

논문 2013-50-8-20

사다리꼴 필터를 이용한 효율적인 중첩펄스 처리 알고리즘 구현

(Implementation of Efficient Pile-up Pulse Processing Algorithm Based on Trapezoidal Filter)

박 철 암*, 정 진 균**

(Zheyao Piao and Jin-Gyun Chung[©])

요 약

X-선과 γ -선을 이용한 형광분석장치는 현재 널리 쓰이는 물질의 고유특성을 분석하는 장치이다. 하지만 여러 가지 원인으로 인해 장치사용 시 측정 신호에서 중첩 현상이 발생한다. 검출 신호의 높이는 측정 물질의 특성을 반영하며 측정 물질을 정확히 분석하기 위해서는 중첩된 신호를 제거하거나 복원을 해야 한다. 현재 trapezoidal 필터는 형광분석장치에 널리 사용되고 있으며 중첩펄스 검출에서도 좋은 결과를 보이고 있다. 본 논문에서는 측정 신호의 사다리꼴 변형에 기반 한 중첩펄스 처리방법을 제안한다. 제안방법은 사다리꼴 필터를 이용한 최대값 검출 알고리즘에 두 개의 카운터와 몇 개의 레지스터만을 추가하여 추가적인 중첩펄스 처리 알고리즘을 구현하기 때문에 기존 방법에 비해 하드웨어 복잡도가 훨씬 적으면서도 정확히 중첩펄스를 처리 할 수 있다.

Abstract

X-ray or γ -ray spectroscopy systems are widely used for analyzing material characteristics. Pile-up pulses are very often encountered for several reasons in XRF systems. Thus, it is necessary to reject or recover pile-up pulses to accurately analyze the material under test. In this paper, a pile up pulse rejection and recovery method is presented for XRF systems using trapezoidal pulse shaping of the input signals. Since the proposed method is based on the trapezoidal pulse shaping method widely-used in XRF systems, only two counters and a few registers are needed to implement the additional function of pile-up pulse rejection and recovery. Consequently, the proposed system is much simpler than conventional pulse reconstruction systems. It is shown that the proposed method can detect and reject pile-up pulses exactly. It is also shown that the pile-up pulses can be recovered if some conditions are satisfied.

Keywords : X-선 형광분석장치, Trapezoidal 필터, 중첩(pile up)펄스, 데이터 처리율.

I. 서 론

X-선을 이용한 형광분석장치는 현재 널리 사용되고

있는 물질의 특성분석 장치중의 하나이다. XRF(X-ray Fluorescence)시스템의 디텍터에서 검출된 신호를 분석할 때 내부 측정 환경으로 인해 신호가 중첩되어 검출되는 경우가 발생한다. 정확한 분석결과를 얻기 위해서는 중첩신호를 처리해주는 것이 매우 중요하다.

현재 많은 시스템들은 시스템 구현의 단순화를 위해 중첩된 펄스를 모두 제거하는 방법을 이용한다^[1]. 중첩펄스를 모두 제거하면 시스템의 구현은 단순화되지만 시스템의 데이터 처리율이 감소된다. 반면에 중첩된 펄

* 학생회원, ** 정회원, 전북대학교 전자공학부
(Department of Electronic Engineering, Chonbuk National University)

© Corresponding Author(E-mail: jgchung@jbnu.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

접수일자: 2013년6월24일, 수정완료일: 2013년7월20일

스를 복원하는 방법을 사용할 경우 데이터 처리율은 증가하지만 시스템의 복잡도가 크게 증가하는 단점이 있다^[2~4].

Trapezoidal(사다리꼴) 필터는 현재 형광분석장치에 많이 쓰이고 있는 데이터 처리 방법이다. 사다리꼴 필터를 사용하면 입력 exponential 신호를 사다리꼴로 변형하여 기존입력신호로부터 검출하기 어려운 최대값을 쉽게 찾을 수 있는 장점이 있다. 사다리꼴 필터는 정상 신호뿐만 아니라 중첩신호 처리에도 많은 장점을 가지고 있음이 알려져 있다^[5]. 최근 사다리꼴 필터를 이용한 효율적인 XRF시스템용 최대값 검출 알고리즘 및 구현 방법이 제시되었으나 이 방법은 정상적인 펄스만을 고려하였고 중첩펄스에 대한 처리방법은 제시되지 않았다^[6].

