ミニレビュー

高速 AD 変換器を用いたデジタル方式
放射線信号処理の動向

高橋浩之

近年、数 GHz 程度までのサンプリング周波数で逐一アナログ-デジタル (AD) 変換を行う超高速 AD 変換器が普及してきており、これを利用して放射線検出器の信号波形を直接サンプリング処理するデジタル方式の放射線信号処理システムに関する研究が最近盛んに行われている。本稿では、そのような放射線信号処理について概観したい。

デジタル方式の信号処理のアイデアそれ自体は凡庸なものであるが、本格的に取り組まれ始めたのは、最近になってからである。これには、半導体技術の進歩により演算素子などが飛躍的に高性能化されてきたため、この方式が現実性を帯びてきたという背景がある。図 1 にデジタル方式による信号処理のブロック図を示す。従来方式においては、放射線検出器から得られる信号は、アナログの信号処理ブロックを経由し、目的に応じた信号処理ハードウェアを用いて適当に整形された後に、マルチチャネル波高分析器などにより計数を行っていた。一方、デジタル方式においては、フラッシュ型 (FADC) など超高速の AD 変換器を用い、放射線検出器から得られる信号を直接デジタル化し個々の放射線パルスの波形情報まで含めた数値データを先に得る。その後、信号処理はデジタル演算により行うのである。ソフトウェアで行う信号処理は CT などの例に見られるように、逆問題を含む非線形処理も比較的容易にこなせるため、複雑な信号の高精度な解析を行ったり、計数率変化に強い信号処理や、波形変化の大きな検出器への適用など、測定状況に応じて最適な信号処理を行う可能性が見えてくる。

本方式に関する報告では、古くは

1986年の Chrien らの論文¹⁾がある。彼らは 20 MHz の FADC を用いてシンチレーション検出器の信号を測定し、MT に記録した後オフライン解析を行った。信号処理自体は、単にベースライン再生に相当することを行ったのみであったが、その可能性は注目された。その後、1990 年頃から徐々に FADC を用いたシステムに関する論文が現れてきた。たとえば、離散システムを念頭に置いた最適フィルタに関する理論的な検討^{2),3)}、非線形の変換を用いたダイナミックレンジの改善⁴⁾、FADC モジュールの開発⁵⁾、有効ビット⁶⁾ など FADC の特性測定^{7),8)}、Ge 検出器の波形解析⁹⁾ などである。1992 年の IEEE Nuclear Science Symposium では、デジタル放射線信号処理について多くの論文が集まり、新しい分野が確立しつつある印象を受けた。Jordanov らは 30 MHz/8 bits の FADC を用い、波高値の演算にはリアルタイム処理の可能なように移動平均を求めるハードウェアと、ピーク検出器からなるシステムについて報告し、移動平均を求める際に AD 変換値の積算を行うため、微分直線性等の特性が改善されることを示した¹⁰⁾。また、Georgiev らは、ほぼ同様の原理の moving window deconvolution 法を提案した¹¹⁾。彼らは、移動平均を求める区間を設定し、プリアンプ特性などを補償するデコンボリューションを施すことにより、より適切な信号処理が可能になるとしている。25 MHz/12 bits の AD 変換器を用いて測定したデータは、Ge 半導体検出器にも十分適用可能なエネルギー分解能を示しており、EURO-BALL の計画におけるシステムの構築を目指

