

Impact of Solar Irradiance on the Receiver Sensitivity of Free-Space Optical Communication Systems

Gihong Park and Hoon Kim[†]

*School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),
291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea*

(Received October 16, 2020; Revised November 17, 2020; Accepted November 18, 2020)

We evaluate the degradation of receiver sensitivity induced by direct and indirect exposure to solar irradiance in free-space optical communication systems. For this purpose, we calculate the variances of numerous noise components arising from solar irradiance, and then estimate the receiver sensitivity penalties for intensity-modulation/direct-detection and coherent systems. The results show that the penalties are less than 1.3 dB when indirect sunlight impinges on the detector, regardless of the system. However, the sensitivity penalties are estimated to be larger than 30 dB when the sunlight is directly incident upon the receiver. These penalties are barely reduced if we insert an optical polarizer, or if we adjust the bandwidth of an optical filter at the receiver to be as narrow as the signal's bandwidth.

Keywords: Free-space optical communication, Receiver sensitivity degradation, Solar conjunction

OCIS codes: (010.3310) Laser beam transmission; (060.4510) Optical communications; (350.0350) Other areas of optics; (350.6050) Solar energy

주광이 무선 광통신 시스템의 수신 감도에 미치는 영향

박기홍 · 김 훈[†]

한국과학기술원 전기및전자공학부
Ⓣ 34141 대전광역시 유성구 대학로 291

(2020년 10월 16일 받음, 2020년 11월 17일 수정본 받음, 2020년 11월 18일 게재 확정)

실외에서 운용되는 무선 광통신 시스템의 수신기는 태양광에 직·간접적으로 노출되기 마련이다. 본 논문에서는 주광이 무선 광통신 시스템의 수신 감도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위하여 방사 조도 측정치를 활용하여 지상에 위치한 수신기에 특정 시야각으로 직접 또는 간접적으로 입사하는 단위 면적당 태양광 전력 스펙트럼 밀도를 얻었고, 이 값을 이용하여 세기 변조/직접 검출 및 코히어런트 시스템의 성능 열화를 계산하였다. 분석 결과 주광이 수신기에 간접적으로 인가되는 경우 수신 감도 페널티가 시스템 종류에 관계없이 1.3 dB 이하였으나, 직접적으로 인가되는 경우에는 30 dB 이상의 매우 큰 수신 감도 열화가 발생하였다. 또한 이러한 수신 감도 열화는 편광자 사용 또는 광학 필터 대역폭 조절에 의해서도 거의 경감되지 않았다.

Keywords: 무선 광통신, 수신감도 열화, 솔라 컨정션

OCIS codes: (010.3310) Laser beam transmission; (060.4510) Optical communications; (350.0350) Other areas of optics; (350.6050) Solar energy

I. 서 론

무선 광통신(free-space optical communication, FSOC) 시스템은 별도의 허가 없이 초광대역(~700 THz) 주파수 자원을 활용할 수 있을 뿐 아니라 짧은 파장의 빛 신호를 반송파로

사용하므로 안테나를 소형, 경량으로 구현할 수 있고, 기존의 RF 통신보다 높은 보안성을 제공하는 등 다양한 장점을 가지고 있다^[1]. 반면에 사용되는 광신호의 좁은 빔(beam) 폭으로 인하여 정교한 송수신간 정렬(예, PAT (pointing, acquisition, and tracking)) 기술이 요구되고, 대기의 흡수·산란과

[†]E-mail: hoonkim@kaist.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7395-3695

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

난류(turbulence)에 의한 광신호의 손실 또는 신틸레이션 등의 채널 효과에 취약하다는 단점이 있다. 이러한 기술적 어려움으로 인하여 무선 광통신 시스템은 주로 고정된 링크에서 사용되어 왔다. 대표적으로 건물 옥상 또는 벽면에 광송수신기가 설치되어 건물 간 초고속 전송 링크에 사용되었으며, 무선 셀룰러 이동통신 시스템을 위한 백홀(backhaul) 망으로도 활용되고 있다²⁾. 최근 송수신기 정렬 기술의 고도화에 힘입어 초고속 데이터를 이동체에 전송하기 위한 방안으로 무선 광통신 기술이 활용되고 있다. 예를 들면 광섬유 포설이 어려운 지역에 무선 데이터 서비스를 제공하기 위하여 페이스북과 구글은 각각 드론 또는 열기구에 FSO 송수신기를 탑재하여 이러한 비행체를 무선 네트워크 노드(node)로써 활용하려는 노력을 기울이고 있다^{3,4)}. 또한 NASA에서는 낮은 전송 속도의 RF 무선 통신 방식 대신 FSO 기술을 활용하여 우주-지상 간 대용량(예, 622 Mb/s) 무선 광전송 실험을 성공적으로 수행한 바 있다⁵⁾. 그러나 무선 광통신 시스템이 이동체를 위한 통신에 활용될 경우 송수신단을 연결하는 조준선(line of sight)의 연장선 상에 태양이 위치하여 수신기에 태양광이 직접 인가되는 솔라 컨전션(solar conjunction) 현상이 발생할 수 있다⁶⁾. 기존의 고정형 무선 광통신 시스템은 대부분의 경우 조준선의 연장선 상에 태양의 궤적이 위치하지 않도록 송수신단의 위치를 설정할 수 있었다. 혹 그렇지 못한 경우에도 수신단 위에 덮개(canopy)를 길게 씌우거나 송신기 뒤에 가림막을 설치하여 태양광의 영향을 최소화하였다. 그러나 이동체에 실장되는 무선 광통신 송수신단에는 이러한 방법을 활용할 수 없을 뿐 아니라 비행체가 자유롭게 이동하다 보면 조준선의 연장선 상에 태양이 위치하는 경우가 발생한다. 이와 같이 태양광이 광수신기에 직접 인가되는 경우 무선 광통신 시스템은 통신 두절이 발생한다고 알려져 있다⁷⁻⁹⁾. 그러나 이에 대한 정량적인 분석은 거의 전무하다. 예를 들면, 참고 문헌 [7]과 [8]에서는 수신기에 인가되는 태양광의 전력이 신호의 그것을 넘는 경우가 발생하

