

광시스템의 잡음에 따른 수신감도 변화에 관한 연구

나유찬*

¹남서울대학교 정보통신학과

A study on the changes of the noise reception sensitivity in the optical system

Yoo-Chan Ra^{1*}

¹Department of Information Communication, Namseoul University

요약 본 논문에서는 일반적인 광시스템에서 항상 존재하는 잡음 및 외부로부터 더해지는 잡음이 광시스템의 수신기의 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 광전송시스템에서 광검출기가 1 이하의 양자효율을 갖는 경우를 고려하여 온-오프 키잉 전송시에 수신기의 수신 감도를 계산하였다. m 이 50이상인 경우 표준에러확률을 유지하기 위한 광시스템의 수신기 감도가 300이하로 계산되어 m 가 적은 경우에 비해서 저출력 시스템을 구성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 값도 실제 시스템에서는 큰 부담이 되는 값이므로 보다 저출력 광원을 사용하는 경우를 고려하여 수신단에 전치증폭기를 설치한 경우에 대해서도 고려하였는데, 그림 3에서 보이는 바와 같이 보다 적은 출력을 갖는 광원을 사용해도 무방하다는 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract In this paper, we investigated the effect of light on the performance of the receiver system noise and external noise added from the ever-present influence in general optical system. And calculated the reception sensitivity of the receiver at the time of off-keying transmission - from the optical transmission system in consideration of the case that the photo detector has a quantum yield of less than one-one. Not less than 50 it was confirmed that it is possible to configure the low power system is calculated and compared with the case where less than 300 the receiver sensitivity of the optical system to maintain the standard error probability. However, even if these values were considered, and the preamplifier in the receiver, considering a case of using a low-output light source, so that a heavy burden in the value less than the actual system installation, using the light source having less than the output, as shown in Figure 3, the results that were obtained also may be used.

Key Words : Optic system, Probability, Receiver, Noise

1. 서론

인간의 정보에 대한 욕구가 나날이 증대됨에 따라 각종 정보기기 및 모바일 기기의 사용이 증가되고 있으며 언제 어디서나 원하는 정보에 접근할 수 있는 유비쿼터스 사회로 진입하고 있는 시대 발전의 흐름에 따라 대규모의 정보를 빠르게 처리하기 위한 정보처리기술이 요구되고 있으며, 신호가 전송되는 채널 상에서 신호의 흐름

을 방해하는 잡음에 통계적인 해석이 절실해지고 있다.

신호가 이동하는 경로를 채널(channel)이라고 하는데, 통신에서는 두 가지의 의미로 사용된다. 첫째로 각각의 신호들이 송수신되는 주파수대역 하나의 단위를 채널이라고 부르고, 둘째로 신호가 전달되는 매질 특성 자체를 채널로 분류하기도 한다. 유선의 경우라면 케이블 자체를 채널이라 할 수 있고, 전자파를 이용한 무선통신에서는 공기 중 자체가 채널이 된다. 실제로 통신에서 사용하

본 논문은 2013년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Yoo-Chan Ra(Namseoul Univ.)

Tel: +82-41-580-2126 email: ycra@nsu.ac.kr

Received August 28, 2014

Revised January 6, 2015

Accepted January 8, 2015

는 채널은 매질 그 자체가 아니라 신호가 이동하고 있는 매질 상에 존재하는 잡음(Noise) 성분에 따라 여러 가지 채널로 분류된다. 즉 매질을 의미하는 채널은 잡음이라는 개념과 따로 생각할 수 없다. 일반적인 광시스템에서는 잡음이 항상 존재하며 외부로부터의 잡음이 더해지게 되며 광 신호 검출 시에도 전자기기의 고유잡음이 더해지게 된다. 광시스템에서 발생하는 기본적인 잡음 메커니즘은 산탄잡음과 열잡음이 있는데 이러한 잡음들은 광시스템에서 입사되는 광전력이 없을 경우 변동적인 잡음의 요소로 시스템의 성능에 커다란 영향을 미친다. 그러나 광검출기에서 산탄잡음과 열잡음이 광자가 전자로 변환 시에 미치는 통계적 특성에 관한 연구는 아직까지 미진한 상태이다.[1][2]