본 논문에서는 기존의 최대값 검출 알고리즘^[6]을 확장하여 정상적인 펄스뿐 아니라 중첩펄스의 경우에도 최대값을 적절히 결정할 수 있는 방법을 제시한다. 제안한 방법은 입력신호를 사다리꼴 펄스로 변형한 뒤 중첩 신호처리 방법을 적용하였으며 간단한 하드웨어 추가로 알고리즘을 쉽게 구현할 수 있다. 제안한 알고리즘은 Verilog HDL로 설계하고 검증하였다.

II절에서는 기존의 중첩신호 처리방법에 대해 설명하고 III절에서는 중첩펄스 처리 알고리즘을 제안한다. IV절에서 시뮬레이션 결과를 제시하고 V절에서 결론을 맺는다.

II. 기존의 중첩펄스 처리방법

일반적으로 XRF시스템을 이용하여 물질의 특성 측정 시 해당 디텍터에서 검출된 신호는 그림 1의 앞부분과 같이 상승시간이 짧고 하강 시간이 매우 긴 exponential 신호이다. Exponential 형태 신호의 최대값은 측정 원소의 에너지 대역을 나타내며 그 크기를 정확히 측정하는 것이 매우 중요하다. 중첩펄스는 그림 1의 뒷부분에 보이는 바와 같이 앞 펄스가 완전히 끝나지 않은 상태에서 또 다른 펄스가 중첩되어 발생한다.

물질의 특성을 정확히 분석하기 위해서는 중첩된 펄스를 처리하여야 하며 중첩된 펄스의 처리는 표 1에 보인 바와 같이 제거하는 방법과 복원하여 처리하는 방법으로 나눌 수 있다. 중첩펄스 제거방법^[1]에서는 중첩펄스 검출블록을 통해 입력 펄스 중 중첩된 펄스를 먼저

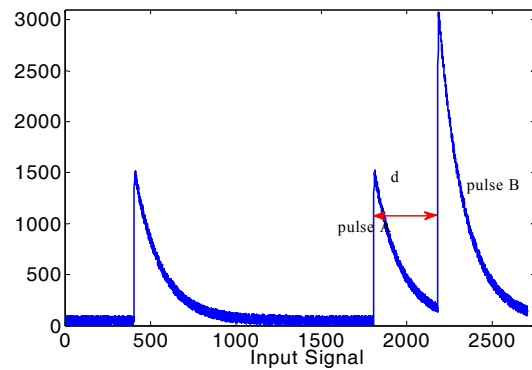


그림 1. 정상펄스와 중첩펄스
Fig. 1. Normal pulse and pile up pulse.

표 1. 중첩펄스의 처리방법 비교
Table 1. Comparison of pile up pulse processing methods.

방식	장점	단점
제거	시스템복잡도 낮음	신호처리율 낮음
복원	신호처리율 높음	시스템복잡도 높음

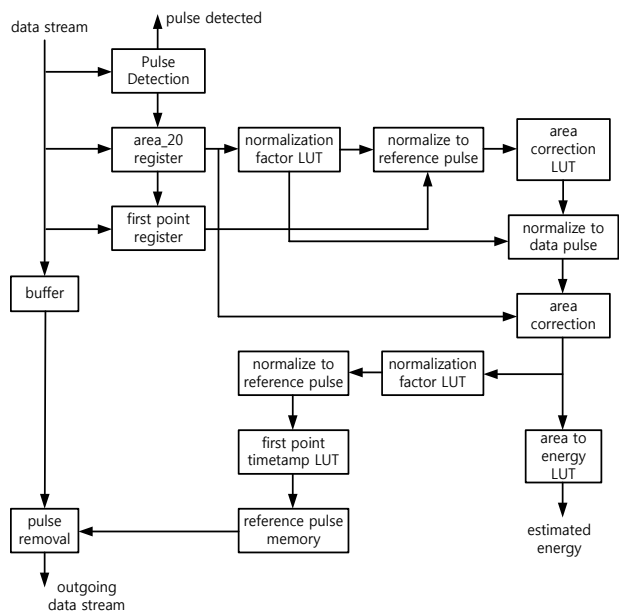


그림 2. 기존 중첩펄스 복원 알고리즘 블록도
Fig. 2. Block diagram of existing pile up pulse recovery algorithm.

