文章编号:1000-7032(2019)05-0659-07

沙尘信道下激光通信系统的性能分析

曹明华¹,姚 宇²,宋梨花¹,王惠琴¹*

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院,甘肃 兰州 730050; 2. 国家电网兰州供电公司,甘肃 兰州 730070)

摘要: 沙尘对激光信号的散射和吸收作用会引起激光信号的严重衰减,本文结合我国沙尘粒子的半径分布特征,在考虑含水影响的基础上,研究了沙尘对激光信号衰减特性的影响,得到了接收端信噪比的表达式;同时针对 OOK 调制,推导了沙尘天气下激光通信系统的误码率和信道容量。仿真分析了能见度、传输距离、含水量以及激光波长等因素对误码率和信道容量的影响。结果表明:随着含水量和传输距离的增大以及大气能见度的减小,系统的误码率会呈现出不断增大的趋势,而信道容量则呈现减小的趋势。在能见度为4 km 的情况下,波长为1 550 nm、传输距离为1 km 时系统的误码率可达 10⁻² 数量级,且归一化信道容量为 8.48 bps/Hz。

关 键 词:沙尘信道;复介电常数;激光衰减;传输性能 中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **DOI**: 10.3788/fgxb20194005.0659

Performance Analysis of Laser Communication System Under Sand-dust Channel

CAO Ming-hua¹, YAO Yu², SONG Li-hua¹, WANG Hui-qin^{1*}

School of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
 State Grid Lanzhou Electric Power Supply Company, Lanzhou 730070, China)
 * Corresponding Author, E-mail: 15117024169@139. com

Abstract: The scattering and absorption caused by sand-dust channel will lead to serious attenuation of the laser signals. By considering the characteristics of the sand-dust particle radius distribution and the effects of sand-dust moisture content, the impact of sand-dust on the attenuation characteristics of laser signal is investigated and the expression of signal-to-noise ratio at the receiving end is proposed. Moreover, the bit error rate and channel capacity under sand-dust weather are deduced for the OOK modulation. Furthermore, the effects of atmospheric visibility, transmission distance, sand-dust moisture content and laser wavelength on the bit error rate and channel capacity are simulated. The results show that the channel capacity and system BER performance decrease with the increase of sand-dust moisture content, transmission distance and the decrease of atmospheric visibility. When the atmospheric visibility is 4 km, the system bit error rate achieves 10^{-2} orders of magnitude with a wavelength of 1 550 nm and a transmission distance of 1 km and the normalized channel capacity is up to 8.48 bps/Hz.

Key words: sand-dust channel; complex permittivity; laser attenuation; transmission performance

基金项目:国家自然科学基金(61875080,61861026,61465007);甘肃省教育厅高等学校科学研究项目(2017A-011);兰州理工大学博士基金(03-061616)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (61875080,61861026,61465007); Foundation of Gansu Education Department(2017A-011); Specialized Research Fund for The Doctoral Program of Higher Education of LUT(03-061616)

收稿日期: 2018-05-21;修订日期: 2018-08-21

1引言

大气激光通信以其传输速率高、抗干扰能力 强、通信容量大等优点逐渐成为当今信息领域的 一大热门技术,被认为是解决"最后一公里"瓶颈 问题切实可行的方案^[1-2]。然而光波在大气中传 播时,因受到外界因素的影响而导致光学特性发 生变化,尤其是近地大气中随机分布的各种离散 悬浮粒子,如霆、雾、云、雨、冰晶、雪花以及烟、沙 尘等会因散射和吸收作用导致激光产生衰减现 象。这不仅会引起脉冲能量的减少,而且会使脉 冲的频域和时域特性发生变化。尤其是在沙尘天 气中,由于沙尘粒子是尺寸较大的非球形的复杂 粒子,这使得激光信号因散射和吸收效应占主导 地位而导致衰减严重,这将极大地影响 FSO 通信 系统的性能,严重时甚至会引起通信中断、失败等 现象^[3-5]。

