

論文の内容の要旨

論文題目 放射線信号の時間幅処理法の研究

Study on a time-width signal processing method of radiation signals

氏 名 織田 忠

1. 序論

放射線検出は、入射した放射線エネルギーによって検出器内物質を電離させ、その電荷を電圧の形に変換しエネルギーをもとめることである。この放射線検出の応用である放射線計測イメージングは、非破壊検査、医療、物理学等の様々な分野で必要不可欠なものになっている。このイメージングとは、検出されたデータに対してよりわかりやすい意味と実用性を持たせるために2次元もしくは3次元に並べた検出器を用いて、放射線エネルギー情報の他に入射位置情報を踏めて取得するものである。この検出された放射線の位置情報は、製造技術の発展によって作成可能になった微細な検出器を用いることで詳細にえることが近年では可能になってきている。この微細化に伴い、チャンネル数が膨大になっている。位置情報とエネルギー情報を分解能よく取得するためには各チャンネルでエネルギーの読み出しが行う必要がある。この膨大なチャンネルに対して各チャンネル読み出しを行うため、集積度や雑音、消費電力の観点からマルチチャンネル放射線信号処理用特定用途向け集積回路 (Application Specific Integrated Circuit) が必須になってくる。同じ面積上でトランジスタ数を増やしていくためにプロセスの微細化が進んでいる。このプロセスの微細化によってLSIの性能が上昇してきている。しかし、一方で電源電圧は製造プロセスの微細化に伴って低下しつづけている。この電源電圧の低下は連続的な値を取り扱うアナログ回路においては信号が電源電圧において制限されるために、ダイナミックレンジ (識別が可能な信号の最小値と最大値の比率) が低下してしまう。また、イメージングにおいて計数率の高い場合には各々のチャンネルにAnalog to Digital Converter (ADC)を実装し、エネルギーを取得しようとする

と回路規模がさらに膨大になってしまう。この両方を解決する方法として、エネルギー情報を波高値としてではなくデジタルパルスの時間幅として取得する時間幅信号処理法がある。これは、ADCを使わずに後段のデジタル回路を用いて全チャネルのエネルギー情報同時に得ることができる。本研究では、波高値測定の簡易版としての時間幅処理法ではなく、従来のアナログ信号処理を簡素化しつつも適切なエネルギー情報を得るようなアプローチとして新たなデジタル・アナログ融合型の時間幅信号処理法を対象とした。そして、その基本特性を明らかにし、特に線形性を大幅に改善する動的閾値法（dynamic Time-over-Threshold法）の開発研究を行い、動的閾値法を実装した実際に計測システムに用いられるマルチチャネル集積回路を設計する。

2. 時間幅信号処理

従来放射線信号処理では、検出器の電流信号を電圧パルス信号に変換し、そのパルス波高値電圧を測定するものであった。時間幅信号処理とは、その電圧パルスの波高値ではなく時間幅に着目した信号処理法である。この時間幅信号処理は近年注目されており、大規模チャネルを扱うような放射線検出システムにおいて用いられるようになってきている。PET（Positron Emission Tomography）やCTの分野において非常によく用いられており、縦（波高値）から横（時間幅）へのパラダイムシフトが進んでいる。その手法にTime-over-Threshold法(ToT法)と呼ばれるものがある（図1左）。これは電圧入力波形が閾値を越えた時にデジタルの1を出力し、逆の場合に0となる。この時間幅を後段のデジタル回路でカウントすることでそのカウント値をエネルギーとして取得する。これは1チャネルの回路の回路規模を小さくすることができ、かつ信号線が一本なのでシステム全体としてもシンプルに構成可能である。しかし、入力と出力時間幅の間に非線形性が生じるために、得られるエネルギースペクトルに歪みが生じてしまう。本研究では新しい時間幅信号処理としてdynamic Time-over-Threshold法を開発した。これはToT法とは異なり、閾値も同様にパルス波のように変化する方法である（図1右）。この場合、CR-RC整形波形とCRフィルターを用いた閾値波整形を行っており、シミュレーション計算を行った結果、図2のようになりCR-RC波形の時定数と閾値CRフィルターの時定数および閾値と波形がクロスしてからの変化までの時間（遅延時間）が同一のときに線形性(積分直線性INLで1.5%)がよく時間幅のダイナミックレンジも取りやすいことが分かった。また、時間幅変換するさいの雑音による時間幅揺らぎが従来のToT法に比べ2桁ほど小さい。