제거한 후 정상펄스만 처리한다. 중첩 펄스 제거방법은 적은 면적으로 구현할 수 있는 반면에 중첩펄스를 모두 제거하기 때문에 시스템 전체의 데이터 처리율은 감소된다.

중첩펄스 복원방법에서는 입력되는 신호 중 중첩된 신호를 복원함으로써 전체 입력되는 신호의 처리율을 높인다^[2~4]. 하지만 기존의 복원방법에서는 입력되는 exponential 신호에서 서로 중첩된 부분을 분리하는 방법을 사용하기 때문에 분리 과정이 어렵고 시스템의 복잡도가 크게 증가하는 단점이 있다. 그림 2와 같이 신호의 분리 및 복원 시 기준(reference) 펄스를 사용하고 반복적으로 알고리즘을 적용해야 하기 때문에 메모리의 사용량 및 시스템의 복잡도가 크게 증가한다^[4].

사다리꼴 필터를 사용하면 중첩펄스 검출에 장점이 있음이 알려져 있으나 효율적인 검출 알고리즘 및 구현 방법은 제시되지 않았다^[5]. 다음 절에서는 사다리꼴 필터를 이용한 효율적인 중첩펄스 처리 알고리즘의 구현 방법을 제시한다.

III. 제안한 중첩펄스 처리방법

1. 중첩펄스의 종류

그림 3(a)의 exponential 신호를 사다리꼴 필터에 적용하면 그림 3(b)의 사다리꼴 모양을 얻을 수 있다. 사다리꼴 모양의 전체 구간은 상승 부분 k , flat-top 부분 m , 하강부분 k 로 나누어져 있다. 중첩된 펄스의 경우 중첩된 두 펄스의 간격에 의하여 그림 4와 같이 다양한 출력을 얻는다. 첫 번째 출력은 입력펄스 A와 B가 더해진 A+B 값이 출력으로 얻어지며 두 번째 경우는 입력펄스 C의 값만 얻을 수 있다. 나머지 경우도 중첩된 두 입력펄스의 간격에 따라 다양한 출력이 얻어짐을 보인다^[5].

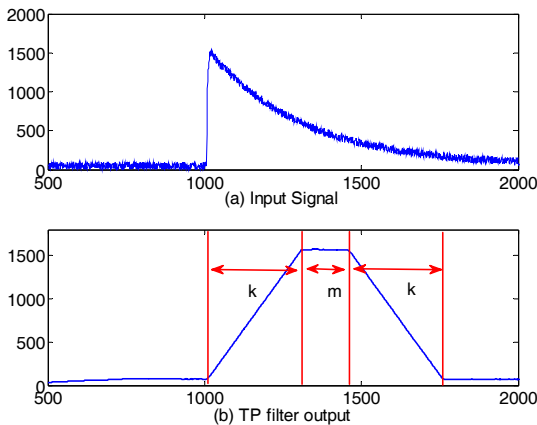


그림 3. (a) 입력신호 (b) 사다리꼴 필터의 출력
Fig. 3. (a) Input pulse, (b) Trapezoidal filter output.

