

스펙트럼 분할된 광신호의 FSK 전송 특성 해석

하은실
남서울대학교 정보통신공학과

An Analysis of FSK Transmission Characteristics of Spectrum Sliced Optical Signals

Eun-Sil Ha

Dept. of Information-Communication Engineering, NamSeoul University

요약 고용량의 데이터의 전송이 빈번해지기 때문에 사용자들은 더 많은 대역폭을 필요로 하고, 더 큰 대역폭을 갖는 통신망의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 필요성을 만족하는 통신망으로는 광통신망이 있다. 따라서 광통신시스템의 전송 용량을 증대하는 연구가 선행되고 있다. 그러나 일반적인 광통신시스템에서 전송매체인 광섬유를 통해 전송된 신호는 수신 시스템에서 직접 검출방식을 통해 신호를 검출한다. 이런 방법은 광신호가 갖는 대역폭의 전체를 이용할 수 없다는 단점을 갖는다. 또한 광신호의 전송할 때, 이웃한 채널로부터의 영향을 받아 신호 대 잡음비가 나빠진다는 문제점도 갖는다. 이러한 상황을 극복하기 위해 외부의 간섭과 잡음의 영향을 최소화하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 앞에서 언급한 상황을 극복하기 위해, 스펙트럼 분할된 신호를 디지털 전송방식인 FSK를 이용하여 전송하였다. 그리고 광통신 시스템의 수신단에서 검출된 신호의 특성을 해석하였다. 스펙트럼 분할된 신호의 PDF로는 가우시안 분포를 사용하였고, 광통신 시스템의 수신단에서의 신호는 k -자승 분포를 갖는 것으로 가정하였다. 해석한 결과 레이저 소스를 전송하는 것보다 스펙트럼 분할된 신호를 전송하는 것이 보다 우수함을 확인할 수 있었다.

Abstract Since transmissions of large amounts of data are frequent, users require more bandwidth, and the need for communications networks having greater bandwidth is increasing. One communications network satisfying this need is an optical communications network. Therefore, studies to increase the transmission capacity of optical communications systems have been carried out. However, in a general optical communications system, a signal transmitted through optical fiber (a transmission medium) is detected through direct detection in the receiving system. This method has a disadvantage in that the entire bandwidth of the optical signal cannot be utilized. Also, when transmitting an optical signal, there is a problem where the signal-to-noise ratio is affected by neighboring channels. To overcome this situation, various studies are being conducted to minimize the influence of external interference and noise. This paper overcomes the situation by transmitting spectrum-sliced signals using the digital transmission system, FSK. Analyzing the characteristics of the signals detected in the receiver of the optical communications system, Gaussian distribution is used for the PDF of the spectrum-sliced signal, and the signal at the receiving end of the optical communications system is assumed to have a k -square distribution. The results of the analysis confirmed it is better to transmit the spectrally divided signal rather than transmit the laser source.

Keywords : FSK, Gaussian distribution, Optic, Slice, Spectrum

1. 서론

과거의 광통신시스템에서 전송되는 광신호를 검출할

때는 직접 검출 방식을 사용하였기 때문에 광신호가 갖는 신호의 대역폭에 비해 매우 적은 대역폭만을 사용할 수 있었다. 또한 광통신시스템에서 전송되는 신호는 수

본 논문은 남서울대학교 2015년도 교내 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Eun-Sil Ha(Namseoul University.)

Tel: +82-42-580-2129 email: hes@nsu.ac.kr

Received November 25, 2016

Revised December 7, 2016

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

신기에 도착할 때에는 신호의 세기가 매우 미약해서 신호 대 잡음비(SNR : signal to noise)가 좋지 않아 수신된 신호의 판별에 어려움을 겪게 된다. 이에 다른 데이터 전송 채널로부터 영향을 받지 않도록 하는 광신호의 전송기법이 요구되고 있다.

본 논문에서는 광신호의 전송도중 이웃한 채널로부터의 간섭 및 다양한 형태를 갖는 잡음원의 영향을 최소화하기 위해 스펙트럼 분할된 신호를 FSK 방식으로 전송하여 광통신 시스템의 수신단에서 신호의 수신특성을 해석하였다.