여 통신 두절이 발생한다고만 언급하고 있다. 또한 참고문헌 [9]는 태양광이 발광다이오드(LED)를 광원으로 활용하는 가시광통신 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과 산탄 잡음의 영향만 고려되었다. 그러나 태양광은 광대역, 비가간섭(incoherent) 특성을 가지고 있으므로 가간섭(coherent) 성질을 지닌 레이저 신호와 동시에 광수신기에 입사할 경우 다양한 비팅(beating) 잡음 성분을 발생시킨다. 이러한 신호 의존적인(signal-dependent) 잡음 성분은 광신호 세기와 함께 증가하므로 태양광이 무선 광통신 시스템의 성능에 미치는 영향을 명확히 이해하기 위해서는 잡음 성분에 따른 성능 열화에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 본 논문에서는 지상에 위치한 FSO 수신기에 태양광이 직·간접적으로 입사될 때 무선 광통신 시스템의 성능 열화를 이론적으로 분석한다. 수신기에 입력되는 태양광의 세기는 American Society for Testing and Materials (ASTM)에서 제공하는 방사 조도(irradiance) 측정자료를 기반으로 계산하였으며, 이 값을 사용하여 세기 변조/직접 검출(IM/DD) 및 코히어런트 광전송 시스템에 대하여 신호 검출 시 고려되는 잡음 분산 및 신호의 세기를 수학적으로 유도하였다. 특히 광대역, 비가간섭 성질을 가지는 태양광은 광증폭기의 자연 증폭 방출광(amplified spontaneous emission, ASE)과 동일한 특성을 지니고 있으므로 광증폭기의 잡음이 유발하는 여러 비팅 잡음 성분을 유도하는 수식을 활용하여 태양광이 수신 감도에 미치는 영향을 계산하였다. 이렇게 얻은 잡음 성분의 분산과 신호의 세기를 통해 비트 오류율(bit-error ratio, BER)을 계산하였으며, 수신 감도 분석을 통해 태양광의 영향을 정량적으로 분석하였다.

II. 수신기에 따른 신호 및 잡음 분석

2.1. 무선 광통신 시스템

본 논문에서는 광통신 시스템에서 널리 활용되는 IM/DD

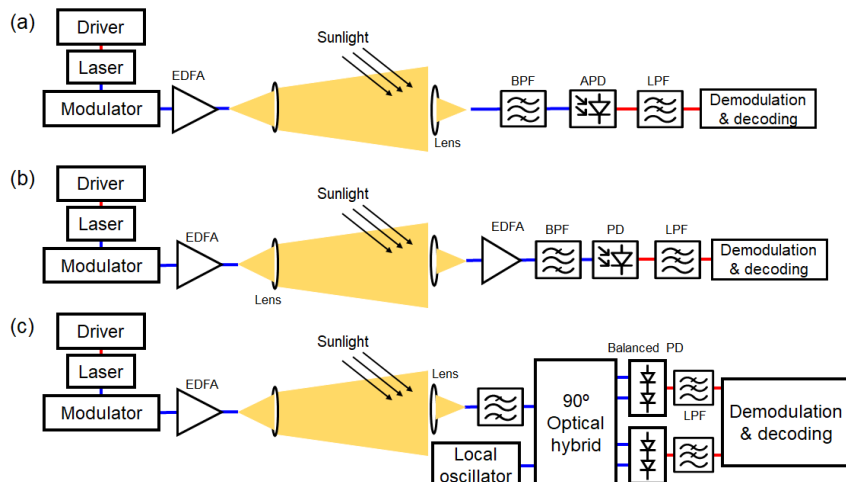


Fig. 1. Schematic diagrams of FSO systems studied in this paper. (a) 780-nm IM/DD system using an APD. (b) 1550-nm IM/DD system using an optically pre-amplified receiver. (c) 1550-nm coherent system.

와 코히어런트 시스템에 대하여 분석을 수행하였다. IM/DD 시스템은 송수신기 구조가 간단하고 구현 비용이 낮다는 장점을 가지고 있기 때문에 단거리 또는 가격에 민감한 전송 링크에 널리 활용된다. 반면에 코히어런트 시스템은 우수한 수신 감도 특성과 높은 전송 용량으로 인하여 장거리 전송 시스템에 주로 활용된다. 그림 1은 IM/DD와 코히어런트 시스템의 구성도를 보여준다. IM/DD 시스템으로 780 nm 대역에서 동작하며 실리콘 아발란치 광검출기(avalanche photodetector, APD)를 사용하는 시스템(그림 1(a))과 1550 nm 대역에서 광전치 증폭(optical pre-amplifier, OPA) 수신기를 사용하는 시스템(그림 1(b))을 고려하였다. 이러한 IM/DD 시스템은 현재 고정용 무선 광통신 시스템으로 널리 사용된다. 코히어런트 수신기는 90° 광 하이브리드(optical hybrid)와 밸런스 광검출기(balanced detector)로 구성되는 위상 다이버시티(phase diversity) 수신기(그림 1(c))를 가정하였다. 이 수신기는 I/Q 채널을 동시에 측정하기 때문에 수신 후 기저 대역(baseband)으로 주파수 하향 변환시(down conversion) 신호를 복소(complex) 진폭으로 표현할 수 있다¹⁰⁾.

2.2. 무선 광통신 시스템의 잡음원(noise source)

무선 광통신 시스템의 성능에 영향을 미치는 잡음원으로는 외부적으로 태양광이 있으며, 수신기 내부적으로는 광증폭기에서 발생하는 ASE 잡음과 광검출기 잡음이 있다. 태양광은 광대역 비가간섭 잡음으로서 ASE 잡음과 마찬가지로 다양한 비팅(beatting) 잡음 성분을 유발하여 광신호 대 잡음비(optical signal-to-noise ratio)를 열화시킨다. 각 비팅 잡음 성분에 대한 정량적 분석은 2.3과 2.4절에서 논한다.

태양광의 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)는 방사 조도를 기반으로 계산할 수 있다. 지상에 위치한 광수신기에 입사되는 태양광의 조도를 구하기 위하여 American Society for Testing and Materials (ASTM)에서 발표한 값을 활용하였다. ASTM은 지표면에 대해서 37° 기울어진 반구에 입사되는 직·간접 태양광 방사 조도를 측정하여 표준으로 제정하였다¹¹⁾. 그림 2에 측정된 태양광 방사 조도를 파장 대역에 따라 나타냈으며, 이를 활용하여 수신기에 입력되는 태

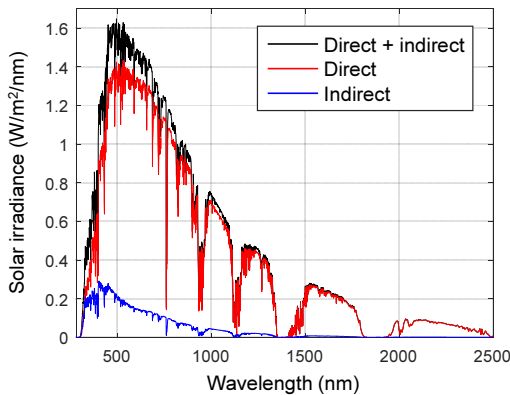


Fig. 2. Solar irradiance provided by ASTM.

양광 PSD를 계산할 수 있다.

