

# 수광각 다이버시티를 이용한 무선광 검출기

## A Wireless Optical Detector using Angle Diversity

이 성 호

Seong-Ho Lee

### 요 약

본 논문에서는 0~360도까지의 모든 방향으로부터 신호광을 수신할 수 있는 수광각 다이버시티 무선광검출기를 구성하였다. 8개의 포토다이오드를 사용하여 수광각 다이버시티를 구성하고 수광각에 따른 검출전압의 변동을 줄이기 위하여 디지털가변저항을 사용하여 출력전압을 안정화하였다. 안정화상태에서 수광각에 따른 전압 변동은 최대검출전압의 약 1/10 이내로 유지되었다. 이 구조는 무선광연결에서 전방향수신기를 구현하는 데에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

### Abstract

In this paper, an angle diversity wireless optical detector is realized that can receive the optical signal at an angle from 0 to 360 degrees. Eight photodiodes constitute an angle diversity receiver, and in order to reduce the voltage variation with the incident angle, the optical detector is stabilized with a digital potentiometer. In a stabilized state, the voltage variation is kept within 1/10 of maximum voltage. This configuration is very useful in constructing an omni-directional receiver in a wireless optical interconnection.

Key words : 수광각 다이버시티, 전압안정화, 무선광연결

### I. 서 론

실내의 무선광연결은 송수신부의 구성이 간단하고, 기존의 무선통신과 상호간섭이 적으며, 신호광의 빔이 존재하는 영역에서만 수신 가능하여 도청의 가능성이 적은 장점을 가지고 있어 이에 대한 활용이 점점 증가하고 있다. 무선광연결의 활용분야로는 근거리 고층건물간 고속전송로 구축, 실내에서 컴퓨터와 주변장치간에 데이터 및 영상의 무선전송, 실내의 방송시스템에서 음성의 무선전송, 그리고 적외선 원격제어장치 등에 이용하는 예가 많아지고 있으며 이에 관련된 연구도 활발하다<sup>[1]-[7]</sup>.

무선광연결은 광원과 광검출기로 구성되며, 광원

으로부터 방사되는 신호광은 직진성이 강하기 때문에 신호광의 진행방향과 광검출기의 표면 방향이 잘 일치하여야 광결합계수가 높아지고 신호검출이 용이하다. 신호광의 진행방향과 광검출기의 표면 방향 사이에 각도  $\phi$ 를 이루고 있을 때 광결합계수는 일반적으로  $\cos \phi$ 에 비례하므로 입사광이 광검출기의 표면과 이루는 경사각이 심할수록 광결합계수가 감소한다. 따라서 전송효율이 높은 광연결을 구성하기 위해서는 신호광의 진행방향으로 광검출기를 잘 정렬하여야 한다. 광검출기가 놓인 위치에 신호광이 여러 방향으로부터 입사하는 경우에는 2개 이상의 광검출기를 사용하여 서로 다른 방향에서 오는 신호광을 수신할 수 있도록 수광각 다이버시티(Angle

「이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.」

서울산업대학교 전자정보공학과(Department of Electronic & Information Engineering, Seoul National University of Technology)

· 논문 번호 : 20021001-122

· 수정완료일자 : 2002년 11월 18일

diversity) 광검출기를 사용할 수 있다<sup>[1]</sup>. 수광각 다이버시티 구조에서는 여러 방향으로부터의 신호광을 수신하지만 일반적으로 수광각에 따른 검출전압의 변동이 존재한다.

본 논문에서는  $\phi=0\sim 360^\circ$  범위의 모든 방향으로부터 신호광을 수신하여 거의 균일한 출력전압을 얻을 수 있는 수광각 다이버시티 구조를 새로이 제안하고 실험하였다. 이 구조에서는 8개의 포토다이오드를 사용하여  $45^\circ$  간격으로 원주상에 배열하고 부하저항으로 디지털 가변저항을 사용하여 저항값을 제어함으로써 출력전압을 일정하게 만들어준다. 이 광검출기는 수평면 상의 모든 방향으로부터 신호광을 균일하게 수신할 수 있으므로 수신부에서 광검출기를 특정한 방향으로 정렬할 필요가 없다. 따라서 실내의 무선광연결을 구성할 때 위치가 서로 다른 여러 개의 광원으로부터 신호광을 수신하는 전방향 광검출기로 활용할 수 있다.