스펙트럼 분할된 신호의 해석에는 수신기의 양자역학적 한계를 파악하기 위해 신호와 잡음의 PDF로는 가우시안 분포를 사용하였고, 광통신 시스템의 링크 끝단에서 신호는 k-자승 분포를 갖는 것으로 가정하였다.

이러한 시스템의 구성을 통하여 스펙트럼 분할된 FSK 신호가 수신부에서 검출될 때 비트에러율(BER : bit error rate)을 유지하기 위한 광전력을 광자의 수로 표현하여 신호의 전송특성을 해석하였다. 이를 통해 시스템의 수신단에서 스펙트럼 분할된 신호를 FSK 전송시에 수신감도 \bar{N}_p 를 계산하였다. 또한 수신감도를 수신기에서 시스템의 대역폭(B_o)와 상호 비트율(T)의 함수인 m 을 이용하여 정규화를 수행하였다.

2. 광통신시스템에서의 신호 검출

2.1 On-Off Key 전송

디지털시스템에서는 ‘0’과 ‘1’만을 이용하여 신호를 표현하므로 광통신시스템에서 신호를 디지털 형태로 전송하기 위해서는 변조를 해야하는데, FSK 전송은 서로 다른 두 개의 주파수를 사용하여 데이터를 변조하는 방식이다. 일반적인 OOK 전송방식에서는 전송되는 신호가 ‘0’과 ‘1’ 중 하나를 선택하므로 수신기의 광검출기는 데이터를 전기적인 펄스로 변환하고 필터는 bit가 전송되는 동안에 에너지를 모으는 역할을 수행한다. 그러나 FSK 전송방식에서는 간섭계를 이용하여 수신된 신호를 OOK 형태로 변환을 한 후 OOK 방식과 같은 과정을 통해 신호를 해석해야 한다.

OOK 전송된 ‘0’과 ‘1’ 신호의 잡음 분산은 식 (1), (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_0^2 = I_{ASE}^2 \frac{B_c}{B_o} \tag{1}$$

$$\sigma_1^2 = 2I_s I_{ASE} \frac{B_c}{B_o} + I_{ASE}^2 \frac{B_c}{B_o} \tag{2}$$

여기서, B_o 와 B_c 는 각각 신호의 대역폭이고, 이를 이용하여 수신기의 광전류는 다음과 같다.

$$I_s = 2\bar{N}_p \eta q R_b G \tag{3}$$

그리고 수신기의 감도는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\bar{N}_p = 2n_{sp} Q^2 \gamma \left[1 + \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{B_o T}{\gamma}} \right] \tag{4}$$

여기서, γ 는 수신기의 대역폭의 비이다.

표준에러확률과 n_{sp} 가 1이라는 조건을 고려하면 수신기의 감도는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{N}_p = 36 + 6\sqrt{2B_o T} \tag{5}$$

식 (5)에서 $B_o T$ 를 1이라고 가정하면 \bar{N}_p 는 44.5가 되고, 편광필터가 사용되면 \bar{N}_p 는 42가 된다.

그리고 실제적인 수신기감도는 γ 를 0.7을 사용하므로 120.8이 된다.

2.2 Frequency Shift Keying 전송

FSK 변조로 신호를 전송하는 경우 수신되는 신호가 증폭기에서 병합되는 것을 제외하면 On-Off Keying 전송과 동일하므로 FSK 전송에서 수신기의 감도는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{N}_p = 2n_{sp} Q^2 \gamma \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2B_o T}{Q^2 \gamma}} \right] \tag{6}$$

표준에러확률과 n_{sp} 가 1이라는 조건을 고려하면 식 (6)은 식(7)과 같이 된다.

$$\bar{N}_p = 36(1 + 0.33\sqrt{9 + B_o T}) \tag{7}$$

실제적인 수신기감도는 γ 를 0.7을 사용하면 식(8)과 같이되고, $B_o T=1$ 을 대입하면 205.52가 된다.

