
Cosmo-Z 技術情報

Cosmo-Z 概要

Rev 0.5

平成 30 年 7 月 31 日
特殊電子回路株式会社

重要 必ずお読みください

本製品を安全にお使いいただくために、以下に示す注意事項を必ずお守りください。万が一、誤った使い方をされますと、お客様のターゲットボードの破損、怪我、火災の原因となるおそれがあります。

1. 通電状態の機器に触れる際には、破損や感電、怪我などに十分ご注意ください。
2. 本製品を誤った方向に差し込むと、ハードウェアが破損することがあります。また、本製品の挿抜は必ず電源断の状態で行ってください。
3. 本製品に強い振動や衝撃、熱を与えないで下さい。
4. 万が一、異常を感じた場合は速やかに電源を OFF にし状況を確認してください。

本製品は、教育や試作など FPGA の動作検証目的などを想定して作られており、この装置を使用した結果は一切保証できません。本製品はお客様機器の研究・開発・評価・教育用としてのみご使用ください。

また、書面による事前の許諾なしに次に掲げるハイリスク用途に使用することはできません。

1. 人命に関わる機器
2. 医療機器
3. 誤動作により、人体、財産または自然環境に影響を及ぼす可能性のある機器
4. 誤動作により、火災の発生を起こさせる可能性のある機器
5. 航空・宇宙機器およびナビゲーションシステム
6. 兵器システムあるいは軍事目的の機器を製造または製造の支援をするための機器
7. 原子力関連機器
8. 電動工具
9. その他、デバイスの誤動作やデータの消失によって、何らかの損害を被る場合や何らかの問題が生じる装置

第1章 Cosmo-Z とは

1.1 Cosmo-Z とは

Cosmo-Z は、XILINX の FPGA 「ZYNQ」 を搭載した高速 ADC ボードです。

波形を計測し、データを FPGA でリアルタイムに処理できるだけでなく、FPGA とファームウェアはユーザーがカスタマイズすることが可能です。

また、コンパクトなサイズに多数のチャンネルを集約しており、Linux を搭載し、Web ブラウザまたは SSH でリモートアクセスすることができます。

Cosmo-Z は、ユーザーの実験に合わせた計測器へと進化させることができる、FPGA がカスタマイズ可能な計測装置です。

1.2 全体的な機能とデータの流れ

Cosmo-Z の全体的な構成を図 1 に示します。

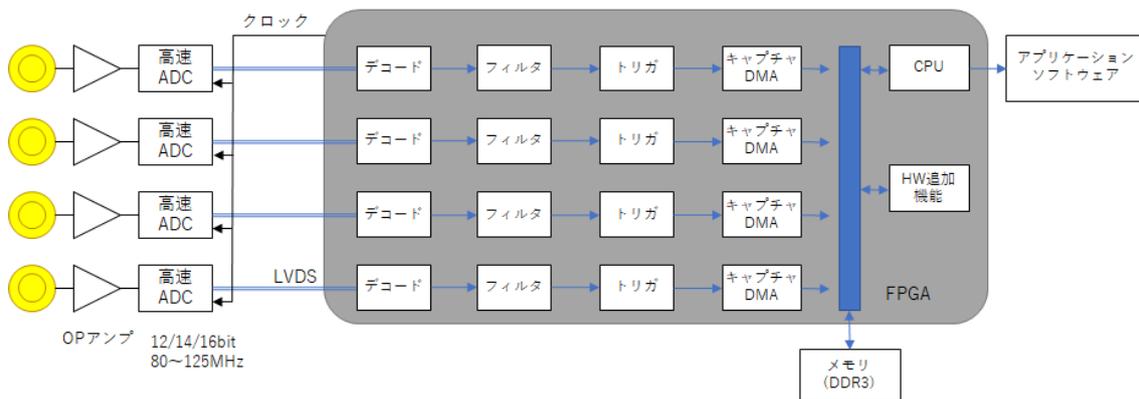


図 1 Cosmo-Z の全体的な構成

高速 ADC はすべて共通のクロック(80/100/125MHz)で動作し、全チャンネル同時にサンプリングします。ADC でデジタル信号に変換されたアナログ波形は FPGA でデコードされ、フィルタ、トリガなどの処理が行われ、DDR3 メモリに格納されます。

CPU は波形を読み出しソフト的に処理し、波形を画像化したり、ネットワークを通じて転送したり、SD カードや USB メモリに保存したりします。

メモリの内容は、CPU と FPGA で共有されているので、ソフトウェアから読み出すことができるほか、ユーザーが FPGA 内に作成したハードウェア追加機能からも波形メモリにアクセスすることができます。

1.3 イベントモード

Cosmo-Zにはイベントキャプチャという計測モードがあります。イベントキャプチャはイベントが発生した期間だけ波形を記録する機能です。イベントが発生していない期間は波形をキャプチャしないため、データ量を削減することができます。