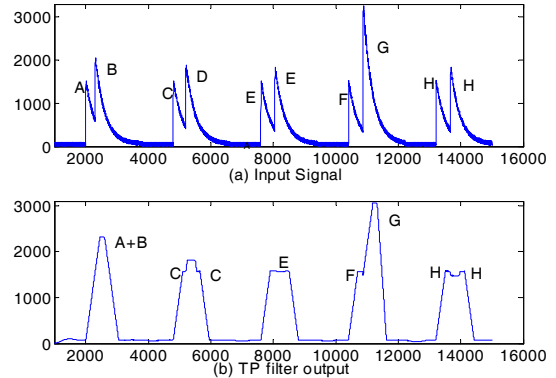


그림 4. (a) 입력신호, (b) 사다리꼴 필터 출력
Fig. 4. (a) Input signal, (b) Output of trapezoidal filter.

ADC : Analog to Digital converter
DPP : Digital Pulse Processing
PUR_en : Pile up Rejected Enable

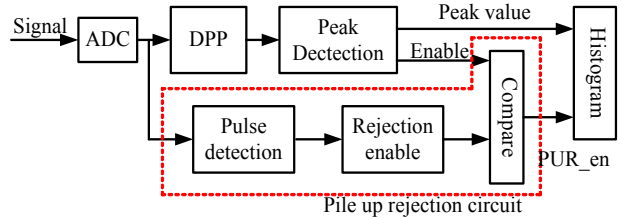


그림 5. 전체 시스템 구조 및 제안한 방법의 설계 블록도
Fig. 5. Block diagram of system and proposed method.

본 논문에서는 체계적으로 중첩펄스를 처리하기 위하여 두 펄스의 간격과 사다리꼴 모양의 부분길이 k, m 을 이용하여 중첩펄스를 구분 한다. 그림 1과 같이 중첩된 펄스는 펄스 A와 펄스 B의 중첩되기 전의 높이에 따라 $A > B, A = B, A < B$ 로 나눌 수 있고 두 펄스의 간격 d 와 $k, L(L=k+m)$ 의 관계에 따라 아래와 같이 5가지로 나눌 수 있다.

- ① $d < k$
 - ② $d = k$
 - ③ $k < d < L$
 - ④ $d = L$
 - ⑤ $d > L$
- (1)

제안한 중첩펄스 처리방법은 중첩된 펄스를 모든 경우의 중첩된 펄스를 검출할 수 있으며 두 펄스 사이의 간격에 따라 펄스의 최대값 검출 가능 여부가 결정된다.

2. 제안한 중첩펄스의 처리방법

그림 5는 전체 시스템의 블록도이다. 점선으로 표시된 부분은 기존의 최대값 검출 알고리즘^[6]에 추가된 중첩펄스 처리 블록이다. 제안한 중첩펄스 처리방법은 step 1의 펄스 검출신호(pulse detection)와 step 2의 제거신호(rejection enable)를 통해 중첩된 펄스 중 최대값 검출이 불가능한 신호를 제거한다.

펄스 detection 신호를 검출하기 위해 입력신호를 식 (2)와 같이 미분한다.

$$Diff(n) = Din(n) - Din(n - 1) \quad (2)$$

위 식에서 $Din(n)$ 은 입력 exponential 신호이며 $Diff(n)$ 는 미분 결과이다. 미분결과로부터 exponential 신호의 입력여부를 확인할 수 있다. 중첩된 두 펄스의 간격 d 를 계산하기 위해 일정한 임계값을 정한다. 이미 출력된 정상펄스의 최대값을 n 등분하여 임계값을 가변으로 제어할 수 있다. 따라서 미분 결과가 임계값 보다 크면 1로 세팅하고 임계값 보다 작으면 0으로 세팅하여 펄스 detection 신호를 생성한다. 아래와 같이 카운터 신호 cnt 1을 생성한다.

```

if pulse_detection=0
    cnt1=cnt1+1;
else
    cnt1=0;
end
    
```

카운터 신호 cnt 1의 값은 중첩된 두 펄스의 간격 d 를 의미하며 다음 조건을 만족하면 중첩펄스의 두 번째 펄스를 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} cnt1(2)-cnt1(1)=1 \\ cnt1(2)-cnt1(3)<L \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)의 조건이 만족되면 rejection enable 신호를 1로 세팅하고 만족 안 될시 0으로 세팅하여 아래와 같이 step2에 적용하는 cnt 2를 생성한다.

```

if rejection_enable=1
    cnt2=cnt2+1;
else
    cnt2=0;
end
    
```