그림 2에서 빨간선은 태양이 방사계(radiometer)의 5.8° 시야각(field-of-view, FoV)의 정중앙에 위치할 경우에 입사되는 직접 태양광 방사 조도를 의미하며, 파란선은 방사계가 바라보는 방향 중심의 시야각 5.8도 이외의 반구에 태양광이 대기의 산란 또는 지표면의 반사 등으로 수신기에 도달하게 되는 태양광의 면적당 방사 조도를 나타낸다. 대기를 구성하는 입자와 에어로졸(aerosol)의 빛 흡수 특성으로 인하여 특정 주파수 영역에서 지표면에 도달하는 태양광의 조도가 상대적으로 낮게 측정된다. 위 측정 결과를 토대로 지표면에서 특정 시야각의 수신기에 입사되는 태양광의 단위 면적당 PSD를 계산할 수 있다. 직접광의 경우 ASTM의 측정값을 활용하였고, 동일한 시야각에 입사되는 간접광의 방사 조도는 수학적 계산을 통해 도출하였다. 이를 위하여 산란 등으로 수신기에 입사되는 간접광의 방사 휘도(radiance)는 균일하다고 가정하였다. 특정 시야각에 입사되는 간접 방사 조도량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{ind} = \frac{(I_{hem} - I_{dir})}{\int_{0.051}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \cos\phi \sin\phi d\theta d\phi} \int_0^{\frac{FoV}{2}} \int_0^{2\pi} \cos\phi \sin\phi d\theta d\phi$$

$$= (I_{hem} - I_{dir}) \frac{1 - \cos(FoV)}{1.995}$$

여기서 I_{hem} 는 180° 시야각 내로 입사되는 직접+간접광의 방사 조도이며, I_{dir} 및 I_{ind} 은 각각 5.8° 시야각 내로 입사되는 직접 및 간접광 방사 조도이다. 수신기에 입력되는 한쪽 편광 태양광의 단위 면적당 PSD는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{sun}(\nu) = \frac{I\lambda^2}{2c}$$

여기서 I 는 직접 및 간접 태양광의 방사 조도, A 는 수신기 조리개의 넓이, λ 는 태양광 잡음의 파장, c 는 빛의 속도를 나타낸다. 식 (1) 및 (2)를 사용하여 FSOC 시스템에 사용되는 780 및 1550 nm 파장 대역에서 시야각 5.8° 수신기에 입력되는 직접 및 간접 태양광 단위 면적당 PSD (S_{sun})을 정리하면 표 1과 같다.

이 외에도 수신기에 광전치 증폭기를 사용하는 경우 ASE 잡음이 필연적으로 발생한다. 한쪽 편광을 가진 ASE 잡음의 PSD는 다음과 같다¹²⁾.

$$P_{ASE}(\nu) = n_{sp}(G-1)h\nu$$

Table 1. Solar irradiance on the 5.8° FoV receiver

Wavelength	Direct solar irradiance	Indirect solar irradiance
780 nm	1.08×10^{-12} W/m ² /Hz	2.47416×10^{-16} W/m ² /Hz
1550 nm	1.05×10^{-12} W/m ² /Hz	7.808125×10^{-17} W/m ² /Hz

여기서 h 는 플랑크 상수, ν 는 광신호의 주파수, n_{sp} 는 자연 방출 계수(spontaneous emission factor)를 의미하며, G 는 광 증폭기의 이득을 나타낸다.

더불어 수신기의 광신호 검출 과정에서 산탄(shot), 암전류(dark current), 열(thermal) 잡음이 발생되며, 이러한 잡음의 분산은 다음과 같이 표현된다^[13].

$$\sigma_{shot}^2 = 2qI_p B_e M^2 F \quad (4)$$

$$\sigma_{dark}^2 = 2qI_D B_e M^2 F \quad (5)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = 4kTB_e/r \quad (6)$$

여기서 q 는 전자의 기본 전하량, I_p 는 수신 광전력에 대한 광 검출기(photo-detector, PD)의 출력 전류, I_D 는 암전류, B_e 는 전기 필터의 대역폭, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도, r 은 부하 저항(load resistor)을 의미한다. 또한 M 및 F 는 APD의 아발란치 이득(avalanche photodiode gain) 및 잡음 지수(noise figure)를 의미하며, PIN 광검출기의 경우 이 값은 1이 된다.

2.3. IM/DD 시스템의 잡음 성분

직접 검출 수신기는 광검출기에 인가되는 빛의 세기만을 검출한다. 즉 광검출기에서는 전기장의 형태에서 더해진 여러 성분들의 세기에 비례하여 전류 신호가 발생한다. 따라서 무선 광통신 시스템의 경우 송신단에서 전송한 광신호 외에 태양광과 광증폭기의 ASE 등이 먼저 전기장의 형태로 더해진 후 그 세기를 구해야 한다. 이 경우 광신호와 태양광, 광신호와 ASE 등 간의 다양한 비팅 성분이 발생하며, 이들이 IM/DD 시스템의 주된 잡음원이 된다. 특히 태양광의 경우 광증폭기의 ASE와 마찬가지로 광대역, 비가간섭 특성을 지니고 있으므로 광증폭기를 사용하는 시스템의 성능 분석과 매우 유사한 방법으로 잡음의 분산을 계산할 수 있다. 그림 3에 광수신기에서 인가되는 신호의 광스펙트럼과 광검출기

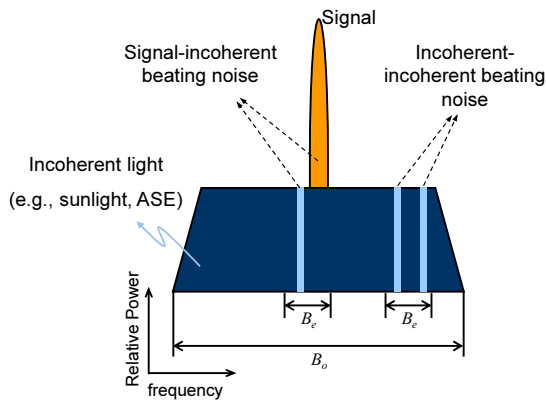


Fig. 3. Optical spectrum of the light impinging onto the detector. Numerous beating components are generated when directly detected.

에서 발생하는 비팅 성분을 나타냈다. 남색은 비가간섭 신호의 PSD, 주황색은 수신된 광신호를 나타낸다.