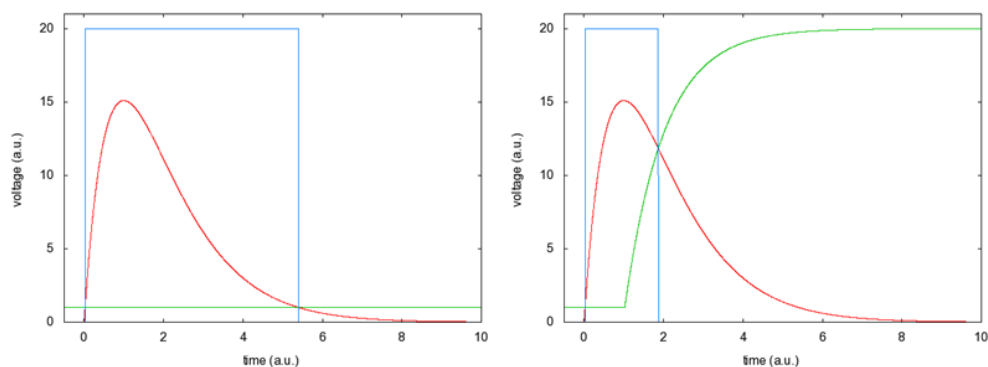


図1 時間幅信号処理（青：出力、赤：入力、緑：閾値）

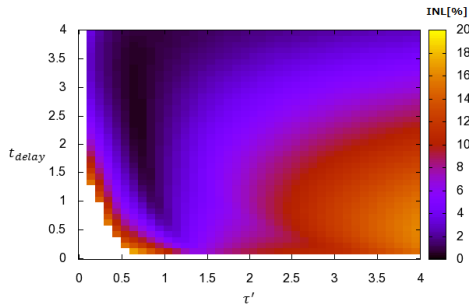


図 2. 線形性シミュレーション結果

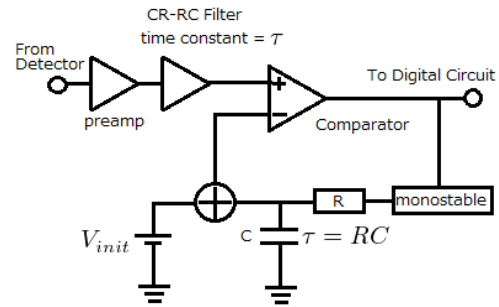


図 3. CR-RC + dToT法の概略回路図

3. プロトタイプを用いたdToT法の原理検証

入力電荷と出力時間幅間の線形性を確認することができたので、ASICを設計する前にディスクリートパーツを用いたプロトタイプ回路（図 3）を実装した。遅延時間とCRフィルターを書ける前のパルスをもノステابلと呼ばれる回路で生成している。これを用いて原理検証を行った。パルスジェネレータを用いた放射線模擬回路を使用した、入力電荷と出力時間幅の線形性を求めた結果、 $INL=2.7\%$ （図 4）であった。シミュレーション結果では $INL=1.5\%$ であるがこの実験では $INL=2.7\%$ と劣化しているのがわかる。これは低電荷領域側ではパルスジェネレータやプロトタイプ自身またデジタル回路からのノイズによるS/N比の低下によるものであると考えられる。放射線源 ^{22}Na と ^{137}Cs を使ったガンマ線スペクトル取得実験を行った結果、図 5 のようなスペクトルを取得することができた。ToT法に比べ、線形性が改善されているので、波高値測定のスぺクトルをよく再現できているのがわかる。ガンマ線の全エネルギーピークやコンプトン端、エスケープピークが適切なチャンネル番号に存在しているのを確認できた。