## II. 수광각 다이버시티 광검출기의 구성

그림 1은 8개의 포토다이오드(PD)를 사용하여 구성된 수광각 다이버시티 광검출기를 나타낸다. 입사광의 단면 강도분포가 가우시안 분포인 경우, 빔의 중심으로부터 방사형의 거리  $r$ 에 따른 강도는  $P(r) = P_0 \exp(-2r^2/w^2)$ 으로 쓸 수 있다<sup>[8]</sup>. 여기에서  $P_0$ 는 빔의 중심에서의 강도이며,  $w$ 는 빔스폿의 크기(spot size)이다.

그림 1의 수광각 다이버시티 광검출기에서는 8개의 PD가 반경  $d$ 인 원주상에  $45^\circ$  각도차를 가지고 배열되어 있으며, 이들은 원의 접선과 수직방향으로 밖으로 향한다. 8개의 PD는 전기적으로 병렬연결되어 있으며 1개의 부하저항  $R_L$ 을 통하여 신호전압이

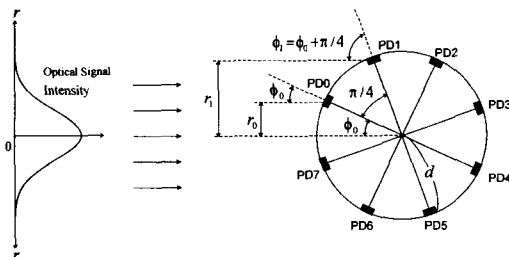


그림 1. 수광각 다이버시티를 이용한 광검출기  
Fig. 1. An optical detector using angle diversity.

검출된다. 따라서 검출전압은 개개의 PD에서 생성된 광전류의 합과 부하저항의 곱이 된다. 이 때 각 PD에서 생성되는 광전류는 수광각과 PD의 위치에 의존한다. 신호광의 중심이 수광각 다이버시티 광검출기의 중심으로 향하고, 광원으로부터 광검출기까지의 거리가 포토다이오드배열의 반경  $d$ 보다 현저히 큰 경우에는 각 PD의 위치에서 신호광의 진행방향은 평행으로 간주할 수 있으며, 수광각 다이버시티의 검출전압  $V_{out}$ 을 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{out} &= R_L \sum_{n=0}^7 i_n = R_L \sum_{n=0}^7 \rho S P(r_n) \cos(\phi_n) \\ &= R_L \rho P_0 S \sum_{n=0}^7 \cos(\phi_n) \times \exp[-2r_n^2/w^2] \\ &= V_0 \sum_{n=0}^7 \cos(\phi_0 + n\pi/4) \times \exp[-2d^2 \sin^2(\phi_0 + n\pi/4)/w^2] \\ &; -\pi/2 < \phi_n < \pi/2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $i_n$ 은  $n$ 번째 포토다이오드(PD <sub>$n$</sub> )에서 발생한 광전류이며,  $R_L$ 은 부하저항,  $\rho$ 는 포토다이오드의 응답도,  $S$ 는 포토다이오드의 수광면적이다.  $V_0$ 는 입사광이 포토다이오드의 표면에 수직으로 입사하는 경우에 1개의 PD에서 발생하는 최대검출전압이며,  $V_0 = R_L \rho P_0 S$ 이다.  $\phi_n$ 은 PD <sub>$n$</sub> 의 방향과 신호광의 진행방향 사이에 이루는 각도이며  $\phi_n = \phi_0 + n\pi/4$ 이다. 여기에서  $\phi_0$ 는 PD<sub>0</sub>와 신호광의 진행방향 사이에 이루는 각도이다.