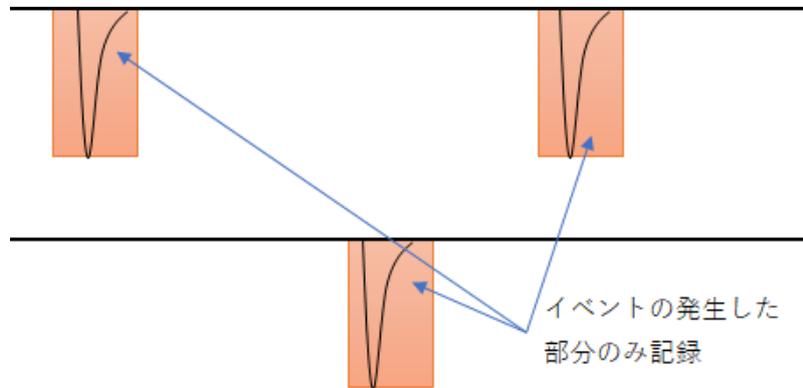


図 2 イベントキャプチャの概念

イベントの発生は各アナログチャンネルの値に閾値を設けることでもできますが、外部トリガによって発生させることもできます。外部トリガに同期した全チャンネル同時サンプリングなどに活用することもできます。

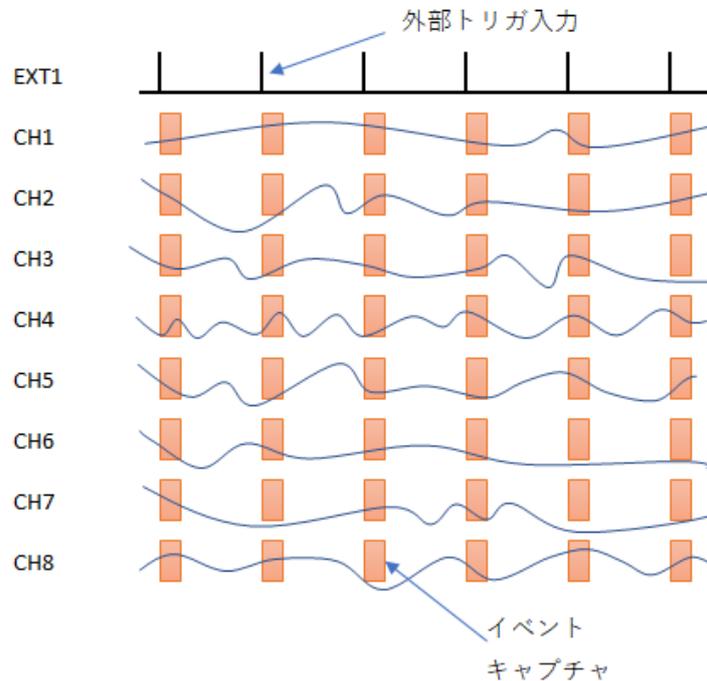


図 3 外部トリガに同期したイベントキャプチャ

1.4 波高分析

波高分析は、発生したイベントの、発生時刻と、発生チャンネル、パルスの高さや幅をハードウェア的に記録していくモードです。

Time	事象
0.001	CH1に高さ320のパルスが発生
0.003	CH2に高さ22のパルスが発生
0.012	CH1に高さ651のパルスが発生
0.015	CH3に高さ125のパルスが発生

図 4 波高分析の概念

これらの機能はハードウェア的に処理されているため、高いレートで処理できるだけでなく、データ量の削減に貢献しています。

波高分析の結果はハードウェア MCA に送られ、ハードウェア的に記録されます。ソフトウェアを介さずにすべてハードウェアで処理されるので、デッドタイムが生じません。高レートでも安定して記録することができます。

