

실내 무선광연결에서 차동증폭기를 이용한 혼신 및 잡음의 감소

Crosstalk and Noise Reduction in Wireless In-house Optical Interconnection Using Differential Amplifiers

이 성 호 · 강 희 창

Seong-Ho Lee · Hee-Chang Kang

요 약

본 논문에서는 실내 무선광연결에서 2개의 채널을 구성하는 경우에 빔의 중첩으로 인하여 발생하는 혼신의 영향을 줄이기 위하여 차동증폭기를 사용하였다. 또한 동일한 원리를 이용하면 주변광잡음이 있는 경우에 잡음을 억제할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이러한 방법은 별도의 광학적 필터나 전기적 필터를 사용하지 않고 간단히 차동증폭기로 구현되므로 근거리 광연결을 구성하는 경우에 매우 유용하게 사용할 수 있다.

Abstract

In this paper, we used differential amplifiers to reduce crosstalk in a wireless in-house optical interconnection in which two channel beams are overlapped. Experimental results show that environmental optical noise is also reduced using the same principle. This method is realized very easily with differential amplifiers without any optical filters or electrical filters. It is very useful in short distance optical interconnections.

I. 서 론

최근에 들어 정보화기술이 발전하면서 음성, 데이터, 영상 등 가입자에 대한 서비스의 종류가 다양해지고 이에 비례하여 통신망에서는 더 높은 전송속도가 요구되고 있다. 장거리고정통신망에서는 고속의 광섬유통신이 기존의 동선케이블을 대체하고 있으며, 가입자망은 이동성을 고려하여 무선통신이 활발히 발전하고 있다. 근래에 들어 실내의 짧은 전송구간에서도 케이블의 초기설치와 유지보수, 통신장치의 접속을 용이하게 하기 위하여 고주파나 광을 이용한 무선 접속기술이 발전하고, 이 중에서

도 광케이블을 사용하지 않는 무선 광연결 기술이 새로운 통신 방법으로 주목 받고 있다^{[1]~[4]}.

실내의 무선광연결에서는 실외에서와는 달리 대기의 기상변화에 대하여 민감하지 않고, 기존의 무선통신주파수와 상호 간섭이 거의 없어 사용이 편리하지만 사용자의 눈의 안전도를 고려하여 광출력을 제한하여야 하고, 햇빛, 형광등, 백열등과 같은 주변의 광잡음에 대한 대책을 마련하여야 한다. 주변광잡음의 영향을 막기 위하여서는 광학적필터 혹은 전기적 필터를 사용하거나 주변광의 주파수보다 훨씬 높은 subcarrier를 사용하여 변조하는 방법이 많이 사용되고 있다^{[1]~[4]}. 이외에도 2개 이상의 채널을 같은 방향으로 구성하는 경우에는 서로 다른

「이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.」

서울산업대학교 전자공학과(Department of Electronics, Seoul National Polytech. University)

· 논문 번호 : 980513-050

· 수정완료일자 : 1998년 7월 1일

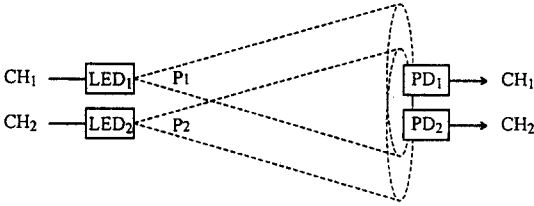


그림 1. 무선광연결에서 혼신 발생
Fig. 1. Crosstalk in a wireless optical interconnection.

광원으로부터 출력된 빔의 중첩으로 인한 혼신이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 같은 방향으로 2개의 무선광전송로를 구성하는 경우에 빔의 중첩으로 인하여 발생하는 혼신의 문제와 주변광에 의하여 발생하는 잡음의 문제를 해소하기 위하여 차동증폭기의 원리를 이용한다. 그림 1에서는 2개의 서로 다른 신호를 보내기 위한 광연결 2개를 구성하는 경우 인접된 빔의 중첩을 도식적으로 표현한다.