광학 필터의 대역폭 B_0 를 통과한 신호들은 PD를 거친 후 전기 필터의 출력단에서 대역폭 B_e 이내의 비팅 신호를 발생시킨다. 이 때 비팅을 유발하는 어느 한 신호가 태양광 또는 광증폭기 ASE인 경우 잡음이 발생한다. 비팅 잡음에는 태양광-태양광, ASE-ASE과 같은 제곱항(self-beating term)성분과 광신호-태양광, 광신호-ASE, 태양광-ASE와 같은 교차 비팅(cross-beating term)성분이 발생한다. 각 비팅 잡음의 분산은 전기 필터 출력단에서의 신호들의 수학적 표현을 기반으로 유도할 수 있다. 태양광이 수신기에 입력된 경우 PD의 출력을 나타내면,

$$E_{out} = MR \left\{ \sqrt{G}S_{in} + \sqrt{G}N_{sun} + N_{ASE} \right\}^2 + N_{thermal} + N_{shot} + N_{dark}$$

$$= MR \left\{ \begin{array}{l} \underbrace{GS_{in}S_{in}^*}_{\text{Received signal output}} \\ + \underbrace{GN_{sun}N_{sun}^*}_{\text{sun-sun beating}} \\ + \underbrace{N_{ASE}N_{ASE}^*}_{\text{ASE-ASE beating}} \\ + \underbrace{G(S_{in}N_{sun}^* + S_{in}^*N_{sun})}_{\text{signal-sun beating}} \\ + \underbrace{\sqrt{G}(S_{in}N_{ASE}^* + S_{in}^*N_{ASE})}_{\text{signal-ASE beating}} \\ + \underbrace{\sqrt{G}(S_{sun}N_{ASE}^* + S_{sun}^*N_{ASE})}_{\text{sun-ASE beating}} \end{array} \right\} + N_{thermal} + N_{shot} + N_{dark} \quad (7)$$

여기서 R 은 광검출기의 응답도이며 S_{in} , N_{sun} 및 N_{ASE} 은 각각 수신된 광신호, 태양광, ASE의 전기장을 의미하고, $N_{thermal}$, N_{shot} 및 N_{dark} 은 각각 열, 산탄 및 암전류 잡음 전류를 의미한다. 780 nm APD 수신기에 대해서는 $G = 1$, 1550 nm OPA 수신기에 대해서는 $M = 1$ 을 만족한다. 상기 식에서 첫번째 항인 수신된 광신호 이외의 태양광-태양광(sun-sun) 비팅 잡음 등의 다양한 비팅 잡음들의 분산 값을 이론적으로 도출할 수 있다. 결과적으로 전기 필터에서 출력되는 신호 전류의 평균값 I_{out} 및 비팅 잡음 분산들을 계산하면 다음과 같다.

$$I_{out} = MI_p = MR \{ GP_{sig}^{in} + 2GS_{sun}AB_0 + 2n_{sp}(G-1)h\nu B_0 \} \quad (8)$$

$$\sigma_{sun-sun}^2 = (RGMS_{sun}A)^2 B_e (2B_0 - B_e) \quad (9)$$

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = \{ Rn_{sp}(G-1)h\nu \}^2 B_e (2B_0 - B_e) \quad (10)$$

$$\sigma_{sig-sun}^2 = 4(RGM)^2 P_{sig}^{in} S_{sun} A B_e \quad (11)$$

$$\sigma_{sig-ASE}^2 = 4R^2 GP_{sig}^{in} n_{sp} (G-1)h\nu B_e \quad (12)$$

$$\sigma_{sun-ASE}^2 = 4R^2 \overline{GS_{sun}AN_{sp}}(G-1)h\nu B_c(2B_o - B_c) \quad (13)$$

여기서 P_{sig}^{in} 은 수신된 광신호의 전력, $\sigma_{sun-sun}^2$ 은 태양광-태양광, $\sigma_{ASE-ASE}^2$ 는 ASE-ASE, $\sigma_{sig-sun}^2$ 는 신호-태양광, $\sigma_{sig-ASE}^2$ 는 신호-ASE, $\sigma_{sun-ASE}^2$ 는 태양광-ASE 비팅 잡음 분산을 뜻한다. 계산에 고려된 태양광 및 ASE 성분은 수신된 광신호와 동일 편파(co-polarized)방향 신호를 가정하였으며, 시스템 성능 분석에는 교차 편파(cross-polarized)방향에 존재하는 태양광-태양광, ASE-ASE, 태양광-ASE 비팅 잡음의 분산 또한 잡음 전력 계산에 포함되어야 한다.

2.4. 코히어런트 시스템의 잡음 성분

코히어런트 시스템의 위상 다이버시티 수신기 출력 또한 식 (7)과 마찬가지로 수학적 분석을 통해 계산될 수 있다. 그림 1에 도시된 위상 다이버시티 수신기의 I 및 Q 채널 출력 전류 I_I 및 I_Q 를 계산하면,

$$I_I = R \left\{ \left| \frac{S_{in} + N_{sun} + S_{LO}}{2} \right|^2 - \left| \frac{S_{in} + N_{sun} - S_{LO}}{2} \right|^2 \right\} + N_{thermal} + N_{shot} \quad (14)$$

$$= R \left\{ \underbrace{\text{Re}(S_{in}S_{LO}^*)}_{I\text{-channel received signal output}} + \underbrace{\text{Re}(N_{sun}S_{LO}^*)}_{I\text{-channel sun-LO beating}} \right\} + N_{thermal} + N_{shot}$$

$$I_Q = R \left\{ \left| \frac{S_{in} + N_{sun} + jS_{LO}}{2} \right|^2 - \left| \frac{S_{in} + N_{sun} - jS_{LO}}{2} \right|^2 \right\} + N_{thermal} + N_{shot} \quad (15)$$

$$= R \left\{ \underbrace{\text{Im}(S_{in}S_{LO}^*)}_{Q\text{-channel received signal output}} + \underbrace{\text{Im}(N_{sun}S_{LO}^*)}_{Q\text{-channel sun-LO beating}} \right\} + N_{thermal} + N_{shot}$$

여기서 R 은 광검출기의 응답도, S_{LO} 는 LO 신호의 전기장을 의미한다. 수식을 보면 위상 다이버시티 수신기의 특징인 입력 성분과 LO 신호 복소 쥘레(complex conjugate)와의 곱의 실수 및 허수 성분이 최종 출력됨을 알 수 있다. 따라서 태양광-LO 비팅 잡음 또한 수신기 출력 부분에 나타난다. 직교 위상 천이 변조(quadrature phase-shift keying, QPSK)의 사용 및 호모다인 검출 방식을 가정했을 경우, 위상 다이버시티 수신기가 출력하는 수신된 광신호 출력 전류 S_I , S_Q 및 수신기 잡음의 분산을 나타내면,

$$S_I = R(P_{LO}P_{sig}^{in})^{1/2} \cos(\theta_I) (\theta_I = \pi/4 \text{ or } -\pi/4) \quad (16)$$

$$S_Q = R(P_{LO}P_{sig}^{in})^{1/2} \sin(\theta_Q) (\theta_Q = \pi/4 \text{ or } -\pi/4) \quad (17)$$

$$\sigma_{sun-LO}^2 = R^2 P_{LO} S_{sun} A B_c \quad (18)$$

$$\sigma_{shot}^2 = qR(P_{sig}^{in} + P_{LO} + 2S_{sun}AB_o)B_e \quad (19)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = 4kTB_c/r \quad (20)$$

여기서 σ_{sun-LO}^2 는 I 또는 Q 채널의 태양광-LO 비팅 잡음 분산, P_{LO} 및 P_{sig}^{in} 는 LO 및 수신된 광신호의 전력, θ_I 및 θ_Q 는 신호의 위상을 의미한다.

