

광 수신시스템에서 버터워스필터의 주파수 응답 효과에 관한 영향

김선엽
남서울대학교 정보통신공학과

A Effect of Frequency Response Effect of Butter-Worth Filter on Optical Receive System

Sun-Yeob Kim
Dept. of Information Communication, Namseou University

요 약 정보전송시스템의 백본 역할을 하고 있는 광시스템에서는 시스템의 성능평가 및 최적화를 위해 신호와 잡음의 통계 특성에 대한 평가가 필수적이다. 광 수신시스템에서는 수신감도를 개선하기 위해 광 검출기 전단에 광증폭기를 채용하여 수신감도를 개선하고 있으나 광 검출기의 출력부에 첨가되는 ASE 잡음으로 인해 광수신기에서 광신호에 대한 전자신호의 대역폭이 비가 변화되는 문제점 또한 존재한다. 이러한 신호들의 대역폭의 비의 변화 문제는 출력단에 존재하는 필터의 통과대역 특성에 따라 변화하게 되는데, 주파수 응답 효과는 무한대의 차수를 갖는 필터를 구성하면 해결할 수 있으나 이를 실제 구현하는 것은 거의 불가능하므로 본 논문에서는 버터 워스 필터를 구현하여 필터의 차수에 따른 광 수신시스템의 주파수 응답 특성을 평가하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 Butter-Worth 필터의 차수 N 이 증가하면 필터의 수신감도가 증가됨을 확인 할 수 있었다. 또한 다양한 n_{sp} 값의 변화에 대한 시뮬레이션 결과 n_{sp} 가 증가할수록 수신감도가 증가함을 확인할 수 있었다. 즉, n_{sp} 에 따라 광전류의 평균치는 증가하고 분산은 감소하기 때문인 것으로 평가할 수 있다.

Abstract In an optical system that serves as the backbone of an information transmission system, it is essential to evaluate the statistical characteristics of the signal and noise for a performance evaluation and optimization of the system. The optical receiver system improves the reception sensitivity by adopting an optical amplifier in front of the optical detector to improve the reception sensitivity, but some problems change the bandwidth of the electronic signal to the optical signal in the optical receiver due to the ASE noise added to the output of the optical detector. The problem of changing the ratio of the bandwidth of these signals varies according to the passband characteristics of the filter present at the output stage. The frequency response effect can be solved by constructing an infinite order filter, but it is almost impossible to implement it. In this paper, the Butterworth filter was implemented to evaluate the frequency response characteristics of an optical receiver system according to the filter order. The simulation results showed that the receiver sensitivity increases as the order of Butter-Worth filters increases. In addition, as a result of simulation of the change of various values, it was confirmed that the reception sensitivity increased with increasing. That is, the average photocurrent increases, and the dispersion decreases with increasing .

Keywords : ASE, Butter-Worth Filter, Detector, Frequency Response, Optic Receiver

이 논문은 2018년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음

*Corresponding Author : Sun-Yeob Kim(Namseoul Univ.)

email: sykim0599@nsu.ac.kr

Received December 27, 2019

Revised January 23, 2019

Accepted February 7, 2020

Published February 29, 2020

1. 서론

통신기술이 발전함에 따라 정보의 전송 및 활용에 대한 인간의 욕구는 나날이 증대되고 있으며 다양한 과학 기술발전의 원천이 되고 있다[1]. 이러한 정보전송시스템의 백본 역할을 하고 있는 광시스템에서는 시스템의 성능평가 및 최적화를 위해 신호와 잡음의 통계 특성에 대한 평가가 필수적이며, 이러한 성능평가 방법은 광 수신 시스템이 표준 비트 에러율을 유지하기 위한 평균 광전력의 계산이 이용되고 있으며, 평균 광전력은 전송되는 비트에 들어있는 광자수를 통해 나타내고 있다[2,3].