그림 1에서 LED₁에서 방출된 광출력을 P₁, LED₂에서 방출된 광출력을 P₂라고 할 경우 광검출기 1(PD₁)에서는 P₁ 이외에 P₂의 일부가 유입되어 혼신을 유발하고, 광검출기 2(PD₂)에서는 P₂ 이외에 P₁의 일부가 유입되어 혼신이 발생하게 된다. 이와 같은 상태를 블록다이어그램으로 나타내면 그림 2와 같다.

그림 2에서 C₁₁은 LED₁으로부터 광검출기 1

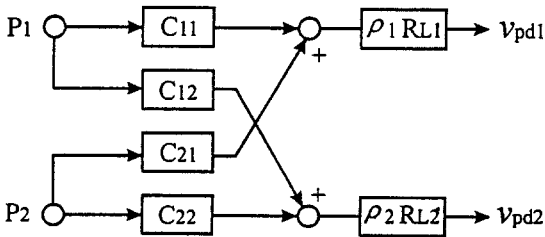


그림 2. 인접 채널간의 혼신을 나타내는 블록다이어그램

Fig. 2. Block diagram illustrating crosstalk between adjacent channels.

(PD₁)으로의 결합효율, C₁₂은 LED₁으로부터 광검출기 2(PD₂)으로의 결합효율, C₂₁은 LED₂으로부터 광검출기 1(PD₁)으로의 결합효율을 나타낸다. ρ₁, ρ₂는 각각 PD₁과 PD₂의 응답도이며, R_{L1}과 R_{L2}는 PD₁과 PD₂의 부하저항이다. v_{pd1}과 v_{pd2}는 각각 PD₁과 PD₂의 부하저항에 나타나는 출력전압이다. 광검출기의 수신대역폭이 신호에 비하여 훨씬 넓은 때에는 응답도는 주파수에 무관한 상수항으로 취급할 수 있으며, PD₁의 출력전압 v_{pd1}은,

$$v_{pd1} = (C_{11} P_1 + C_{21} P_2) \rho_1 R_{L1} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있으며 PD₂의 출력전압 v_{pd2}은

$$v_{pd2} = (C_{12} P_1 + C_{22} P_2) \rho_2 R_{L2} \quad (2)$$

로 쓸 수 있다. 식 (1)에서는 우변의 둘째항(C₂₁P₂ρ₁R_{L1})이 채널 2에서 PD₁으로 유입된 혼신이고, 식 (2)에서는 우변의 첫째항(C₁₂P₁ρ₂R_{L2})이 채널 1에서 PD₂로 유입된 혼신을 나타낸다.

대기를 전송매체로 공유하는 무선광연결에서는 이와 같이 빔의 중첩에 의한 혼신이 발생할 수 있으므로 신호전송을 효율적으로 하기 위하여서는 이를 적절히 소거하여야 한다. 다른 채널의 신호가 유입되지 않도록 빔의 직경을 작게 만들어 결합계수 C₁₂, C₂₁를 줄이거나, 사용채널에 따라 광원의 파장이 다른 경우에는 광검출기 전단에 광학적 필터를 사용할 수도 있다. 이외에 광검출기 후단에서 전기적 필터를 이용하여 각 채널의 신호를 구별해 낼 수 있다.

본 논문에서는 광원으로부터의 출력빔의 중첩이 발생하여 혼신이 있는 경우에 광학적 필터나 전기적 필터를 사용하지 않고 두 개의 광검출기에서 생성되는 전기적 신호를 차동증폭하여 각 채널의 신호를 분리하는 방법을 연구하여 실험하였다. 이 방법은 각 채널간의 혼신을 줄이거나 또는 주변광잡음의 세기가 커서 신호광의 세기와 유사한 강도를 갖는 경우에 광잡음특성을 개선하기 위하여 쉽게 이용할 수 있다.

