

TOF – PET 검출기를 위한 시간 기반 단일선 다중 임계 전압 방법의 실험적 평가

주혜연^{1*}, 이민석^{1,2}, 이재성^{1,3}

서울대학교 바이오엔지니어링 협동과정¹

서울대학교 혁신의과학 융합전공²

서울대학교 의과대학 핵의학과

Experimental evaluation of Time-based Single-Line Multi Voltage Threshold Method for TOF-PET detector

Hyeyun Chu^{1*}, Minseok Yi¹

Interdisciplinary Program in Bioengineering, Seoul National Graduate School, Seoul, Korea

*hyeyun0828@snu.ac.kr

Abstract

A single-transmission line readout of MVT signals that encode the energy information of an analog scintillation pulse into multiple digital pulses was enabled by utilizing a simple XOR gate. The energy linearity and signal reconstruction accuracy of the MVT method with only 3 thresholds were sufficiently good. The energy resolution estimated by reconstruction method turned out as 6.37%, 7.04% and 13.26% at each three different methods. The energy linearity was increased to 0.98, which is 0.02% higher than conventional ToT. The reduction of timing channels for MVT by applying the proposed method will be useful in improving the integrity of PET data acquisition system.

1. 연구 배경

양전자 단층 촬영 기법에서는 아날로그 섬광 펄스의 정보를 얻는 과정에서 펄스를 디지털화 하는 과정이 요구된다. 이러한 단계는 아날로그 디지털 변환 회로(ADC)를 통하여 수행된다. 그러나 일반적으로 샘플링 클럭을 이용해서 샘플링하는 아날로그-디지털 변환 회로에서는, 회로의 복잡도가 증가하고 여러가지 소자를 필요로 하기 때문에 소비전력과 크기가 커진다는 단점이 존재한다. 이러한 문제점을 극복하기 하여, 시간 기반 임계 값을 설정하여 시간 폭을 통해 섬광 펄스의 아날로그 신호 정보를 얻는 ToT 방법이 고안되었다[1]. 이러한 ToT 방법은 아날로그 신호의 시간과 에너지 정보를 한번에 얻을 수 있다는 장점이 존재하지만 한개의 임계값을 적용하는 방법에는 에너지의 비선형성과 에너지, 시간 해상도가 좋지 않다는 한계가 있다. 보다 좋은 성능을 갖는 회로를 개발하기 위하여 여러 개의 임계값을 적용하는 ToT 방법, 시간에 따라 양의 기울기를 가지고 증가하는 임계값을 적용하는 ToT 방법, 양과 음의 임계값을 적용하여 타임스탬프를 찍는 ToT 등이 발전하여 활발히 연구가 진행되었다[2-3]. 하지만 이러한 방법들은 여전히 시간 정보를 얻기 위해 여러개의 채널을 필요로 한다는 단점이 있고, 이는 곧 회로의 복잡도 및 소비 전력과 직결되어 양전자 단층 촬영 기기에 바로 적용 될 수 없다는 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 해당 연구에서는 여러 개의 임계값을 설정하되 이러한 채널 정보를 XOR 게이트를 통하여 하나의 채널로 정보를 통합하는 과정에 대해 다루었다. 여러 개의 임계값을 적용하는 ToT의 장점은 유지하되 여러 개의 채널 갯수가 요구되는 단점을 해결하는 방법에 대해 고안하였다. 결과적으로 하나의 송신 채널을 통해 FPGA I/O 포트에 연결되는 채널 수를 한개로 줄여 MVT에서의 정보를 하나의 디지털 송신 라인을 통해 전달 할 수 있는 새로운 펄스 디지털화 방식에 대한 연구를 진행하였다.

2. 연구 방법

XOR 게이트를 사용하기 위해 여러개의 임계값을 적용하는 과정에서는 홀수개의 임계값을 적용하는 것이 필요하다. 임계값의 갯수가 5개 이상인 경우 에너지 정보 측면에서 성능의 큰 향상을 보이지 않기 때문에, 해당 실험에서는 3개의 임계값을 적용하는 것으로 선택하였다[3]. 3개의 서로 다른 디지털 펄스 입력 값이 XOR 게이트로 들어가면, 세개의 다른 케이스에 따라서 각각 2개, 4개, 6개의 타임스탬프를 갖는 경우를 도출 할 수 있다.

