

# PSD의 신호 처리를 위한 AM 변조 및 복조 회로

## Signal Processing Algorithm for a PSD Sensor using Amplitude Modulation/Demodulation

라 종 필\*, 신 명 관\*, 박 기 환\*

(Jong Pil La, Myung Kwan Shin and Kyi Hwan Park)

\*광주과학기술원 기전공학과(전화:(062)970-2391, 팩스:(062)970-2384, E-mail : khpark@kjist.ac.kr)

**Abstract** : The signal processing algorithm for a PSD(Position Sensitive Detector) using amplitude modulation/demodulation is addressed in this paper. Dark currents and external noises such as daylight and fluorescent lights are eliminated by using amplitude modulation/demodulation and a low pass filter. The proposed amplitude modulation/demodulation method for a PSD sensor is compared with pulse amplitude modulation method. The proposed amplitude modulation is proved to be more accurate and robust than PAM method by analysis and experiments. Multiple measurements using one PSD sensor by amplitude modulation/demodulation is also addressed. The power variation of light source is compensated by normalization process using a divider.

**Keywords** : PSD, Amplitude Modulation/Demodulation, Signal Processing

### I. 서 론

PSD 센서는 광센서의 일종으로 표면에 입사된 빛의 강도뿐만 아니라 그 입사된 위치에 따라 그 출력 전류 값이 변하는 성질을 이용하여 위치를 측정하는 센서이다. PSD 센서 표면의 P-N 접합부에 빛이 비균일하게 입사되면, 빛의 입사지점에서 광전류가 유도된다. 이 현상을 'Lateral Effect' 라고 한다[1][2]. 이 때 유도된 전류는 양쪽의 전극을 향해 흘러 가는데 PSD 센서의 표면의 저항이 균일하게 분포되어 있으므로, 양 전극에서 얻는 전류는 빛의 입사지점에서 그 전극까지 거리에 반비례한다. 이들 전류로부터 입사된 빛의 무게 중심점의 위치를 계산한다.

이와 같은 광센서를 사용함에 있어서 발생하는 여러 가지 문제들 중 하나는 암전류다. 암전류는 그 이름이 암시하듯이 빛에 의해 유도된 전류가 전혀 없는 상태에서도 발생하는 누설전류이다. 이러한 암전류는 원래의 전류 신호에 더해지는 방식으로 왜곡함으로써 측정오차의 원인으로 작용한다.

PSD와 같은 광센서를 사용함에 있어 발생하는 또 다른 문제로 외부광원에 의한 영향을 들 수 있다. 일반적으로 센서를 사용할 때 통상의 실험실 환경에서 사용되므로 외부 광원에 의한 영향을 피할 수 없다. 보통의 외부 광원으로는 백열등 형광등과 같은 인공조명과 태양광과 같은 자연광이 있다. 이러한 외부 광원은 일반적으로 주파수가 수백 Hz 이내이다.

PSD 센서를 사용함에 있어서 발생하는 이와 같은 여러 가지 문제를 해결하기 위하여 Wang은 PAM(Pulse Amplitude Modulation) 방법을 사용하였다[2].

그는 PSD 센서를 이용하여 자기부상 시스템에 구성하였는데, 사용된 PSD 센서의 구동주파수는 PAM 방식의 펄스형태의 신호로 인해 수십 kHz로 제한되는 단점이 있었다. 따라서 PSD 센서의 전체 대역폭이 구동주파수에 의해 수 kHz로 제한되었다. PAM 방법에 대해서는 다음 장에서 간략히 기술한다.

Qian 등은 하나의 PSD 센서를 이용하여 여러 점의 위치를 동시에 측정하는 방법을 제안하였다[3]. 같은 주파수로 구동되는 여러 개의 광원이 각기 다른 duty ratio를 가짐으로서 하나의 PSD 센서를 이용하여 여러 광원의 위치를 측정할 수 있었다. 그러나 이 방법도 PAM 방법을 사용하기 때문에 PAM 방법이 가지는 제약들을 가지고 있다.

Narayanan 등은 PSD 센서의 신호처리를 위하여 위상 변조/복조 방법을 사용하였다[4][5]. 이는 단일주파수 신호원에 의해 구동되는 광원이 PSD 센서의 표면에 입사될 때 그 위상지연이 위치에 따라 변하는 특성을 이용한 것이다. 그러나 이 방식은 선형성이 매우 나쁜 단점을 가진다. 위상 변조/복조 방식을 이용하여 하나의 PSD로부터 여러 광원의 위치를 측정하는 방법에 대해서도 기술하고 있다.