그리고 광 수신시스템에서는 수신감도를 개선하기 위해 광 검출기 전단에 광증폭기를 채용하여 수신감도를 개선하고 있으나 광 검출기의 출력부에 첨가되는 ASE 잡음으로 인해 광수신기에서 광신호에 대한 전자신호의 대역폭이 비가 변화되는 문제점 또한 존재한다.

이러한 신호들의 대역폭의 비의 변화 문제는 출력단에 존재하는 필터의 통과대역 특성에 따라 변화하게 되는데, 이를 광 수신시스템의 주파수 응답 효과라 한다.

이 주파수 응답 효과는 무한대의 차수를 갖는 필터를 구성하면 해결 할 수 있으나 이를 실제구 현하는 것은 거의 불가능하므로 본 논문에서는 버터 위스 필터를 구현하여 필터의 차수에 따른 광 수신시스템의 주파수 응답 특성을 평가하였고, 전송 방식에 따른 광 수신시스템의 감도도 새롭게 평가하였다.

2. 광시스템에서 신호의 검출

2.1 성능해석을 위한 확률계산

Fig. 1은 광 수신시스템에서 사용되는 수신부의 블록도가 보이고 있다.

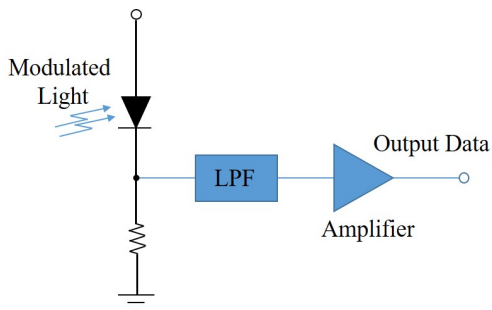


Fig. 1. A block diagram of optical receive system

Fig. 1에 보이는 시스템에서는 수신부에 입사하는 신호의 반송파와 위상이 동일한 국부발진기를 구현하기 어려우므로 직접검파가 이용된다[4,5].

이러한 직접검파에서 광 수신시스템에서 광신호 검출의 최소 임계치는 식 (1)으로 표현된다.

$$\frac{\partial P_e}{\partial S_{th}} = 0 = -\Pr(0)P_x^0(S_{th}) + \Pr(1)P_x^1(S_{th}) \quad (1)$$

식 (1)은 사전 전송 확률로서 사전확률이 동일한 때에는 확률밀도함수가 같도록 구성된 후 계산한다. 광 수신 시스템에서 수신기의 성능을 저하시키는 주요한 요소는 열잡음인데, 열잡음은 확률밀도함수를 가우시안 프로파일로 가정하여 계산하는 것이 편리하다[5].

광 수신시스템에서 검출되는 신호와 부가되는 잡음에 대해 가우시안 프로파일을 이용하여 표현하는 경우 일반적인 확률 식 (2)와 (3)으로 나타낸다.

$$P(1|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \int_{S_{th}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\mu_0 - x)^2}{2\sigma_0^2}\right) dx \quad (2)$$

$$P(0|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \int_{-\infty}^{S_{th}} \exp\left(-\frac{(\mu_1 - x)^2}{2\sigma_1^2}\right) dx \quad (3)$$

여기서, $\mu_{1(0)}$ 는 1(0)인 경우 광전류 값이고, $\sigma_{1(0)}$ 는 1(0)인 경우, 잡음의 분산이다. 식 (2)와 (3)에 대한 정규화는 식 (4)와 (5)로 표현된다.

$$\Pr(1|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Q_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (5)$$

$$\Pr(0|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Q_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (6)$$

식 (1)에 주어진 바와 같이 최소 임계치를 계산하기 위해서는 미분식이 0이 되어야 하지만 이러한 방법은 수치해석이 매우 난해하다는 문제점이 있으므로 가우시안 프로파일을 사용한다. 이 방법은 최선의 방법은 아니지만 계산된 결과는 적당한 값이고 실제 적용하는데 큰 문제는 없다.

이러한 가우시안 프로파일을 이용하여 비트 에러율을 다시 계산하면 식 (7)과 같다.

$$P_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

식 (7)을 이용하여 Personick 인자 Q 에 대한 비트에러율을 계산하면 Fig. 2와 같다.