作为我国沙尘暴的主要源地和频发区,西北 地区年平均沙尘天气在 60 d 左右^[6]。该地区沙 尘粒子的粒径相对较大,尺寸主要分布在0.01~ 0.25 mm 之间^[7]。当激光信号在大气信道中传输 时,不仅会受到自由空间损耗、大气衰减、背景辐 射和大气湍流等因素的影响,还会受到沙尘的影 响。为此,学者们针对沙尘天气粒子的物理特性 以及沙尘信道中激光信号的传播特性展开了广泛 的研究。周碧等^[8]利用 Mie 散射激光雷达和双波 长偏振激光雷达的观测资料,分析了黄土高原半 于旱区沙尘气溶胶垂直分布和时间演变特征。王 红霞等^[9]基于 Mie 散射理论和蒙特卡洛模型分别 建立了沙尘性、水溶性、海洋性和煤烟性4种不同 类型气溶胶中的衰减模型。Islam 等^[10] 通过 Mie 理论求解麦克斯韦方程组的方法,提出了一种沙 尘暴中微波信号的衰减特性的计算方法。文献 [8,10]虽然分析了沙尘信道的衰减效应,但却忽 略了沙尘含水量对衰减的影响。闵星等[11]利用 Rayleigh 近似求解了带电沙粒的散射场问题,并 分析了沙粒浓度、含水量等因素对不同频率电磁 波的衰减作用。Li 等^[12]通过搭建的激光通信系 统实验测试平台,得到了大气衰减信道和大气湍 流信道下的信噪比和误码率公式,并研究了它们 随能见度的变化趋势。王惠琴等^[13]针对 MPPM 调制研究了大气湍流信道中光 MIMO 通信系统的 信道容量和误码率。韩立强等[14]分析了大气湍 流和大气衰减联合效应下光 MIMO 系统的性能。 上述文献较好地研究了不同影响因素下激光通信 系统的性能,但有关沙尘信道中激光通信系统传 输性能的研究甚少,且大多忽略了沙尘中含水量 的影响。

为此,本文在考虑含水量的基础上研究了沙 尘信道下激光信号的衰减,分析了含水量、能见度 及传输距离等因素对无线激光通信系统误码率以 及信道容量的影响。

2 理论推导

激光信号在沙尘信道中传输时,光束因受到 沙尘粒子的散射和吸收作用会产生能量的衰减和 脉冲的变化。而这些变化将会引起信噪比的降 低,从而导致误码率增大以及信道容量减小。

2.1 沙尘信道下的激光衰减特性

设沙尘浓度为 W,表示单位体积内的沙尘粒 子个数,由文献[15]可知,对于粒径分布不均匀 的沙尘而言,其沙尘浓度可以表示为:

$$W = \frac{\pi}{6} G\rho \ 10^{-9} \int_0^\infty r^3 F(r) \, \mathrm{d}r =$$

0. 001388 $\rho \int_0^\infty r^3 F(r) \, \mathrm{d}r,$ (1)

其中,r为沙尘粒子半径,ρ为粒子数密度,表示 单位体积内所含沙粒的个数。p(r)为沙尘粒子 的尺寸分布函数。依据文献[15]的研究结果, 沙尘天气下沙尘粒子的半径分布服从对数正态 分布,即

$$F(r) = \frac{1}{(2r)\sigma} \sqrt{2\pi} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(2r) - \mu}{\sigma}\right]^2\right\},$$
(2)

其中,μ和σ分别表示 ln(2r)的标准差和数学期 望。那么,沙尘粒子半径分布的概率密度函数为

$$f(r) = \frac{F(r)}{\rho},$$
 (3)

又根据 Koschmieder 定律,能见度 V 和衰减系数 C_e 之间的关系为

$$V = \frac{15}{C_{\rm e}},\tag{4}$$

其中

$$C_{\rm e} = 8.686 \times 10^3 \pi \rho \int_0^\infty r^2 f(r) \,\mathrm{d}r,$$
 (5)

联立公式(4)、(5),则沙尘的粒子数密度可表示为

9)

$$\rho = \frac{15}{8.686 \times 10^3 \pi V \int_0^\infty r^2 f(r) \,\mathrm{d}r},\tag{6}$$

将公式(6)和公式(2)代入到公式(1)中,可得沙 尘粒子浓度为

$$W = \frac{5.085 \times 10^{-8} \int_{0}^{\infty} r^{3} F(r) \,\mathrm{d}r}{V \int_{0}^{\infty} r^{2} f(r) \,\mathrm{d}r}, \qquad (7)$$

然而,沙尘大气中的粒子并不完全是干沙,通常还 会含有一定的水分。因此,在分析沙尘天气下激

$$\varepsilon'_{s} = 3$$

$$\varepsilon''_{s} = \begin{cases} 1.8 \times 10^{2\lg f - 2.8} / f & 0.8 \text{ GHz} \leq f < 80 \text{ GHz}, \\ 18.256 / f & f \leq 80 \text{ GHz} \end{cases}$$
(6)