II. 혼신개선의 원리

무선광연결에서 타 채널로부터 유입된 신호를 소거하여 혼신을 개선하기 위한 전송시스템 구성도는 그림 3과 같다. 각 광검출기의 후단에 그림 3과 같이 차동증폭기를 설치하고 차동증폭기의 (+)입력단과 (-)입력단에 대한 전압이득을 따로 조정할 수 있도록 한다. 이 시스템을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4에서 차동증폭기의 전단부는 그림 2에서와 같은 구조이고, G_{11} 과 G_{21} 은 각각 차동증폭기 1 (Amp₁)에서의 (+)입력단과 (-)입력단의 전압이득을 나타내며, G_{22} 과 G_{12} 는 각각 차동증폭기 2 (Amp₂)에서의 (+)입력단과 (-)입력단의 전압이득을 나타낸다. 증폭기의 대역폭이 신호주파수보다 훨씬 넓은 경우에는 전압이득 G 를 주파수에 대하여 상수항으로 취급할 수 있다. 본 논문의 실험에서는 광검출기와 증폭기의 대역폭이 약 30 kHz이고 신호전송은 1 kHz, 3 kHz의 정현파신호를 사용 하였으므로 이러한 근사가 타당하다.

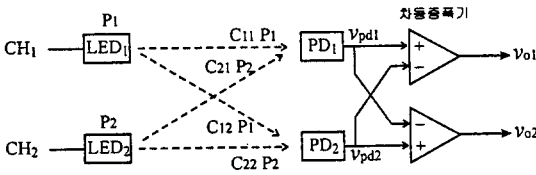


그림 3. 채널간의 혼신방지를 위한 장치구성도
Fig. 3. System configuration for the prevention of crosstalk between channels.

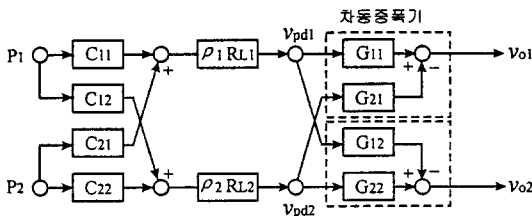


그림 4. 그림 3의 시스템구조에 대한 블록다이어그램
Fig. 4. Block diagram for the system configuration of Fig. 3.

그림 4에서 동일한 응답도와 부하저항을 가지는 광검출기를 사용하는 경우에는 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $R_{L1} = R_{L2} = R_L$ 이므로 Amp₁의 출력전압 v_{o1} 은

$$\begin{aligned} v_{o1} &= (C_{11} P_1 + C_{21} P_2) \rho R_L G_{11} - (C_{12} P_1 + C_{22} P_2) \rho R_L G_{21} \\ &= (C_{11} G_{11} - C_{12} G_{21}) \rho R_L P_1 + (C_{21} G_{11} - C_{22} G_{21}) \rho R_L P_2 \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다. 식 (3)에서 P_2 가 포함된 항은 혼신을 나타내며, 이 항이 영이 되려면 $C_{21} G_{11} - C_{22} G_{21} = 0$ 이어야 하므로

$$G_{21} = \frac{C_{21}}{C_{22}} G_{11} \quad (4)$$

이 만족되어야 한다. 이 때의 출력전압 v_{o1} 은

$$v_{o1} = \left(C_{11} - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{22}} \right) G_{11} \rho R_L P_1 \quad (5)$$

이 되어 v_{o1} 은 P_1 만의 함수가 된다.

같은 방법으로, Amp₂의 출력전압 v_{o2} 은

$$\begin{aligned} v_{o2} &= (C_{12} P_1 + C_{22} P_2) \rho R_L G_{22} - (C_{11} P_1 + C_{21} P_2) \rho R_L G_{12} \\ &= (C_{12} C_{22} - C_{11} G_{12}) \rho R_L P_1 + (C_{22} G_{22} - C_{21} G_{12}) \rho R_L P_2 \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다.