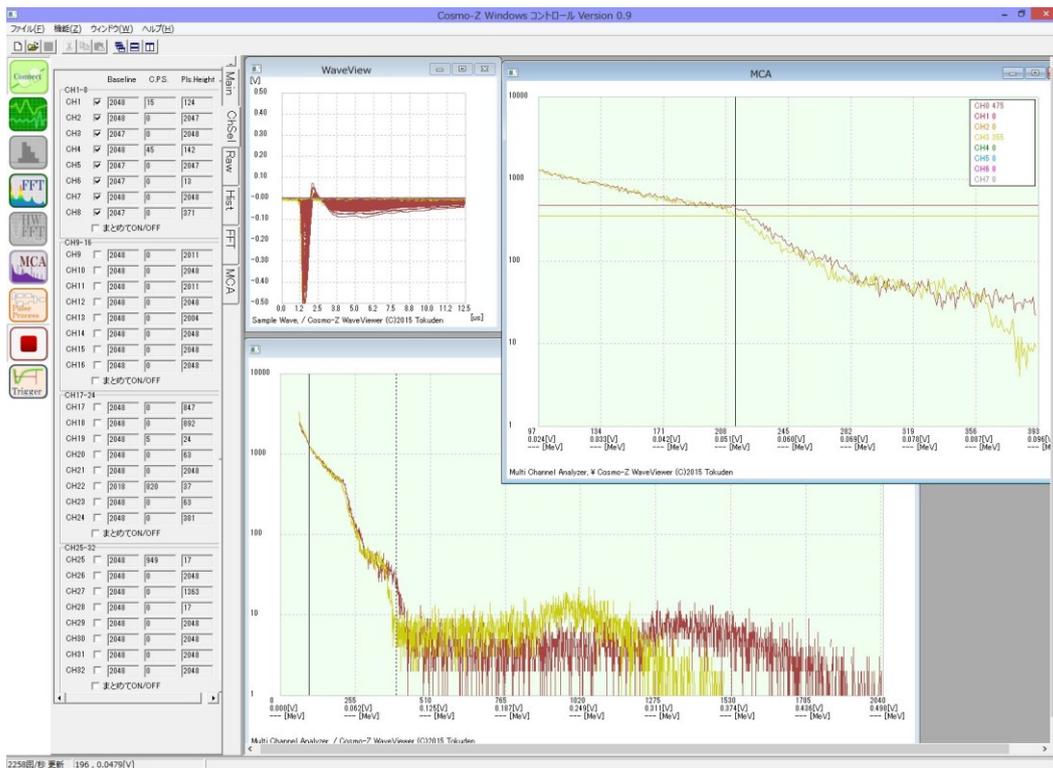


図 5 ハードウェア MCA による放射線スペクトラム測定

第2章 FPGA ならではのリアルタイム処理

2.1 フィルタ回路の例

ADC から取り込んだデータは、フィルタを通してトリガロジックに運ばれます。フィルタには、FIR や CIF といった通常のフィルタだけではなく、

$$V_{out} = Gain \times V_{in} + Offset$$

の処理を行うゲイン・オフセット調整回路も含まれます。

FIR/CIF フィルタは、計測分野ではローパスフィルタとしてよく用いられています。図 6 はノイズとともに計測された信号(黄色)を、CIF フィルタで平滑化したものです(青)。このようなフィルタをユーザが組み込むことができます。

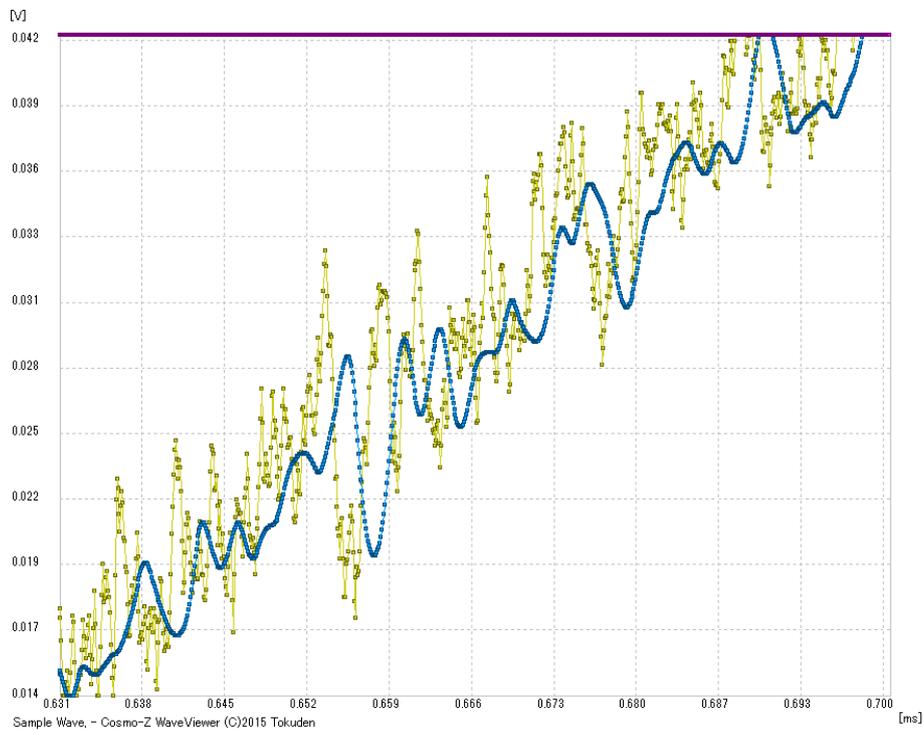


図 6 CIF フィルタの効果

2.2 波形成型回路

波形整形回路は放射線計測に特化された機能で、TFA、BLR、CFD および Shaper が用意されています。この回路はオプションでの追加機能となります。

TFA は、Timing Filter Amplifier のことで、主に光電子増倍管からの信号がコンデンサで結合されている場合に、波形を鋭くしてイベントが発生した時刻がわかりやすくするために用いられます。BLR は、Base Line Recovery のことで、放射線計測の際にベースラインの変動を抑えるために使用されます。CFD は自己信号を遅延させたものを足し合わせる回路で、パルスの大きさに関わらず発生時刻を正確に決めるために用いられます。

Shaper は半導体検出器における弾道欠損を補うため、exp で減衰する波形を台形に整形する回路です。(図 7、図 8)

