

근거리의 자외선 비가시거리 통신에 관한 연구

박 동 국†

(원고접수일 : 2011년 9월 27일, 원고수정일 : 2011년 12월 14일, 심사완료일 : 2011년 12월 19일)

Study on Short-range Non-line-of-sight Ultraviolet Communication

Dong-Kook Park†

요 약 : 기존의 무선 RF 통신은 근거리에서 전력손실이 상대적으로 크고, 전파간섭 및 방해, 재밍 등에 민감하다. 이러한 단점을 보완하는 대안으로 자외선을 이용한 통신 방식에 대한 연구가 최근 관심을 받고 있다. 본 논문에서 자외선을 이용한 비가시거리 통신의 data rate 특성에 대해 시뮬레이션한 결과를 제시하였다. On-off keying 방식을 사용하는 비가시거리 자외선 통신에서 data rate는 송신 빔의 방향, 수신 빔의 빔 폭, 송신 전력에 의해 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

주제어 : 자외선 통신, 비가시거리 통신, 자외선 발광다이오드, 근거리 통신

Abstract: A conventional wireless rf communication has relatively high ratio of power dissipation to transmit power for short-range links, susceptibility to interference, interception and jamming of electromagnetic wave. The study on alternative using ultraviolet signal to remedy the shortcomings of conventional rf communication has recently received attention. In this paper, the simulation results about the data rate performance of ultraviolet non-line-of-sight communication are provided. It is found that the direction of transmitting beam, receiving field of view width and the transmitting signal power have a seriously effect on the data rate of on-off-keying non-line-of-sight ultraviolet communication.

Key words: Ultraviolet communication, Non-line-of-sight communication, UV LED, Short-range communication

1. 서 론

자외선(Ultraviolet: UV)은 파장에 따라 315~380nm를 UV-A, 280~315nm를 UV-B, 100~280nm를 UV-C로 정의하고 있으며, 환경 분야에서 미생물의 살균용으로 많이 응용되고 있다.

그러나 UV의 대기에 의한 산란 현상을 이용하여 가시거리(line-of-sight: LOS) 및 비가시거리(non-line-of-sight: NLOS) 통신에 UV를 응용하려는 연구도 1960년대부터 시도되었다[1-2]. 초기의 연구들은 UV의 광원으로 플래쉬 튜브, 램프, 레이저 등과 같은 큰 규모의 광원을 사용하였고, 수십 km 이상의 긴거리의 통신에 목표를 두었다. 그러나 최근 들어 저전력, 높은 안정도의 소형의 UV LED와 에벌런치 광

다이오드(APD) 등 광원(source)과 검출기(detector)가 개발되면서, 저 전력의 근거리 UV 통신에 대한 연구가 진행되고 있다[3-4].

이것은 기존의 무선 RF 통신이 근거리에서 전력 손실이 상대적으로 크고, 전파 간섭 및 방해 등에 민감하므로 이러한 단점을 보완하는 대안으로 UV 통신이 충분한 가능성을 가지고 있기 때문이다. 특히 군사용 등 근거리에서 비밀을 요하는 통신이나 기타 보안이 요구되는 근거리 망 구성 분야에 응용이 적합하여 관심이 증가하고 있다.

또한 근거리 무선 데이터 통신으로 TV, 노트북, 디지털 카메라 등의 기기에 사용되고 있는 적외선 통신이 있으나, 이것은 송수신 거리가 10m 내외로

† 교신저자(한국해양대학교 전자통신공학과, E-mail:dkpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4311)

너무 가까운 거리이므로, 적외선 통신과 RF 통신의 중간 거리 영역에서 UV 통신이 적합한 것으로 고려되고 있다.

UV 통신은 주로 UV-C 대역을 사용하는데, 이것은 대기 상층부의 오존층에 의해 태양에서 날아오는 UV-C 신호가 대부분 흡수되므로 지상에서는 UV-C 대역의 신호가 매우 미약하여 저 잡음의 통신 용으로 사용하기 적합하기 때문이다. UV-C 대역의 LED 광원을 사용한 NLOS 통신에 대해 발표된 문헌 [3]을 살펴보면, 단일 산란(single scattering) 채널 모델을 근거로 UV 전파 및 채널 모델링을 통해 수신 신호 전력에 대한 근사 수식을 유도하고, 이것을 바탕으로 거리에 따른 경로 손실, data rate, 부호 오류율(bit error rate: BER) 특성 등에 대해 언급하고 있다. 이 때 송수신 빔의 각도 및 빔 폭은 대부분 일정한 값으로 고정 하고, 특성을 조사하였다.