일반적으로 산탄잡음은 검출기에 제대로 입사되지 않고 산란되는 빛이나 열적으로 생성된 전자-정공 쌍의 결과로 나타나는 암전류(dark current) 산탄잡음으로 알려진 또 다른 잡음항들이 더해지게 된다. 이러한 산탄잡음은 수신기의 수신감도를 제한하는 가장 큰 요인으로 동작한다. 실제 수신기에는 검출된 미약한 광신호의 증폭과 복조를 위해 전자소자가 포함되는데, 이러한 전자소자들에서 도체의 불규칙한 열운동은 입사되는 광전력이 없을 때는 변동적인 잡음성분으로 더욱 크게 나타나게 된다.

따라서 신호의 전송 시에 채널 상에 존재하는 변동적인 잡음성분의 체계적인 해석은 보다 절실하다 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 광시스템 상에 존재하는 다양한 형태의 잡음 메커니즘에 대해 모델링을 하였으며 이를 이용하여 광시스템의 신호결정회로에서의 잡음의 영향에 대해 계산을 하였다.

2. 본론

2.1 광시스템의 잡음 메커니즘의 해석

일반적인 광시스템에는 잡음이 항상 존재하며, 또한 외부로부터 잡음이 더해지게 된다. 그리고 광검출 과정 시, 전자기기의 고유한 잡음이 더해지게 된다. 광수신기에서 전류의 변동을 유발하는 기본적인 잡음메커니즘은 산탄잡음(shot noise)과 열잡음(thermal noise)이다.[3][4] 산탄잡음은 광자가 전자로 변환시의 통계적 특성과 광검출기에 도달한 광자들이 프와송(Poisson)분포로 인해 발

생한다.

산탄잡음의 스펙트럼(spectrum) 밀도 $S_{sh}(v)$ 는 식 (1)으로 주어진 잡음의 분산 σ_{sh}^2 을 갖는 상수 또는 백색잡음으로 가정한다.[5]

$$\sigma_{sh}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{sh}(v) dv = 2qI_s B_e \quad (1)$$

여기서 B_e 는 광시스템의 유효 전자 잡음 대역폭이고 q 는 전하량이다. 산탄잡음에는 검출기에 제대로 입사되지 않고 산란되는 빛이나 열적으로 생성된 전자-정공 쌍의 결과로 나타나는 암전류(dark current) 산탄잡음으로 알려진 또 다른 잡음 항들이 더해지게 된다. 이러한 산탄잡음은 광시스템의 감도를 제한하는 가장 큰 요인으로 동작한다. 실제 광시스템에는 검출된 미약한 광신호의 증폭과 복조를 위해 전자소자가 포함되는데, 이러한 전자소자들에서 도체의 불규칙한 열운동은 입사되는 광전력이 없을 때는 변동적인 잡음성분으로 더욱 크게 나타나게 된다. 이러한 잡음성분은 열잡음 또는 나이퀴스트잡음(Nyquist noise)으로 불리는데, 광시스템의 검출감도를 극도로 저하시키고, 대부분의 실제적인 경우에는 산탄잡음보다 더욱 큰 요소로 존재한다. 일반적인 경우, 열잡음의 분산(variance)량은 거의 1THz 이상의 백색잡음이고, 식 (2)와 같이 모델링(modeling)할 수 있다.[6]

$$\begin{aligned} \sigma_{th}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{th}(v) dv \\ &= \left(\frac{4V_T q B_e}{Z} \right) \\ &= 8\pi V_T C_T q B_e^2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $S_{th}(v)$ 는 산탄잡음의 유사 전력 스펙트럼 밀도이고, V_T 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant)와 온도의 곱을 전하량으로 나눈 값으로 표현되는 열 전위, Z 는 유효잡음임피던스(impedance), C_T 는 광시스템의 유효잡음정전용량 그리고 B_e 는 전기신호의 대역폭이다. 유효잡음정전용량 G 를 유효잡음임피던스 Z 에 관련된 식으로 표현하면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_T = \left(\frac{1}{2\pi Z B_e} \right) \quad (3)$$