2.2 광 수신시스템에서 신호 검출

광 수신시스템의 증폭기는 신호를 증폭시키는 역할을 하지만 증폭된 신호에 ASE잡음이 더해지도록 하기 때문에 SNR이 나빠진다는 문제점을 갖고 있다. 광 수신시스템에서 변조되지 않은 신호는 식 (8)처럼 쓸 수 있다 [6,7].

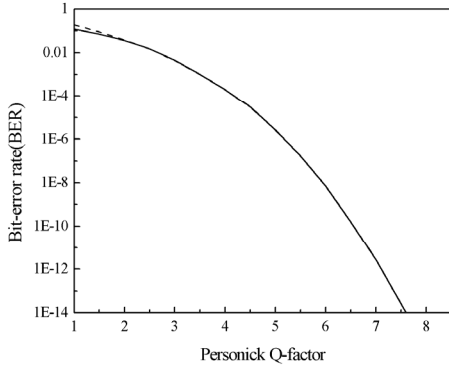


Fig. 2. A Bit error rate for Personick Q-factor

$$E(t) = [A + x(t)] \cos [\omega_c t + \theta(t)] - y(t) \sin [\omega_c t + \theta(t)] \quad (8)$$

수신된 신호의 대역폭 B_o 에 대해 잡음이 일정하게 분포한다는 가정을 하면, x 와 y 는 각각 $B_o/2$ 의 대역폭을 갖게 되고, 광 수신시스템의 출력은 증폭기 ASE의 직교 편광으로 인하여 식 (9)와 같이 된다.

$$I = \frac{1}{2} \left((A+x)^2 + y^2 + \tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 \right) + I_{ckt} \quad (9)$$

$$= I_s + I_{s-ASE} + I_{ASE-ASE} + I_{ckt}$$

식 (9)는 광 수신시스템에서 증폭기의 매우 높은 이득으로 인한 전기잡음이다. ASE-ASE 잡음의 경우 대역폭이 좁은 광필터를 통과하면 최소화되지만 신호-ASE 잡

음은 최소화 할 수 없다. 그러므로 광 수신시스템에서 생성되는 잡음은 비트잡음전류의 분산 σ^2 를 이용하여 표현 할 수 있고 이는 식 (10)과 같이 쓸 수 있으며 식 (10)은 ASE로 인한 평균잡음전류의 분산이다.

$$\begin{aligned} \operatorname{var}(x) &= \sigma_x^2 \\ &= n_{sp} \eta q (G-1) B_o \\ &= \frac{I_{ASE}}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 식 (11)은 신호-ASE 잡음의 분산을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \operatorname{var}(I_{s-ASE}) &= \operatorname{var}(Ax) \\ &= \sigma_{s-ASE}^2 \\ &= A^2 (\operatorname{var}(x)) \left(\frac{2B_c}{B_o} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9)을 통해 I_s 가 A^2 의 반임을 알 수 있고, 분산은 식 (12)와 같이 된다.

$$\sigma_{s-ASE}^2 = 2I_s I_{ASE} \left(\frac{B_c}{B_o} \right) \quad (12)$$

$\operatorname{var}(x^2)$ 계산식을 유도를 통하여 ASE-ASE 잡음전류의 분산을 표현하면 식 (13)과 같이 계산된다.

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = I_{ASE}^2 \left(\frac{B_c}{B_o} \right) \quad (13)$$

2.3 광 수신시스템의 수신감도의 향상

광 수신시스템에서 SNR을 증대시키기 위한 방안으로는 전치증폭시스템과 자승검출시스템을 함께 사용하는 방법이 있다. 이 방법은 표준에러확률을 만족하는데 필요한 평균 광전력이 줄어들기 때문에 SNR이 개선되는 효과를 보이는 것이다. 그리고 광 검출시스템을 병합하여 이용하는 광 수신시스템의 잡음지수는 항상 1보다 크기 때문에 SNR이 개선됨을 의미한다. 만약 S_{min} 이 최소 검출신호전력을 의미하는 경우 광 수신시스템에서 필요한 최소 SNR은 S_{min} 을 전자성분으로 나누면 얻어지게 되고 광시스템에서 최소 SNR은 대략적으로 20dB이므로 이득 G 를 갖는 광 수신시스템의 경우, $SNR = SNR'$ 으로 쓸 수 있게되고, 식 (14)와 같이 쓸 수 있다[9-11].