$r_n$ 은 PD <sub>$n$</sub> 이 신호광의 중심으로부터 벗어난 거리이며,  $r_n = d \sin(\phi_0 + n\pi/4)$ 의 관계를 가진다. 수식 (1)에서 PD <sub>$n$</sub> 의 광전류  $i_n$ 은  $\cos(\phi_n) > 0$ 인 범위, 즉  $-\pi/2 < \phi_n < \pi/2$ 인 영역에서만 PD <sub>$n$</sub> 에서의 광전류가 생성되며,  $\phi_n > \pi/2$  또는  $\phi_n < -\pi/2$ 일 때는 PD <sub>$n$</sub> 과 신호광 사이에 이루는 각도가  $90^\circ$ 보다 커서 PD <sub>$n$</sub> 의 뒷면으로 입사하는 경우가 되므로 이때에는  $i_n = 0$ 가 된다.

그림 2는 8개의 포토다이오드를  $45^\circ$  간격으로 배열한 수광각 다이버시티 구조에서 신호광의 수광각  $\phi_0$ 에 따른 출력전압의 변화를 수식 (1)에 따라 도시한 것이다.

여기에서  $\phi_0$ 는 입사광의 진행방향과 PD<sub>0</sub>의 방향 사이에 이루는 각도이다. 포토다이오드의 수가 8개

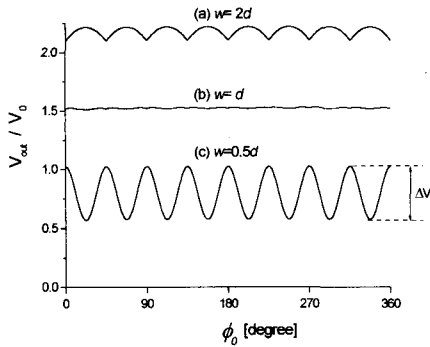


그림 2. 수광각에 따른 출력전압의 변화  
Fig. 2. Output voltage variation with incident angle.

이므로  $\phi_0$ 의 증가에 따라  $45^\circ$ 를 주기로 하여 검출 전압의 크기는 증가와 감소를 반복한다. 이 때 검출 전압의 최대값과 최소값의 차이  $\Delta V = V_{out(max)} - V_{out(min)}$ 는 신호광의 스폿의 크기( $w$ )에 따라 다르다. 그림 2에서 곡선 (a), (b), (c)는 각각  $w=2d$ ,  $w=d$ ,  $w=0.5d$  일 때  $\phi_0$ 에 따른 출력전압을 나타내며,  $d$ 는 그림 1의 PD-배열에서 원주반경을 나타낸다.

그림 3은 검출전압의 변화폭  $\Delta V$ 가 신호광의 스폿 크기( $w$ )에 따라서 변화하는 모양을 나타낸다. 실선의 그래프는 수식(1)을 사용하여  $\Delta V$ 를 계산한 값이고, 부호(■)는 실험을 통하여 측정한 결과이다.

$w/d < 1$ 인 영역에서는  $w/d > 1$ 인 영역에 비하여

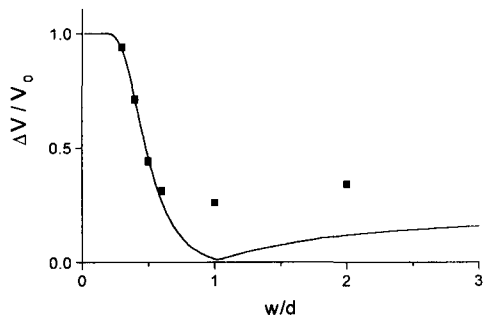


그림 3. 스폿크기와 전압변동의 관계  
— : 계산값  
■ : 측정값  
Fig. 3. The relation between spot-size and voltage variation.  
— : Calculated result  
■ : Measured result

상대적으로 수광각에 따른 검출전압의 변화가 크다.  $w/d < 1$ 일 때는 신호광 빔스폿의 크기  $w$ 가 증가함에 따라  $\Delta V$ 가 감소하는 경향을 보이다가  $w/d=1$  부근에서  $\Delta V$ 가 최소가 된다.  $w/d > 1$ 인 영역에서는  $w$ 가 증가함에 따라  $\Delta V$ 가 완만히 증가하고  $\Delta V/V_0 \approx 0.2$ 로 근접하면서 거의 일정한 값을 유지한다. 실험에서는  $\Delta V/V_0 \approx 0.3$  정도로 근접해 가는 경향을 보였다.