식 (6)에서 P_1 이 포함된 항은 혼신을 나타내며, 이 항이 영이 되려면 $C_{12} G_{22} - C_{11} G_{12} = 0$ 이어야 하므로

$$G_{12} = \frac{C_{12}}{C_{11}} G_{22} \quad (7)$$

이 만족되어야 한다. 이 때의 출력전압 v_{o2} 은

$$v_{o2} = \left(C_{22} - \frac{C_{21} C_{12}}{C_{11}} \right) G_{22} \rho R_L P_2 \quad (8)$$

이 되어 v_{o2} 은 P_2 만의 함수가 된다.

따라서 식 (4)와 식 (7)을 만족하도록 차동증폭기의 (-)입력단의 전압이득 G_{21} , G_{12} 를 정해주면 식 (5)와 식 (8)에서의 혼신이 없는 신호를 수신할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 광원에서 광검출기로 진행되는 빛의 형태가 진행방향과 수직인 평

면상에서 가우시안 형태인 경우 광검출기가 각 빔의 중심부에 놓이면 C_{11} 과 C_{22} 는 C_{12} 나 C_{21} 보다 큰값을 가진다. 따라서 식 (5)에서 $C_{11} - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{22}} > 0$, 식 (8)에서 $C_{22} - \frac{C_{21} C_{12}}{C_{11}} > 0$ 이다. 또한 가우시안 안의 빔이 아니더라도 일반적으로 $C_{11} - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{22}} \neq 0$, $C_{22} - \frac{C_{21} C_{12}}{C_{11}} \neq 0$ 이다. 이 값이 영보다 크면 차동 증폭기의 출력단에서 그대로 증폭하고, 영보다 작으면 반전된 신호가 나타나므로 출력단에서 반전시키면 원신호를 수신할 수 있다. 실험적으로는 각 수신단에서 차동증폭기를 사용하여 (+)와 (-) 입력단의 전압이득을 서서히 조절하여 혼신이 없어지도록하여 원래의 송신된 신호파만 나타나도록 먼저 만들고, 그 상태에서 차동증폭기의 출력신호를 원하는 크기로 증폭시킨다.

III. 실험

무선 광연결에서 채널간의 혼신을 감소하기 위한 실험구성도는 그림 5와 같다.

본 논문의 실험에서는 광원과 광검출기로서 값이 저렴하고 저속인 GaAs LED와 Si PIN을 사용하

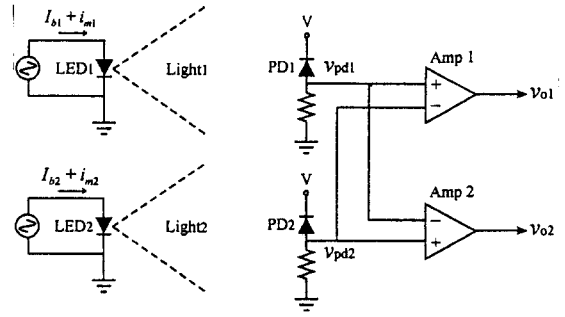
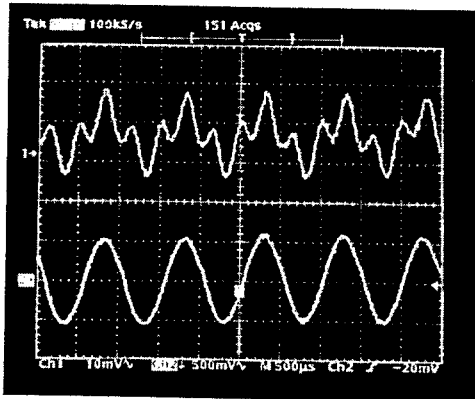


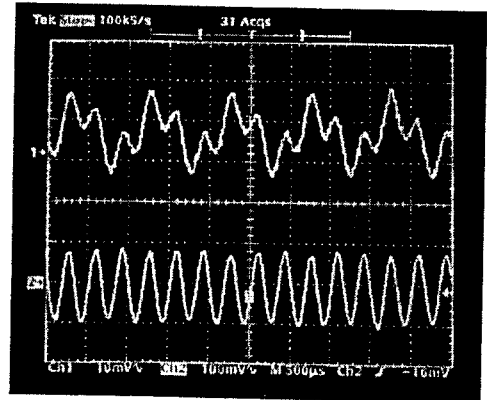
그림 5. 혼신방지를 위한 실험구성도

Fig. 5. Experimental setup to prevent crosstalk.