沙粒子的复介电常数为^[16]:

由公式(9)可以看出,干沙的复介电常数与入射 光的频率有关,即随着激光波长的变化而变化。 依据 Ellison^[18]提出的经验公式,纯水复介电 常数 *ε* , 的实部 *ε* , 和虚部 *ε* , 可表示为

光信号的衰减时,考虑含水量对衰减的影响是有 必要的。利用麦克斯韦-格尼特公式可得含水湿

 $\varepsilon_{e} = \varepsilon_{r} + i\varepsilon_{i} = \varepsilon_{s} \left[1 + \frac{3P \frac{\varepsilon_{w} - \varepsilon_{s}}{\varepsilon_{w} + 2\varepsilon_{s}}}{1 - P \frac{\varepsilon_{w} - \varepsilon_{s}}{\varepsilon_{s} + 2\varepsilon_{s}}} \right], (8)$

其中, ε_{r} 和 ε_{i} 分别是湿沙复介电常数的实部和虚部, P为含水量, ε_{s} 和 ε_{w} 分别为干沙和水的介电常数。

其中干沙复介电常数的实部 ε'和虚部 ε'分别为[17]:

$$\begin{cases} \varepsilon'_{w} = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_{1} - \varepsilon_{\infty}) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{s}}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha \pi}{2}\right]}{1 + 2\left(\frac{\lambda_{s}}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha \pi}{2} + \left(\frac{\lambda_{s}}{\lambda}\right)^{2(1-\alpha)}}, \quad (10) \\ \varepsilon''_{w} = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_{1} - \varepsilon_{\infty}) \left(\frac{\lambda_{s}}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \cos \frac{\alpha \pi}{2}}{1 + 2\left(\frac{\lambda_{s}}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha \pi}{2} + \left(\frac{\lambda_{s}}{\lambda}\right)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\sigma_{w}\lambda}{18.8496 \times 10^{10}}\end{cases}$$

其中, $\sigma_w = 12.5664 \times 10^8 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,而 $a_{\chi}\lambda_s, \varepsilon_1$ 以及 ε_a 是与大气温度相关的参量,具体可依据文献[18]选取。

根据文献[15]可知,沙尘信道的激光衰减为^[19]:

$$A = \frac{92.7\varepsilon_{i}}{(\varepsilon_{r}+2)^{2}+\varepsilon_{i}^{2}} \cdot \frac{W}{\lambda}, \qquad (11)$$

其中, W 为沙尘粒子的浓度, λ 为激光的波长。考 虑到沙尘粒子中含水量对衰减的影响, 分别将 ε。 的实部和虚部代入公式(11)中, 得到此时激光信 号总的衰减量为

$$A = \frac{4.714 \times 10^{-6} \times \varepsilon_{i} \int_{0}^{\infty} r^{3} p(r) dr}{\lambda ((\varepsilon_{r} + 2)^{2} + \varepsilon_{i}^{2}) V \int_{0}^{\infty} r^{2} N(r) dr}.$$
 (12)

2.2 沙尘信道下的激光传输性能

由比尔·朗伯定律^[20]可知,大气激光透射 率为:

$$\tau(L) = \frac{I(L)}{I(0)} = e^{-AL},$$
 (13)

其中 *I*(0)为发射光功率,*I*(*L*)是光传输距离 *L* 后的光功率,*A* 为衰减系数。将公式(12)带入到公

式(13)中,即可得到沙尘天气下激光的透射率。 可以看出,当沙尘衰减系数越大时,透过率就越 小,对沙尘天气下的激光通信影响就越大。又根 据文献[21],接收端的接收功率 *P*_B 可以表示为:

$$P_{\rm R} = \frac{\pi D^2 \tau}{4\pi \left(\theta L\right)^2} P_{\rm T}, \qquad (14)$$

其中,D为接收孔径, θ 为光束发散角, P_{T} 为激光 信号的发送功率。

假设接收端光电检测器的响应度为 ξ ,电子 电荷为e,光电二极管的等效噪声带宽为B,则光 电检测器产生的平均光生电流 $\langle i_s^2 \rangle$ 和探测器的 均方散粒噪声电流 $\langle i_n^2 \rangle$ 可以表示为^[22]:

$$\langle i_{\rm s}^2 \rangle = \rho P_{\rm R},$$
 (15)

$$\langle i_{\rm n}^2 \rangle = 2e(\langle i_{\rm s}^2 \rangle + \langle i_{\rm dn}^2 \rangle)B + \langle i_{\rm Tn}^2 \rangle, \quad (16)$$

