韓國電磁波學會論文誌 第13卷 第6號 2002年 7月 論文 2002-13-6-08

디지털가변저항을 이용한 무선광 검출전압의 안정화

Voltage Stabilization of a Wireless Optical Detector using a Digital Potentiometer

이 성 호

Seong-Ho Lee

요 약

본 논문에서는 무선광연결에서 사용하는 광검출기의 위치가 신호광의 중심으로부터 이탈되어 발생할 수 있는 검출전압의 변동을 디지털가변저항을 이용하여 안정화한다. 검출전압의 안정화가 가능한 최대이탈거리를 계산하고, 검출전압의 안정화 동작을 실험적으로 확인하였다. 이 안정화 방법은 신호광 출력이나 빔 진행방향의 미소한 변화 또는 광검출기의 위치변동으로 인한 검출전압의 불안정을 해소하는 데에 매우 유용하게 이용할 수 있다.

Key words : 무선광연결, 전압안정화

Abstract

In this paper, the output voltage of a photodetector is stabilized using a digital potentiometer, to reduce the voltage variation when the detector position deviates from the center of the signal beam. The capture distance is calculated, and stabilization performance is observed through experiments. This scheme is very useful to reduce the output voltage variations due to the small change of the optical signal power, beam direction, and the detector position.

Ⅰ. 서 론

무선광연결은 기존의 무선통신과 상호간섭이 적고 송수신장치를 구성하기 위한 가격이 저렴하며, 신호광의 방사영역을 벗어나면 도청이 되지 않아 보안성이 높은 장점을 가지고 있어 이에 대한 연구가 활발해지고 있다[1]~[6]. 무선광연결의 활용분야로는 근거리 고층건물간 고속전송로 구축, 실내에서 컴퓨터 단말기간이나 음성 및 영상 시스템의 무선전송, 그리고 적외선 원격제어장치에 많이 이용되고 있다.

무선광연결은 자유공간을 전송매체로 사용하며, 신호광을 발생시키는 광원부와 이 신호광을 전기적 신호로 변환하는 광검출기로 구성된다. 광원으로부터의 방사되는 신호광의 단면 강도(Intensity)분포는 대개 신호광의 중심부에서 강도가 제일 높고 중심축으로부터 멀어질수록 강도가 낮아진다. 따라서 광검출기의 위치가 신호광의 중심축으로부터 얼마나 떨어져 있는가에 따라 검출되는 전압의 차이가 발생한다. 이러한 전압 차이가 심하면 수신부에서 신호전송에 문제가 발생되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 광검출기의 출력전압이 일정한 크기를 갖도록 안정화시켜야 한다.

본 논문에서는 디지털 가변저항(Digital potentio-

「이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.」

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

· 논 문 번 호 : 20020304-028
· 수정완료일자 : 2002년 5월 27일

meter)를 부하저항으로 사용하고 마이크로콘트롤러를 이용하여 부하저항의 크기를 제어함으로써 광검출기의 출력전압의 변동을 안정화하고, 또한 신호광의 강도분포가 가우시안 분포를 하는 경우 검출전압의 안정화가 가능한 광검출기의 최대이탈거리(포착거리)를 계산하였다.

Ⅱ. 검출전압의 안정화 포착거리

무선광연결의 송신부에서는 전기적 입력신호에 따라 광원을 변조하여 신호광을 자유공간으로 방사하고, 수신부에서는 광검출기에 입사하는 신호광을 검출하여 다시 전기적 신호로 변환한다. 광원으로부터 방사되는 신호광의 단면 강도분포는 대개 가우시안 분포에 가깝다. 따라서 광검출기를 구성하는 수광소자인 포토다이오드의 위치가 신호광의 중심에 놓일 때 검출되는 전압이 제일 높고, 신호광의 중심으로부터 멀어질수록 검출되는 전압이 감소한다.