두 개의 카운터를 비교하면 cnt 1은 입력되는 펄스를

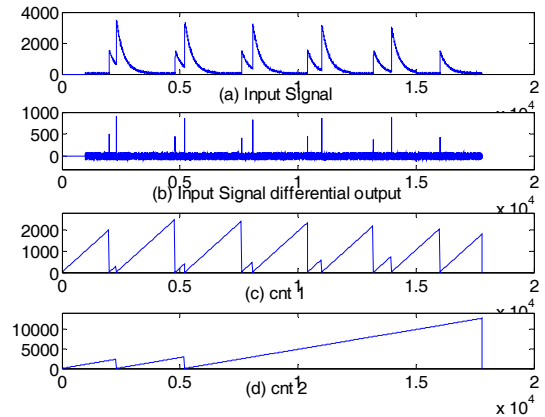


그림 6. (a) 입력신호, (b) 입력신호의 미분 값, (c) Cnt1, (d) Cnt2

Fig. 6. (a) Input Signal, (b) Input signal differential output, (c) Cnt1, (d) Cnt2.

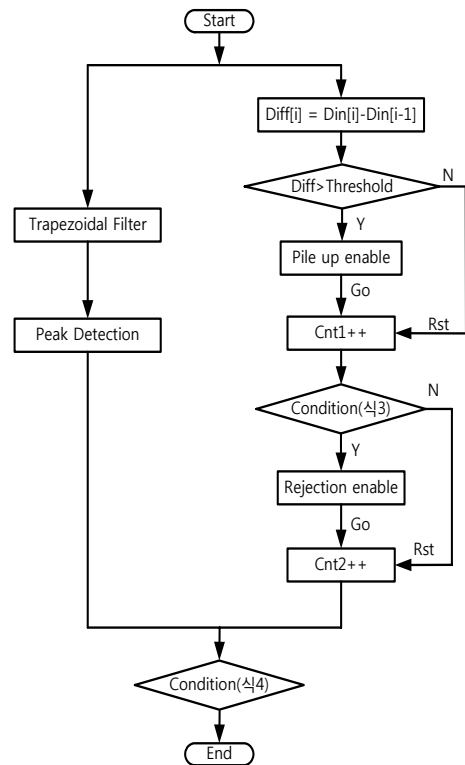


그림 7. 제안방법의 흐름도

Fig. 7. Flowchart of proposed method.

모두 검출하며 두 펄스의 간격 d 를 확인할 수 있고 cnt 2는 중첩펄스의 두 번째 펄스만 검출한다. 따라서 최대값 검출 알고리즘^[5]을 이용하여 생성되는 peak enable 신호와 cnt 2가 식(4)의 조건을 만족 시 중첩펄스의 최대값 검출 불가능한 부분을 제거한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{cnt2}(2) - \text{cnt2}(1) = 1 \\
 & \text{cnt2}(3) - \text{cnt2}(2) = 1 \\
 & \text{peak_en} = 1 \\
 & \text{cnt2}(1) > L + 64 \\
 & \text{cnt2}(2) > L + 64 \\
 & \text{cnt2}(3) > L + 64
 \end{aligned} \tag{4}$$

그림 6는 제안방법을 이용하여 얻은 시뮬레이션 결과이다. 그림 6(a)와 같이 펄스가 입력될 시 제안방법을 통해 펄스의 간격을 알 수 있는 cnt 1과 최대값 검출 불가능한 중첩펄스 제거를 위한 cnt 2를 얻을 수 있다. 그림 7는 제안 방법의 흐름도이다.

IV. 시뮬레이션 결과

그림 8, 9, 10은 식 (1)의 각 경우에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에 보인 바와 같이 중첩된 두 펄스의 간격 d 가 사다리꼴 상승부분 길이 k 보다 작거나 같을 경우 사다리꼴 필터의 출력은 정상적인 flat-top 부분을 보이지 않고 있으며 이를 제거하고 중첩펄스의 최대값 검출이 가능한 경우에만 최대값을 검출한다.