였다. 광원으로 800 nm의 파장을 가진 GaAs LED 두 개를 사용하였으며, 각각 바이어스 전류를 약 50 mA로하고 이때 LED의 광출력은 약 10 mW이었다. 이 상태에서 LED₁에는 1 kHz 진폭 20 mA, LED₂는 3 kHz 진폭 20 mA의 정현파를 사용하여 각각 직접변조 하였다. LED의 광출력을 렌즈를 사용하여 빔의 중심축으로부터 강도가 피크값의 1/2이 되는 반치폭(half-power beam width)이 약 20°정도로 방사가 되도록하고 각 LED로부터 약 60 cm 정도의 거리에 광검출기 PD₁과 PD₂를 위치하



(a)



(b)

그림 6. 관측된 출력파형

(a) 1 kHz 신호 (상 : v_{pd1} , 하 : v_{o1}) (b) 3 kHz 신호 (상 : v_{pd2} , 하 : v_{o2})

Fig. 6. Observed output waveforms.

(a) 1 kHz Signal (upper : v_{pd1} , lower : v_{o1}) (b) 3 kHz Signal (upper : v_{pd2} , lower : v_{o2})

였다. 실험에 사용한 광검출기는 응답도 $0.5(A/W)$ 인 Si-PIN 포토다이오드이다. PD₁과 PD₂의 부하저항은 $50\text{ k}\Omega$ 로 하였으며, 이 상태에서 수신 대역폭은 약 100 kHz 정도이다. LED₁과 LED₂간의 거리는 약 3 cm 이고 PD₁과 PD₂간의 거리도 약 3 cm 로 근접하여 각 PD에서는 두 광출력빔이 중첩된 상태를 유지하였다. 이 때 PD₁과 PD₂에 나타난 파형 v_{pd1} 과 v_{pd2} 를 오실로스코프로 관찰하니 그림 6(a)와 그림 6(b)에서의 상단에 나타난 파형이다. 각 파형에서는 1 kHz 와 3 kHz 의 신호가 혼합되어 원신호를 거의 구별할 수가 없는 상태이다. 이때 각 PD의 출력전압을 그림 5의 실험도에 보인 바와 같이 차동증폭기의 입력단에 연결하고 각 증폭기의 (+)단자의 전압이득은 약 10으로 고정하고 (-)단자의 이득을 서서히 조정하니 타 채널로부터의 혼신이 사라지고 각 LED에서 전송된 정현파 신호만 뚜렷하게 나타났다. 차동증폭기의 출력단에서는 전압이득을 약 10배로 만들었다. 실험에 사용한 차동증폭기는 PMI사의 OP-05 연산증폭기를 사용하여 만든 차동증폭기이며 대역폭은 약 30 kHz 이다. 이 때 관측된 출력파형 v_{o1} 과 v_{o2} 는 그림 6(a)와 그림 6(b)의 하단에 보이는 바와 같다.

그림 6에서 보이는 바와 같이 차동증폭기를 이용하여 각 입력단자의 전압이득을 적절히 조절하면 공간을 전송매체로 사용하는 근거리 무선광연결에서 각 빔의 중첩으로 인하여 발생하는 혼신을 방지할 수가 있다.