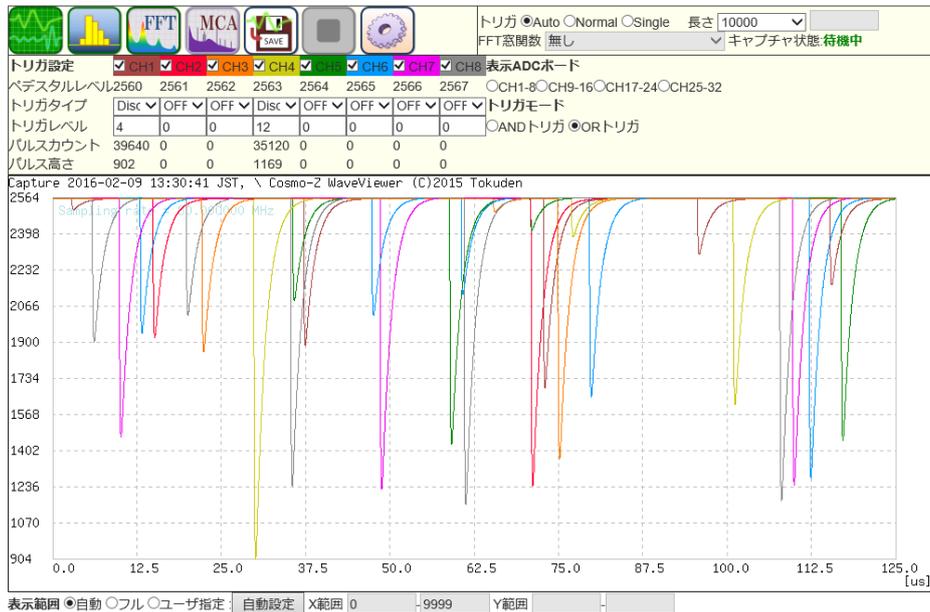


図 7 指数関数的に減衰する波形

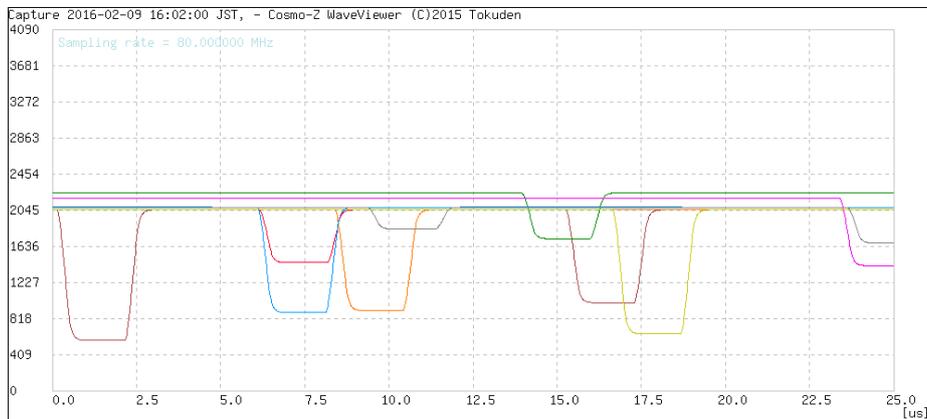


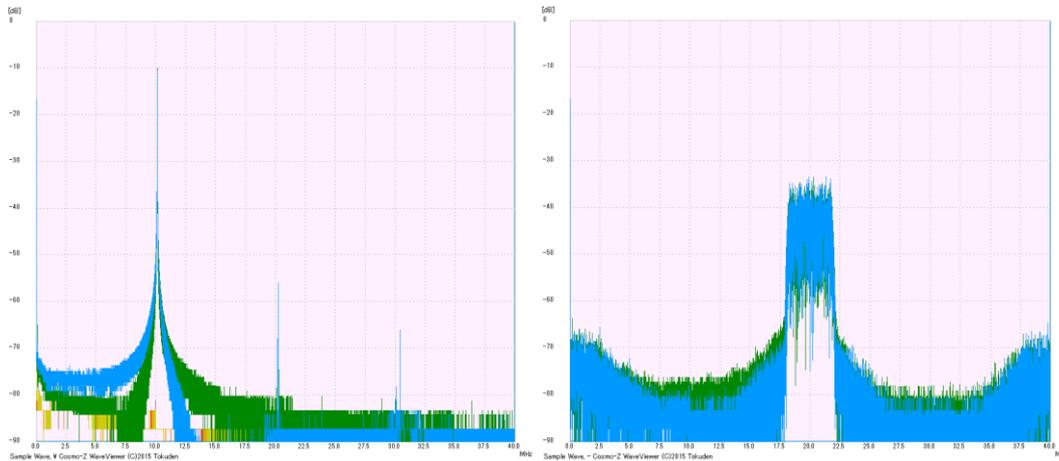
図 8 Shaper によって台形に整形された波形

2.3 ハードウェア・フーリエ変換回路

2種類のハードウェア・フーリエ変換回路をオプションで提供しています。

① 固定長 HW FFT

第一のハードウェア・フーリエ変換回路は、演算精度は16bit固定少数点ですが、32768固定長ポイントのFFTを、51 μ 秒で実行します。Radix-8、周波数間引き、改良型FFTアルゴリズムを採用しています。