광시스템의 성능평가의 척도는 입력되는 '1' 또는 '0'의 구별에 필요한 광전력의 최소양이다. 시스템에서의 불규칙한 잡음은 신호의 검출과정에서 BER로 나타내는 에러의 발생률을 변화시킨다. 광섬유 시스템의 일반적인 BER은 10^{-9} 정도의 값을 갖는다. 이러한 BER은 잡음의 영향에 민감하게 변화하는 값으로 고정적으로 정규화시키기 어렵다는 문제점을 지니고 있다. 그리고 시스템의 성능을 결정하는 또 다른 파라미터(parameter)로 SNR을 사용하기도 하는데, SNR은 시스템의 예상전력(power budget)에 관련된 값으로서 데이터전송율과 시스템의 잡음레벨에 의존하는 값이다.

이에 본 논문에서는 광시스템의 감도를 정규화 하는 방법으로 비트간격(bit-interval)당 신호가 '1'인지 '0'인지를 결정하는 기준으로 필요한 광자(photon)의 수를 사용하였다. 비트 당 광자의 수로 표현되는 감도는 식 (4)에 의해 표현되는 수신된 광전력에 관련된다.[7]

$$N_p = \frac{P_s}{(h\nu)R_b} \quad (4)$$

여기서, R_b 는 비트 전송율이고 N_p 는 광시스템 감도의 척두치이다.

일반적으로 수신기의 수신 전력 또는 수신 감도와 같은 물리량의 표현은 척두치보다는 평균치를 이용하므로 식 (4)의 광시스템 감도의 척두치보다는 평균치인 $\overline{N_p}$ 를 주로 이용한다. 그리고 식 (2)을 이용하면 광전류는 식 (5)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_s = 2\overline{N_p}\eta qR_b \quad (5)$$

여기서, $\overline{N_p}$ 는 감도의 평균치이다.

2.2 광시스템에서 잡음의 영향 분석

시스템의 최적 성능에 대한 기초적인 한계는 시스템을 개발 하는데 필요한 요소이다. 이러한 한계치는 시스템 설계자가 이상적인 한계치로 시스템의 성능을 비교하는데 쓰이기도 하지만, 시스템의 성능을 개선하기 위한 적당한 한계치를 설정하는데 도움을 준다. 이러한 예의 대표적인 것이 정보이론의 Shannon의 법칙이다. 이와 마찬가지로 본 논문에서는 산탄잡음이 광수신기의 수신감

도에 미치는 영향에 대해 고찰한다.

광시스템이 광신호를 수신할 때, 광자는 식 (6)과 같이 초당 평균비율로 수신기에 도착한다.[33]

$$r = N_p R_b \quad (6)$$

여기서, r 는 광자의 도착율이다. 이러한 광자들의 도착시간에서 무질서도를 가정한다면, 이러한 평균 비율은 식 (7)에 나타난 것처럼 프와송 분포를 이용하여 특성화할 수 있다.

$$\Pr(N) = \frac{(rT)^N \exp(-rT)}{N!} \quad (7)$$

여기서, T 는 광시스템에서 광자의 검출시간이고, N 은 광자의 수이다. 위 식은 T 시간동안 광검출기에 도착 가능한 광자들의 수에 대한 확률을 나타내고 또한 OOK 시스템의 기본 원리를 나타낸다. 즉, OOK 시스템은 신호의 비트 값이 '1'인 상태 동안에는 광신호가 전송되지만, 신호의 비트 값이 '0'인 상태 동안에는 광신호가 전달되지 않기 때문에, 확률밀도는 신호의 비트 값이 '0'인 신호와 첫 번째 임펄스 사이의 한계 레벨을 결정을 갖는 임펄스의 이산 값이 된다.[8][9] Green의 정리에 의하면, 이러한 광자의 수를 집계하는 수신기는 신호의 비트 값이 1인 상태에 해당하는 동안 도착하는 광자 하나 하나의 계산에 의존한다.[33] 그러나 광자가 검출되지 않을 경우는 신호의 비트 값이 '0'인 신호의 전송으로 인한 것뿐만 아니라, 어떠한 양자의 분포의 가능성이 없을 정도로 약하게 존재하는 광신호가 수신되는 신호의 비트 값이 '1'인 상태의 전송이 잘못된 상황도 포함한다. 그러므로 광자 검출 동안에는 에러가 없게 되나, 광자가 검출되지 않는 경우에도 유한 에러확률이 존재하게 된다. 그러므로 에러확률은 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-rT) = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-r}{R_b}\right) = \frac{1}{2}(-N_p) \quad (8)$$

