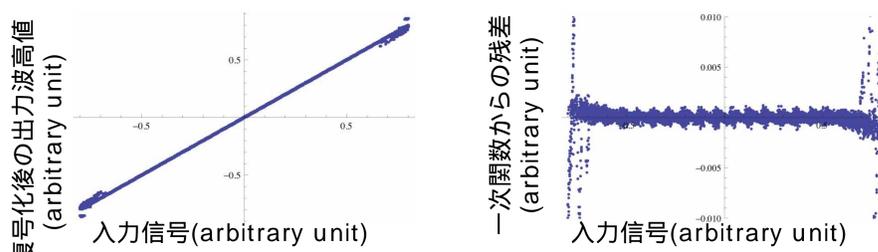


従来ASIC [1] のz領域モデル

新規ASIC のz領域モデル

- 従来の2次回路から四次に変更し、ノイズ整形性能を強化
- ASIC後段のデシメーション(復号化)フィルタ係数と回路を数値シミュレーション (Mathematica) で最適化した。

BBMエレクトロニクスによる CCD 冷却性能試験



kTC 雑音、白色雑音込のシミュレーション(1 pixel あたり49 サンプル (c.f. 従来ASIC では 155サンプル/pixel))

- フルスケールの ± 0.6 の範囲で良く安定
- (peak-peak signal)/(RMS noise) > 4000 を達成
- ! 既に回路パラメータに落とし込みを終えている

開発スケジュール

- 2012年度 回路設計・レイアウト設計(ポストレイアウトシミュレーション含む) 並行してSD-CCDは従来ASICを用いて広帯域分光性能を測定
- 2013年度 新規ASICの製作、単体性能評価試験、および信号処理回路システムへの組み込み
- 2014年度 SDCCDと接続し、有効エネルギーレンジとカメラシステムとしての雑音性能を評価 放射線耐性評価

References

- 1) H. Nakajima et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (2009) 747-751
- 2) H. Nakajima et al., Nucl. Instr. and Meth. A 632 (2011) 128
- 3) H. Nakajima et al. 2013 submitted to NIMA
- 4) H. Nakajima et al., Nucl. Instr. and Meth. A 610 (2009) 78-82
- 5) H. Inose et al., IRE Trans. on Sp. Elec. Tel. SET-8 (1962) 204-209
- 6) J. P. Doty et al., Proc. SPIE 6276 (2007) 62761P
- 7) D. Matsuura et al., Proc. SPIE 6686 (2007) 66860L