그러나 UV LED와 광 다이오드를 여러 개 사용하는 송수신 구조의 경우 외부의 반사경 등 형상 및 배열을 적절히 하면 UV 송신 빔의 방향 및 빔 폭 그리고 UV 수신 방향 및 수신가능 빔 폭(Field of view : FOV)을 조절하는 것이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 송수신 신호의 빔폭 및 방향에 따른 UV-C NLOS 통신의 특성 변화를 연구한다. 또한 일정한 BER 및 일정한 data rate 을 위해 필요한 송신전력에 대해서도 연구하고자 한다.

2. 무선 UV 통신 링크의 근사 수식

먼저 UV 무선 통신 채널의 특성을 살펴보면, 송신된 UV 신호는 대기 중의 분자(molecular)에 의한 흡수와 분자 및 에어로졸(aerosol)에 의한 산란 과정을 겪게 된다[5]. 분자에 의한 UV의 흡수는 통신 신호의 세기를 줄이는 역할을 하며, UV의 산란은 전송된 신호가 수신기로 방향으로 되돌아오는 메커니즘을 제공한다. 이 때 수신기로 되돌아오는 신호의 크기는 대류권의 아래쪽 2km 영역에 있는 분자와 에어로졸의 산란 특성의 함수로 주어지는데, 분자와 에어로졸은 크기의 차이에 기인하여 아주 다른 산란 특성을 갖는다. 분자는 UV 파장에 비해 훨씬 크기가 작기 때문에 Rayleigh 산란체로 고려되며, 에어로졸

은 UV 파장보다 일반적으로 큰 크기를 갖고 있기 때문에 Mie 산란체 특성을 나타낸다.

이러한 분자 및 에어로졸의 흡수, 산란 성능은 흡수(absorption), 산란, 소멸(extinction)(흡수+산란) 계수 k_a , k_s , k_e 를 사용하여 특성을 표시하며, UV에서 흡수 계수는 산란 계수에 비해 파장에 의한 영향을 크게 받는다[5].

그림 1에 본 논문에서 조사하고자하는 UV NLOS 통신 링크 모델을 나타내었다. 송신(Tx) 빔 폭을 ϕ_1 , 수신(Rx)부의 빔 폭(Field of view : FOV) 를 ϕ_2 , Tx 빔의 정점(apex) 각도는 θ_1 , Rx 빔의 apex 각도는 θ_2 , Tx부와 Rx부의 직선 거리 간격은 r , Tx 빔과 Rx 빔이 교차되는 부분의 체적은 V , Tx부와 Rx부에서 교차 체적 V 의 중심까지의 거리를 각각 r_1 , r_2 로 표기 한다.

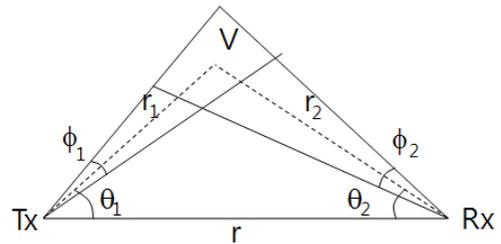


그림 1: 무선 자외선 통신 링크 모델

LED 광원의 송신 전력을 P_t , 송신 복사 빔의 입체각(solid angle)을 Ω_1 라 할 때 단위 입체각 당 송신전력은 P_t/Ω_1 이 된다. 경로 손실과 감쇄를 고려할 때 거리 r_1 에서의 수신 전력 밀도는

$$\frac{P_t}{\Omega_1} \frac{e^{-k_e r_1}}{r_1^2} \quad (1)$$

이 된다. 식 (1)의 전력 밀도로 체적 V 에 입사된 전력은 체적 안에 놓인 대기 구성 물질에 의해 산란이 생기게 되며, 산란된 전력 중 일부가 수신부(Rx)로 향하게 된다. 수신부로 향하는 산란된 전력은 입사된 전력에 식 (2)로 표현되는 비례상수를 곱하여 구할 수 있다[6].