FPGAのリソースは、BRAM36Kを96個、DSP48Eを216個使用します。Cosmo-Zに8chのキャプチャ回路など諸々一式を入れた状態でのリソースの使用率を示します。

表 1 固定長ハードウェアFFT回路のロジック使用率

Slice Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Registers	15,302	15,720	9%
Number of Slice LUTs	11,431	78,600	14%
Number of occupied Slices	4,874	19,650	24%
Number of RAMB36E1/FIFO36E1s	140	265	52%
Number of RAMB18E1/FIFO18E1s	82	530	15%
Number of DSP48E1s	224	400	56%

このようにFPGAに入れても圧迫しないコンパクトな設計になっていて、1回の32768ポイントFFTを51 μ 秒で実行できるので、連続した時系列データをFFTした場合、最高80MHzまで切れ目なくできる計算になります。

② 可変長 HW FFT

第二のハードウェア・フーリエ変換回路は、演算精度は 16bit 固定少数点ですが、512~1048576 ポイントの FFT を実行できます。Radix-2、時間軸間引き、改良型 FFT アルゴリズムを採用しています。

65536 ポイントの FFT では、バタフライ演算を 524288 回行う必要があります。演算器は 200MHz で動作するのでクロック周期は 5ns であり、1 回のバタフライ演算は 2 クロックを要するので 10ns で完了します。FFT が完了するまでに 5242880ns \approx 5.24ms の時間を要する計算となります。この回路で計測対象を 12.5MHz で ADC した場合、5.24ms の間に 65536 個のデータが溜まるので、すなわち、この速度が切れ目なく FFT できる最高速度となります。

表 2 可変長 HW FFT 回路の性能

データ数	バタフライ演算回数	FFT 計算時間	最高サンプリング周波数
16384	114688	1.15ms	14.3 MHz
32768	245760	2.46ms	13.3 MHz
65536	524288	5.24ms	12.5 MHz
1048576	10485760	105ms	10.0 MHz