위 식은 '1'과 '0'의 전송이 동등하게 발생하는 경우에 이상적인 수신기를 이용하면 에러확률이 10^{-9} 정도를 유지하려면 평균적으로 10개의 광자가 필요함을 의미한다. 이 경우에 $\overline{N_p}$ 는 N_p 의 절반이 된다.

결정회로에서 수신된 신호와 잡음의 PDF를 수학적인 편리성을 위해 가우시안 분포로 가정한다. 가우시안분포를 사용하면 결과가 근사 값으로 나타나지만 이 결과를 통해서도 수신기감도를 평가할 수 있고, 또한 시스템에서 잡음이 급격하게 증가하는 대부분의 상황에서도 적합하기 때문이다.

산탄잡음적 한계를 적용한 다양한 모멘트(moment)는 식 (9)와 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu_{I(1)} = I_s \quad \mu_{I(0)} = 0 \quad (9)$$

$$\sigma_{I(1)}^2 = 2qI_s B_e \quad \mu_{I(0)} = 0 \quad (10)$$

여기서 $A_{I(1)}$ 는 비트 값이 1인 신호가 수신되는 경우를 나타내고, $A_{I(1)}$ 는 비트 값이 0인 신호가 수신되는 경우를 나타낸다. 양자효율이 균일한 것으로 가정하여 위식들을 다시 표현하면 식 (11)과 식(12)와 같이 된다.

$$\mu_{1/0} = \mu_{I(1/0)} \quad (11)$$

$$\sigma_{1/0} = \sigma_{I(1/0)} \quad (12)$$

여기서, 양자효율을 1로 가정하여 평균치를 나타내면 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\overline{N_p} = Q^2 \frac{B_c}{R_b} \quad (13)$$

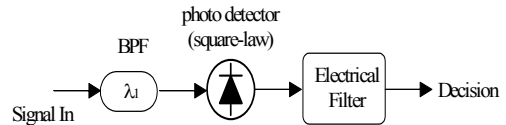
전기신호의 대역폭 B_c 가 신호의 비트 전송율 R_b 의 절반이고, 에리확률 P_e 가 10^{-9} 인 경우, 식 (1-28)은 비트 당 18개의 광자가 도착함을 나타낸다. 이 결과와 비트 당 10개의 광자가 도착하는 프와송 분포를 이용하여 얻어진 결과를 비교하면 가우시안 분포의 성질을 파악할 수 있다.[6]

광검출기가 $\eta < 1$ 의 양자효율을 갖는다는 가정하면, 위에서 평가된 수신기의 감도가 유사한 팩터(factor)에 의해 보정된다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 고려한 광시스템에서 잡음 발생 메커니

즘을 고려한 수신기구조는 그림 1과 같다. 수신기는 이상적인 자승검파검출기와 결정구간 동안 에너지를 측정하는 적분기 뒤에 대역통과필터가 위치한다. 수신기에 나타나는 잡음의 영향에 대한 해석은 가우시안 랜덤과정의 에너지 분포로부터 직접적으로 얻어지는데, 에리확률이 최소로 되는 한계레벨은 신호와 잡음의 확률분포에 의존한다.