신호광의 진행방향과 수직한 평면상에서 빔의 강도가 가우시안 분포를 하는 경우, 그림 1과 같이 신호광의 중심축으로부터 방사방향으로 거리 γ 만큼 떨어진 지점에서의 강도는 $P(r)=P_0e^{-2r^2/w^2}$로 쓸 수 있다[7]. 여기에서 w는 신호광의 스폿크기(spot size)이며, P_0는 신호광 중심에서의 강도이다. 이 때 광검출기의 출력전압 v_{out}는

$$\begin{aligned} v_{out} &= iR_L = \rho P(r)\times R_L \\ &= \rho R_L \times P_0 e^{-2r^2/w^2} \end{aligned} \tag{1}$$

이다. 여기에서 i는 포토다이오드에서 발생하는 광전류, ρ는 포토다이오드의 전류응답도(Current responsivity)이고, R_L은 부하저항이다. 포토다이오드의 위치가 신호광의 중심으로부터 벗어나 거리 r이 증가하면 출력전압은 감소하므로, 포토다이오드의 위치가 변경되면 출력전압이 변화하고, 이 변화가 심할 경우에는 무선광연결에서 에러를 유발할 수 있다. 이 때 출력전압 v_{out}을 안정화하기 위해서는 신호광의 중심으로 광검출기를 자동정렬하는 구조를 사용하여 이탈거리 r이 0에 접근하도록 하는 방법이 있고[6], 또한 별도의 증폭기를 후단에 설치하고 증폭기의 전압이득을 제어하는 방법이 있다. 이 외에도 부하저항 R_L을 제어하는 방법을 사용할 수 있음을 본 논문에서 새로이 소개한다. 일정전압을 유지한다는 원리는 모두 유사하나 이중 부하저항 R_L을 제어하는 구조가 제일 간단하므로 이 방법을 사용하여 포착거리를 계산하고 실험한다.

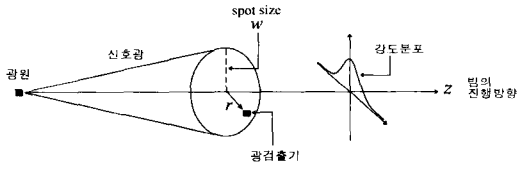


그림 1. 신호광의 강도분포와 광검출기의 위치
Fig. 1. Optical intensity distribution and the detector position.

디지털가변저항을 광검출기의 부하저항으로 사용하여 출력전압을 안정화하기 위한 구조는 그림 2와 같다.

그림 2의 마이크로콘트롤러에서는 광검출기의 출력전압 v_{out}을 A/D변환하여 읽어들인 후 기준전압 v_{ref}와 비교하여 디지털가변저항을 증가하거나 감소시킴으로써 v_{out}을 일정하게 유지한다. 출력전압 v_{out}을 기준전압 v_{ref}로 일정하게 유지하도록 만들기 위한 부하저항값은 식 (1)에 $v_{out}=v_{ref}$를 대입하여 R_L을 계산하면

$$R_L = \frac{v_{ref}}{\rho P_0}\times e^{2r^2/w^2} \tag{2}$$

이 된다. 식 (2)에서 보면 출력전압을 일정하게 유지

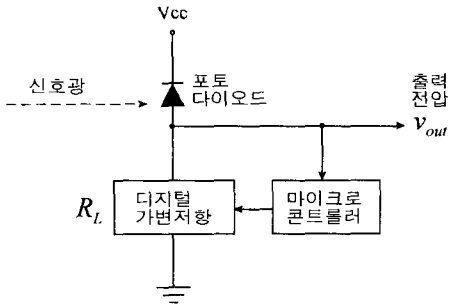


그림 2. 광검출기의 출력전압 안정화 구조
Fig. 2. System configuration for the ouput voltage stabilization.