계산값과 실험값을 비교할 때,  $w/d$ 의 증가에 따라  $\Delta V/V_0$ 의 변화경향은 유사하지만 그 값에 차이를 보이는 것은 레이저다이오드로부터 방출되는 신호광 빔의 내부에서 작은 명암이 존재하는 경우가 많으며, 설치된 포토다이오드의 응답도의 미소한 차이, 그리고 설치위치와 방향의 미소한 차이 때문에 실험값에서는 계산결과보다 출력전압의 변동량이 약간 큰 경향을 보였다. 수광각 다이버시티구조에서 사용한 포토다이오드의 수가 많을수록 수광각에 따른 검출전압의 변동량은 일반적으로 감소하지만, 본문에서는 검출전압의 변동량을 더욱 줄이고  $\phi_0=0 \sim 360^\circ$ 의 모든 각도에서 균일한 검출전압을 얻기 위하여 PD-배열의 부하저항으로 디지털가변저항을 사용하여 출력전압을 안정화하였다.

### Ⅲ. 수광각 다이버시티 광검출기의 출력전압 안정화

수광각 다이버시티 광검출기에서 수광각  $\phi_0$ 에 따른 출력전압의 변동을 안정화하기 위한 실험장치의 구성도는 그림 4(a)이며, 여기에서 점선으로 표기한 전압안정화 회로의 연결 구성도는 그림 4(b)이다.

그림 4(a)에서 2개의 마이크로컨트롤러간에 UART단자를 통하여 19.2 kbps의 전송속도로 문자를 전송하기 위한 무선광연결을 구성하였다. 송신부로 사용한 마이크로컨트롤러의 UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)로부터 출력되는 신호를 사용하여 레이저다이오드를 강도변조하여 송신하고, 수신부에서는 수광각 다이버시티구조의 광검출기를 통하여 검출되는 신호를 수신부 마이크로컨트롤러의 UART단자에 연결하였다. 신호광을 발생시키는 광원은 800 nm의 파장을 가지며 바이어스 전류 70 mA에서 약 10 mW의 광출력을 가지는

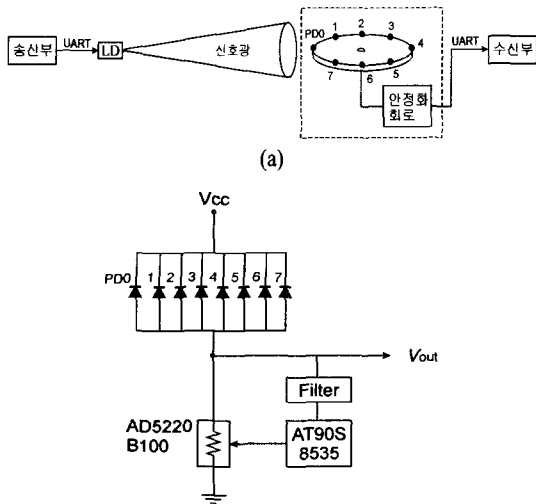


그림 4. 출력전압 안정화 실험장치 구성도  
 (a) 실험장치 구성도  
 (b) 출력전압 안정화 회로  
 Fig. 4. Experimental setup for voltage stabilization.  
 (a) Experimental setup  
 (b) Circuit for voltage stabilization

GaAs 레이저다이오드를 사용하였다. 광원으로부터 약 2 m 되는 지점에 그림 1의 수광각 다이버시티구조를 가지는 광검출기를 설치하여 신호광을 수신하였다.