[Fig. 1] Schematic diagram of receiver in optical system

결정회로의 입력 단에서 수신된 신호는 식 (14)과 같이 표현할 수 있다.[38]

$$I = \frac{1}{2T} \int_0^T [x^2(t) + y^2(t) + \overline{x^2}(t) + \overline{y^2}(t)] dt + I_n \quad (14)$$

여기서, $x(t)$, $y(t)$, $\overline{x^2}(t)$, $\overline{y^2}(t)$ 는 대역폭 $B_0/2$ 의 기저대역 가우시안 프로세스이고, I_n 는 수신기의 전기적인 부분으로 인한 열잡음 전류이다. 식 (14)에서 산탄잡음은 원래의 신호변동 그리고 PIN 수신기의 열잡음과 비교할 때 매우 적은 값이므로 무시한다. 광시스템의 수신기에 수신된 비트 값이 1인 상태에서 $x(t)$, $y(t)$, $\overline{x^2}(t)$ 그리고 $\overline{y^2}(t)$ 는 유사잡음 신호성분이다. 이러한 성분은 수신된 비트 값이 0인 상태에서는 이러한 항들이 존재하지 않고, 수신된 비트 값이 1인 상태에서는 $x(t)$, $y(t)$, $\overline{x^2}(t)$ 그리고 $\overline{y^2}(t)$ 는 유사잡음 신호와 전치증폭기의 ASE 잡음에 일치하는 성분을 더한 값이 된다. 그러므로 0인 상태에서는 전치증폭기의 ASE 잡음의 성분만 존재하게 된다. 전치증폭기 이득이 충분히 커서 전기적인 열잡음을 무시할 수 있다고 가정하면 식 (2-2)에 의해 주어지는 에리확률을 최소로 하기위한 한계레벨 전류 I_{th} 가 주어질 때 수신기는 $I > I_{th}$ 일 때 1이 전송된 것으로 결정하고, $I < I_{th}$ 일 때는 0이 전송된 것으로 결정한다.

$$P_1(I_{th}) = P_0(I_{th}) \quad (15)$$

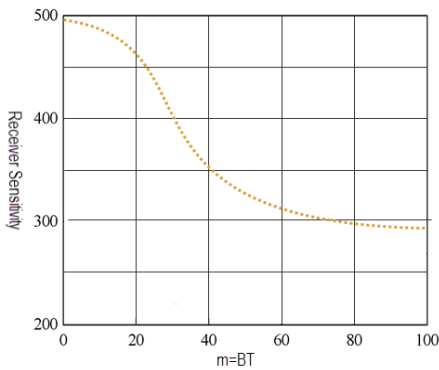
여기서 P_1 는 1인 신호 전류의 확률 밀도 함수이고, P_0 는 0인 신호 전류의 확률 밀도 함수이다. 일반적으로 주어진 분포에 대한 정밀한 수학적 표현을 얻는 것은 어려우나 평균값을 얻는 것은 상대적으로 쉽다. 앞 장에서 논의한 바와 같이 일반적인 근사에 이용되는 분포는 가우시안 분포를 이용한다. 가우시안 분포의 경우에 에러확률은 식 (16)과 같이 표현된다.

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (16)$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)$$

결정신호에 대해 가우시안 근사를 적용하는 것은 부적당함이 Marcuse에 의해 밝혀졌으므로, 본 논문에서는 유사 잡음 신호의 경우에 대한 결과까지 이러한 내용을 확장한다.

그림 2는 m 의 변화에 따른 광시스템의 수신감도의 변화를 보이고 있다. m 의 값이 커짐에 따라 잡음의 영향이 줄어들어 표준에러확률을 유지하기 위한 필요 광전력이 적어 짐을 알 수 있다. 이를 통해 m 값의 조절을 통해 광시스템의 수신단에서 잡음의 영향을 억제할 수 있음을 확인할 수 있다.



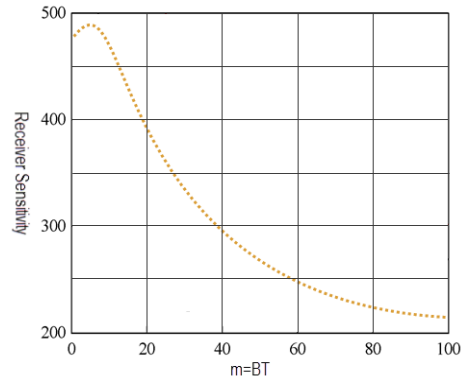
[Fig.2] Receiver sensitivity along the m

그림 3은 전치증폭기 광시스템의 수신기의 앞단에 붙여 m 의 변화에 대한 감도의 변화를 나타낸 것이다.