이 논문에서는 AM 변조/복조 방식을 이용한 PSD 센서의 신호처리 방식에 대해 기술하였다. PAM 및 위상 변조/복조 방법의 단점을 극복하기 위하여 연속적인 AM 변조/복조 방법이 소개되었다. 연속적인 AM 변조/복조는 PAM보다 넓은 대역폭을 가진다고 알려져 있고, 특히 외부광원에 더욱 강한 것으로 증명되었다. 또한 연속 AM 변조/복조 방식에서는 펄스 신호에 의해 발생하는 전원 잡음은 나타나지 않는다.

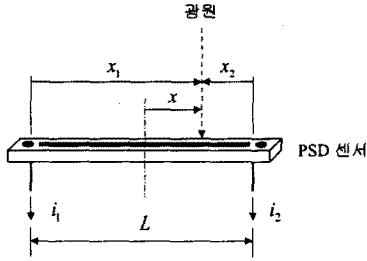


그림 1 PSD 센서의 모습

하나의 PSD로부터 여러 개의 광원의 위치를 측정하는 방식 또한 이 논문에서 소개되었다.

## II. PAM기법을 이용한 PSD센서의 신호처리

빛이 PSD센서에 투사되면, 광기전력이 발생하고 그것에 의해 광전류  $i_1$  과  $i_2$ 가 그림1과 같이 발생한다. 이상인 경우, PSD 표면에서 발생된 광기전력에 의해 생성되는  $i_1$ 는 광원 중심으로부터 전극까지의 거리  $x_i$ 에 반비례한다. 즉,

$$i_i = k_f I_s \frac{1}{x_i} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,  $k_f$  및  $I_s$ 는 각각 비례상수, 광원의 강도이다. 광원의 중심 위치  $x$ 와  $x_i$ 의 관계는 다음과 같다.

$$x = \frac{L}{2} \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서,  $L$ 은 PSD 센서의 길이이다. 식 (1)과 (2)로부터 광전류와 광원의 위치간의 관계를 아래 식과 같이 얻을 수 있다.

$$x = -\frac{L}{2} \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \dots\dots\dots(3)$$

광원의 출력변화에 의한 영향은 나눗셈 로직을 통한 표준화 작업에 의해 보상되고 이를 통해 센서의 중앙으로부터 위치  $x$ 가 측정된다.

### 2.2 Pulse Amplitude Modulation

위치 측정을 위해 사용된 광원 외에 형광등이나 햇빛 같은 외부광원에 의한 전류가 발생되는데, 이러한 의도하지 않은 광전류는 센서로부터 거리를 측정하는데 오차로 작용한다. 이러한 노이즈를 없애기 위한 방법중의 하나가 PAM 방법이다.

PAM방식에서는 광원이 사각파를 발생시키도록 변조된다. 이러한 사각파는 광원을 반복적으로 on/off시키면서 만들어질 수 있다. 광원이 꺼졌을 때, 광전류에는 광원에 의한 전류와 외부광원에 의한 전류가 같이 포함되어 있다. 그러나 광원이 꺼졌을 때는 외부광원에 의한 광전류만 발생하게 된다. 이 두 전류의 차는 순수하게 광원에 의해서만 발생되는 광전류이다. 광원을 변조시키기 위해서 LM555 펄스발생기가 사용되었다. 보통 광원의 변조주파수는 수십 kHz정도이다.

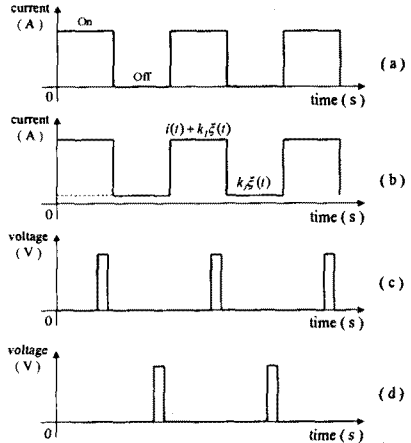


그림 2 PAM의 신호 흐름도

PAM의 신호 흐름도는 그림2와 같다. 광원의 구동신호는 그림2(a)와 같이 타이머 회로에서 발생한다. 구동신호는 증폭되어서 LED(light emitting diode)나 LD (laser diode)와 같은 광원으로 전달된다. 타이머 회로는 그림2(c)와 (d)에서처럼 샘플링 트리거 신호를 동시에 발생시키는데, 이 신호는 그림 2(b)의 센서 출력을 샘플링 하기 위한 시간을 결정한다.

