

文章编号: 1001-3806(2010)02-0185-04

散射效应对 FSO-OFDM 系统的影响研究与仿真

赵黎^{1,2}, 柯熙政², 任安虎¹

(1. 西安工业大学 电子信息工程学院, 西安 710032; 2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了研究大气散射效应对光信号的影响, 以雨粒子为例, 从其物理特性出发, 应用 Mie 散射理论和 Joss 雨滴谱分布, 计算了雨粒子对光波传输的衰减, 在此基础上分析了光散射效应对自由空间光通信-正交频分复用系统性能的影响。结果表明, 在散射信道中, 自由空间光通信-正交频分复用系统的性能主要取决于散射造成的光强度起伏方差, 其次为散射造成的光强度衰减系数。

关键词: 光通信; 自由空间光通信; 正交频分复用; 散射效应; Mie 散射理论

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.012

Research and simulation of the influence of the scattering effect on FSO-OFDM system

ZHAO Li^{1,2}, KE Xi-zheng², REN An-hu¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China; 2. Automation & Information School, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: For studying the effects of atmospheric scattering to optical signals, taking rain particles as an example, starting from its physical properties and employing Mie scattering theory and Joss raindrop spectrum distribution, the light intensity attenuation coefficient caused by rain particles' scattering was calculated. On this basis, the scattering effect on the performance of the free space optical communication orthogonal frequency division multiplexing (FSO-OFDM) system was analyzed. The results show that the FSO-OFDM system performance in scattering channel primarily depends on the variance of light intensity caused by scattering, secondly depends on light intensity attenuation coefficient caused by scattering.

Key words: optical communication; free space optical communication F; orthogonal frequency division multiplexing; scattering effect; Mie scattering theory

引言

自由空间光通信是以光信号为载波, 大气为传输介质直接进行语音、数据、图像信息双向传送的一种技术。该技术由于具有成本低、组网灵活、安装方便、无需频率许可等优点, 已成为当今信息技术的一大热点, 其作用和地位已能和光纤通信、微波通信相提并论, 是构筑未来世界范围通信网必不可少的一种技术^[1]。但是, 自由空间光通信的信道为大气信道, 大气中含有

组成大气各种成分的分子以及悬浮于大气中的固态和液态气溶胶粒子(雨、雾、沙尘等), 光波在大气中传播时必然会遇到这些粒子产生散射及吸收作用, 使得光波在大气中传输会不断的衰减^[2]。参考文献[3]中曾提及将正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制技术引入大气激光通信系统中可以抵御大气散射效应, 但是并没有给出定量的结果。作者在以雨粒子对光的散射效应为例, 计算了光 OFDM 信号在不同降雨量的条件下抵御散射效应的效果仿真图。

1 Mie 散射模型

1908年, 米氏应用电磁场理论, 求解均匀介质中任意尺寸、任意成分的均匀球体对入射单色平面波的散射, 得到了严格的解析解。米氏理论在研究光在大气、水以及云雨雾和气溶胶中的传播方面有着广泛的应用。根据 Mie 理论, 散射系数、衰减系数定义如下^[4]:

基金项目: 国防重点实验室基金资助项目(9140C3601010701); 军队八六三创新计划资助项目(2008AAJ159); 陕西省教育厅科技专项基金资助项目(07JK332); 陕西省自然科学基金资助项目(2007F12); 广东省科技厅科技基金资助项目(2007-26)

作者简介: 赵黎(1981-), 女, 博士, 主要从事大气激光通信方面的研究。

E-mail: pillily_lily@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-01-13; 收到修改稿日期: 2009-03-09

散射系数(散射效率因子):

$$Q_s = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1)$$

衰减系数(衰减效率因子):

$$Q_e = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2)$$

吸收系数:

$$Q_a = Q_e - Q_s \quad (3)$$

式中, α 为颗粒尺寸参量 ($\alpha = \pi D/\lambda$); a_n 和 b_n 称为 Mie 系数, 可由下式计算得到:

$$\begin{cases} a_n = \frac{\psi_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - m\psi_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)}{\zeta_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - m\zeta_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)} \\ b_n = \frac{m\psi_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - \psi_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)}{m\zeta_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - \zeta_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $m = m_1 - im_2$ 为粒子相对周围介质折射率, 当虚部不为 0 时, 表示粒子有吸收。

$$\begin{cases} \psi_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} J_{n+(1/2)}(z) \\ \zeta_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} H_{n+(1/2)}^{(2)}(z) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $J_{n+(1/2)}$, $H_{n+(1/2)}^{(2)}(z)$ 分别表示半整阶的贝塞尔函数和第 2 类汉克函数。

1.1 雨粒子特性及分布

降雨是常见的自然现象, 它能对光信号产生衰减, 严重的还可能导致无线通信链路的中断。雨滴的形状取决于其尺寸, 雨滴的直径在 $100\mu\text{m} \sim 10\text{mm}$ 之间, 一般不大于 8mm , 大于 8mm 的雨滴是不稳定的, 将发生破裂。摄影研究表明^[5], 半径小于 1mm 的雨滴基本为球形, 对于更大的雨滴, 其形状为扁椭球形, 其底部有一凹槽, 其旋转轴近似垂直, 为了便于计算和比较, 通常使用等体积球的概念。根据流体力学的理论, PRUPPACHER 和 PITTER 计算了雨滴的形状, 其计算形状如图 1 所示^[5]。