$$SNR' = \frac{G^2 S}{N + G^2 N_{ASE}} \quad (14)$$

여기서, $G^2 N_{ASE}$ 는 외부로부터 증폭기로 유입되는 ASE 잡음, S 는 검출되는 신호전력이다. 이를 이용하여 광 수신시스템에서 검출할 수 있는 신호전력의 최소 값 S'_{min} 은 식 (15)와 같다.

$$\frac{G^2 S'_m}{N + G^2 N_{ASE}} = \frac{S_m}{N} \quad (15)$$

3. 버터 워스 필터의 주파수 응답 특성

앞 장을 통해 광 수신시스템에서 검출되는 신호전력의 최소 값을 계산하는 방법에 대하여 고찰을 하였다. 이러한 계산을 통해 광 수신시스템의 수신감도의 변화를 계산할 수 있지만 이러한 계산은 매우 부정확한 값을 보인다. 그 이유는 앞 장의 해석에서는 광통신네트워크 상에 존재하는 필터들을 이상적인 스펙트럼인 구형파의 형태로 가정하여 광 수신시스템의 수신기의 성능을 해석하였기 때문이다[12].

구형 스펙트럼을 갖는 필터는 실현할 수 없으므로 이상적인 경우가 아닌 실제의 비구형 스펙트럼을 갖는 필터에 따라 주파수 응답 특성이 어떻게 변화하는지 고찰하고 시뮬레이션을 해야만 한다[13].

본 논문에서는 마흐젠더 간섭계를 기반으로 대역통과 특성은 버터워스(Butterworth) 특성을 갖는 필터를 이용하여 광 수신시스템의 감도를 계산하였다.

광 수신시스템에 수신되는 신호와 증폭기로부터 더해지는 ASE를 포함한 단위전력은 다음과 같다.

$$I = \frac{1}{2T} \int_0^T [x^2(t) + y^2(t) + \tilde{x}^2(t) + \tilde{y}^2(t)] dt \quad (16)$$

식 (16)에서 $x(t), y(t), \tilde{x}(t), \tilde{y}(t)$ 는 대역폭 $B_o/2$ 를 갖는 가우시안 프로파일이고, 광 수신시스템의 수신기가 ON인 경우는 유사 잡음과 ASE 잡음이 더해진 형태를 띄고, 수신기가 OFF인 경우는 ASE잡음만 존재한다. 광 수신시스템에서 열잡음을 무시할 수 있을 만큼 증폭기의 이득이 충분히 큰 경우 광 수신시스템의 수신감도를 계산하기 위한 I 의 평균치는 식 (17)과 같다.

$$I = \frac{1}{2T} (4\sigma^2 T) = 2\sigma^2 \quad (17)$$

$$var I = \frac{2}{T} \left[\int_{-\infty}^{\infty} df |P(f)|^2 \right] \quad (18)$$

식 (18)에서 $P(f)$ 는 기저 대역에서의 전력 스펙트럼이다. 그리고 광신호의 전력 스펙트럼 밀도 P_o 는 다음과 같다.

$$P_o B_{o,eqv,N} = \overline{N_p} h \nu R_b \quad (19)$$

식 (19)에서 여기서, $B_{o,eqv,N}$ 는 광 수신시스템에서 필터의 등가 대역폭이고, Butter-worth 전송함수를 사용하여 식 (20)과 같이 표현 할 수 있다[14,15].

$$B_{o,eqv,N} = \frac{\pi}{2N \sin\left(\frac{\pi}{2N}\right)} B_o = C_{eqv,N} B_o \quad (20)$$