회로 디자인을 위하여 두개의 비반전 증폭기 (AD8000; Analog Devices)와 각각의 임계값을 설정해주기 위한 세개의 비교기(ADCMP601; Analog Devices), 그리고 세개의 신호를 하나의 디지털 펄스로 합치기 위한 하나의 XOR 게이트(NC7SZ386P6X; Onsemi)가 사용되었다. 데이터는 3mm x 3mm x 20mm 크기의 LGSO 크리스탈과 Na-22 소스를 이용하여 한개의 SiPM 디텍터에 정면 조사 기법을 활용하여 받았고, DRS4 디지털타이저에 1GSPS 샘플링 속도를 적용하여 각 펄스 당 1024개의 샘플과 총 20000개의 이벤트를 얻었다.

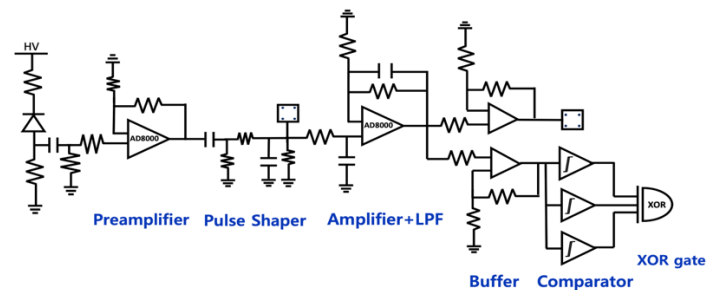
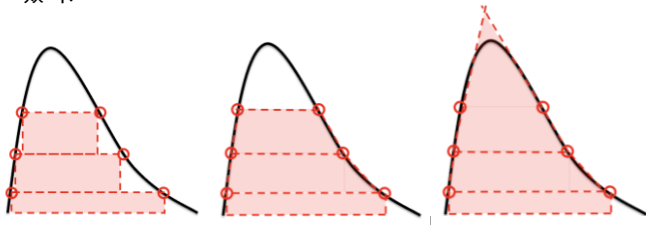


그림2. 단일 다중 임계 방법에 대한 회로

해당 실험에서는 임계값이 각각 30, 60, 90mv로 적용되었고, 이렇게 세개의 임계값이 적용되면 하나의 디지털 펄스에서는 상승 엣지와 하강 엣지에서 세개씩 타임스탬프를 얻을 수 있게 된다. 이렇게 얻은 여섯개의 샘플링 포인트로, 에너지 정보를 여러가지 측면에서 분석해볼 수 있다. 첫째로, 타임스탬프 사이의 길이를 가로 길이로 하고 임계값 사이의 크기를 세로 길이로 하여 직사각형, 사다리꼴, 그리고 교차점을 이용한 삼각형 세가지 방식으로 펄스의 크기를 추정할 수 있다.



<직사각형> <사다리꼴> <교차점-삼각형>

그림3. 6개의 타임스탬프를 이용한 에너지 추정 방법

또한, 이렇게 추정된 에너지 크기와 ToT 값의 관계성을 에너지 선형성을 이용하여 계산할 수 있다.

3. 연구 결과

아날로그 펄스의 최댓값에 따라 첫째, 둘째, 세번째의 임계값을 지나면 각각 2개, 4개, 6개의 타임스탬프가 생기는 경우로 이벤트를 분류할 수 있다.

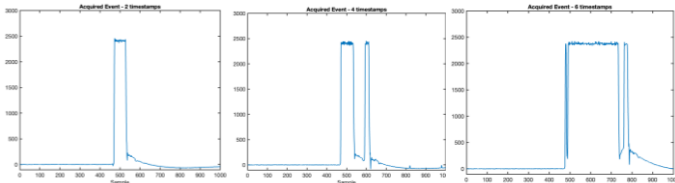


그림4. XOR 게이트를 통과한 디지털 펄스 케이스.