2.3 전송특성의 해석을 위한 근사법

광통신시스템의 수신단의 결정회로 입력 단에서 수신된 신호는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \frac{1}{2T} \int_0^T \left[x^2(t) + y^2(t) + \tilde{x}^2(t) + \tilde{y}^2(t) \right] dt + I_n \quad (8)$$

여기서 $x(t)$, $y(t)$, $\tilde{x}(t)$, $\tilde{y}(t)$ 대역폭 의 기저대역 가우시안 프로세스이고, I_n 은 수신기의 열잡음 전류이다. 식 (8)에서 산탄잡음은 원 열잡음에 비해 작은 값이므로 무시한다.

전치증폭기 이득이 충분히 큰 경우에는 식 (9)에 의해 주어지는 에리확률을 최소로 하기 때문에 수신기는 $I > I_{th}$ 인 경우 ‘1’이 전송된 것으로 가정하고 그 반대의 경우에는 ‘0’이 전송된 것으로 가정한다.

$$P_1(I_{th}) = P_0(I_{th}) \quad (9)$$

여기서 P_1 과 P_0 는 각각 ‘1’과 ‘0’인 신호의 확률밀도함수이다. 주어진 분포에 대한 정밀한 수학적 표현에 비해 평균값 μ_0 , μ_1 과 표준편차 σ_0 , σ_1 를 계산하는 것은 상대적으로 쉽기 때문에 을 얻는 것은 어려우나 평균값인 μ_1 과 μ_0 와 표준 편차인 σ_1 과 σ_0 를 얻는 것은 상대적으로 쉽다. 따라서 해석의 용이성을 위해 그림 1과 같은 가우시안 분포를 이용한다. 가우시안 분포의 경우에 에리 확률은 식 (10)과 같이 표현된다.

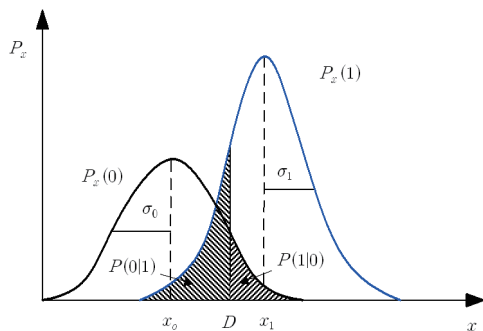


Fig. 1. Gaussian probability distributions

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (10)$$

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

여기에서 식 (8)을 간략화하기 위해 식 (10)의 적분항이 식 (11)과 같이 근사되는 것으로 가정한다.

$$I = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{4m} [x_i^2 + y_i^2 + \tilde{x}_i^2 + \tilde{y}_i^2] \quad (11)$$

식 (8)과 식 (11)과 같이 표현되는 광신호 전류의 실효치와 표준편차는 식 (12), (13)과 같이 표현된다.

$$\mu_1 = 2\sigma^2, \quad \mu_0 = 0 \quad (12)$$

$$\sigma_1^2 = \left(\frac{2}{m}\right)\sigma^4 + \sigma_g^2, \quad \sigma_0^2 = \sigma_g^2 \quad (13)$$

여기에서 σ_g^2 는 가우시안 분포를 적용하였을 때의 열잡음 전류의 분산을 나타낸다. 그리고 σ^2 은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_g Q}{1 - \frac{Q^2}{2m}} \quad (14)$$

윗 식에서 σ^2 는 광전류의 평균을 나타내므로 \bar{N}_p 는 광통신시스템의 수신단에 도달한 광신호의 광자수를 의미하므로 이 값을 이용하여 식 (14)를 식 (15)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\sigma^2 = \bar{N}_p \eta q R_b \quad (15)$$

수신기의 열잡음 전류의 분산은 식 (16)과 같이 주어지고, 식 (16)에 있는 C_T 는 식 (17)과 같이 주어진다.

$$\sigma_g^2 = \left(\frac{4V_T q B_e}{Z}\right) \quad (16)$$

$$= 8\pi V_T C_T q B_e^2$$

$$C_T = \left(\frac{1}{2\pi Z B_e}\right) \quad (17)$$

이상의 식들을 이용하여 정리하면 식 (18)과 같이 표

현할 수 있다.