III. 잡음 전력 스펙트럼 밀도 및 비트 오류 분석

3.1. 시스템 구성에 따른 잡음 전력 스펙트럼 밀도 비교 및 분석

본 절에서는 FSOC 시스템의 성능을 제한하는 주된 잡음 원을 파악하기 위하여 잡음 성분 별로 PSD를 분석하였다. 이를 위하여 2장에서 도출한 직접 및 간접 태양광 방사 조도 및 잡음 분산 식을 활용하여 수신기에서 발생하는 잡음 성분들의 PSD 및 수신된 광신호의 세기에 따른 잡음 전력을 도

Table 2. Parameters and constants used for the performance analysis of FSOC systems

	Parameters	Symbol	Value
Parameters and constants	Temperature	T	300 K
	Boltzmann constant	k	1.38×10^{-23} J/K
	Load resistance	r	50 Ω
	Planck constant	h	6.63×10^{-34} J · s
	Elementary charge	q	1.6×10^{-19} C
	Speed of light	c	3×10^8 m/s
	Area of receiver aperture	A	$2.3\pi \times 10^{-4}$ m ²
	Average received signal power	P_{sig}	1 mW
	Optical filter bandwidth	B_o	80 GHz
	APD (for 780-nm IM/DD system)	Avalanche photodiode gain	M
Noise figure		F	$100^{0.3}$
Quantum efficiency		η	0.75
Wavelength		λ	780 nm
Dark current		I_D	15×10^{-9} A
Optical pre-amplifier (for 1550-nm IM/DD systems)	Spontaneous emission factor	n_{sp}	1.26
	Gain	G	15 dB
PIN PD (for 1550-nm IM/DD & coherent systems)	Quantum efficiency	η	0.8
LO (for 1550-nm coherent system)	Signal power	P_{LO}	10 mW

시하여 잡음 성분의 우세도를 파악하였다. 분석에 관련된 시스템의 상수와 변수는 표 2와 같다.

그림 4는 780 nm APD 광검출기를 사용하는 IM/DD 시스템에서 각 잡음 성분의 PSD를 보여준다. 비팅 잡음의 경우 실선은 직접 태양광, 파선은 간접 태양광에 수신기가 노출된 경우를 의미한다. 직접 및 간접 태양광에 따른 산탄 잡음의 PSD 차이는 0.5 dB 미만으로 아주 작기 때문에 그래프 상에서 구분하지 않았다. 사용된 광학 필터의 대역폭이 80 GHz이며, 광학 필터의 통과 대역의 중간에 신호가 위치하므로 신호와 비가간섭광과의 비팅 성분은 40 GHz까지만 존재한다. 또한 태양광-태양광과 같은 비가간섭광 간의 비팅 성분은 80 GHz까지 존재한다. 결과를 보면 직접 태양광에 노출된 환경에서는 신호-태양광 비팅 잡음이 주된 성능 열화 요인이며, 다른 잡음 성분보다 10 dB 이상 PSD 값이 높다는 것을 알 수 있다. 반면에 간접 태양광만 수신기에 인가되는 경우에는 산탄 잡음이 주된 잡음 성분이며, 그 전력은 직접 태양광의 경우와 비교하여 35 dB 이상 크게 낮다.

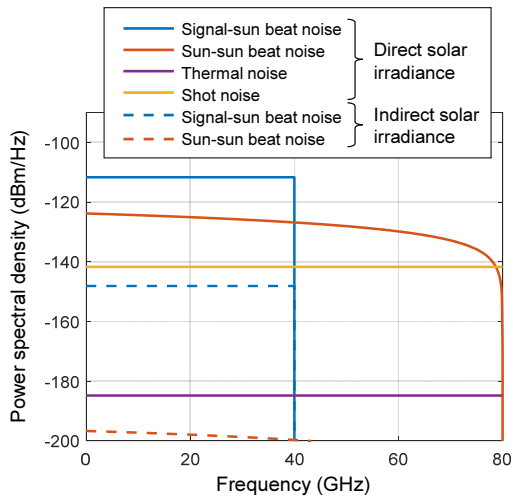


Fig. 4. Power spectral density of the noise components in the 780-nm IM/DD system using an APD receiver when the receiver is exposed to solar irradiance.

그림 5는 1550 nm 광전치 증폭기를 사용하는 IM/DD 시스템의 잡음 성분에 대한 PSD를 보여준다. 이 경우 태양광의 비가간섭광 뿐 아니라 광증폭기의 ASE 잡음과의 비팅으로 수많은 잡음 성분이 발생한다. 그림에도 불구하고 시스템의 성능을 좌우하는 주된 잡음 성분은 그림 4의 결과와 마찬가지로 신호-태양광 비팅 잡음이다. 그 다음은 태양광-태양광 비팅 잡음으로 신호-태양광 잡음보다 10 dB 이상 낮다.

그림 6은 1550 nm 코히어런트 시스템의 잡음 PSD를 보여준다. LO 레이저 광의 높은 광전력으로 인하여 직접 태양광에 노출된 수신기는 태양광-LO 비팅 잡음이 다른 잡음 성분보다 월등히 우세하다. 간접 태양광 환경에 노출될 경우에는 LO에 의한 산탄 잡음이 가장 크게 시스템의 성능을 제한한다.

공통적으로 무선 광통신 시스템의 수신기가 직접 태양광에 노출되었을 경우에는 IM/DD 시스템의 경우 신호-태양광 비팅 잡음, 코히어런트 시스템은 태양광-LO 비팅 잡음에 의하여 시스템 성능이 제한될 것으로 예상된다. 이들 요소들을 포함한 총 수신기 잡음 분산은 식 (11), (12) 및 (19)를 통해

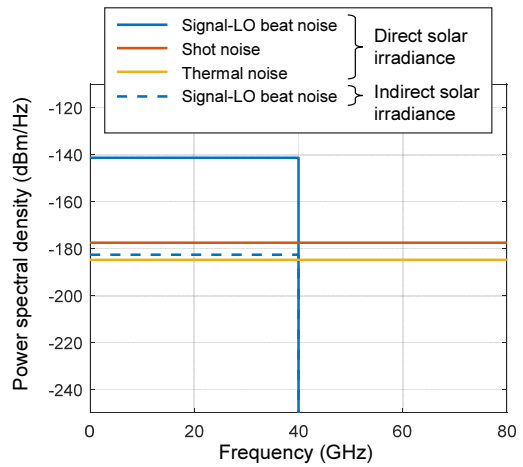


Fig. 6. Power spectral density of the noise components in the 1550-nm coherent system when the receiver is exposed to solar irradiance.