타 채널로부터 유입되는 혼신은 잡음에 해당한다. 그림 6(a)상부그림과 같이 혼신된 상태에서 PD₁의 출력전압(v_{pd1})중 1 kHz 의 성분은 신호전압(v_{sig})이고 3 kHz 의 성분은 유입된 잡음 전압(v_{nos})이다. 이 상태는 신호와 잡음이 거의 유사한 크기로 혼신된 상태이며 $v_{sig}/v_{nos} \approx 1$ 이다. 그림 6(a)하부 그림에서 차동증폭기의 출력전압(v_{o1})에는 잡음이 비율이 감소하여 $v_{sig}/v_{nos} \approx 10$ 정도이므로 S/N비는 약 20 dB 개선되고 있다. 이 때 1 kHz 신호에 실린 미약한 진폭변화는 약간 남아있는 3 kHz 의 잡음의 영향이다. 이것은 2개의 광검출기의 바이어스 전압을 공동으로 사용할 때 전기적으로 유기되는 잡음이다. 2절의 원리에서는 전기적 회로에서 발생하는 미세한 잡음의 영향은 무시하였다. 혼신 및 잡음

의 개선효과를 보기 위하여는 통신속도에 비하여 차동증폭기의 대역폭이 더 넓어야하며, 식 (5)에서 보는 바와 같이 각 결합계수의 관계가 $C_{11} - (C_{12} C_{21})/C_{22} \neq 0$ 이어야 $v_{o1} \neq 0$ 이므로 신호검출이 가능하고, 또한 각 PD의 최대 입사광파워가 수신부(광검출기와 증폭기)의 동적범위(dynamic range)이 내에 있어야 적용이 가능하다.

동일한 원리를 이용하여 광잡음이 존재하는 공간에서 무선광연결을 실시하는 경우에 유입되는 주변 광잡음의 영향을 줄일 수도 있다. 실내에서 무선광연결을 하는 경우에 눈의 안전을 위하여 출력을 낮출 필요가 있고, 신호광의 세기가 미약할수록 주변 광의 영향은 상대적으로 커진다. 이러한 환경에서 차동증폭의 원리를 이용하여 광잡음개선 효과를 살펴보기 위하여 PC간에 무선광연결을 구성하여 실험하였다. 실험구성도는 그림 7과 같다.

PC간의 신호전송을 위하여 직렬포트(serial port)를 이용하여 광연결을 구성하였다. 송신용으로는 직렬포트의 송신단자(3번)와 접지단자(5번) 사이의 출력전압신호에 비례하는 전류를 생성하여 LED를 구동하였고, 수신부에서는 광검출기로 빛을 수신하여 PIN포토다이오드의 부하저항의 양단전압을 증폭하여 직렬포트의 수신단자(2번)와 접지단자(5번)와 연결하였다.

이러한 송신부와 수신부가 양쪽 PC에 각각 한 개씩 접속되어 PC₁과 PC₂간에 양방향 무선광연결을 구성하였다. 각각의 수신부에 부착된 광검출기는 상대측 광원으로부터 약 2 m 정도 떨어진 거리에 위치하였다. 이러한 양방향 연결 구성에서 단일방향의 전송경로만을 도식적으로 자세히 나타내면 그림 8과 같다.

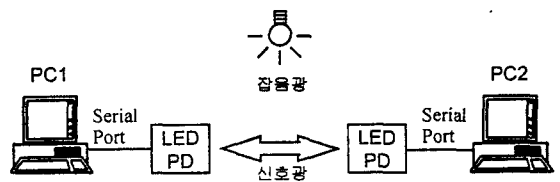


그림 7. PC간의 무선광연결

Fig. 7. Wireless optical interconnection between personal computers.

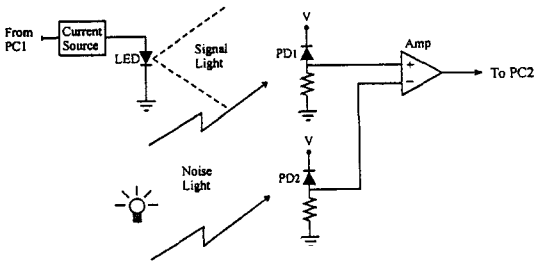


그림 8. 광잡음이 존재하는 공간에서의 무선광연결 실험구성도

Fig. 8. Experimental setup for the wireless optical interconnection in a space with optical noise.