其中,〈i²_{dh}〉为暗电流的噪声,由于暗电流的数值 远远小于光生电流的值,所以往往可以忽略。 〈i²_n〉为均方热噪声电流,通常可表示为

$$\langle i_{\rm Tn}^2 \rangle = \frac{4KTB}{R},$$
 (17)

其中, $K = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K,为玻尔兹曼常数,T为等效噪声温度,R为等效电阻。

那么,光电二极管输出的总均方噪声电流为

$$\langle i_{\rm n}^2 \rangle = 2B \Big(e \xi P_{\rm R} + \frac{2KT}{R} \Big),$$
 (18)

因此,沙尘衰减信道下的信噪比可以表示为

$$K_{\rm SNR} = \frac{\langle i_{\rm s}^2 \rangle}{\langle i_{\rm n}^2 \rangle} = \frac{\xi D^2 \tau P_{\rm T}}{e R \xi D^2 \tau P_{\rm T} + 8 \theta^2 L^2 K T}, \quad (19)$$

由公式(19)可以看出,沙尘信道下的信噪比与发送功率、接收孔径,光束发散角和激光透过率等有关。依据公式(12),透过率又与大气能见度、传输距离以及沙尘粒子的含水量等因素有关。所以,这些因素均会影响光信号的接收信噪比。

由于大气激光通信中普遍采用强度调制/直 接检测(IM/DD)方式。因此,在 OOK 调制,假设 仅考虑高斯噪声,且其工作在最佳判决门限,那么 在沙尘大气信道中的误码率可表示为

$$P_{00K} = P(1)P(0/1) + P(0)P(1/0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\langle i_{s}^{2} \rangle}{2\sqrt{2\langle i_{n}^{2} \rangle}}\right), \quad (20)$$

将公式(15)和(18)分别带入到公式(20)中,可得 沙尘信道下 OOK 调制时的误码率为

$$P_{\text{OOK}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\xi D^2 \tau P_{\text{T}}}{8\theta L \sqrt{B \left(\frac{e\xi \pi D^2 \tau P_{\text{T}}}{2\pi} + \frac{2KT}{R} \right)}} \right),$$
(21)

由公式(21)同样可以看出,影响沙尘信道下大气 激光通信系统误码率性能的主要因素有大气能见 度、传输距离以及沙尘粒子的含水量等。

由香农信道容量公式,连续信道的信道容 量为

$$C = B \log_2(1 + K_{\rm SNR}), \qquad (22)$$

其中,B为信道的带宽,S为信号的功率,N为噪 声功率。将沙尘信道下采用 OOK 调制的信噪比 代入公式(22)中,可得到此时系统的信道容量为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{\xi D^2 \tau P_{\rm T}}{e R \xi D^2 \tau P_{\rm T} + 8 \theta^2 L^2 K T} \right),$$
(23)

由公式(23)可见,此时系统的信道容量与发送功 率、接收孔径、光束发散角和激光透过率等有关。

3 仿真分析

为了得到大气激光通信系统在沙尘信道下的 传输性能,分别仿真了激光信号在沙尘天气下传 输时,信噪比、误码率以及归一化信道容量随各参 数的变化关系,其结果如图 1~7 所示。仿真参数 为:沙尘粒子的复折射率指数 n = 1.55 - 0.005i, $t = 20^{\circ}$,发射功率 $P_{T} = 1$ W,光束发散角 $\theta = 200$ μrad ,光电检测器采用 PIN 光电二极管,响应度 $\xi = 0.5$ A/W,电子电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C,检测器 带宽 B = 10 MHz,等效电阻 R = 1 Ω,接收孔径D =0.05 m,调制方式为 OOK 调制。

图1为不同传输距离和含水量条件下激光通 信系统误码率随信噪比的变化关系。可以看出, 当含水量相同时,随着传输距离的增大,激光信号 的衰减增大,导致系统的误码率也逐渐增大;而当 传输距离一定时,随着含水量的增大,系统的误码 率逐渐增大。







图 2 为不同能见度下误码率随传输距离的变 化。可以看出,随着传输距离的增大,误码率逐渐 增大并趋于最大值 0.5,此时系统性能最差。此 外,当传输距离为 500 m,能见度为 3,4,5 km 时 系统的误码率分别为 10⁻²,10⁻⁵,10⁻⁹数量级。即