센서의  $i$ 번째 전극에서 측정된 광전류  $i_i(t)$ 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_i(t) = k_f I_s \frac{1}{x_i(t)} + \xi(t), \dots\dots\dots(4)$$

$$2(n-1)T < t \leq (2n-1)T$$

여기서,  $n$ 은 정수이고,  $T$ 는 신호의 주기이다. 외부광원의 강도는  $\xi(t)$ 이고  $i$ 번째 전극에서 측정된 위치는  $x_i(t)$ 이다. 전체전류는 외부광원과 주광원에 의한 전류가 모두 포함되어 있다.

광원이 꺼졌을 때 측정된 전류는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$i_i(t) = k_f \xi(t), \dots\dots\dots(5)$$

$$(2n-1)T \leq t < 2nT$$

이 전류는 단지 외부광원에 의해 유도된 값이다.

식(4)와 (5)에 의한 전류가 LF398과 같은 샘플링 장치로 샘플 된다면 외부광원에 의한 전류는 간단히 뺄셈에 의해 제거될 수 있다. 그 연산은 식(6)과 같다.

$$i_i(t)^* |_{t=(2n-1)T} - i_i(t)^* |_{t=2nT} = k_f I_s \frac{1}{x_i [(2n-1)T]^*} + k_f \xi [(2n-1)T]^* - k_f \xi (2nT)^* \dots\dots\dots(6)$$

여기서, \*는 주어진 어떤 순간에 샘플된 데이터를 말한다. 외부노이즈  $\xi(t)$ 는 샘플링 주파수에 비해 느리게 변한다고 가정한다. 그러므로 우리는 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$k_f \xi [(2n-1)T]^* - k_f \xi [(2n)T]^* \approx 0 \dots\dots\dots(7)$$

그 러 므 로

$$i_s(t)^* |_{t=(2n-1)T} - i_s(t)^* |_{t=2nT} = k_f I_s \frac{1}{x_s [(2n-1)T]^*} \dots\dots\dots(8)$$

이 된다. 샘플된 전류는 순수하게 주어진 광원에 의해 발생된 전류만을 포함하게 된다. 따라서 외부광원에 의한 노이즈 전류는 제거된다.

### III AM 변조/복조 방법을 이용한 신호처리

PAM 방식은 많은 부차적인 문제를 발생시키는데, 예컨대 leakage 문제와 비선형성 등을 들 수 있다.

식(7)은 다른 시간에 획득된 잡음이 근사적으로 같다는 가정하에서 성립된다. 즉, 외부 잡음이 매우 느리게 변한다고 가정한다. 그러나, 실제로 120Hz 형광등 잡음의 경우에 그 속도가 비교적 빠르므로, 완전히 제거될 수는 없다. 예를 들어 25kHz의 구동 주파수를 갖는 PAM 방법을 사용할 때 잡음 제거비는 1/50이다.

식(4)와 (5)에서 비례상수  $k_f$ 는 동일하다고 가정하였는데, 실제로는 그 값이 전체 광량에 비례한다. 따라서, 이러한 비선형성에 의해서 오차가 발생할 수 있는데, PSD에서  $k_f$ 는 광량에 대해서 감소한다. 따라서 본 논문에서는 PAM 외에 새로운 신호처리 방법을 제안한다.

#### 3.1 AM 변조

또 다른 방법은 광원의 주파수를 외부 노이즈가 가장 작은 영역으로 옮기는 것이다. 위치신호의 주파수는 구동 주파수  $\omega_c$ 의 양쪽에 존재하게 된다.

사인파로 변조된 광원의 복사조도  $I_s(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_s(t) = d + m \sin \omega_c t \dots\dots\dots(12)$$

여기서,  $d$ 는 DC-offset이고,  $m$ 은 주파수가  $\omega_c$ 인 사인파 신호의 크기이다. 변조된 빛이 음수나 비연속성을 가지는 것을 막기 위해  $d$ 는  $m$ 보다 커야 한다. 복사조도가  $\xi(t)$ 인 외부광원의 노이즈가 존재할 때, PSD 센서의  $i$ 번째 전극에서 발생하는 전류는 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_s(t) = k_f [d + m \sin(\omega_c t + \alpha)] \frac{1}{x_s(t)} + k_f \xi(t) \dots\dots(13)$$