그리고 광 수신시스템에서 전력스펙트럼밀도는 식 (21)과 같다.

$$P_o = \frac{\overline{N_p} h \nu R_b}{C_{eqv,N} B_o} \quad (21)$$

그리고 앞에서 살펴봤던 personick-factor Q 는 식 (22)와 같이 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{var I_1} + \sqrt{var I_0}} \quad (22)$$

식 (23)으로 주어지는 personick-factor Q 를 조금 더 정리하여 표현하면 식 (23)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q = \frac{\sqrt{2m}}{\sqrt{bx^2 + 2cx + a} + \sqrt{bx^2}} \quad (23)$$

위 식에서 $a = K_{s,N}/C_{s,N}^2$, $b = K_{n,N}/C_{n,N}^2$, $c = K_{sm,N}/(C_{s,N}C_{n,N})$ 이고, 위 식에 $G \gg 1$ 의 조건을 고려하면 x 는 식 (24)와 같다[16].

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{\sigma_{nN}^2}{\sigma_{sN}^2} \\
 &= \frac{n_{sp} h \nu (G-1)}{N_p h \nu R_b G} \frac{C_{nN}}{C_{sN}} \\
 &= \frac{n_{sp} m}{N_p} \frac{C_{nN} C_{eqv,N}}{C_{sN}}
 \end{aligned} \tag{24}$$

4. Butter-Worth Filter의 차수에 따른 광 수신시스템의 수신감도 특성

전 절의 식 (24)에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 4에 보이고 있다. 표준에러확률인 10^{-9} . $n_{sp} = 2$ 에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

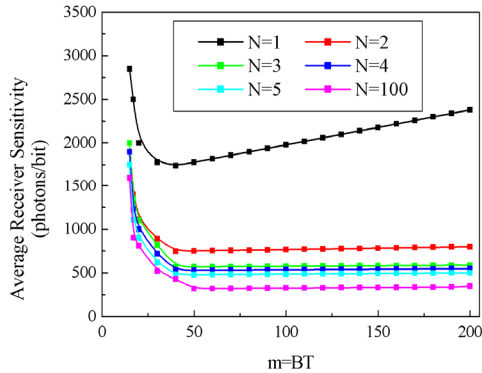


Fig. 4. Receiving Sensitivity of Optical Receiver System Using Butter-worth Filters of Various Order N

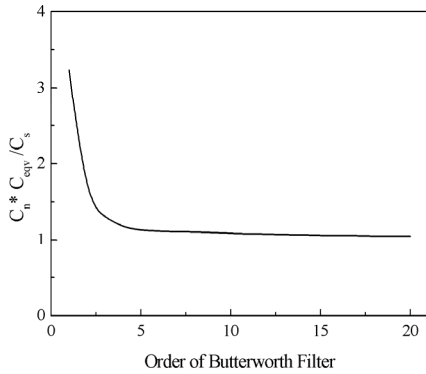


Fig. 5. Ratio of noise-to-signal power to filter order N

Fig. 4에 나타난 바와 같이 필터의 차수가 증가하면 수신감도가 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 신호전력에 대한 잡은 전력의 비가 감소하기 때문이다.

Fig. 5에는 필터의 차수 N 에 대한 C_{nN} , $C_{eqv,N}$ 그리고 C_{sN} 을 나타내었다. Fig. 6에는 표준에러확률인 10^{-9} . $n_{sp} = 4$ 에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

Fig. 6에 보이는 바와 같이 필터의 차수가 낮은 경우는 필터의 수신감도가 높아지고, 필터의 차수가 높아지는 경우에는 수신감도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 낮은 필터의 차수는 좁은 대역폭을 의미하고 더 상호 채널 간섭이 발생하기 때문이다.