이 경우는 그림 2에 비해 표준 에러 확률을 유지하기 위해 필요한 광전력이 보다 더 적어짐을 확인할 수 있는데 이는 전치증폭단이 잡음의 영향을 상쇄시키는 역할을 수행하기 때문으로 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 일반적인 광시스템에서 항상 존재하는 잡음 및 외부로부터 더해지는 잡음이 광시스템의 수신기의 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰을 통해 통신채널 및 수신기에서 전자의 브라운운동으로 발생하는 열잡음을 m 의 값을 통해 광시스템의 수신전력에 미치는 영향을 계산하였다. 광시스템에서 표준에러확률을 유지할 수 없는 경우는 무의미하므로 표준에러확률을 유지하기 위해 필요한 m 에 대하여 광시스템의 수신감도를 계산하는 방식을 통하여 연구를 수행하였다.



[Fig. 3] Receiver sensitivity along the m with preamplifier

이에 본 논문에서는 광전송시스템에서 광검출기가 1 이하의 양자효율을 갖는 경우를 고려하여 온-오프 키잉 전송시에 수신기의 수신 감도를 계산하였다. m 이 50이상인 경우 표준에러확률을 유지하기 위한 광시스템의 수신기 감도가 300이하로 계산되어 m 가 적은 경우에 비해서 저출력 시스템을 구성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 값도 실제 시스템에서는 큰 부담이 되는 값이므로 보다 저출력 광원을 사용하는 경우를 고려하여 수신단에 전치증폭기를 설치한 경우에 대해서도 고려하였는데, 그림 3에서 보이는 바와 같이 보다 적은 출력을 갖는 광원을 사용해도 무방하다는 결과를 얻을 수 있었다.

향후 본 논문에서 고려한 잡음메커니즘을 고쳐한 광시스템의 수신기가 설계가 실제로 구현이 된다면 보다 우수한 성능의 광시스템의 수신기를 구현이 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] National Information Society Agency Information Strategy Planning Division, "Paradigm shift in the era of smart vision and ICT strategy", National Information Society Agency, 2010.
- [2] T. Li and M.C. Teich, "Photon point process for travelling-wave laser amplifiers," *J. Quantum Elect.*, vol. 29, no. 9, pp. 2568-2578, 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/3.247716>
- [3] N. J. Frigo, K. C. Reichmann, P.P. Iannone, J.L. Zyskind, J.W. Sulhoff and C. Wolf, "A WDM PON architecture delivering point-to-point and multiple broadcast services using periodic properties of a WDM router," *Optical Fiber Communications Conference*, paper PD-24, Dallas (TX), Feb. 1997.
- [4] Paul E. Green, *Fiber Optic Networks*. Prentice Hall: New Jersey, 1993.
- [5] L. Nguyen, J. F. Young and B. Aazhang, "Photoelectric current distribution and bit error rate in optical communication systems using a superfluorescent fiber source," *J. Lightwave Technology*, vol.14, no. 6, pp. 1455-1466, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/50.511675>
- [6] S. D. Personick, "Receiver design for digital fiber-optic communication systems" *Bell Systems Technical Journal*, vol. 52, no. 6, pp. 843-874, 1973.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1973.tb01993.x>
- [7] B. E. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0471213748>
- [8] J. A. Arnaud, "Enhancement of optical receiver sensitivities by amplification of the carrier," *IEEE j. Quantum Electronics*, vol. 4, no. 11, pp. 893-895, 1968.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/QE.1968.1074977>
- [9] D. Marcuse, "Derivation of analytical expressions for the bit-error probability in lightwave systems with optical amplifiers," *J. Lightwave Technology*, vol. 8, no. 12, pp. 1816-1823, 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/50.62876>

나 유 찬(Yoo-Chan RaHong)

[정회원]



- 1994년 2월 : 원광대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 원광대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1995년 8월 ~ 1998년 2월 : 정보통부 전파연구소 공업연구사
- 2010년 3월 ~ 2011년 2월 : 칼슨 뉴먼대학 교환교수
- 1998년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

이동통신, 전자통신회로