식 (18)에서 Q 를 6, η 를 0.7 그리고 C_T 를 $0.1pF$ 을 대입하면 식 (19)를 얻을 수 있다.

$$\bar{N}_p = \frac{\left(\frac{Q}{2\eta} \sqrt{\frac{8\pi C_T V_T}{q}}\right)}{\left(1 - \frac{Q^2}{2m}\right)} \quad (18)$$

$$\bar{N}_p = \frac{2732}{\left(1 - \frac{18}{m}\right)} \quad (19)$$

식 (19)의 의미는 10^{-9} 의 에러확률은 m 이 18보다 작은 경우에 얻어짐을 의미한다. 그리고 광신호에너지 분산으로 인한 전력 손실은 $-10\log(1-18/m)$ 으로 표현된다.

광통신시스템에서 ‘1’인 신호는 신호 검출후 열잡음이 더해져서 나타나는 잡음의 버스트이고, ‘0’인 신호는 열잡음으로만 나타나는데, 열잡음에 대한 확률밀도함수는 다음 식으로 표현된다.

$$P_g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (20)$$

1과 0비트에 관련된 분포함수의 교차점에서 최적의 결정한계레벨 $x = x_{th}$ 가 발생한다. 1과 0 비트의 발생확률이 같은 경우의 에러확률은 식 (21)과 같이 표현된다.

$$P_e = 0.5 \left[\int_{-\infty}^{x_{th}} P_r(x) dx + \int_{x_{th}}^{\infty} P_g(x) dx \right] \quad (21)$$

식 (21)에서 에러 확률을 최소화 하기 위한 한계레벨은 식 (22)와 같이 표현할 수 있으며, 이를 이용하면 식 (21)은 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r(x_{th}) = P_g(x_{th}) \quad (22)$$

$$P_e \approx \int_{x_{th}}^{\infty} P_g(x) dx \quad (23)$$

위 식에 10^{-9} 의 에러확률을 대입하면 수신부에서의 수신감도와 m 의 관계식은 식 (24)와 같이 표현된다.

그림 2는 식(24)를 수치 해석한 결과로 다음과 같은 의미를 갖는다. 첫째로 광자수가 큰 경우 고출력의 광전력은 m 이 10 이하의 경우에는 10^{-9} 의 에러확률이 확보되는데, 이것은 광통신시스템에서 전력효율이 좋아짐을 나타내고, 근사해석법의 경우에는 m 이 20보다 작은 경우에는 수신시스템의 감도를 표현하지 못함을 의미한다.

$$\frac{0.5}{(2m-1)!} \left(\frac{644m}{\bar{N}_p}\right)^2 * \quad (24)$$

$$\left[\left(\frac{-644m}{\bar{N}_p} - 8.5\right) \Gamma(0.5+m) \text{Hyg}(0.5+m, 1.5, k) \right] = 1$$

여기서,

$$k = \frac{103648.58m^2}{\bar{N}_p^2} - \frac{2732.26m}{\bar{N}_p} + 18$$

즉, m 이 20인 경우 수치해석이 근사해석법에 비해 7.2dB의 우수함을 보인다.

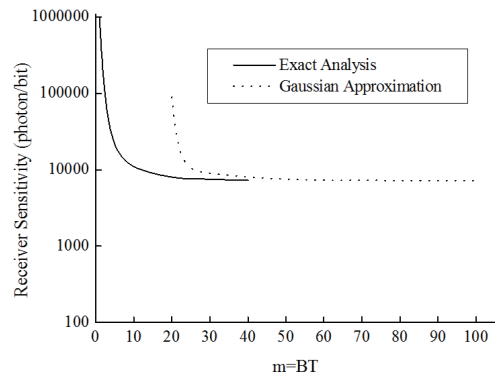


Fig. 2. Receiver sensitivity on $P_e = 10^{-9}$

3. 스펙트럼 분할된 FSK 전송 특성 해석

광통신시스템의 일반적인 변조방식은 On-Off Keying 방식이지만 스펙트럼 분할신호와 같은 시스템의 환경에서는 유사잡음신호의 처리가 어렵기 때문에 본 논문에서

서는 광대역 유사잡음신호들을 전송하는 경우에 FSK 시스템을 적용하여 그 전송 특성을 On-Off Keying 비교한다.

FSK 전송을 통해 전송된 신호를 검출하기 위한 수신기의 구조는 그림 3에 보이는 이중필터구조를 이용한다.