여기서,  $\alpha$ 는 PSD의 전파속도와 신호처리회로에 의한 위상지연이다. 외부 노이즈와 DC-offset에 의해 발생된 전류를 없애기 위해 식(13)에 의해 주어진 신호를  $\omega_c$ 를 중심주파수로 하는 밴드패스필터에 입력한다. 그러므로 광원의 구동주파수는 밴드패스필터에 의해 제거하기 쉽도록 노이즈 주파수보다 높은 주파수를 가지도록 설계한다. 그래서 최종 신호는 주광원에 의해 발생된 전류만을 포함한다. 그 식은 다음과 같다.

$$i_s(t) = k_f m \frac{1}{x_s(t)} \sin(\omega_c t + \alpha) \dots\dots\dots(14)$$

#### 3.2 AM 복조

$i_s(t)$ 를  $\sin(\omega_c t)$ 에 곱한다면 다음과 같이 된다.

$$i_s(t) \sin \omega_c t = k_f m \frac{1}{x_s(t)} \sin \omega_c t \sin(\omega_c t + \alpha) \dots\dots(15)$$

$$= \frac{k_f m}{2} \frac{1}{x_s(t)} [\cos \alpha - \cos(2\omega_c t + \alpha)]$$

구동 주파수에 의한  $2\omega_c$ 를 저역 통과필터로 제거하면

$$i_s(t) \sin \omega_c t = \frac{k_f m}{2} \frac{1}{x_s(t)} \cos \alpha \dots\dots\dots(16)$$

를 얻을 수 있다. 마찬가지로,

$$i_s(t) \cos \omega_c t = \frac{k_f m}{2} \frac{1}{x_s(t)} \sin \alpha \dots\dots\dots(17)$$

를 얻을 수 있다. 식 (16)와 (17)에서  $\alpha$ 에 의한 영향을 없애기 위해  $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ 의 관계를 이용한다. 주어진 광원에 의한 전류  $i_s(t)$ 는 식(18)과 같이 식(17)의 제곱근을 계산하여 얻을 수 있다. 식(18)에서 보는 바와 같이 위상지연에 대한 의존성은 신호에서 나타나지 않는다.

$$\sqrt{[i_s(t) \sin \omega_c t]^2 + [i_s(t) \cos \omega_c t]^2} \dots\dots\dots(18)$$

$$= \frac{k_f m}{2} \frac{1}{x_s(t)}$$

#### 3.4 AM 변조/복조를 이용한 다중 측정

각기 다른 가진 주파수를 가지는 여러 개의 광원을 이용하여 각각의 빛의 위치를 측정할 수 있다. 각각  $\omega_{1,c}$ 와  $\omega_{2,c}$ 의 주파수를 가지는 광원에 의해 유도된 전류로부터 각각의 주파수를 분리하면 아래와 같다.

$$i_s(t) \sin(\omega_{1,c} t) = \frac{k_f m_1}{2} \frac{1}{X_{1,i}} \cos \alpha_1$$

$$i_s(t) \cos(\omega_{1,c} t) = \frac{k_f m_1}{2} \frac{1}{X_{1,i}} \sin \alpha_1 \dots\dots\dots(19)$$

$$i_s(t) \sin(\omega_{2,c} t) = \frac{k_f m_2}{2} \frac{1}{X_{2,i}} \cos \alpha_2$$

$$i_s(t) \cos(\omega_{2,c} t) = \frac{k_f m_2}{2} \frac{1}{X_{2,i}} \sin \alpha_2$$

이들 신호로부터 빛이 입사된 각각의 위치  $X_1$ 과  $X_2$ 를 얻을 수 있다.

### IV. 실험 및 결과

그림 3은 본 실험에서 사용된 신호처리부의 블록도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 Hamamatsu사에서 생산되는 일차원 PSD S1352가 사용되었다. S1352의 파장의 범위는 가시광선영역과 적외선영역의 일부를 포함하는 320nm에서 1100nm이다. 감도가 가장 좋은 파장은 920nm이다. 880nm의 파장을 가지는 레이저 다이오드 HFE4082-321이 실험에 사용되었다. 일반적으로 LD는 응답이 빠르고, 간단한 렌즈의 조합을 통해 작은 크기로 집광할 수 있다. 사용된 광원의 DC-offset은 1.2mW이고 변조크기는 0.5mW이다. 일반

적인 AM 변조는 순수 사인이나 코사인 함수에 의해 이루어진다. 그러나 빛의 강도는 음수일 수 없으므로

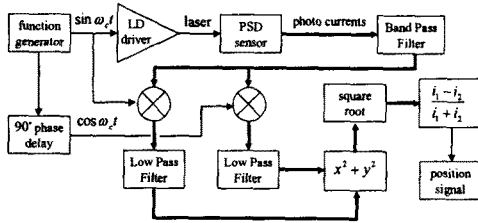


그림 3 AM 변조/복조 방법을 이용한 PSD 센서 신호처리의 블럭도

순수하게 사인파와 DC-offset이 더해진 형태로 변조한다. 따라서, PSD에 의해 측정된 전류 신호는 광원의 DC-offset과 잡음에 의한 전류를 포함한다. 고역통과 필터를 사용하여 DC-offset과 저주파 잡음을 제거한 후 순수한 AM 변조 신호를 얻을 수 있다.