그림 4(b)에서 병렬로 연결된 8개의 포토다이오드(PD0~PD7)는 그림 4(a)에서 보인 바와 같이 반경 1.5 cm를 가진 원형 회전자의 가장자리에 원의 접선과 수직방향을 향하도록 설치되어 있다. PD-배열에 사용한 포토다이오드는 모두 0.8 μm 파장에서 0.5 A/W의 응답도를 가지는 Si 포토다이오드를 사용하였다. 8개의 포토다이오드에서 생성된 광전류는 한 개의 부하저항으로 모아지고 이 부하저항의 양단전압이 출력전압  $V_{out}$ 이 된다.  $V_{out}$ 의 진폭변화를 감지하기 위하여 필터를 통과한 후에 마이크로컨트롤러 AT90S8535의 AD 변환단자에 입력된다. 이 필터는 신호광의 변조주파수와 일치하는 중심주파수를 가진 대역통과필터와 Peak-Detector, 그리고 저역통과필터로 이루어져 있다. 이 필터는 신호광의 AC 진폭을 DC 레벨로 변화시키기 위하여 사용한 것이다.

마이크로컨트롤러에서는 출력전압( $V_{out}$ )과 기준값( $V_{ref}$ )을 비교하여  $V_{out} > V_{ref}$ 이면 디지털가변저

항을 감소시키고, 그 반대가 되면 디지털가변저항을 증가시킨다. 따라서 부하저항으로 사용되고 있는 디지털가변저항의 크기는 출력전압  $V_{out}$ 의 변화를 억제하는 방향으로 증감하게 된다. 이 디지털가변저항은 Analog Devices사의 AD5220-B100이며, 칩선택 신호(CS)와 클럭신호(CLK), 그리고 증가/감소를 지정하는 (U/D)신호를 입력신호로 하고, 100 kΩ의 저항값을 128단계로 나누어 한 개의 클럭펄스당 약 780 Ω씩 전기적으로 증가하거나 감소시킬 수 있는 IC형 가변저항이다.

그림 5는 PD-배열에 고정부하저항 50 kΩ을 사용한 경우와 디지털가변저항을 사용하여 출력전압을 제어한 경우에 수광각  $\phi_0$ 의 변화에 따른 출력전압의 변동을 측정된 결과이다.

수광각에 따른 출력전압의 변동을 측정하기 위하여 원주형인 PD-배열의 중심을 스텝핑모터의 회전축에 고정하고 모터를 1.8°씩 규칙적으로 회전시키면서 출력전압을 기록하였다. 그림 5(a)는 고정부하저항을 사용한 경우이며 수광각  $\phi_0$ 에 따른 출력전압의 변동량이 약 0.7 V인 상태이다. 이 때 수신부에서 신호광의 스폿크기는 광검출기의 반경의 약 1/2인 상태이다. 이 상태에서 수광각의 증가에 따른 검출전압의 주기적 변화가 그림 2(c)와 달리 45°의

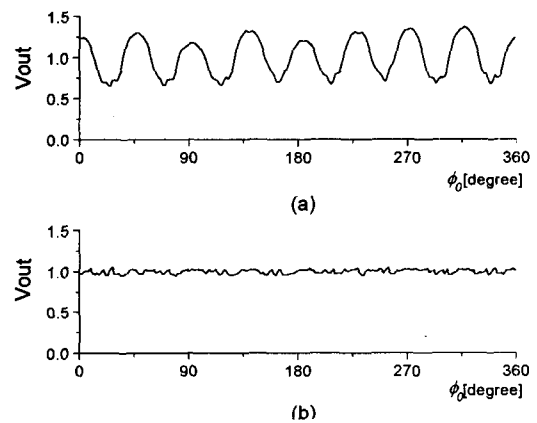


그림 5. 수광각에 따른 출력전압의 변화  
 (a) 고정부하저항을 사용한 경우  
 (b) 디지털가변저항을 사용한 경우  
 Fig. 5. Output voltage variation with incident angle.  
 (a) With a fixed load resistor  
 (b) With a digital potentiometer

한 주기 내에서 미세한 변동상태가 나타나는 것은 각 포토다이오드에서의 미소한 응답도의 차이와 신호광의 내부의 단면강도분포에서 작은 명암이 존재하기 때문이다.