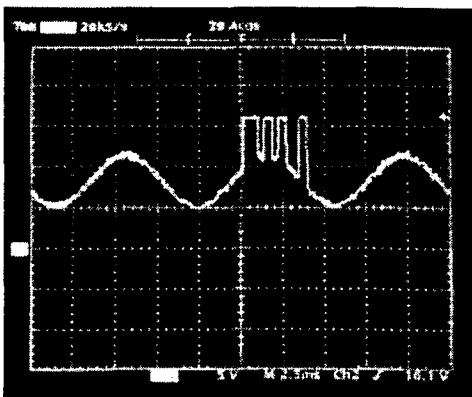
그림 8의 실험구성도는 그림 5에서의 LED₂ 대신에 주변의 잡음광인 백열전등이 설치되어 있는 것 이외에 차동증폭기를 이용하는 구성방식은 동일한 형태이다.

PC의 송신부에 사용한 전류원의 전류변조율은 20 mA/V이고 광원으로는 약 800 nm의 파장을 가진 GaAs LED를 사용하였다. 이 LED의 광출력은 주입전류 40 mA에서 약 10 mW이며 수신단에 사용한 광검출기는 응답도 0.5(A/W)인 Si-PIN 포

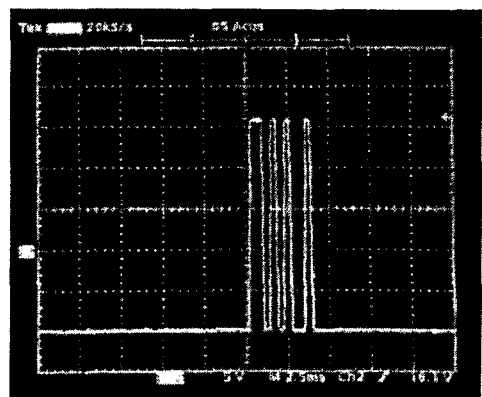
토타다이오드이다. PC간에 데이터를 전송하기 위하여 사용한 프로그램은 마이크로소프트사의 Works이다. 전송속도는 2.4 kbps를 사용하였다. LED의 광출력은 렌즈를 사용하여 약 30° 정도로 방사하였다. 이상 상태에서 광잡음 개선효과를 확인하기 위하여 광검출기의 근처에 백열등(30 W)을 설치하여 수신부에서 단일의 PD를 사용하여 증폭한 경우와 2개의 PD를 사용하여 차동증폭한 경우를 비교하여 보았다. 그림 9는 PC₁에서 PC₂로 문자 'j'자를 전송하는 경우 수신측에서 오실로스코프로 관찰한 수신 파형이다.

그림 9(a)는 단일의 PD를 사용하여 수신측에서 증폭한 신호를 나타낸다. 이 파형에는 신호파(부호 110101001)와 백열등으로부터 방출되는 잡음광(사인파곡선)이 섞여있어 신호파를 구분하기가 어렵다. 이 상태에서는 수신측에 문자전송이 되지 않는다. 그림 9(b)는 그림 8에서의 실험구성도와 같이 차동증폭기를 사용하여 수신부를 구성한 상태에서 수신신호를 나타낸다. 이 상태는 잡음광이 소거된 상태이며 깨끗한 신호파형만 검출됨을 볼 수 있다.

두가지 실험에서 보인바와 같이 차동증폭의 원리를 이용하면 채널간의 혼신과 주변광잡음의 영향을 감소할 수 있다. 이 방법에서는 광학적필터나 전기적필터 또는 높은 부변조파를 사용하지 않고 대신



(a)



(b)

그림 9. 'j'자 전송시 수신파형

(a) 1개의 광검출기 사용 (b) 2개의 광검출기 사용

Fig. 9. Received signal waveforms of the letter 'j'.