図 1 高速 AD 変換器を用いた放射線信号処理システム

している。ただし、実際にはデコンボリューションはアイディアの提出のみであり、効果的に用いるためには、ハードウェア等を含めた検討が必要と思われる。

われわれは、それに対して、200 MHz/10 bits の AD 変換器を用いた信号波形処理について、多数回散乱成分と波形の関係を、信号処理によるピークコンプトン比の向上などの提案を行った¹²⁾。その後 Jordanov らは、IIR (infinite impulse response) デジタルフィルタによるリアルタイム処理の研究を進め、台形フィルタなどの例を示している¹³⁾。Gatti, Sampietro らイタリアのグループは、フィルタリング理論から見た最適信号処理の実現に離散サンプリングシステムを用いること^{14), 15)}に興味を集中させている。また、多数のディレイラインを用いたフィルタリング¹⁶⁾、最小二乗フィッティングによる波高値の導出¹⁷⁾や AD/DA 変換器、DSP を組み合わせた複合 AD 変換システムによる微分直線性の改善¹⁸⁾、さらに、X 線用システムの実用化¹⁹⁾、BGO 検出器のパイルアップ処理²⁰⁾、マイクロフォニック雑音の予測による低減²¹⁾、³He 比例計数管の壁効果の補正²²⁾など、さまざまな試みがなされ、本分野の裾野が拡大しつつある。

デジタル方式の利点の一つは、検出器からのより直接的な数値データが得られることである。これは裏を返せば信号波形の変化がそれだけ大きいということであり、中途半端な信号処理を施すと情報が増えたことによってかえって波高値等のばらつきが大きくなるなどの悪影響がでる。検出器応答が把握できず波形の変化に対応可能な信号処理ができない間は、波形変化を抑制するアナログフィルタ等を用いた方がよい場合も多々あろう。しかし、このデジタル方式の新しい信号処理自体についてより深く知ることは、今まで気が付かなかった検出器の一面を覗くこととなり、ひいては新しい発見や新しい検出器の開発に寄与するのではないかと考える。

Key Words : digital signal processing, ADC, waveform processing, pulse height analysis, filter

文 献

- 1) Chrien, R. E. and Sutter, R. J. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A249**, 421 (1986)
- 2) Gatti, E. et al. : *ibid.*, **A287**, 513 (1990)
- 3) Klein, S. R. and Hazen, E. : *ibid.*, **A309**, 536 (1991)
- 4) Walter, P. V. and Rausch, A. : *IEEE Trans.*, **NS-39**, (4), 776 (1992)
- 5) Angststadt, R. G. et al. : *ibid.*, **NS-39**, (5), 1297 (1992)
- 6) Cennamo, F. et al. : *IEEE Trans.*, **IM-41**, (6), 840 (1992)
- 7) Crawley, H. B. et al. : *IEEE Trans.* **NS-38**, (2), 102 (1991)
- 8) Crawley, H. B. et al. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A345**, 329 (1994)
- 9) Bamford, G. J. et al. : *IEEE Trans.*, **NS-38**, (2), 200 (1991)
- 10) Jordanov, V. and Knoll, G. F. : *ibid.*, **NS-40**, (4), 764 (1993)
- 11) Georgiev, A. and Gast, W. : *ibid.*, **NS-40**, (4), 770 (1993)
- 12) Takahashi, H. et al. : *ibid.*, **NS-40**, (4), 626 (1993)
- 13) Jordanov, V. and Knoll, G. F. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A345**, 337 (1994)
- 14) Bertuccio, G. et al. : *ibid.*, **A322**, 271 (1992)
- 15) Bertuccio, G. et al. : *ibid.*, **A353**, 257 (1994)
- 16) Ripamonti, G. and Castoldi, A. : *IEEE Trans.*, **NS-41**, (4), 1109 (1994)
- 17) Los Acros, J. M. and Garcia-Torano, E. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A339**, 99 (1994)
- 18) Simoes, J. B. P. S et al. : *Proc. of 1994 IEEE Nucl. Sci. Symp.*, p. 636, Norfolk (1995)
- 19) Audet, S. A. et al. : *ibid.*, p. 155 (1995)
- 20) Komar, R. J. and Mak, H. B. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A336**, 246 (1993)
- 21) Uritani, A. et al. : *ibid.*, **A351**, 598 (1994)
- 22) Takahashi, H. et al. : *ibid.*, **A353**, 164 (1994)

(東京大学工学系研究科)