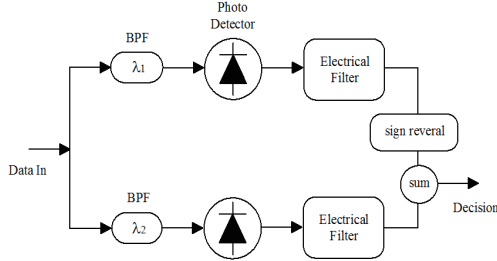


Fig. 3. Typical receiver for FSK transmission

그림 3의 시스템에서 신호는 식 (25)과 (26)과 같은 광전류와 잡음 분산으로 표현된다.

$$\mu_{I(1)} = 2\sigma^2, \quad \mu_{I(0)} = 0 \quad (25)$$

$$\sigma_{I(1)}^2 = \frac{2}{m}\sigma^4 + \sigma_g^2, \quad \sigma_{I(0)}^2 = \sigma_g^2 \quad (26)$$

여기서 $\mu_{I(1/0)}$ 는 광전류의 평균치이고, $\sigma_{I(1/0)}$ 는 광전류의 평균치이고, $\sigma_{I(1/0)}^2$ 는 잡음 분산이다. 광전류와 잡음분산 값은 그림 3에 표현된 필터들의 출력값의 차이로 결정되고, 식 (27)과 식 (28)에 의해 결정된다.

$$\mu_1 = \mu_{I(1)} - \mu_{I(0)}, \quad \mu_0 = \mu_{I(0)} - \mu_{I(1)} = -2\sigma^2 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 &= \sigma_0^2 \\ &= \sigma_{I(1)}^2 + \sigma_{I(0)}^2 \\ &= \frac{2}{m}\sigma^4 + 2\sigma_g^2 \end{aligned} \quad (28)$$

그리고 Q 는 식 (29)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \\ &= \frac{4\sigma^2}{2\sqrt{\frac{2}{m}\sigma^4 + 2\sigma_g^2}} \end{aligned} \quad (29)$$

식 (29)를 σ^2 에 대해 다시 표현하면 식 (30)과 같이 표현된다.

FSK 전송의 경우에는 광전류의 침두치와 평균치같다. 따라서 식 (31)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_g Q}{\sqrt{2}\sqrt{1 - \frac{Q^2}{2m}}} \quad (30)$$

$$2\sigma^2 = \bar{N}_p \eta q R_b \quad (31)$$

식 (30)과 식 (31)을 이용하여 FSK 전송시스템의 전송특성을 수신감도로 나타내면 식 (32)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{N}_p = \frac{2\frac{B_c}{R_b} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}\eta} \sqrt{\frac{8\pi V_T C_T}{q}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{Q^2}{2m}}} \quad (32)$$

그리고 $B_c = R_b/2$ 라 놓으면 식 (32)는 식 (33)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{N}_p = \frac{\left(\frac{Q}{\sqrt{2}\eta} \sqrt{\frac{8\pi V_T C_T}{q}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{Q^2}{2m}}} \quad (33)$$

식 (43)에 10^{-9} 의 에러확률, η 는 0.7 그리고 C_T 를 $0.1pF$ 을 대입하면 식 (34)를 얻을 수 있다.

$$\bar{N}_p = \frac{3864}{\sqrt{1 - \frac{18}{m}}} \quad (34)$$

식 (34)로 주어지는 결과를 계산한 결과가 그림 4에 보이고 있다.

그림 4에 나타난 바와 같이 스펙트럼 분할된 소스의 경우는 m 에 따라 감도가 변화하지만 Laser source의 경우는 수신부의 감도가 거의 상수와 같다.

그림 3의 FSK 시스템에서 신호가 하나의 채널에만 존재하면 채널의 출력은 가우시안 분포를 띄는 채널의 열잡음이 더해지는 스펙트럼 분할된 신호 전력이 된다.

그림 5는 그림 4와의 비교를 위해 κ -지승법을 이용하여 해석을 한 결과이다. 그림 4와 마찬가지로 스펙트럼 분할된 신호의 FSK 전송이 수신부의 감도가 훨씬 우수함

을 확인 할 수 있다.