제안한 중첩펄스 처리방법은 최대값 검출 알고리즘과 같이 사용함으로써 중첩된 펄스의 간격을 정확히 계산할 수 있으며 왜곡된 사다리꼴 출력을 제거하여 중첩펄스를 더 효율적으로 검출하였다. 그림 8, 9, 10에서 각각 처음 두 경우는 펄스사이의 간격 d 가 k 보다 작기 때문에 중첩된 펄스로부터 최대값 검출이 불가능하며 나

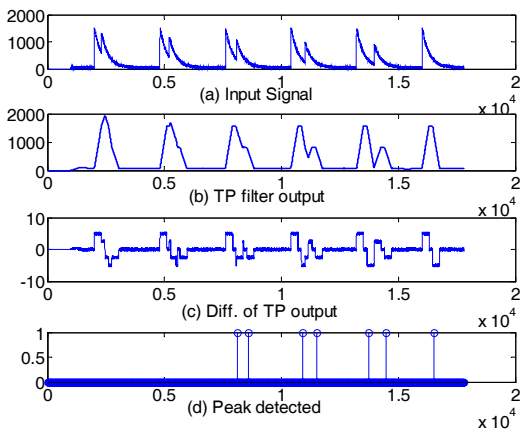


그림 8. 펄스 A>B 일 때의 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation results of pulse A>B.

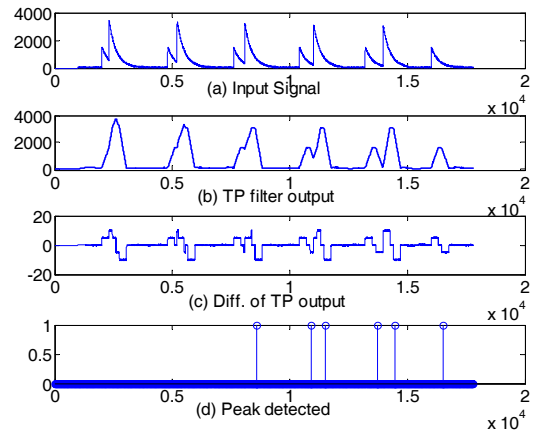


그림 9. 펄스 A<B 일 때의 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation results of pulse A<B.

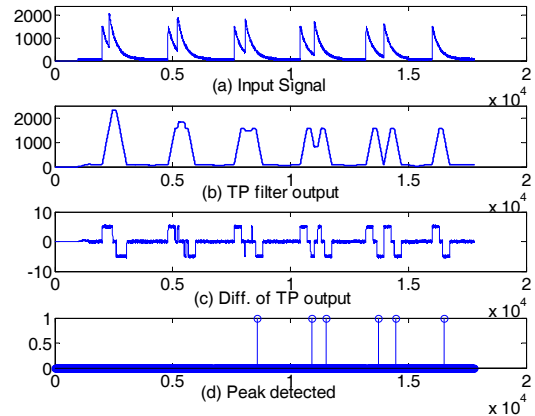


그림 10. 펄스 A=B 일 때의 시뮬레이션 결과
Fig. 10. Simulation results of pulse A=B.

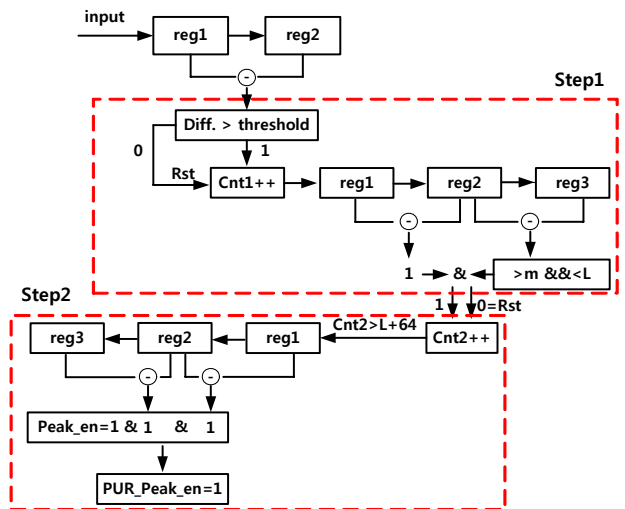


그림 11. 제안방법의 pile up 처리 하드웨어 구조
Fig. 11. Hardware architecture of proposed pile up processing block.