또한, 구간 별 펄스의 크기를 나타내는 타임스탬프 2개와 4개를 갖는 이벤트의 비율도 임계값을 조정함에 따라 변화됨을 확인하였다. 두번째 임계값을 높이면, 첫번째와 두번째 임계값 사이의 최댓값을 갖는 이벤트 수는 증가하고, 반대로 두번째와 세번째 임계값 사이에서 최댓값을 갖는 이벤트 수는 감소한다. 이러한 신호가 XOR 게이트를 거치면 2개의 타임스탬프를 갖는 이벤트 수는 증가하고, 4개의 타임스탬프를 갖는 이벤트 수는 감소함을 그래프에서 확인할 수 있다. 이로서 임계값에 따라 펄스의 크기가 올바르게 검출됨을 알 수 있다.

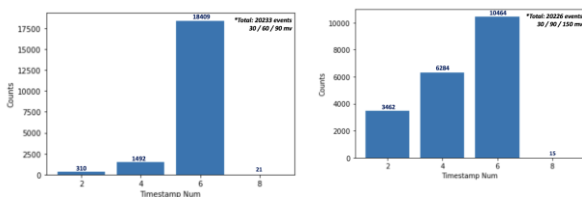
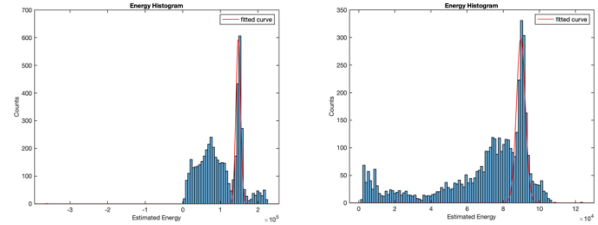


그림5. 임계값 조정에 따른 이벤트 수 변화

첫번째 실험에서는, 얻은 아날로그 신호와 위의 방법으로 계산된 에너지 값 사이의 분석을 통하여 에너지 해상도를 계산하였다. ToT로 얻은 타임스탬프에 따라 계산하면 직사각형, 사다리꼴, 교차점을 이용한 삼각형 방식으로 각각 6.37%, 7.04%, 13.26%의 결과를 나타냈다. 아날로그 신호를 같은 방식으로 계산했을 때 평균 9.88%의 에너지 해상도를 보여, 해당 방식이 아날로그 신호에 대한 에너지 정보를 바르게 계산할 수 있음을 확인하였다.



<ADC>

<ToT - 직사각형>

그림6. ADC와 ToT값을 통해 직사각형으로 추정된 에너지 히스토그램

더하여, 이렇게 측정된 에너지의 선형성은 피팅된 직선에 대한 선형성을 나타내는 R² 계산 법을 통해 계산 되었는데, 하나의 임계값을 활용하는 Single-ToT 방법에서는 0.96의 선형성을, 새롭게 제안된 방법에서는 0.98의 선형성을 보였다.

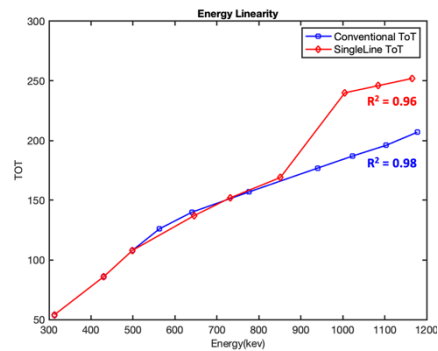


그림7. Single-ToT방식과 단일 다중임계전압 방식의 에너지 선형성

따라서, 단일 다중 임계 전압 방법으로 추정된 에너지가 기존의 아날로그 펄스를 디지털화 하는 데에 있어서 왜곡 없이 정확한 정보를 도출한다는 점을 알 수 있다.

4. 참고 문헌

[1] Kim, Heeiong, et al. "A multi-threshold sampling method for TOF-PET signal processing." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 602.2 (2009): 619-621.
 [2] Fujiwara, Takeshi, et al. "Multi-level time-over-threshold method for energy resolving multi-channel systems." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 57.5 (2010): 2545-2548.
 [3] Jung, Jiwoong, et al. "An improved time over threshold method using binolar signals." *Physics in Medicine & Biology* 63.13 (2018): 135002.
 [4] Kim, Kuu Rom, et al. "Analog and digital signal processing method using multi-time-over-threshold and FPGA for PET." *Medical physics* 45.9 (2018): 4104-4111.