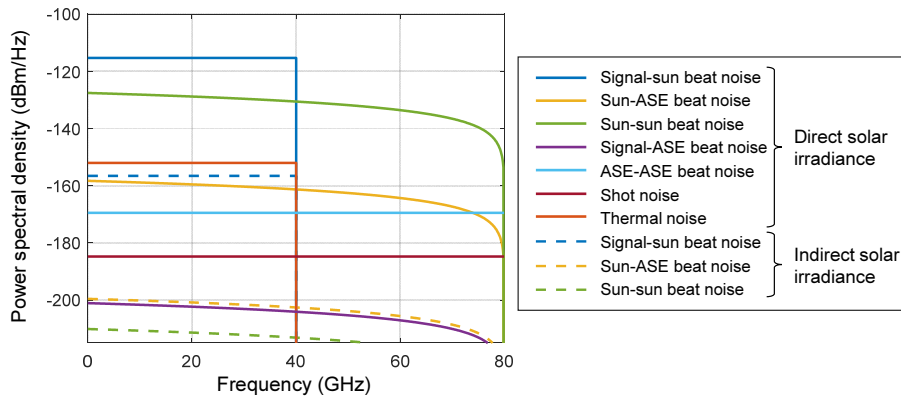


Fig. 5. Power spectral density of the noise components in the 1550-nm IM/DD system using an optically pre-amplified receiver when the receiver is exposed to solar irradiance.

알 수 있듯이 수신된 광신호의 전력을 변수로 포함하고 있다. 따라서 수신하는 광신호 크기의 증감에 따라 내포하는 잡음들의 우세도는 변화할 수 있다. 잡음 성분들간의 상관성이 없다고 가정할 경우 IM/DD 및 코히어런트 시스템에 대한 총 수신기 잡음 분산 $\sigma_{IM/DD}^2$ 과 σ_{coh}^2 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{IM/DD}^2 = \sigma_{sig-sun}^2 + \sigma_{sig-ASE}^2 + 2\sigma_{sun-ASE}^2 + 2\sigma_{ASE-ASE}^2 + 2\sigma_{sun-sun}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (21)$$

$$\sigma_{coh}^2 = \sigma_{sun-LO}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (22)$$

여기서 σ_{coh}^2 는 I 채널에 대한 잡음 분산만을 나타내었다. 이에 기반하여 그림 7과 그림 8에 직접 및 간접 태양광에 노출된 수신기의 광신호의 세기에 따른 총 잡음 분산을 도시하였다. 전기 필터의 대역폭 B_e 는 20 GHz로 설정하였다.

결과를 보면 직접 태양광에 노출된 수신기의 경우, IM/DD 시스템에서는 -14 dBm보다 작은 수신 광전력에서 태양광-태양광 비팅 잡음이, -14 dBm보다 큰 전력 영역에서는 신호-

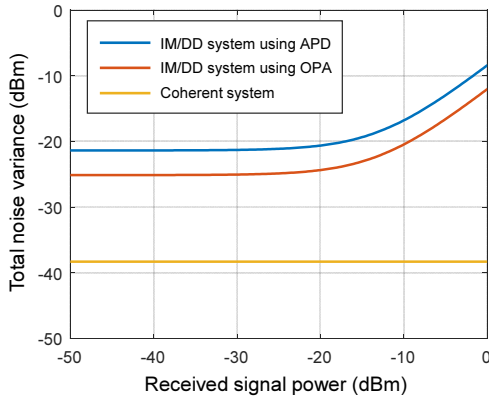


Fig. 7. Noise variances versus the received signal power when the receiver is exposed to direct sunlight.

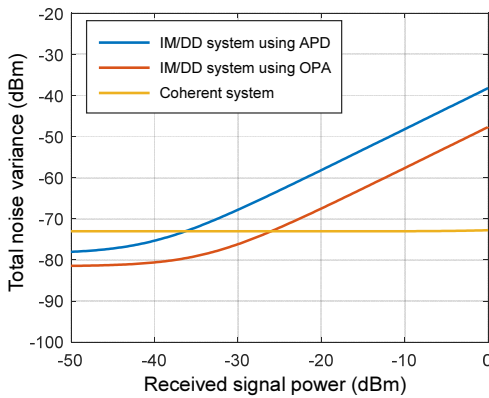


Fig. 8. Noise variances versus the received signal power when the receiver is exposed to indirect sunlight.

태양광 비팅 잡음이 수신기 성능을 결정짓는 주된 잡음 성분이 된다. 코히어런트 시스템의 경우에는 LO 레이저의 높은 광전력으로 인하여 위에서 수신 광전력에 상관없이 태양광-LO 비팅 잡음이 성능을 제한한다.

간접 태양광만 수신기에 인가되는 경우에는 APD를 사용하는 IM/DD 시스템은 -50 dBm 이하의 낮은 입력 광신호에 대해서는 암전류의 산탄잡음과 열잡음이 우세하지만 그보다 높은 전력의 광신호가 인가되면 산탄 잡음이 주된 잡음 성분이다. 광전치 증폭기를 사용하는 1550 nm IM/DD 시스템은 입력 광신호가 -37 dBm 이하인 경우 수신기의 열잡음이 시스템 성능을 제한하지만, 수신 전력이 증가함에 따라 주된 잡음 성분이 신호-ASE 비팅으로 바뀐다. 코히어런트 시스템은 LO 레이저의 높은 광전력으로 인하여 산탄 잡음이 가장 우세하다.

3.2. 수신된 광신호 전력에 대한 BER 분석

앞 절에서 분석한 잡음의 분산 값을 활용하여 무선 광통신 시스템의 BER 성능을 예측할 수 있다. 잡음 성분이 가산성 백색 가우시안 특성을 따른다고 가정하면, 온-오프 변조 (on-off keying, OOK) 변조 방식을 사용하는 IM/DD 시스템과 QPSK 변조 방식을 사용하는 코히어런트 시스템의 BER 성능은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$BER_{IM/DD} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{I_{out}(on) - I_{out}(off)}{\sqrt{2} \{ \sigma_{IM/DD}(on) + \sigma_{IM/DD}(off) \}} \right] \quad (23)$$

$$BER_{coh} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{S_I^2 + S_Q^2}{4\sigma_{coh}^2}} \right) \left\{ 1 - \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{S_I^2 + S_Q^2}{4\sigma_{coh}^2}} \right) \right\} \quad (24)$$

여기서 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 는 상보 오차 함수(complementary error function), $I_{out}(on)$ 및 $I_{out}(off)$ 는 온 및 오프 신호의 평균 전류를 의미한다^[10,13]. 그림 9에 직접·간접 태양광이 수신기에 들어오는 경우 무선 광통신 시스템의 BER 곡선을 도시하였다. IM/DD 시스템의 전송 속도는 20 Gb/s이며, 코히어런트 시스템은 40 Gb/s이다. 시스템의 기준 성능을 보여주기 위하여 태양광이 수신기에 입사하지 않는 경우를 또한 도시하였다. 수신기 변수는 표 2를 따르며, 전기 필터의 대역폭 B_e 는 20 GHz로 가정하였다. 또한 온-오프 변조의 소광비는 무한히 높다고 가정하였다.