$$\frac{k_s}{4\pi} P(\mu) V \quad (2)$$

여기서 $P(\mu)$ 는 산란 위상 함수로서 식 (3)과 같이 Rayleigh 와 Mic 산란 모델에 따라 다음과 같이 구해진다[3].

$$P(\mu) = \frac{k_s^{Ray}}{k_s} p^{Ray}(\mu) + \frac{k_s^{Mic}}{k_s} p^{Mic}(\mu) \quad (3)$$

여기서, $k_s = k_s^{Ray} + k_s^{Mic}$, $\mu = \cos\theta_s$,

$$p^{Ray}(\mu) = \frac{3[1+3\gamma+(1-\gamma)\mu^2]}{16\pi(1+2\gamma)},$$

$$p^{Mic}(\mu) = \frac{1-g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1+g^2-2g\mu)^{3/2}} + f \frac{0.5(3\mu^2-1)}{(1+g^2-2g\mu)^{3/2}} \right]$$

이며, γ, g, f 는 임의의 상수이다.

산란된 전력은 수신부로 전파되면서 자유공간 경로 손실 $[\lambda/(4\pi r_2)]^2$ 과 대기 감쇄 $e^{-k_e r_2}$ 및 검출기의 수신 이득 $(4\pi A_r/\lambda^2)$ 에 의해, 수신 전력은

$$P_{r,NLOS} = \left(\frac{P_t}{\Omega_1}\right) \left(\frac{e^{-k_e r_1}}{r_1^2}\right) \left(\frac{k_s}{4\pi} P(\mu) V\right) \quad (4)$$

$$\times \left(\frac{\lambda}{4\pi r_2}\right)^2 e^{-k_e r_2} \left(\frac{4\pi A_r}{\lambda^2}\right)$$

으로 표현된다. 여기서, $\Omega_1 = 2\pi[1 - \cos(\phi_1/2)]$, $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$, $k_e = k_s + k_a$, $r_1 = r \sin\theta_2/\sin\theta_s$, $r_2 = r \sin\theta_1/\sin\theta_s$, λ 는 파장, A_r 은 수신 어퍼춰(aperture)의 면적이다.

교차 체적 V 가 작은 경우에는 $V = r_2 \phi_2 (r_1 \phi_1)^2$ 으로 근사할 수 있으며[6], 체적이 큰 경우에는 $V = 1/3\pi(D_1^2 h_1 - D_2^2 h_2)$ 으로 근사할 수 있다[3]. 여기서 $D_1 = h_1 \phi_1/2$, $D_2 = h_2 \phi_1/2$, $h_1 = r_1 + r_2 \phi_2/2$, $h_2 = r_1 - r_2 \phi_2/2$ 이다. 본 논문에서는 송수신 빔 폭의 다양한 변화에 대해 조사하고자 하므로 교차 체적이 큰 경우의 근사식을 사용한다. 그러므로 이 모든 값을 식 (4)에 대입하여 정리하면, 수신 전력은

식 (5)와 같다.

$$P_{r,NLOS} = e^{-\frac{k_e r (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}} \times \left[\frac{P_t A_r k_s P(\mu) \phi_2 \phi_1^2 \sin\theta_s [12 \sin^2\theta_2 + \phi_2^2 \sin^2\theta_1]}{96 r \sin^2\theta_2 \sin\theta_1 (1 - \cos\frac{\phi_1}{2})} \right] \quad (5)$$

여기서 $P_{r,NLOS}$ 가 r^2 이 아닌 r 에 비례하여 감소하므로 무선 RF 통신의 경우에 비해 근거리에서의 신호의 감쇄가 적게 되는 것을 알 수 있다.

또한 플랑크 상수(Planck constant)를 h 라고 하고, 광속을 c , 검출기의 양자 효율을 η_r , 검출기의 양자 증가 이득을 G , data rate 를 R 이라고 할 때, 검출기의 대역폭을 data rate의 2배로 제한하는 경우, 수신 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)은 식 (6)과 같이 표현된다[6].

$$SNR_{r,NLOS} = \frac{\eta_r G P_{r,NLOS}}{2 R h c / \lambda} \quad (6)$$

여기서 SNR 의 정의는 일반적인 정의를 따라 신호전력과 잡음 variance의 비로 정의 하였다.