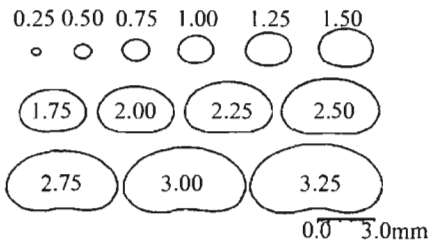


Fig. 1 The theoretical calculated raindrop (the numbers indicate the equivalent sphere radius)

雨滴尺寸分布也被称为雨滴谱, 是研究降雨特性、大气激光通信、雷达气象和无线电波传播的重要参量, 得到了广泛的测量和模式化研究。雨滴谱测量多使用先进的专门测量设备——雨滴谱仪, 在不同地区测量数据的基础上得到了大量雨滴尺寸分布模型, 如:

Laws-Parsons 分布、Marshall-Palmer 分布、Joss 分布、对数-正态分布、gamma 分布等, 其中 Laws-Parsons 分布和负指数分布的 Marshall-Palmer 分布及 Joss 分布被广泛使用。本文中就是利用 Joss 分布计算雨天情况下激光的衰减。

JOSS 等人利用雨滴谱仪在瑞士的 Locarno 测量了雨滴尺寸分布, 发现雨滴尺寸分布随降雨类型有很大的变化, 他们将降雨的类型分为: 毛毛雨、广延雨和雷暴雨, 其形式为^[6] (单位为 m^{-3}/mm):

$$\begin{cases} n(r) = 60000 \exp(-5.7R^{-0.21}r), (\text{毛毛雨}) \\ n(r) = 14000 \exp(-4.1R^{-0.21}r), (\text{广延雨}) \\ n(r) = 2800 \exp(-3.0R^{-0.21}r), (\text{雷暴雨}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, R 为降雨率, r 为粒子半径。

1.2 雨粒子散射

当强度为 I_0 的光通过距离为 l 的介质后, 根据 Bougure 定律^[7], 其强度可表示为:

$$I = I_0 \exp\left[-\int_0^l \sigma dl\right] \quad (7)$$

式中, σ 为单次散射近似时的衰减系数:

$$\sigma = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(n, \alpha) n(r) dr \quad (8)$$

衰减系数 σ 表示光每经过单位距离的介质后衰减率, 此公式也是单次散射近似的基本公式。

使用 Bougure 定理的前提是假设接收机视场为 0° , 这样就可以认为散射的全部能量没有进入接收机中, 都被衰减掉了。但在实际工程应用中, 虽然单次散射在一定程度上可以描述光散射的特征, 但在很多情况下, 单次散射不足以描述复杂的散射过程; 另外, Mie 理论散射效率因子 Q_s 是基于光各个方向的散射导致的光的衰减, 而实际工程应用中 Q_s' 是除前向锥形散射角以外的衰减, 这就使得实际散射效率因子 Q_s' 与理论的散射效率因子 Q_s 不同。

根据 Mie 理论, Q_s' 被定义为:

$$\begin{aligned} Q_s' &= Q_s - \frac{1}{2k^2(\pi r^2)} \int_0^\omega (I_1 + I_2) d\Omega = \\ &Q_s - \frac{1}{\alpha^2} \int_0^\theta (I_1 + I_2) \sin\theta' d\theta' \end{aligned} \quad (9)$$

式中, I_1, I_2 是 Mie 散射光强, $k = 2\pi/\lambda$ 。这时光前向散射修正因子被定义为:

$$\rho = \frac{Q_s'}{Q_s} = 1 - \frac{1}{Q_s \alpha^2} \int_0^\omega (I_1 + I_2) \sin\theta' d\theta' \quad (10)$$

DEEPAK 等人对多次散射和前向散射的问题做了研究, 证明在多次散射影响下, 光束的前向几度范围内存在一个比较大的峰值, 这种前向峰值效应使得光衰减

大大降低。DEEPAK 和 VANGHAN 提出一个前向散射修正系数 ρ 的近似公式:

$$\rho_c = \rho(\alpha\theta) = [1 + J_0^2(\alpha\theta) + J_1^2(\alpha\theta)]/2 \quad (11)$$

式中, α 为尺度参量, θ 为散射角, $J_0(\alpha\theta)$ 和 $J_1(\alpha\theta)$ 为 0 阶和 1 阶第 1 类贝塞尔函数。同时, 他们认为在 $r > \lambda$ 和 $\theta \leq 1.5^\circ$ 时, 同精确公式相比误差小于 2%。本文中根据该修正方案对单次散射公式进行再次修正, 修正后可考虑多次散射的影响, 以便于更加准确地计算。图 2 所示为波长 $\lambda = 10.60\mu\text{m}$ 的激光透过率随降雨强度的变化曲线。