믹서에 의해서 발생된 캐리어 신호는 저역통과 필터로 제거된다 3차 butterworth 필터가 저역통과 필터로 사용되었다. 믹서의 곱셈연산을 위해 AD633JN이 사용되었다.

PSD의 증상으로부터 측정된 절대위치는 식(3)을 이용하여 계산될 수 있다. 가산과 감산 작용은 OP27과 고정밀도의 저항들에 의해 수행된다. 연산작용의 정확성을 높이기 위해 개체간 오차가 0.01% 미만인 되도록 저항을 선정하여 사용하였다.

그림 4와 그림 5는 각각 위치신호와 그것의 비선형성을 나타낸다. PSD와 AM 변조/복조 시스템을 포함한 측정시스템은 80dB의 신호대 잡음비를 가지고 ±0.5%의 비선형성을 가진다.

### V. 결 론

PSD센서의 AM 변조/복조에 대해서 소개하였다. 외부노이즈와 주변환경의 변화에 대한 강인성을 증가시키기 위한 신호처리 알고리즘이 논의되었다. AM 변조/복조 알고리즘은 PAM방식과 비교 설명되었다. 본 연구에서의 얻은 신호의 비선형성은 ±0.5% 이하이고, 신호대 잡음비는 80dB이상이다.

### 참 고 문 헌

- [1] W. Schottky, "Ueber den Entstehungsort der Photoelektronen in Kupfer-Kupferoxydul-photozellen" Phys. Z., Vol.31, pp.913-925, 1930.
- [2] Wanjun Wang, "Design of an Optically Based Sensing System for Magnetically Levitated Micro-automation Systems", Dissertation for Ph.D., The University of Texas at Austin, 1989.
- [3] Dahong Qian, Wanjun Wang, Ilene J. Busch-Vishniac, and A. Bruce Buckman "A Method for

### Measurement of Multiple Light Spot Positions on One Position-Sensitive Detector(PSD)", IEEE

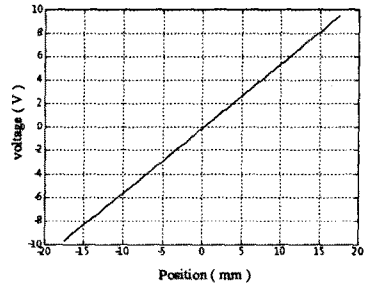


그림 4 AM 변조/복조 방법을 이용하여 측정된 PSD의 위치 신호

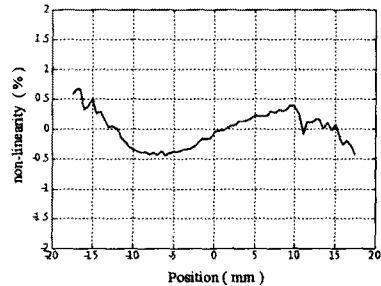


그림 5 AM 변조/복조 방법을 이용하여 측정된 PSD의 비선형성

Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol.42, No.1, pp.14-18, Feb. 1993.

[4] Chellappan Narayanan, A. Bruce Buckman, and Ilene Busch-Vishniac, "Position Detection of Multiple Light Beams using Phase Detection", IEEE Transaction of Instrumentation and Measurement, Vol.43, No.6, pp.830-836, Dec. 1994.

[5] Chellappan Narayanan, "Position Dependence of the Transient Response of a Position-Sensitive Detector Under Periodic Pulsed Light Modulation", IEEE Transaction on Electron Device, Vol.40, No.9, pp.1688-1694, September 1993.

[6] AD633, C00786a-0-12/00(rev. D), Analog Device Ltd. 2000, "User's Manual", www.analog.com

[7] A. Cabrita, J. Figueredo, L. Pereira, V. Silva, D. Brida, E. Fortunato, R. Martins, "Performance of a-Six : Clx :H Schottky barrier and pin diodes used as position sensitive detectors, Journal of Non-Crystalline Solids 299-302, pp.1277-1282, 2002.