한편 on-off keying(OOK) 방식을 사용하는 통신에서 신호의 검출을 위한 BER은 아래 식과 같이 표현된다[6].

$$BER_{r,NLOS} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{SNR_{r,NLOS}}}{2\sqrt{2}}\right) \quad (7)$$

여기서 erfc 은 상보 오차함수(complementary error function)이다.

3. 실험 및 분석

UV NLOS 통신에서 수신 전력을 표시하는 근사식 (5)의 정확성 및 시뮬레이션 결과의 타당성을 조사하기 위해 경로 손실(path loss)을 구하여 다른 문헌에서 발표한 실험결과와의 근사식(100m 이내에서 유효한 수식)과 비교해 보았다[7-8]. 여기서 경로 손실이란 송신 에너지와 수신 에너지의 비로서 정의하며, 경로 손실은 $L = P_t/P_r$ 으로 구할 수 있다[7]. 그림 2에 $k_a = 0.9 \text{ km}^{-1}$, $k_s^{Ray} = 0.24 \text{ km}^{-1}$, $k_s^{Mic} = 0.25 \text{ km}^{-1}$

이고, $\gamma=0.017$, $g=0.72$, $f=0.5$, $\phi_1=10^\circ$, $\phi_2=30^\circ$, $\theta_1=\theta_2=70^\circ$ 일 때 단위 cm^2 면적당 거리에 따른 경로 손실을 나타내었다. 그림 2에서 두 결과 값이 유사한 것을 볼 수 있으므로 식 (5)의 시뮬레이션 수치의 결과의 타당성을 확인하였다.

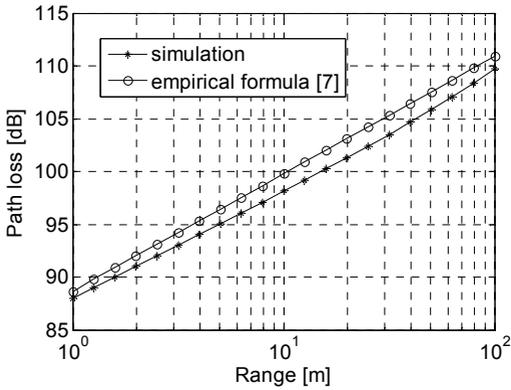


그림 2: 경로손실 비교

송수신 신호의 빔 폭에 따른 영향을 조사하기 위해 수신 어퍼춰(aperture) 면적 $A_r=1cm^2$, 검출기의 양자 증가 이득을 $G=1$ 으로 규격화하였고. 파장 $\lambda=260nm$, 송신전력 $P_t=50mW$, 송수신 직선거리 $r=500m$ 을 기본적인 파라미터로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$BER=10^{-3}$ 이 되는 data rate를 θ_1, θ_2 의 변화에 따라 구하고자 한다. 그림 3에 $\phi_1=\phi_2=\theta_2=30^\circ$ 일 때 θ_1 의 값이 $10^\circ \sim 80^\circ$ 에서 변할 때의 data rate의 변화를 θ_1 으로 나타내었고, $\phi_1=\phi_2=\theta_1=30^\circ$ 일 때 θ_2 의 값이 $10^\circ \sim 80^\circ$ 에서 변할 때의 data rate의 변화를 θ_2 으로 나타내었다. θ 가 증가함에 따라 data rate가 감소하는 것을 볼 수 있으며, θ_2 보다 θ_1 에 의해 data rate가 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 식 (5)에서 수신 전력이 θ_1, θ_2 에 따라 다른 특성 변화를 갖는 것을 예상할 수 있으나 이러한 현상이 생기는 원인에 대해서는 더 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