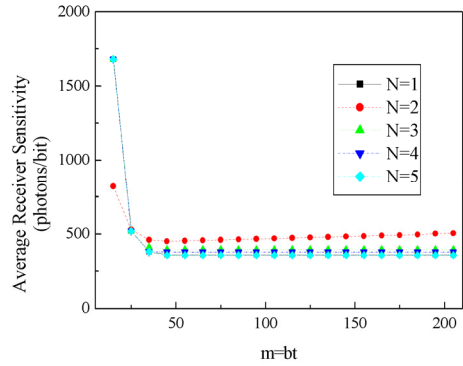


Fig. 6. Receiving Sensitivity of Optical Receiver System Using Butter-worth Filters of Various Order N

Fig. 7은 표준에러확률인 10^{-9} . $n_{sp} = 6$ 에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. Fig. 7에서 확인할 수 있는 내용은 앞의 경우와 동일하다 필터의 차수가 낮아지는 경우 필터의 수신감도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이 경우도 필터의 차수가 적은 경우 대역폭이 좁아지기 때문이다.

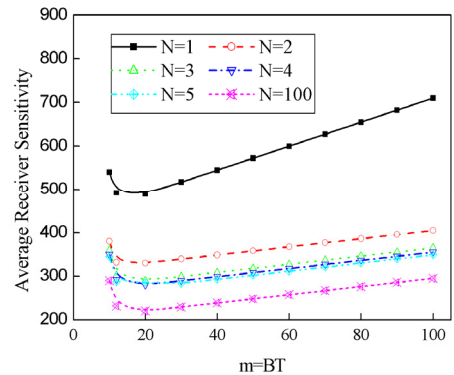


Fig. 7. Receiving Sensitivity of Optical Receiver System Using Butter-worth Filters of Various Order N

Fig. 8은 표준에러확률인 10^{-9} . $n_{sp} = 8$ 에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

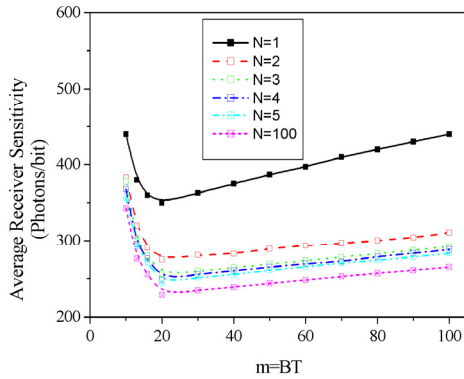


Fig. 8. Receiving Sensitivity of Optical Receiver System Using Butter-worth Filters of Various Order N

5. 결론

본 논문에서는 광 수신시스템에서 butter-worth 필터의 차수 N 이 수신감도에 미치는 영향에 대해 살펴 보았다. 시뮬레이션 결과를 통해 Butter-Worth 필터의 차수 N 이 증가하면 필터의 수신감도가 증가됨을 확인 할 수 있었다. 즉 Butter-worth 필터의 차수 N 을 증가시켜 필터 구형특성을 날카롭게 하면 할 수록 수신감도는 증가되었음을 확인할 수 있다.

또한 다양한 n_{sp} 값의 변화에 대한 시뮬레이션 결과 n_{sp} 가 증가 할수록 수신감도가 증가함을 확인할 수 있었다. 즉, n_{sp} 에 따라 광전류의 평균치는 증가하고 분산은 감소하기 때문인 것으로 평가할 수 있다. 향후 추가해야 할 부분은 필터의 차수 N 이 시스템의 페널티에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 즉 광 수신 감도를 높이기 위해서는 필터의 차수 N 을 증가시키면 된다는 것을 확인하였지만 실제 시스템의 구현 시, 필터의 차수 N 을 어느 정도로 설정하는 것이 수신감도와 시스템의 구현의 양면을 만족할 수 있는지에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

[1] B. W. Seo, "Joint Transceiver Design for SWIPT in

MIMO Interference Channel", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 19, No. 5, pp. 55-62, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.5.55>

[2] Y. G. Sun, Y. M. Hwang, I. S. Sim, and J. Y. Kim, "De-noising in Power Line Communication Using Noise Modeling Based on Deep Learning", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 18, No. 4, pp. 55-60, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.4.55>