수신 감도는 10^{-5} BER 기준으로 APD를 사용하는 IM/DD, 광전치 증폭기를 사용하는 IM/DD, 그리고 코히어런트 시스템에 대하여 각각 약 -31, -33.5 및 -39 dBm으로 측정되었다. 결과를 보면 직접 태양광이 수신기에 인가되는 경우 시스템 종류에 관계없이 수신 감도가 30 dB 이상 열화되었다. 예를 들면, 직접 태양광이 수신기에 들어오는 경우 광전치 증폭기를 사용하는 IM/DD 시스템의 수신 감도는 -1 dBm으로 측정되었다. 코히어런트 시스템의 수신 감도 역시 -3 dBm으로 크게 저하되었다. 반면에 간접 태양광 환경에 수신기가 노출

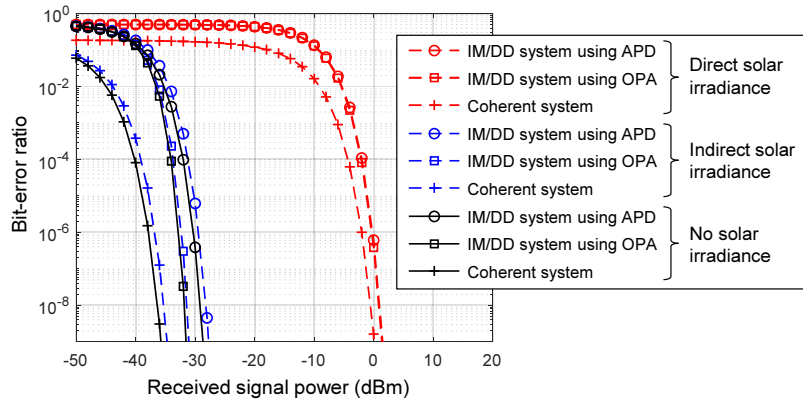


Fig. 9. BER performance of FSOC systems in the presence of solar irradiance.

될 경우에는 수신 감도 열화가 1.3 dB 이하로 미미하였다. 이는 표 1에 보인 바와 같이 간접 태양광의 조도가 직접 태양광의 그것에 비하여 4000배 이상 낮기 때문이다. 본 연구에서 살펴본 온-오프 변조 방식과 QPSK 변조 방식은 각각 직접 검출 시스템과 코히어런트 시스템에서 매우 좋은 수신 감도를 가지는 변조 방식에 해당된다. 따라서 고차 변조(예, PAM-4와 같은 펄스 진폭 변조 또는 16 QAM과 같은 변조)를 사용하는 시스템의 경우보다 높은 신호 대 잡음비가 필요하므로 태양광이 의한 성능 열화는 더욱 심화될 것으로 판단된다.

현실적으로 송수신기 정렬 오차, 대기 채널의 신호 감쇠 등으로 인하여 높은 광전력을 수신하는 것이 매우 어렵기 때문에 태양광이 수신기에 직접 인가되는 경우 통신이 불가능하다고 할 수 있다. 이는 기존 논문에서 언급된 내용과 일치한다⁷⁻⁹⁾.

태양광은 레이저 광신호와 달리 편광되어 있지 않으며 (unpolarized) 넓은 파장에 걸쳐서 광범위하게 퍼져있는 특성이 있다. 따라서 편광자(polarizer)를 사용하여 광신호와 직각 편광 성분의 태양광을 제거하거나 광학 필터의 대역폭을 좁혀서 수신기에 인가되는 태양광의 조도를 낮춤으로써 성능 향상을 기대할 수 있다.

그림 10은 직접 태양광 환경에서 편광자의 유무에 따른 BER 성능을 보여준다. 결과를 보면 편광자를 적용하였을 때, 10^{-5} BER 기준으로 직접광에 노출된 IM/DD 시스템의 수신기에 대해서 약 0.4 dB의 수신 감도 이득을 확인할 수 있다. 편광자를 사용하여 수신기에 인가되는 태양광 조도를 절반으로 낮추었음에도 불구하고 수신 감도 이득이 적은 이유는 IM/DD 시스템의 성능을 제한하는 주된 잡음 성분이 신호-태양광 비팅이기 때문이다. 비팅 현상은 동일 편광 빛 간에 발생하므로 편광자를 사용하여 신호 편광에 직교인 태양광 성분을 제거하더라도 신호-태양광 비팅 잡음을 감소시키지 못한다. 편광자는 태양광-태양광 비팅 잡음은 절반으로 감소시킬 수 있으나 이 잡음 성분은 주된 잡음이 아니므로 수신 감도 이득이 미미하다. 결과를 보면 코히어런트 시스템 역시 편광자의 사용으로 인한 수신 감도 이득이 거의 없다.

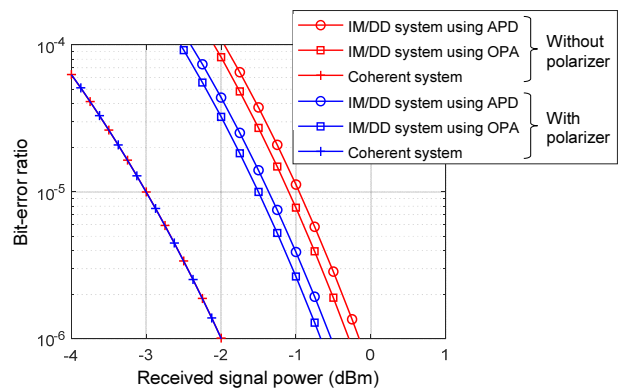


Fig. 10. BER curves of FSOC systems in the presence of direct solar irradiance when a polarizer is inserted at the receiver.

이는 코히어런트 시스템의 성능을 제한하는 태양광-LO 비팅 잡음은 LO와 동일한 편광 성분의 태양광에 의해서만 발생하는 것이기 때문이다. 편광자로 LO와 직교 편광 성분의 태양광을 제거해도 이 성분은 태양광-LO 비팅 잡음에 기여하지 않는 성분이므로 시스템 성능 개선을 이끌어 낼 수 없다. 결론적으로 편광자는 태양광에 의한 무선 광통신 시스템의 성능 열화를 완화시키는데 별 도움이 되지 않는다.