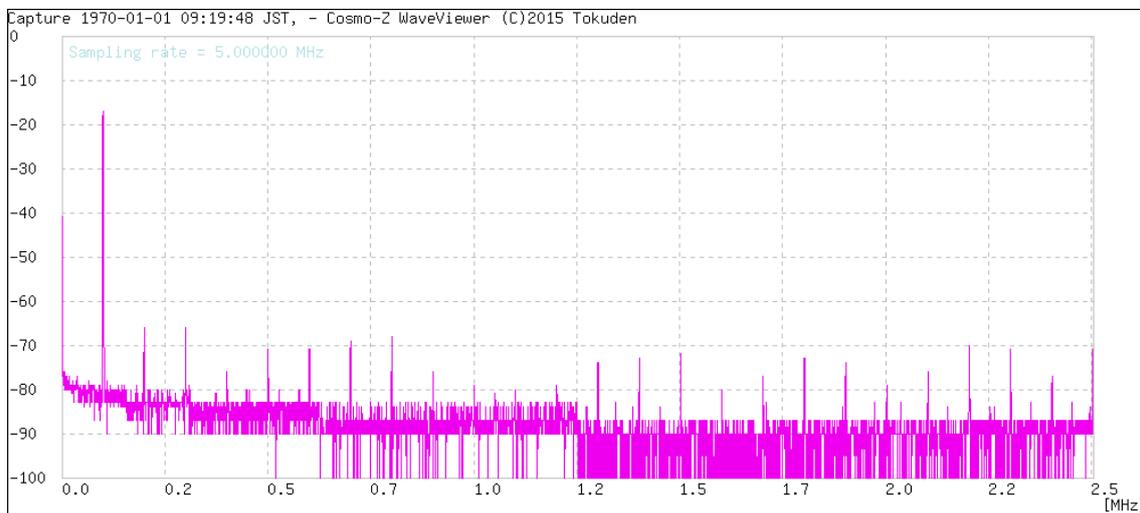


図 9 可変長 HW FFT 回路の変換結果

2.4 デジタル・ロックインアンプ

オプションでデジタル・ロックインアンプを搭載することができます。

ロックインアンプは微小信号を計測するための回路で、特定の周波数成分の振幅と位相を測定することができます。

Cosmo-Z のデジタル・ロックインアンプは、特定のチャネルの信号をトリガとして使用して、その周期を推定し、周波数成分を抽出します。

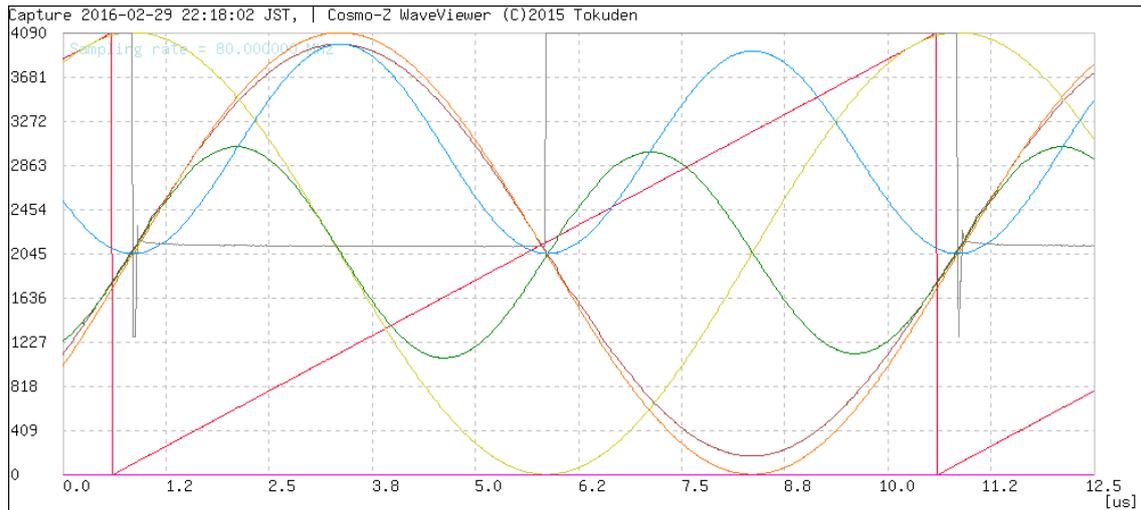


図 10 デジタル・ロックインアンプの動作例

第3章 カスタマイズ

3.1 拡張ボード

Cosmo-Z Type-C 基板は、拡張ボードを利用して機能を拡張することができます。

メイン基板は 8ch の AD 入力を備えていますが、拡張ボードを使用することで最大 32ch までアナログ入力を増やすことができます。

また、SMA コネクタから外部トリガを入力するためのトリガボード、DAC からアナログ信号を出力するための DAC ボード、1GHz でサンプリングする 1G ADC ボード、18bit でサンプリングするための 18bit ADC ボード、光出力ボードなどをそろえています。

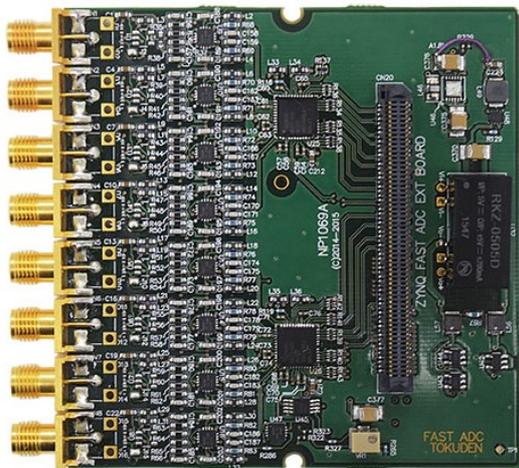


写真 1 拡張 ADC ボード



写真 2 18bit 拡張 ADC ボード



写真 3 トリガボード

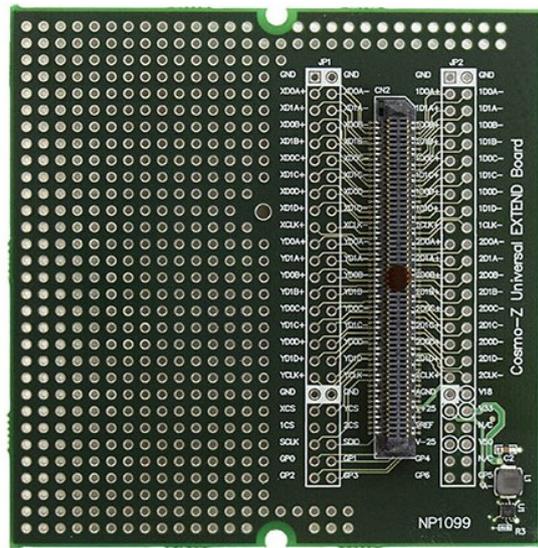


写真 4 ユニバーサルボード

3.2 FPGA の機能拡張

ほとんどの計測アプリケーションにおいては、高速 ADC や DMA はどのような実験や計測でもだいたい同じ構成となって、実験ごとの差異は、フィルタやトリガ、波形解析に現れます。

Cosmo-Z では、どのような実験・計測でも共通して使用される ADC インタフェースや DMA、プレトリガといった回路などを標準プラットフォームとして提供し、実験毎に異なるフィルタや、トリガロジックをユーザーがカスタマイズできるようにしています。

また、ユーザーが作成したリアルタイム波形解析回路からメインメモリの内容にダイレクトにアクセスすることもできるので、高速なハードウェア信号処理を行うことも可能です。詳細は、別途用意する FPGA 機能拡張マニュアルをご覧ください。