그림 5(b)는 디지털가변저항을 사용하여 출력전압의 변화를 제어하는 상태이며, 수광각에 따른 출력전압의 변동량이 약 0.1 V 이내로 안정화된 상태이다. 이 상태에서는  $\phi_0 = 0 \sim 360^\circ$  범위에서 어느 방향으로부터 신호광이 수신되어도 출력전압이 거의 일정함을 볼 수 있다. 안정화 상태에서 약 0.1 V의 출력전압의 변화량이 남아 있는 것은 출력전압이 기준값 1 V를 유지하도록 디지털가변저항을 제어하는 과정에서 1 step 당 변화량(약 780  $\Omega$ )의 증감에 의하여 나타나는 결과이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는  $\phi_0 = 0 \sim 360^\circ$  범위의 모든 방향에서 신호광을 수신할 수 있는 수광각 다이버시티 구조의 광검출기를 구성하고 수광각에 따른 출력전압의 변동량을 간단한 수식을 세워서 계산하고 실험으로 측정하였다. 또한 수광각에 따른 출력전압의 변동을 줄이고 모든 수광각에서 거의 균일한 출력전압을 갖도록 디지털 가변저항을 사용하여 출력전압을 안정화하였다. 빔 스폿의 크기가 PD-배열의 반경의 약 1/2이 될 때, 고정부하저항을 사용한 경우 수광각에 따른 전압변동량이 약 0.7 V이었으나, 출력전압의 안정화 상태에서는 전압변동량이 약 0.1 V 이내로 감소하여  $\phi_0 = 0 \sim 360^\circ$ 의 모든 방향에 대하여 비교적 평탄한 검출전압을 유지하였다.

이와 같이 출력전압이 안정화된 수광각 다이버시티 광검출기는 그림 6과 같이 여러 개의 광원으로부

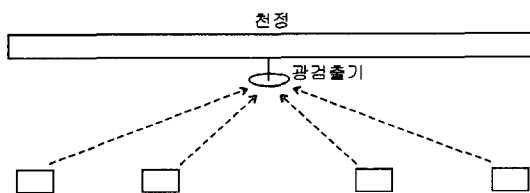


그림 6. 실내무선광연결에 활용하는 예  
Fig. 6. Application example in a wireless optical interconnection.

터 신호광을 수신하는 경우에 광검출기의 방향을 별도로 정렬하지 않아도 균일한 출력전압을 얻을 수 있는 전방향 광검출기로 활용할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Joseph M. Kahn, John R. Barry, "Wireless infrared communications", *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, 1997.
- [2] M. Street, P. N. Stavrinou, D. C. O'Brien and D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems-a review", *Optical and Quantum Electronics*, 29, pp. 349-378, 1997.
- [3] 이성호, "무선광연결에서 근사적 평균잡음검출을 이용한 광잡음 감소", 한국전자과학회논문지, 11(2), pp. 228-233, 2000년 2월.
- [4] 이성호, "무선광연결에서 편광판을 이용한 광잡음 감소", 한국전자과학회논문지, 11(3), pp. 365-371, 2000년 4월.
- [5] 이성호, "무선광연결에서 신호광에 자동정렬하는 차동검출기", 한국전자과학회논문지, 11(5), pp. 822-829, 2000년 8월.
- [6] 이성호, "디지털가변저항을 이용한 무선광 검출전압의 안정화", 한국전자과학회논문지, 13(6), pp. 560-565, 2002년 7월.
- [7] 이성호, "무선광 차동검출기에서 디지털가변저항을 이용한 잡음광의 감소", 한국전자과학회논문지, 13(6), pp. 599-604, 2002년 7월.
- [8] Joseph C. Palais, *Fiber optic communications*, Prentice Hall, pp. 47, 1998.

이 성 호



1957년 8월 12일생  
1980년 2월: 한국항공대학 전자공학과 (공학사)  
1989년 2월: 한국과학기술원, 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1993년 2월: 한국과학기술원, 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월~현재: 서울산업대학교 전자정보공학과 부교수

[주 관심분야] 광통신, 초고주파회로