그림 11은 광학 필터의 대역폭에 따른 수신기의 BER 성능을 보여준다. 신호의 대역폭이 20 GHz이므로 광학 필터의 최소 대역폭을 신호 대역폭의 2배인 40 GHz로 설정하였다. 각 수신기에는 편광자가 삽입되었고, 수신된 광신호의 평균 전력은 IM/DD와 코히어런트 시스템에 대하여 각각 -2와 -4 dBm으로 설정하였다. 결과를 보면 필터의 대역폭을 80에서 40 GHz까지 감소시킬 때, APD와 OPA를 사용하는 IM/DD 시스템의 경우 BER이 각각 4.4×10^{-5} 에서 1.9×10^{-5} , 3.2×10^{-5} 에서 1.4×10^{-5} 로 다소 감소하지만 코히어런트 수신기에서는 BER 개선이 관찰되지 않았다. 이는 광학 필터 대역폭 감소로 인해 직접 검출 수신기에서는 두번째 우세 잡음 성분인 태양광-태양광 비팅 잡음 전력이 감소하지만, 코히어런트 수신기는 태양광-태양광 잡음이 밸런스 광검출기에서 상쇄되어 사라질 뿐 아니라 태양광-LO 비팅 잡음이 타 잡음 성

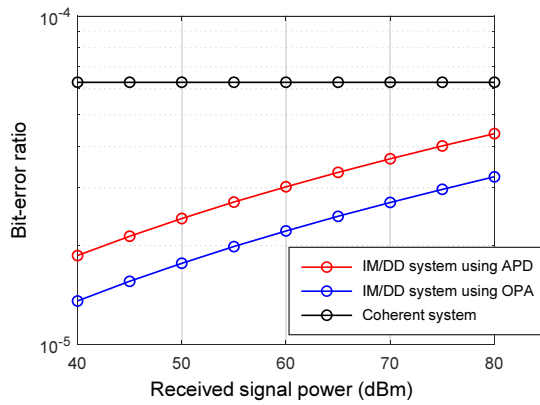


Fig. 11. BER performance under the direct solar irradiance as a function of the bandwidth of optical filter.

분에 비하여 월등히 우세하므로 효과가 없기 때문이다. 결론적으로 광학 필터의 대역폭을 감소시키더라도 시스템의 성능을 제한하는 주된 잡음 성분을 감소시키지 못하므로 광학 필터의 대역폭을 줄이더라도 수신 감도 개선은 미미하거나 없다.

IV. 결 론

본 논문에서는 무선 광통신 시스템의 수신기에 태양광이 들어올 경우 수신 감도의 열화를 수학적으로 분석하였다. 태양광 방사 조도 측정 자료를 기반으로 특정 넓이 및 시야각의 조리개에 입사되는 태양광 방사 조도를 계산하였으며, 이를 기반으로 780 nm APD를 사용하는 IM/DD 시스템, EDFA와 같은 광전지 증폭기를 사용하는 IM/DD 시스템, 그리고 1550 nm 코히어런트 시스템에 대하여 수신 감도 열화를 도출하였다. 태양광이 수신기에 직접 인가되는 경우 IM/DD 시스템은 수신 신호 전력이 낮을 때에는 태양광-태양광 비팅이, 수신 신호 전력이 큰 경우에는 신호-태양광 비팅 잡음이 시스템의 성능을 제한하였다. 반면에 코히어런트 시스템은 태양광-LO 비팅이 시스템의 성능을 제한하였다. 이러한 비팅 잡음 성분은 수신기의 종류에 상관없이 30 dB 이상의 상당히 큰 수신 감도 열화가 발생하였다. 대기의 산란 등에 의하여 수신기에 간접적으로 태양광이 들어오는 경우에는 수신 감도 열화가 1.3 dB 이하로 미미하였다. 이러한 수신 감도 열화는 수신기에 편광자를 사용하거나 광학 필터의 대역폭을 감소시켜도 거의 감소하지 않았다. 따라서 이동형 무선 광통신 시스템의 경우 태양광이 수신기에 직접 들어오면 통신이 두절될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래 전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다(UD190033ED).

References

1. H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: challenges and mitigation techniques," *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **19**, 57-96 (2017).
2. E. Leitgeb, M. Gebhart, and U. Birmbacher, "Optical networks, last mile access and applications," in *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*, A. K. Majumdar, J. C. Ricklin, ed. (Springer, NY, USA, 2008), Vol. 2, pp. 273-302.
3. Facebook Engineering, "Building communications networks in the stratosphere," (Y. Maguire, Published Date: 30 Jul. 2015), <https://engineering.fb.com/connectivity/building-communications-networks-in-the-stratosphere/> (Accessed Date: Oct. 2020).
4. R. Van Hooijdonk, "Google's projects loon and skybender are taking internet connectivity to greater heights," (Richard Van Hooijdonk Blog, Published Date: 10 March 2016), <https://www.richardvanhooijdonk.com/blog/en/google-projects-loon-and-skybender-are-taking-internet-connectivity-to-greater-heights> (Accessed Date: Oct. 2020).
5. Lunar Laser Communications Demonstration, "Lunar laser communication demonstration NASA's first space laser communication system demonstration," (National Aeronautics and Space Administration Lunar Laser Communications Demonstration Goddard Space Flight Center, Published Date: 2013), https://www.nasa.gov/sites/default/files/llcdfactsheet.final_web_.pdf (Accessed Date: Oct. 2020).
6. G. H. Park and H. Kim, "Impact of solar radiation on the performance of outdoor free-space optical communication systems," in *Proc. Photonics Conference* (Phoenix Pyeongchang Hotel, Korea, Dec. 2019), paper F2C-1.
7. V. G. Sidorovich "Solar background effects in wireless optical communications," *Proc. SPIE* **4873**, 133-142 (2002).
8. M. S. Islim, S. Videv, M. Safari, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, and H. Haas, "The impact of solar irradiance on visible light communications," *J. Lightwave Technol.* **36**, 2376-2386 (2018).
9. D. Rollins, J. Baars, D. P. Bajorins, C. S. Cornish, K. W. Fischer, and T. Wiltsey, "Background light environment for free-space optical terrestrial communications links," *Proc. SPIE* **4873**, 99-110 (2002).
10. K.-P. Ho, *Phase-Modulated Optical Communication Systems* (Springer, Boston, MA, USA, 2005).
11. *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*, ASTM G173-03, 2020.
12. E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications* (Wiley-Interscience, NY, USA, 1994).
13. G. Keiser, *Optical Fiber Communications (Asia adaptation), 5th revised Ed.* (Mc Graw Hill Education, UK, 2014).