하기 위해서는 빔의 중심으로부터 방사형 거리 r이 증가할수록 부하저항 R_L이 증가하여야 한다. 그러나 디지털가변저항이 증가할 수 있는 최대저항의 크기는 R_{max}로 규격화되어 있다. 따라서 식 (2)에 $R_L = R_{max}$를 대입하여 출력전압 안정화가 가능한 최대거리(최대포착거리) r_{max}를 구하면

$$\frac{r_{\max}}{w} = \sqrt{\frac{1}{2}\ln\left(\frac{R_{\max}\times\rho P_0}{\upsilon_{ref}}\right)} = \sqrt{\frac{1}{2}\ln\left(\frac{R_{\max}\times i_0}{\upsilon_{ref}}\right)} = \sqrt{\frac{1}{2}\ln\left(\frac{\upsilon_{\max}}{\upsilon_{ref}}\right)} \quad (3)$$

이 된다. 식 (3)에서 최대포착거리 r_{max}를 스폿의 크기 ω로 정규화하여 r_{max}/ω로 나타내었다. 여기에서 ρ는 포토다이오드의 전류응답도, P_0는 신호광의 중심에서의 강도이며, R_{max}는 디지털가변저항의 최대값이다. i_0는 포토다이오드가 신호광의 중심부에 있을 때 발생하는 광전류이며, υ_{max}는 포토다이오드가 신호광의 중심부에 있을 때 검출되는 최대 출력전압으로서 $\upsilon_{max} = i_0\ R_{max} = \rho\ P_0\ R_{max}$의 관계를 가진다. 따라서 신호광의 중심에서의 강도 P_0가 정해지면 υ_{max}가 상수가 되고, 식 (3)에서 기준전압 υ_{ref}를 작게 설정할수록 $\upsilon_{max}/\upsilon_{ref}$ 값이 커지며 최대포착거리 r_{max}는 증가한다.

최대포착거리가 존재하기 위해서는 r_{max}가 실수값이 되어야 하고, 식 (3)에서 $\upsilon_{max}/\upsilon_{ref} > 1$인 관계가 요구된다. $\upsilon_{max}/\upsilon_{ref} < 1$인 경우에는 식 (3)에서 실수값의 r_{max} 가 존재하지 않으며, 출력전압을 안정화할 수 있는 조건이 형성되지 않는다. 그 이유는 $\upsilon_{max}/\upsilon_{ref} < 1$인 상태는 광검출기가 빔의 중심에 위치하여도 광검출기에서 생성할 수 있는 최대전압(υ_{max})보다 기준전압(υ_{ref})이 더 높게 설정된 경우이기 때문이다. 이 상태에서는 마이크로콘트롤러가 광검출기의 출력전압을 기준전압(υ_{ref})과 일치시키기 위하여 디지털가변저항에 증가신호를 계속 발생시키지만, 디지털가변저항은 정해진 최대 저항값 R_{max}를 초과할 수 없으므로 계속 R_{max}에 머무르게 되어 출력전압이 기준전압(υ_{ref})를 따라 가지 못한다. 이때의 광검출기의 동작은 고정된 부하저항 R_L=R_{max}을 가진 상태와 동일하다. 따라서 광검출기의 출력전압을 안정화하기 위해서는 기준전압(υ_{ref})가 최대검출전압(υ_{max})보다 낮게 설정되어야 한다.

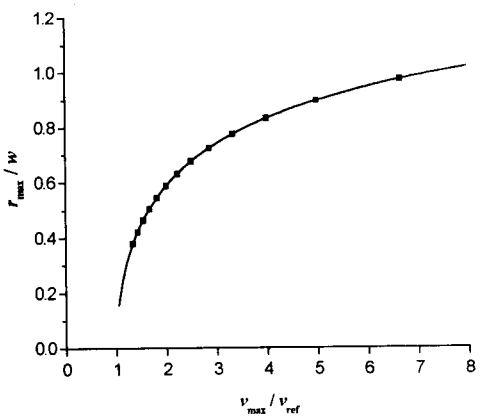


그림 3. 기준전압(υ_{ref})과 포착거리(r_{max})의 관계
Fig. 3. The relation between the reference voltage (υ_{ref}) and the capture distance(r_{max}).