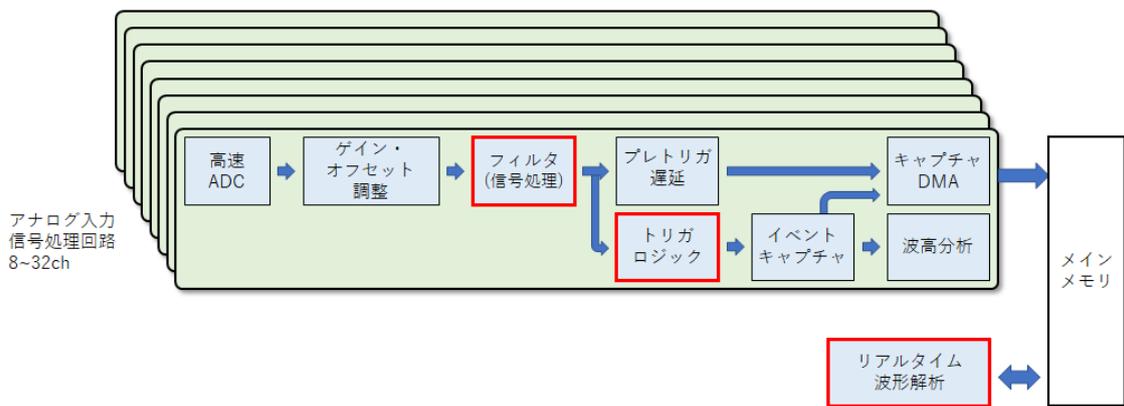


図 11 Cosmo-Z 標準プラットフォーム

3.3 トリガについて

Cosmo-Z には、チャンネルごとに ADC の値をベースにした 6 種類のトリガを用意しています。

- UPPER . . . ADC 値が指定の値以上ならトリガ発生
- LOWER . . . ADC 値が指定の値以下ならトリガ発生
- RISE . . . ADC 値が指定の値を横切って上回ったトリガ発生
- FALL . . . ADC 値が指定の値を横切って下回ったトリガ発生
- Discri . . . ADC 値が代表値より指定の値だけ下回ったらトリガ発生
- Cross . . . ADC 値が指定の値を横切ったらトリガ発生

また、FPGA にユーザが実装して拡張することも可能です。

- 例 2つ以上のシンチレータが光ったら計測開始
 3つ以上のシンチレータが光って、パルス高さの合計値が
 ○○以上なら計測開始。



第4章 アナログ入力仕様

4.1 ノイズ性能

Cosmo-Z 12bit 版は $\pm 0.5V$ を12bit分解能で計測するので、 $1LSB \approx 244 \mu V$ となります。入力無信号時のノイズのヒストグラムを図12に示します。

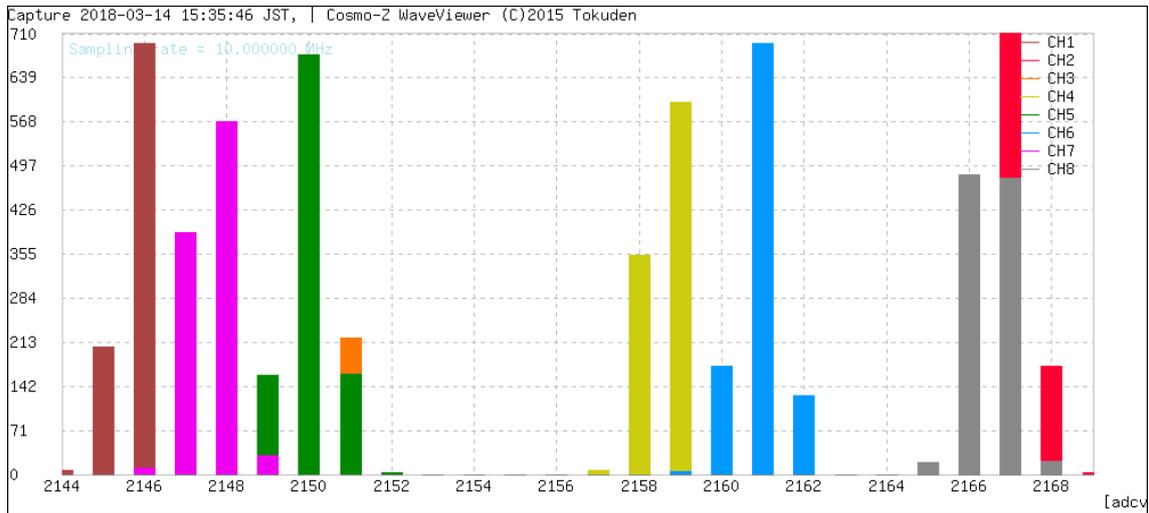


図12 Cosmo-Z 12bit 版のノイズ性能

Cosmo-Z 14bit 版は $\pm 0.5V$ を14bit分解能で計測するので、 $1LSB \approx 64 \mu V$ となります。入力無信号時のノイズのヒストグラムを図13に示します。