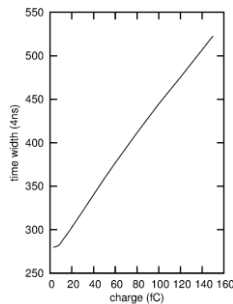


図 4、線形性

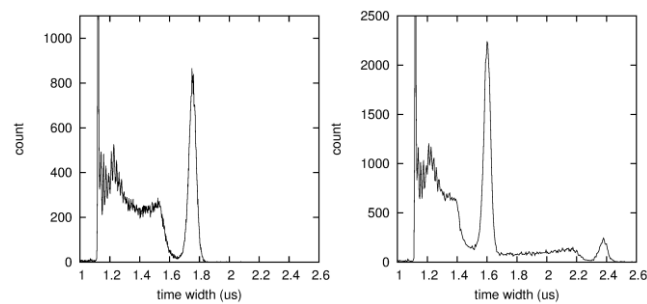


図 5、dToT法を用いたガンマ線スペクトル（左： ^{137}Cs 。右： ^{22}Na ）

4. APDアレー用dToT ASIC

ディスクリートパーツを用いたプロトタイプ回路の実験によって、CR-RC フィルターと dToT 法の組み合わせの線形性の確認とガンマ線スペクトルの取得の確認ができたので、TSMC 社 0.25 μm プロセスを利用して APD アレー用マルチチャンネル dToT ASIC を設計した。各チャンネルには、電荷積分アンプ(CSA)、ポールゼロキャンセレーション回路(Pole-Zero Cancellation Circuit, PZC)、波形整形回路、コンパレータ、タイミング生成回路、閾値整形回路から形成されている。放射線模擬信号を入れ回路の電荷—出力時間幅測定を行った結果8チャンネルで平均して $INL=4.7\%$ であった。理論値からのズレは、高抵抗回路のバラつきによる目標とする時定数から

のズレが非線形の劣化に影響を与えている。また、 ^{22}Na のガンマ線測定を行った。その結果図7のようなスペクトルを取得することができ、511keV のピークでは平均して約 20%のエネルギー分解能を得られた。これは、雑音レベルが等価雑音電子で 8000 電子と高いレベルになっているためである。この雑音レベルが線形性の低電荷側の劣化を解くに悪化させている。

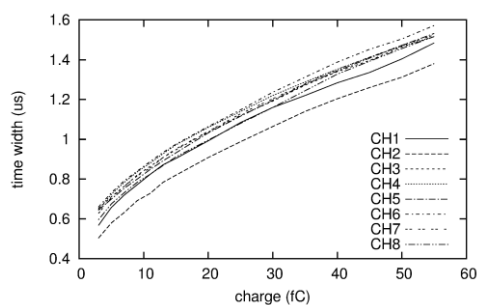


図 6．線形性

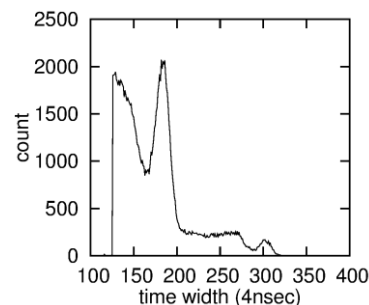


図 7． ^{22}Na スペクトル

5. コンプトンカメラ用dToT ASIC

実際の応用として、福島原子力発電の事故による散乱した放射性物質の線量マッピングのためのPINフォトダイオードコンプトンカメラ用マルチチャネルASICを設計した。この際に、前回のASICを参考にし、より性能を上げるために雑音の最適化を行うと同時に、バラつきに対してロバストな設計になるように独自に開発したルックアップテーブルを用いた方法論を用いて設計を行った。計算した結果、雑音電子は約450電子となった。また、線形性に関しては、シミュレーション（図8）上で様々なCMOSコーナーパラメータを用いて評価した結果、INLは $1.5 \pm 0.3\%$ （図9）であった。この線形性は、シンチレータや検出器の分解能自体3～10%であるために、スペクトロスコーピーとしての応用に問題にならない

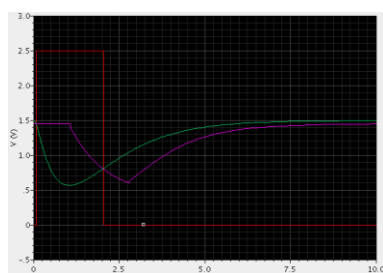


図 8．Hspiceシミュレーション

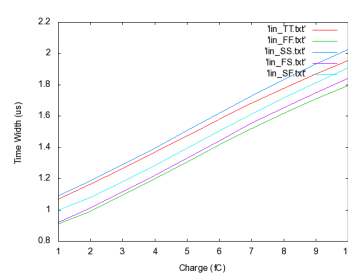


図 9．線形性

6. 結論

位置情報とエネルギー情報を必要とするマルチチャネルスペクトロスコーピーのための波高値測定に匹敵する時間幅処理法を動的閾値を用いた方法で開発し、プロトタイプとシミュレーションによってその線形性、ジッターなどの基本特性を明らかにした。その結果をもとにしてASICを作成し、全チャネルのスペクトルの測定にも成功した。新たなコンプトンカメラ用のASICにはそのASICの結果をもとにし、より設計を最適化することでさらに良い性能を持つASICの設計をすることができ、これらの結果から従来の縦方向（波高値）から横方向（時間幅）へのパラダイムシフトを促すような先駆的な役割を担う研究をすることができた。