그림 3은 기준전압(υ_{ref})와 최대포착거리(r_{max})의 관계를 식 (3)에 따라 도시한 그래프이다. 여기에서 부호(■)는 실험을 통하여 측정한 값이다. 디지털가변저항기를 사용하여 출력전압을 안정화시킬 수 있는 범위는 포토다이오드가 빔의 중심으로부터 최대포착거리 이내에 위치하여야 하며 그림 3에서 곡선의 아래쪽 영역에 해당한다.

Ⅲ. 무선광 검출전압의 안정화 실험

무선광연결에서 디지털 가변저항을 이용한 검출전압의 안정화 동작을 확인하고 포착거리를 측정하기 위한 실험구성도는 그림 4와 같다.

실험에 사용한 광원은 주입전류 80 mA에서 약 30 mW의 광출력을 가지며, 중심파장이 800 nm인 GaAs 레이저다이오드이다. 광원으로부터 약 1 m 떨어진

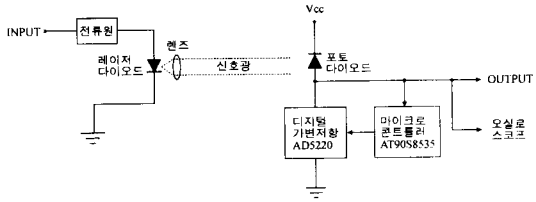
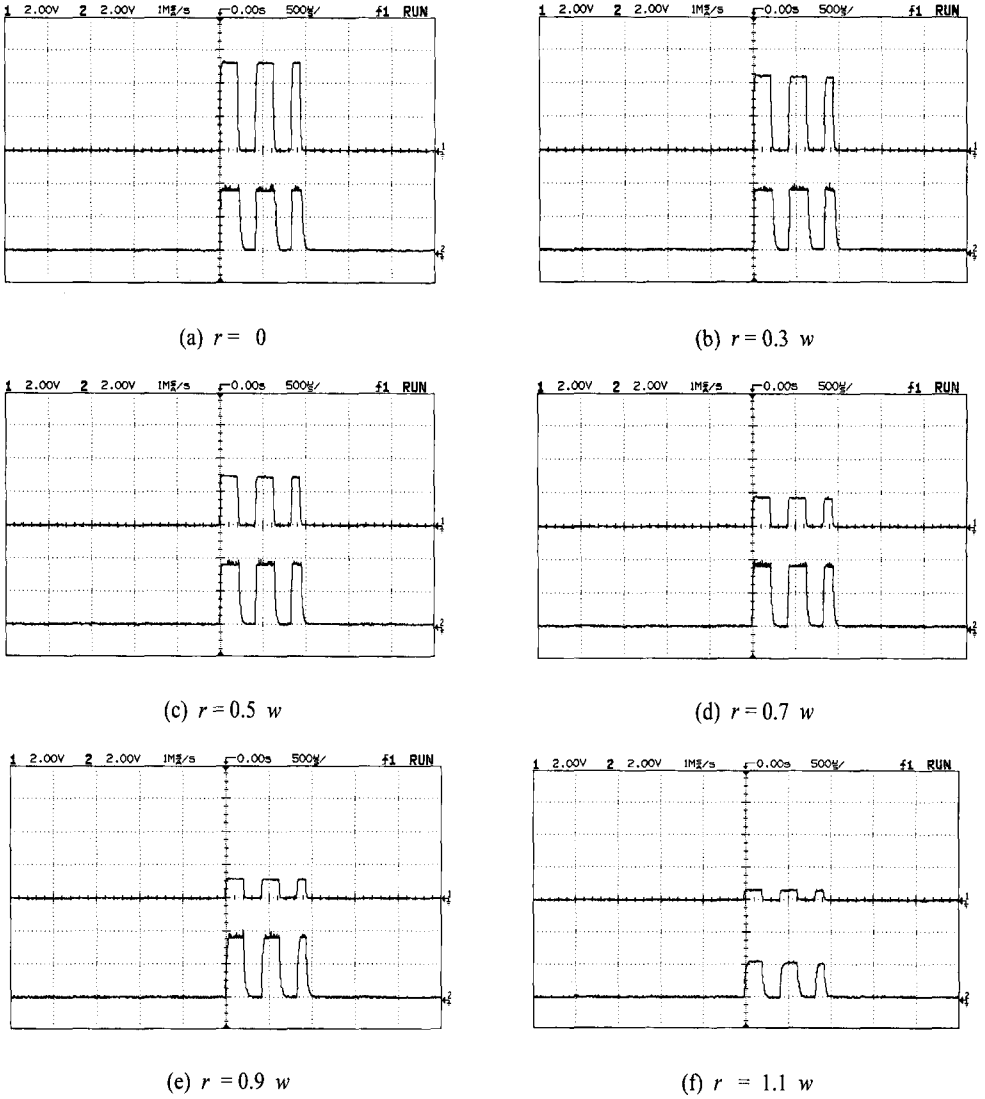