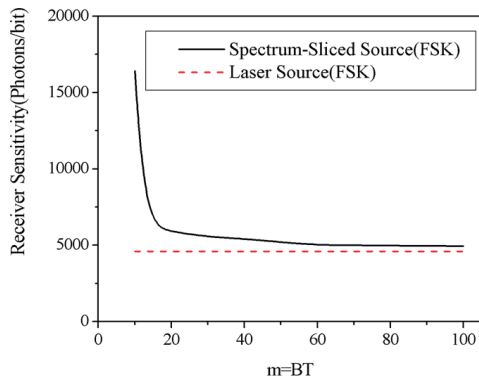


Fig. 4. A sensitivity for a receiver using FSK transmission approximate analysis method

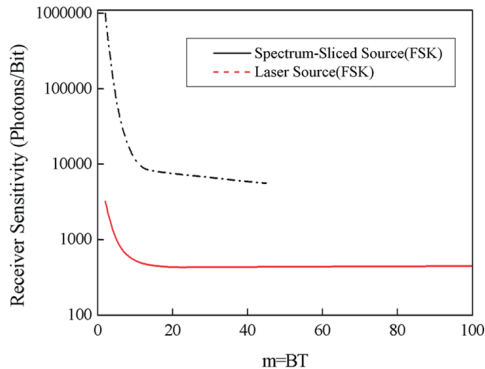


Fig. 5. A sensitivity for a receiver using FSK transmission k-square method

4. 결론

현재의 광통신시스템에서 시스템의 가격을 낮추기 위해서 스펙트럼 분할된 광신호를 전송하는 방법에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

스펙트럼 분할된 광신호를 전송하는 방법은 처음에는 송신기의 구성의 복잡성을 해결하는 방법으로 제시되었지만 광대역 특성을 갖는 광신호의 초과잡음을 제거하는데 고가의 비용이 필요하므로 시스템의 가격을 낮추는 방법으로는 적합하지 않다.

이에 본 논문에서는 스펙트럼 분할된 광신호를 일반적인 디지털 전송기법인 FSK 기법을 이용하여 광신호를 전송하고 이를 수신단에서 수신하는데 필요한 수신기의 평균 감도를 계산하였다. 이를 통해 광대역 신호를 사용

하는 것보다 스펙트럼 분할된 신호를 FSK 전송하는 것이 훨씬 효율이 우수함을 확인하였다.

References

- [1] Y. Cheng and S.-H. Hwang, "Subcarrier intensity modulation-spatial modulation for optical wireless communications," *J. KICS*, vol. 38A, no. 12, pp. 1086-1093, Dec. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2013.38a.12.1086>
- [2] N. Kirman and J. Martinez, et al., "A power-efficient all-optical on-chip interconnect using wavelength-based obvious routing," in *Proc. of 15th edition on Architectural support for programing languages and operating systems (ASPLOS)*, pp. 15-28, Pittsburgh, PA, USA, Mar. 2010.
- [3] M. Briere and B. Girodias, et al., "System level assessment of an optical Noc in an MPSoC platform," in *Proc. of IEEE Conf. on Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, pp. 1-6, Nice, France, Apr. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1109/date.2007.364438>
- [4] N. Sherwood-Droz and k. Preston, et al., "Device guidelines for WDM interconnects using silicon microring resonators," in *Proc. of Workshop on the Interaction between Nanophotonic Devices and Systems (WINDS)*, pp. 53-64, Atlanta, GA, USA, Dec. 2010.
- [5] B. A. Small, B. G. Lee "Multiple-wavelength integrated photonic networks based on microring resonator devices," *Journal of Optical Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 112-120, oct. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1364/JON.6.000112>
- [6] G. Hendry and R. Robonson, "Time-division-multiplexed arbitration in silicon nanophotonic network-on-chip for high performance chip multiprocessors", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 71, no. 5, pp. 641-650, May 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2010.09.009>

하 은 실(Eun-Sil Ha)

[정회원]



- 1987년 2월 : 경북대학교 전자공학 (공학사)
- 1995년 2월 : 서강대학교 대학원 정보처리학과 (이학석사)
- 2005년 3월 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터고학부 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

OFDM, 광시스템