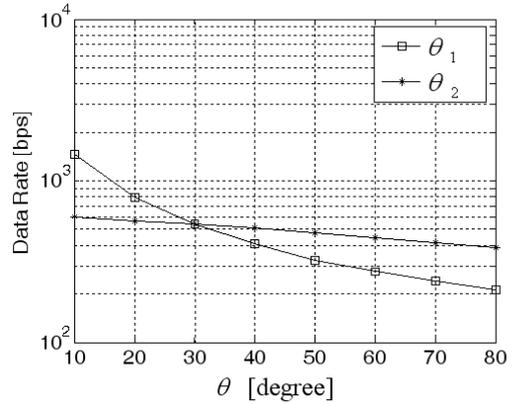


그림 3: 빔의 정점 각도에 따른 data rates 변화

그림 4에는 ϕ_1, ϕ_2 의 변화에 따른 data rate 변화를 시뮬레이션 해 보았다. $\theta_1=\theta_2=\phi_2=30^\circ$ 일 때 ϕ_1 의 값이 $10^\circ \sim 80^\circ$ 에서 변할 때의 data rate의 변화를 ϕ_1 으로 나타내었고, $\theta_1=\theta_2=\phi_1=30^\circ$ 일 때 ϕ_2 의 값이 $10^\circ \sim 80^\circ$ 에서 변할 때의 data rate의 변화를 ϕ_2 으로 나타내었다. ϕ 가 증가함에 따라 data rate가 증가하는 것을 볼 수 있으며, ϕ_1 보다 ϕ_2 에 의해 data rate가 크게 변하는 것을 볼 수 있다.

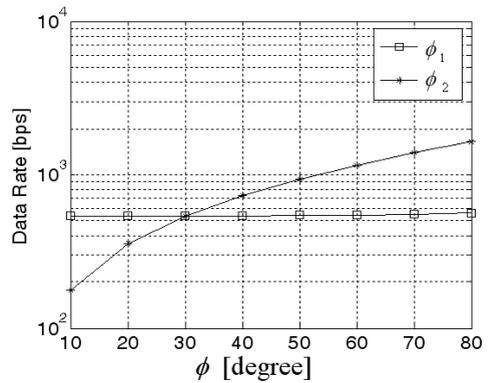


그림 4: 빔 폭 변화에 따른 data rates 변화

그림 3과 그림 4의 결과로부터 θ_1, ϕ_2 의 변화에 의해 data rate의 변화가 큰 것을 알 수 있으므로, 동일한 data rate를 갖는 θ_1, ϕ_2 의 값을 조사하여 그림 5에 나타내었다. 이 때 BER은 10^{-3} 으로 고정하고

나머지 파라미터의 값은 앞서 시뮬레이션 한 것 과 동일하게 하였다.

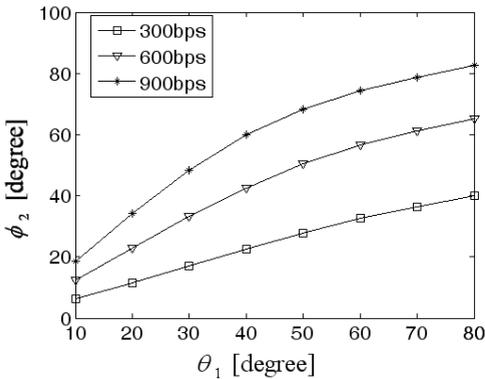


그림 5: θ_1 과 ϕ_2 에 따른 data rate 변화

그림 5의 결과를 살펴보면, 일정한 θ_1 에서는 ϕ_2 가 클수록, 일정한 ϕ_2 에서는 θ_1 이 작을수록 data rate가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 $BER=10^{-3}$, $r=500m$, 송신전력 $P_t=50mW$ 일 때 θ_1 과 ϕ_2 가 약 80° 이내에서 data rate 이 최대 약 900bps 정도인 것을 볼 수 있다. 그러나 이것은 수신 어퍼춰 (aperture) 면적 $A_r=1cm^2$, 검출기의 양자 증가 이득을 $G=1$ 으로 규격화하였기 때문이며, 실제의 경우를 이보다 큰 값을 갖게 된다.

그러나 규격화 한 경우일지라도 이 보다 빠른 data rate 을 갖기 위해서 송신 전력에 따른 data rate 변화를 살펴보고자 한다. $\theta_1=\theta_2=\phi_1=\phi_2=30^\circ$ 에서 $r=500m$, BER이 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} 일 때 송신 전력에 따라 data rate 변화를 조사하여 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서 송신전력이 증가함에 따라 data rate 도 증가하는 것을 볼 수 있고, 900mW의 송신전력에서 약 10kbps 정도의 data rate 을 갖는 것을 알 수 있다.

물론 송수신 거리에 따라서도 data rate 이 변하게 되며, 그림 6과 동일한 조건에서 BER이 10^{-3} 이고, 송신전력이 50mW, 200mW, 350mW 로 변할 때 송수신 직선거리 r 의 변화에 따른 data rate 변화를 시뮬레이션하여 그림 7에 나타내었다.