그림 4. 실험구성도
Fig. 4. The experimental setup.

지점에 광검출기를 설치하여 신호광을 수신하였다. 이 광검출기는 포토다이오드와 디지털가변저항, 그리고 마이크로콘트롤러로 구성되어 있다. 포토다이오드는 전류응답도가 0.4 A/W인 Si-PIN이며, 부하저항으로는 Analog Devices사의 AD5220-B100 디지털가변저항을 사용하였다. 디지털가변저항을 구동하기 위한 마이크로콘트롤러는 A/D변환기가 내장된 Atmel사의 AT90S8535를 사용하였다.

포토다이오드에서 검출되는 전압을 AT90S8535의 ADC 단자에 입력하여 A/D 변환하고, 이를 기준전압(v_{ref})과 비교한 후, 클럭펄스와 $\overline{UD}$(Up-down) 제어신호를 생성하여 디지털가변저항기 AD5220-B100을 구동하였다. AD5220-B100은 최대저항(R_{max}) 100 kΩ을 128단계로 나누어 한 개의 클럭펄스당 약



(a) $r = 0$ (b) $r = 0.3\ w$

(c) $r = 0.5\ w$ (d) $r = 0.7\ w$

(e) $r = 0.9\ w$ (f) $r = 1.1\ w$

그림 5. 이탈거리의 증가에 따른 광검출기의 출력변화
상부파형 : 고정 부하저항인 경우, 하부파형 : 디지털 가변저항인 경우

Fig. 5. Output voltage variation as the deviation increases.
Upper trace : fixed load resistance
Lower trace : digital potentiometer

780 Ω씩 증가하거나 감소시킬 수 있는 소자이다. 따라서 AT90S8535에서 A/D변환한 입력전압이 기준전압보다 클 때에는 $U\overline{D}=0$신호를 발생하여 부하저항을 감소시키고, 입력전압이 기준전압보다 작을 때에는 $U\overline{D}=1$신호를 발생하여 부하저항을 증가하도록 제작하였다. AD5220-B100을 구동하는 클럭펄스는 AT90S8535에서 1 ms 주기로 발생시켰다.