[3] M. Singh, A. Kumar, and K. Singh, "Secure optical system that uses fully phase-based encryption and lithium niobate crystal as phase contrast filter for decryption," *Optics & Laser Technology*, Vol. 40, No. 4, pp. 619-624, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.09.007>

[4] A. Luukanen, L. Grönberg, T. Haarnoja, P. Helistö, K.Kataja, M. Leivo, A. Rautiainen, J. Penttilä, J. E. Bjarnason, C. R. Dietlein, M. D. Ramirez and E. N. Grossman, "Passive THz imaging system for stand-off identification of concealed objects: Results from a turn-key 16 pixel imager", *Proc. SPIE*, Vol. 6948, No. 694800, pp. 1-9, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.784922>

[5] B. N. Behnken and G. Karunasiri, "Real-time terahertz imaging of nonmetallic objects for security screening and anticounterfeiting applications", *Proc. of SPIE*, Vol. 7117, No. 711705, pp. 1-10, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.800632>

[6] C. Weg, W. von Spiegel, R. Henneberg, R. Zimmermann, T.Loeffler and H. G. Roskos, "Fast Active THz Cameras with Ranging Capabilities", *J. Infrared Milli Terahz Waves*, Vol. 30, No. 12, pp. 1281-1296, 2009. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10762-009-9565-8>

[7] Z. Liu, S. L. Xu, C. Lin, J. Dai, and S. Liu, "Image encryption scheme by using iterative random phase encoding in gyrator transform domains," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 4, pp. 542-546, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.12.005>

[8] T. Ujvari, P. Koppa, M. Lovasz, P. Varhegyi, S. Sajti, E. Lorincz, and P. Richter, "A secure data storage system based on phase-encoded thin polarization holograms," *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 6, No. 4, pp. 401-411, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1464-4258/6/4/017>

[9] P. Koppa, "Phase-to-amplitude data page conversion for holographic storage and optical encryption," *Applied Optics*, Vol. 46, No. 17, pp. 3561-3571, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.46.003561>

[10] D. S. Monaghan, U. Gopinathan, T. J. Naughton, and J. T. Sheridan, "Key-space analysis of double random phase encryption technique," *Applied Optics*, Vol. 46, No. 26, pp. 6641-6647, 2007. DOI:<http://dx.doi.org/10.1364/AO.46.006641>

[11] E. Perez-Cabre, M. Cho, and B. Javidi, "Information authentication using photon counting double random

- phase encrypted images," *Optics Letters*, Vol. 36, No. 1, pp. 22-24, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.46.006641>
- [12] T. Sarkadi and P. Koppa, "Quantitative security evaluation of optical encryption using hybrid phase and amplitude-modulated keys," *Applied Optics*, Vol. 51, No. 6, pp. 745-750, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.51.000745>
- [13] C. Jansen, S. Wietzke, O. Peters, M. Scheller, N. Vieweg, M. Salhi, N. Krumbholz, C. Jördens, T. Hochrein and M. Koch, "Terahertz imaging: applications and perspectives", *Appl. Optics* Vol. 49, No. 19, pp. E48-E57, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.49.000E48>
- [14] Z. Liu, M. Yang, W. Liu, S. Li, M. Gong, W. Liu, and S. Liu, "Image encryption algorithm based on the random local phase encoding in gyrator transform domains," *Optics Communications*, Vol. 285, No. 19, pp. 3921-3925, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2012.05.061>
- [15] B. Javidi and T. Nomura, "Securing information by use of digital holography," *Optics Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 28-30, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.25.000028>
- [16] X. Tan, O. Matoba, Y. Okada-Shudo, M. Ide, T. Shimura, and K. Kuroda, "Secure optical memory system with polarization encryption," *Applied Optics*, Vol. 40, No. 14, pp. 2310-2315, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.40.002310>

김 선 엽 (Sun-Yeob Kim)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (학박사)
- 2000년 6월 ~ 2006년 2월 : 한국 정밀전자 선임연구원
- 2006년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 부교수

<관심분야>
광시스템