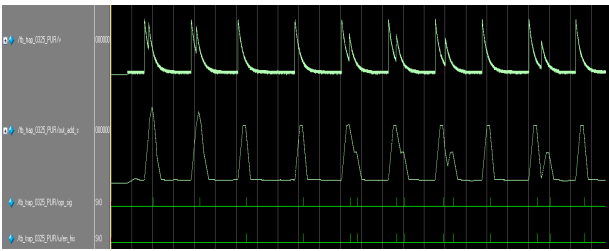


그림 12. 하드웨어 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Hardware simulation results.

머지의 경우는 제안한 알고리즘에 의해 최대값이 검출된다. k 값이 작은 경우 더 많은 중첩펄스로부터 최대값 검출이 가능하다.

그림 11은 제안한 방법의 하드웨어 구조이다. 두 개의 카운터와 몇 개의 레지스터를 이용하여 제안 방법을 하드웨어로 구현하였다. 하드웨어는 Verilog HDL로 설계하였고 검증하였다. 그림 12는 제안방법의 시뮬레이션 결과이며 MATLAB으로 얻은 결과와 동일하게 중첩펄스가 처리됨을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 사다리꼴 필터와 최대값 검출 알고리즘에 두 개의 카운터와 몇 개의 레지스터만을 추가한 중첩펄스의 효율적인 처리방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기존 중첩펄스 복원방법처럼 복잡한 회로가 필요하지 않으며 최대값 결정에 널리 쓰이는 사다리꼴 필터에 기반 하기 때문에 Ballastic deficit 현상을 피할 수 있는 등 사다리꼴 필터의 장점을 유지한다.

사다리꼴 필터의 k 값 등 파라미터 조절과 중첩펄스 처리 및 데이터 처리율과의 관계분석은 추후 연구해야 할 과제이다.

REFERENCES

- [1] Richard B. Mott, Ringoes, NJ, U. S. Patent 7,855,370 B2, 21.12.2010.
- [2] Robert H. Redus, Alan C. Huber, David J. Sperry, "Dead time correction in the DP5 digital pulse processor," *IEEE Conference Publication*, pp. 3416-3420, 2008.
- [3] M. Nakhostin, Zs. Podolyak, P. H. Regan, and P.M. Walker, "A digital method for separation and reconstruction of pile up events in germanium detectors," *AIP Journals &*

Magazines, pp. 103507-10357-5, 2010.

- [4] M. D. Haselman, J. Pasko, S. Hauck, T. K. Lewellen and R. S. Miyaoka "FPGA-based pulse pile-up correction with energy and timing recovery," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 1823-1830, Oct., 2012.
- [5] Cosimo Imperiale, and Alessio Imperialb, "On nuclear spectrometry pulses digital shaping and processing," in *Measurement*, vol., 30, Issue 1, pp. 49-73, 2011.
- [6] 박철암, 정진균 "XRF시스템용 효율적인 Trapezoidal 필터 및 최대값 검출 회로 설계," 전자공학회 논문지, vol. 50, no. 6, 2013(in press).

저 자 소 개



박 철 암(학생회원)
2010년 중국 연변대학교 정보통신학과 학사 졸업
2012년 전북대학교 전자공학부 석사 졸업.
2012년~현재 전북대학교 전자공학부 박사과정.

<주관심분야 : 통신, 신호처리, 반도체>



정 진 균(평생회원)
1985년 전북대학교 전자공학 학사 졸업.
1989년 미국 미네소타 주립대학 전기공학 석사 졸업.
1991년 미국 미네소타 주립대학 전기공학 박사 졸업.

<주관심분야 : 통신, 컴퓨터, 신호처리, 반도체>