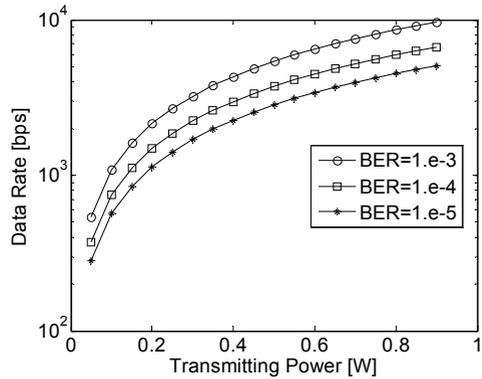


그림 6: 송신전력에 따른 data rate 변화

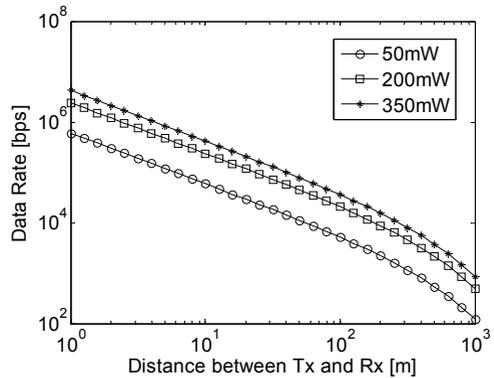


그림 7: 송수신 직선거리에 따른 data rate 변화

그림 7에서 동일한 전력에서도 송수신 거리가 가까운 경우 data rate가 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 저전력의 UV 파장의 신호를 이용한 비가시거리(NLOS) 통신에서 송신과 수신 의 빔 각도 등에 따른 채널 특성, 특히 data rate에 대해 조사하였다. 이 때 사용한 통신 방식은 on-off keying 방식을 사용하였다. 본 논문의 시뮬레이션 결과를 통해 UV 송신 빔의 방향(θ_1) 및 수신 빔의 빔 폭(ϕ_2)이 전체 시스템의 data rate에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 송신 전력과 송수신 거리에 의한 data rate 변화도 조사하였다.

이러한 결과를 이용하면 on-off keying 방식을 사용하는 UV NLOS 통신 시스템에서 송수신 거리가

제한되어 있을 때, UV 통신으로 구현할 수 있는 최대 data rate의 값이 얼마인지 알 수 있으며, 또한 최대 data rate을 구현하기 위한 θ_1 , ϕ_2 및 송신전력 P_t 를 설계할 수 있어, UV NLOS 통신 시스템 설계에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] D. E. Sunstein, A Scatter communications Link at Ultraviolet Frequencies, B.S. Thesis, MIT, Cambridge, MA, 1968.
- [2] D. M. Reilly, Atmospheric Optical Communications in the Middle Ultraviolet, M.S. Thesis, MIT, Cambridge, MA, 1976.
- [3] Z. Xu, H. Ding, B. M. Sadler, and G. Chen, "Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links", Optics Letters, vol. 33, no. 16, pp. 1860-1862, 2008.
- [4] Z. Xu, "Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art", IEEE Comm. Magazine, May, pp. 67-73, 2008.
- [5] G. A. Shaw, M. Nischan, M. Ijengar, S. Kaushik and M.K. Griffin, "NLOS uv communication for distributed sensor systems", Proc. of SPIE, vol. 4126, pp. 83-96, 2000.
- [6] Z. Xu, "Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links", Proceedings of IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Proc., 2007.
- [7] Q. He, Z. Xu, B.M. Sadler, "Performance of short-range non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers", Opt. Express, vol. 18, no. 12, pp. 12226-12238, 2010.
- [8] G. Chen, F.A. Galala, Z. Xu and B.M. Sadler, "Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links", Opt. Express, vol. 16, no. 19, pp. 15059-15068, 2008.

저 자 소 개



박동국(朴東國)

1987년 부산대학교 전자공학과 (공학사), 1989년 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사), 1994년 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학박사), 1994년 - 1996년 LG전자(선임연구원), 1996년 - 현재 한국해양대학교 전자통신공학과(교수). 관심분야: 무선전력전송, 안테나공학, 초고주파 공학, 레이더