먼저 검출전압의 안정화가 가능한 최대포착거리를 측정하기 위하여 광검출기를 마이크로미터가 부착된 정밀조정기에 고정하고, 광검출기의 위치를 신호광의 중심으로부터 조금씩 이탈시키면서 출력전압을 관찰하였다. 광검출기가 놓여있는 위치에서 신호광의 스폿(spot)은 타원형이며, 광원의 렌즈를 조절하여 편의상 스폿크기를 가로 약 4 cm, 세로 약 6 cm가 되도록 하였다. 레이저다이오드에 약 80 mA의 DC 주입전류를 가한 상태에서 신호광의 중심에서의 최대검출전압(υ_{max})은 약 2 V이었다. 마이크로콘트롤러의 프로그램에 기준전압(υ_{ref})를 0.1 V씩 변화시키면서 신호광 단면의 가로방향으로의 최대 포착거리를 측정하였다. 측정결과는 앞의 Ⅱ절의 그림3에 표시된 부호(■)이다.

다음으로 이 광검출기의 출력전압 안정화 동작을 확인하기 위하여 두 개의 컴퓨터(PC#1, PC#2)간에 무선광연결을 구성하였다. 광원과 광검출기는 각각 PC#1과 PC#2의 직렬포트에 연결되어 있다. 광원부에서는 PC#1의 송신신호를 사용하여 광원을 강도변조하고, 광검출기의 출력전압을 PC#2와 오실로스코프에 연결하였다. 고정부하저항에 의한 출력변동상태와 디지털 가변저항에 의한 출력전압의 안정화 동작을 비교 관찰하기 위하여 약 0.3 cm의 근접된 위치에 포토다이오드 2개를 나란히 설치하여, 한 개는 고정된 부하저항 25 kΩ을 사용하고 다른 한 개에는 최대저항이 100 kΩ인 디지털가변저항를 사용하여 2개의 출력전압을 동시에 관찰하였다. 디지털가변저항을 가진 포토다이오드의 최대전압과 기준전압의 비를 $\upsilon_{max}/\upsilon_{ref}=5$로 설정하여 포착거리가 $r_{max}=0.9\ w$인 상태이고, 스폿의 크기는 $w=4$ cm를 유지하였다.

실험결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 (a)~(f)까지는 PC#1으로부터 PC#2로 문자 "F"자(부호 1100 11001)를 전송할 때에 포토다이오드의 이탈거리(r)를 증가시키면서 $r=0$부터 $r=1.1\ w$일 때까지 2개의 검출전압을 오실로스코프로 관측한 것이다. 각각의 그림에서 상부파형은 고정된 부하저항 25 kΩ을 사용한 검출전압이고, 하부파형은 디지털가변저항을 사용한 검출전압이다. 그림(a)~(e)까지는 이탈거리 r이 0부터 0.9 w까지 증가하며 포토다이오드가 포착거리($r_{max}=0.9\ w$) 이내에 있는 경우이다. 이 영역에서 고정부하저항인 경우에는 이탈거리 r이 증가함에 따라 출력전압의 진폭이 현저히 감소하지만, 디지털가변저항인 경우에는 일정한 진폭을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 그림 (f)에서는 이탈거리가 $r=1.1w$이며 포토다이오드의 위치가 포착거리($r_{max}=0.9w$)를 벗어난 경우로서 디지털가변저항이 증가할 수 있는 한계를 초과한 상태이다. 이 때에는 디지털가변저항이 최대저항 100 kΩ에 이르러 더 이상 증가하지 못하므로 고정된 부하저항과 같이 포토다이오드가 빔의 중심으로부터 멀어짐에 따라 출력전압이 약해진다. 따라서 광검출기의 출력전압을 안정화하기 위해서는 포토다이오드의 위치가 포착거리 이내에 있어야 함을 볼 수 있다.

검출전압의 안정화 동작에 대한 과도응답을 살펴보기 위하여 계단입력의 신호광에 대한 광검출기의 전압변화를 관측하였다. 기준전압을 0.2 V로 정하고 초기검출전압을 1 V와 0.5 V로 하였을 때 검출전압이 기준전압으로 접근해 가는 과정을 오실로스코프로 관측한 실험결과는 그림 6과 같다.