Fig. 2 BER performance *versus* transmission distance under different atmospheric visibility

当传输距离一定时,系统误码率随着能见度的增 大逐渐减小。这是因为,能见度越大时,激光信号 在传输过程中受到沙尘粒子的影响越少,产生的 衰减效果也越小,系统的误码率越低。

图 3 分析了沙尘含水量对误码率的影响。此时传输距离为 1 km,波长为 1 550 nm。可以看出,3 种湿度下的系统误码率随能见度增大逐渐减小,当能见度分别增大至 1.5,2.5,3.5 km 时,系统的误码率开始迅速减小。而当能见度一定时,含水量越小,系统的误码率也越小。



图 3 不同沙尘含水量下误码率随能见度的变化



图 4 为不同能见度下系统归一化信道容量随 传输距离的变化曲线。可以看出,系统的归一化 信道容量随着传输距离增大而减小并逐渐趋于稳 定。而且能见度越小,归一化信道容量减小的速 度也越快。当传输距离为 5 km,能见度为 3,4,5 km 时,归一化信道容量分别为 2.52,3.93,4.84 bps/Hz。即传输距离相同时,能见度越大,归一化 信道容量也越大。



图 4 不同能见度下归一化信道容量随传输距离的变化

Fig. 4 Normalized channel capacity *versus* transmission distance under different atmospheric visibility

图 5 为不同传输距离下归一化信道容量随能 见度的变化曲线。可以看出,信道容量随能见度 的增大而增大。在能见度为 4 km 的条件下,当传 输距离分别为 1,2,3 km 时,系统的归一化信道容 量分别为 8.48,6.49,5.34 bps/Hz。





Fig. 5 Normalized channel capacity *versus* atmospheric visibility under different transmission distance

图 6 为不同波长下归一化信道容量随能见 度的变化关系。可以看出,当波长一定时,系统 归一化的信道容量随能见度的增大而增大;而 且当激光信号的波长越长时,系统归一化的信 道容量也就越大。在能见度为 4 km 的条件下, 当激光波长分别为 855,1 060,1 550 nm 时,系 统的归一化信道容量分别为 0.36,3.45,8.48 bps/Hz。这说明,当在沙尘信道中进行无线激 光通信传输时,选择长波长激光器有利于增大 系统的信道容量。





图 7 为不同含水率下系统归一化信道容量随 能见度的变化曲线。从图中可以看出,3 种湿度 条件下归一化信道容量随着能见度的增大而增 大。这是因为,能见度的增大使得大气中沙尘粒 子的含量变小,沙尘粒子对激光信号的影响也就 随之变小,使得系统的信道容量逐渐增大。此外, 当大气能见度为4 km,含水率为10%、20%和30%



图 7 不同含水率下归一化信道容量随能见度的变化

Fig. 7 Normalized channel capacity *versus* atmospheric visibility under different sand-dust moisture content

时,归一化信道容量分别为8.48,4.91,2.4 bps/Hz。即含水率越大,系统归一化信道容量越小。

4 结 论

结合我国西北地区沙尘的特点,在考虑含水 率的情况下,推导出沙尘信道中激光信号衰减的 表达式,并将其运用于 OOK 调制中,分别推导出 系统的信噪比、误码率以及信道容量表达式,仿真 分析了在不同影响因素下系统性能的变化曲线。 结果表明:(1)激光信号在沙尘天气下传输时,系 统误码率会随着含水量和传输距离的增大而增 大,随能见度的增大而减小;(2)系统的归一化信 道容量随能见度的增大而增大,随传输距离和大 气湿度的增大而减小。并且当波长越长时,系统 的归一化信道容量也会越大。

参考文献:

- [1] SHAINA, GUPTA A. Comparative analysis of free space optical communication system for various optical transmission windows under adverse weather conditions [J]. Proced. Comput. Sci., 2016,89:99-106.
- GHASSEMLOOY Z, PEREZ J, LEITGEB E. On the performance of FSO communications links under sandstorm conditions
 [C]. Proceedings of The 12th International Conference on Telecommunications, Zagreb, Croatia, 2013;53-58.
- [3] GUPTA R, SINGH P. Performance analysis of FSO system for different fog conditions [M]. SINGH R, CHOUDHURY S. *Proceeding of International Conference on Intelligent Communication*, *Control and Devices*, Singapore: Springer, 2017.
- [4] ESMAIL M A, FATHALLAH H, ALOUINI M S. Outdoor FSO communications under fog: attenuation modeling and performance evaluation [J]. IEEE Photon. J., 2016,8(4):7905622-1-23.
- [5] ROBINSON S, JASMINE S. Performance analysis of hybrid WDM-FSO System under various weather conditions [J]. Frequenz, 2016,70(9-10):433-441.
- [6] WANG R X, LIU B, LI H R, et al. Variation of strong dust storm events in Northern China during 1978 2007 [J]. Atmos. Res., 2017,183:166-172.
- [7] 董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性 [J]. 电波科学学报, 1997,12(1):15-25. DONG Q S. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1997, 12(1):15-25. (in Chinese)
- [8] 周碧. 黄土高原半干旱区气溶胶辐射特性观测研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2012.
 ZHOU B. Measurements of Aerosol Radiative Properties over Semi-arid Region of the Loess Plateau [D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2012. (in Chinese)
- [9] 王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究 [J]. 物理学报, 2013,62(2):024214-1-3. WANG H X, ZHU Y Z, TIAN T, *et al.*. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2013,62(2):024214-1-3. (in Chinese)
- [10] ISLAM M R, OMER ELSHAIKH Z E, KHALIFA O O, et al. Prediction of signal attenuation due to duststorms using Mie scattering [J]. IIUM Eng. J., 2010,11(1):71-87.
- [11] 闵星,李兴财,李新碗,等. 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响 [J]. 光学学报, 2015,35(1):0129001-1-8.
 MIN X,LI X C,LI X W, et al.. Effects of charged sandstorm on electromagnetic wave propagation [J]. Acta Opt. Sinica, 2015,35(1):0129001-1-8. (in Chinese)
- [12] LI H S, SANG X Y. SNR and transmission error rate for remote laser communication system in real atmosphere channel

[J]. Sens. Actuators A Phys., 2017,258:156-162.

- [13] WANG H Q, WANG X, CAO M H. Ergodic channel capacity of spatial correlated multiple-input multiple-output free space optical links using multipulse pulse-position modulation [J]. Opt. Eng., 2017,56(2):026103.
- [14] 韩立强,游雅晖.大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能 [J].中国激光,2016,43(7): 0706004-1-8.

HAN L Q, YOU Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation [J]. Chin. J. Lasers, 2016,43(7):0706004-1-8. (in Chinese)

- [15] 董庆生,赵振维,丛洪军. 沙尘引起的毫米波衰减 [J]. 电波科学学报, 1996,11(2):29-32.
 DONG Q S, ZHAO Z W, CONG H J. The mm-wave attenuation due to sand and dust [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1996, 11(2):29-32. (in Chinese)
- [16] ALHUWAIMEL S, MISHRA A, INGGS M. Review of radar signal attenuation due to sand and dust storms [C]. Proceedings of 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Cape Town, South Africa, 2012: 1096-1099.
- [17] SIHVOLA A H, KONG J A. Effective permittivity of dielectric mixtures [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1988, 26(4):420-429.
- [18] ELLISON W J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0 25 THz and the temperature range 0 - 100 ℃ [J]. J. Phys. Chem. Ref. Data, 2007,36(1):1-18.
- [19] ELSHEIKH E A A, ISLAM M R, HABAEBI M H, et al. Dust storm attenuation modeling based on measurements in Sudan
 [J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2017,65(8):4200-4208.
- [20] KIM I I, MCARTHUR B, KOREVAAR E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1 550 nm in fog and haze for optical wireless communications [C]. Proceedings of SPIE 4214, Optical Wireless Communications III, Boston, MA, 2001:26-37.
- [21] RICKLIN J C, HAMMEL S M, EATON F D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [J].
 J. Opt. Fiber Commun. Rep., 2006,3(2):111-158.
- [22] WEI A H, HAN B, ZHAO W, et al. The influence of atmospheric turbulence on IM/DD space optical communication system [C]. Proceedings of SPIE 8906, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems, Beijing, China, 2013:890610-1-8.



曹明华(1979 -),男,甘肃平凉人, 博士,副教授,硕士生导师,2016 年 于北京邮电大学获得博士学位,主 要从事无线光通信理论与技术方面 的研究。

E-mail: caominghua@ lut. cn



王惠琴(1971 -),女,甘肃渭源人,博 士,教授,博士生导师,2012 年于西安 理工大学获得博士学位,主要从事无 线光通信理论与技术方面的研究。 E-mail: 15117024169@139.com