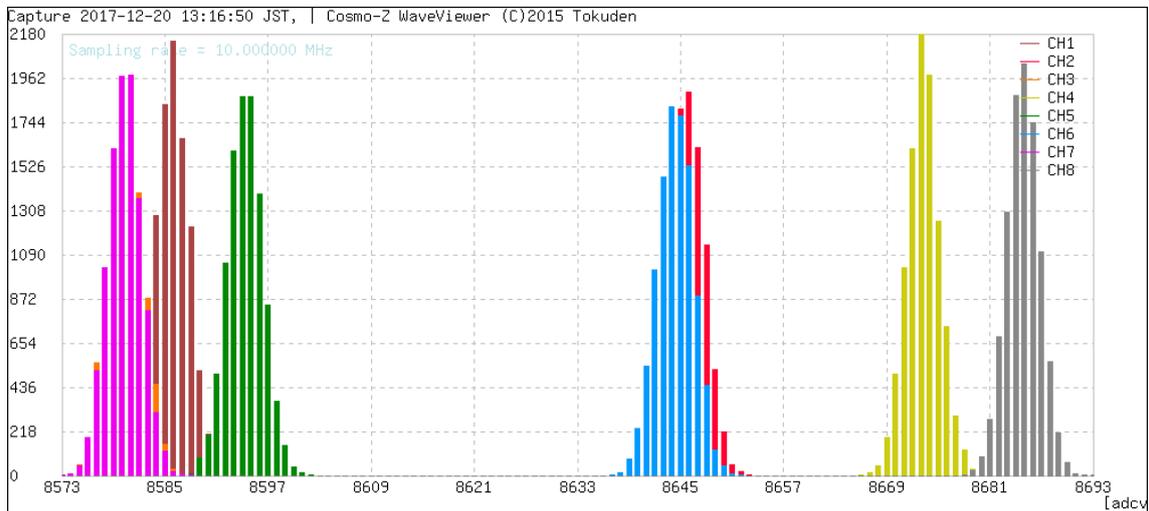
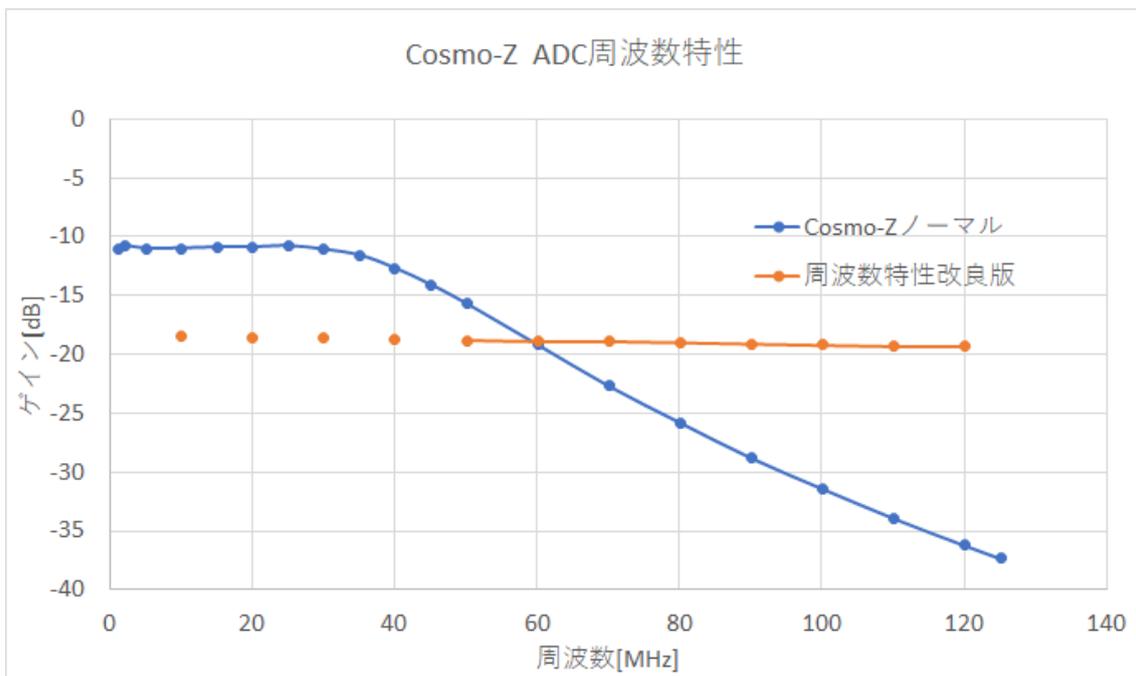


図13 Cosmo-Z 14bit 版のノイズ性能

4.2 周波数特性

Cosmoz-Z の入力回路は、アナログフィルタによって約 50MHz で 3dB ダウンするよう設計されています。

この周波数特性の制限は、エイリアシングを防ぎ、ノイズを減らすためのものですが、レーダー信号のアンダーサンプリングなどで 200～600MHz 程度の信号をデコードしたい場合のため、フィルタの定数を変更することも承っています。その場合は、100MHz 以上でもほぼ減衰しないようになります。



『Cosmo Z 概要』

第1版 平成30年7月31日

特殊電子回路株式会社

©Copyright 2018 特殊電子回路(株) All rights reserved. 無断転載を禁じます