초기전압과 기준전압 차이의 0.9~0.1로 변화하는 응답시간은 약 35 ms로 측정되었다. 따라서 이 속도 이하로 발생하는 기계적 진동이나 광검출기의 위치변동에 의한 전압변화를 포착거리내에서 안정

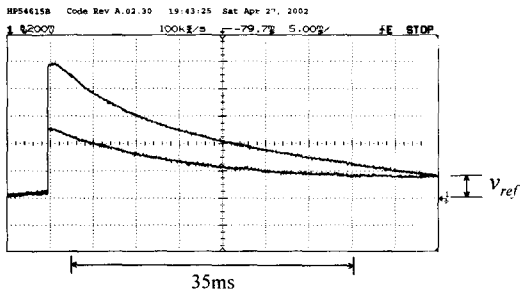


그림 6. 계단입력광에 대한 광검출기의 출력변화
Fig. 6. Step response of the photodetector.

화할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 무선광연결에서 사용하는 광검출기가 신호광의 중심으로부터 벗어나는 경우 발생하는 검출전압의 변동을 안정화하기 위하여 디지털가변저항을 사용하였다. 검출전압안정화가 가능한 포착거리를 계산하였고, 또한 실험을 통하여 검출전압 안정화 동작을 확인하였다. 실험에서 사용한 검출전압의 안정화 원리는 디지털 가변저항을 부하저항으로 사용하고, 포토다이오드의 이탈거리가 증가함에 따라 발생하는 검출전압의 감소를 부하저항의 증가량으로 보상하였다. 이 때 디지털가변저항의 증가량은 최대 저항값으로 제한되므로 안정화할 수 있는 포착거리가 정해진다. 광검출기의 출력전압 안정화는 이 포착거리 이내에서 가능하다. 포착거리는 최대저항이 클수록 커지지만 광검출기의 수신대역폭이 부하저항에 반비례하므로 최대저항을 선택할 때는 전송속도를 고려하여 설정하여야 한다.

본 논문의 구조에서는 포착거리가 최대 부하저항에 주로 의존한다. 이와 비교하여 자동정렬형 광검출기[6]에서는 포착거리가 최대주행거리로 제한되며, 증폭기 이득을 제어하는 구조에서는 최대 전압이득에 주로 의존하는 차이가 있다. 무선광연결에서 신호광의 흔들림이나 광검출기의 위치변동에 따른 검출전압의 불안정이 발생하는 환경에서 이와 같은 안정화 방법을 사용하면 매우 편리하다.

참 고 문 헌

[1] M. Street, P. N. Stavririnou, D. C. O'Brien and D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems -a review", *Optical and Quantum Electronics*, 29, pp. 349-378, 1997.

[2] 이성호, 강희창, "실내무선광연결에서 차동증폭기를 이용한 혼신 및 잡음의 감소", 한국전자파학회논문지, vol. 9, no. 5, pp. 660-667, 1998. 10.

[3] 이성호, 강희창, "차동검출기를 이용한 무선광연결에서 신호대잡음비의 개선", 한국전자파학회논문지, vol. 10, no. 1, pp. 54-62, 1999. 2.

[4] 이성호, "무선광연결에서 근사적 평균잡음검출을 이용한 광잡음 감소", 한국전자파학회논문지, vol. 11, no. 2, pp. 228-233, 2000. 2.

[5] 이성호, "무선광연결에서 편광판을 이용한 광잡음 감소", 한국전자파학회논문지, vol. 11, no. 3, pp. 365-371, 2000. 4.

[6] 이성호, "무선광연결에서 신호광에 자동정렬하는 차동검출기", 한국전자파학회논문지, vol. 11, no. 5, pp. 822-829, 2000. 8.

[7] Joseph C. Palais, *Fiber Optic Communications*, 4th ed., Prentice Hall, pp. 47, 1998.

이 성 호

1980년 2월: 한국항공대학교 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