(a) Using a single PD (b) Using double PD's

에 차동증폭기를 사용한다. 실내에서 무선광연결을 하는 경우 신호광의 세기가 인체에 영향이 없도록 약한 파워로 송수신하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있으며 신호를 약하게 할수록 형광등이나 백열등과 같은 주변광잡음의 영향이 커질 수 있다. 이와같이 광잡음의 세기가 신호의 세기와 유사한 정도가 되어 광신호전송에 영향을 많이 주는 실내환경이나 채널간의 혼신이 심한 경우에 본 논문에서 제시한 차동증폭에 의한 잡음소거의 원리를 이용하면 매우 편리하다.

IV. 결론 및 검토

본 논문에서는 무선광연결에서 나타나는 채널간의 혼신 또는 주변의 광잡음의 영향을 개선하기 위한 광검출시스템을 연구하였다. 먼저 유사한 특성을 가진 2개의 광원과 2개의 광검출기를 사용하여 2개의 전송채널을 구성하고 빔의 중첩상태에서 차동증폭기를 이용하여 다른 채널의 신호성분을 소거함으로써 채널간의 혼신을 줄이는 원리와 실험을 보였다. 두 번째로 이러한 원리를 이용하면 광잡음의 영향이 심한 환경에서 무선광연결을 구성하는 경우에도 광잡음의 개선효과가 있음을 PC간의 무선광연결 실험을 통하여 확인하였다. 광잡음 특성을 개선하기 위하여 1개 또는 2개의 중심파장이 서로 다른 광학적 필터와 2개의 PD를 사용하여 차동검출한 경우^[5]와 비교하면, 본 논문에서는 광학적으로 신호와 잡음을 분리 검출하지 않고(광학적 필터를 사용하지 않음), 2개의 PD를 이용하여 각 PD에서 검출된 각각의 잡음과 신호의 강도(Intensity)가 두 지점에서 차이를 보여 식 (5)에서 $C_{11} - (C_{12} C_{21}) / C_{22} \neq 0$ 조건이 성립하면 원신호를 수신할 수

있음을 보여 준다. 이 방식은 신호파와 유사한 파장을 가진 혼신이나 주변광잡음에서도 사용할 수 있다.

이 방법은 구현하기가 매우 간단하므로 실내광연결을 실시하는 경우에 유용하게 쓸 수 있다.

참고 문헌

- [1] T. S. Chu and M. J. Gans, "High speed infrared local wireless communication," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 25, no. 8, pp. 4-10, 1987.
- [2] Fritz R. Gfeller and Urs Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse radiation," *Proc. IEEE* vol. 67, no. 11, pp. 1474-1486, 1979.
- [3] John R. Barry, Joseph M. Kahn, Edward A. Lee and David G. Messerschmit, "High-speed nondirective optical communication for wireless network," *IEEE Network Magazine*, Nov., pp. 44-54, 1991.
- [4] F. Davidson, "Direct detection optical communication receiver performance for intensity subcarrier frequency shift keying," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-23, no. 2, Mar. pp. 271-275, 1997.
- [5] A. M. Street, P. N. Stavrinou, D. C. O'Brien, D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems-a review," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 29, pp. 349-378, 1997.

강 희 창



1964년 2월 : 한국항공대학 전자공학과 (공학사)

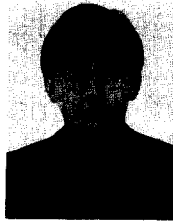
1988년 9월 : 단국대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1982년 9월~1983년 2월 : 미국 Southern Illinois University 객원교수

1996년 1월~1997년 2월 : 미국 Oregon State University 객원교수

1980년~현재 : 서울산업대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 전자파, EMC /EMI, 초고주파회로

이 성 호



1980년 2월 : 한국항공대학 전자공학과(공학사)

1989년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1993년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월~현재 : 서울산업대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 광통신, 초고주파회로