修正后的衰减效率因子:

$$Q_c' = Q_a(\alpha, n) + \rho_c(\alpha\theta) Q_s(\alpha, n) \quad (12)$$

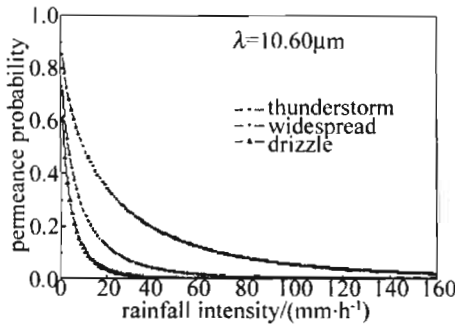


Fig. 2 Laser permeance probability with rainfall intensity at wavelength $\lambda = 10.60\mu\text{m}$

2 FSO-OFDM 系统结构

FSO-OFDM 的基本原理是首先通过 OFDM 将多个数字或模拟信号源调制在不同的电载波上, 形成多载波电信号, 然后再利用多载波电信号调制光载波, 形成光信号在大气信道中进行传输^[8]。

FSO-OFDM 系统与传统的 FSO-开关键控制 (on-off keying, OOK) 系统相同, 都是由发射和接收两部分组成。图 3 所示为 FSO-OFDM 系统模型, 其中发射部分由 OFDM 调制模块、光上变频模块、大气信道组成; 接收部分由光下变频模块、OFDM 解调模块组成。

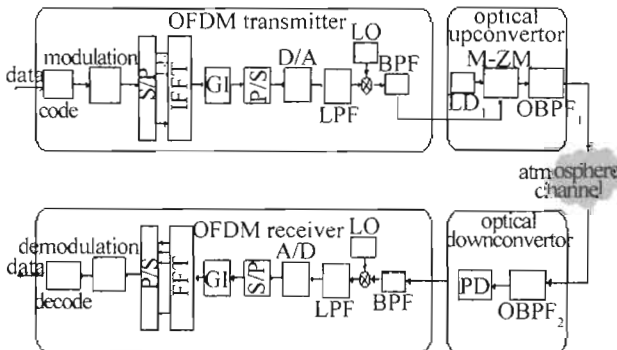


Fig. 3 The FSO-OFDM model, S/P—series/parallel; (I) FFT—(inverse) fast Fourier transform; GI—guard interval; P/S—parallel/series; D/A—digital/analog; LPF—lowpass filter; LO—local oscillator; BPF—bandpass filter; LD—laser diode; M-ZM—Mach-Zehnder modulator; OBPF—optical bandpass filter; PD—photodiode

基带 OFDM 信号格式为:

$$S(i, k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^N X_{i,k} \exp(j2\pi f_k t), \quad (f_k = (k-1)/T_s) \quad (13)$$

式中, $X_{i,k}$ 表示第 i 个 OFDM 符号中第 k 个子载波上的信号; f_k 为子载波频率。对于频带 FSO-OFDM 系统, 需对基带 OFDM 信号进行频谱搬移, 即将基带信号上变频到中频载频 f_{LO} , 经变频后的信号可表示为:

$$s_{IF}(i, k) = \frac{1}{N} \exp(j2\pi f_{LO} t) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^N X_{i,k} \exp(j2\pi f_k t) \quad (14)$$

取其部以一个 OFDM 符号为例, 得:

$$s_{OFDM}(k) = \text{Re}[s_{IF}(t)] = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{k=1}^N \text{Re}(X_{i,k}) \cos[2\pi(f_k + f_{LO})t] - \sum_{k=1}^N \text{Im}(X_{i,k}) \sin[2\pi(f_k + f_{LO})t] \right\} \quad (15)$$

根据欧拉公式, 变频后信号的实部就已经包含了信号 X_k 的同相分量和正交分量^[9]。因此, 第 i 个 OFDM 符号中第 k 个子载波的信号格式为 $s_{OFDM}(i, k)$, $i = 1 : \infty$, $k = 1 : N$ 。对于任一个 OFDM 符号经过信道 h 后在接收端接收到的信号为:

$$y(i, n) = h(i, n) s_{OFDM}(i, n) + \eta = \begin{bmatrix} h(i, 0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h(i, 1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h(i, N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(i, 0) \\ s(i, 1) \\ M \\ s(i, N-1) \end{bmatrix} + \eta \quad (16)$$

对接收到的时域信号再进行快速傅里叶变换即可得到星座位置值, 进而可以解调出原始二进制数据。从上式可以看出, 每个子载波上的信道响应是不同的, 如果每个子载波上的信道响应值变化不大, 即可近似为恒参信道 $h(i)$ 时, 根据快速傅里叶变换的线性特性有:

$$Y(i, n) = \text{FFT}[h(i) s_{OFDM}(i, n) + \eta] = h(i) \text{FFT}[s_{OFDM}(i, n)] + \text{FFT}(\eta) \quad (17)$$

此时系统性能主要取决于加性噪声, 随着信噪比的增加, 加性噪声的影响就可以忽略掉; 如果每个子载波上的信道响应值变化比较大时, 则系统性能主要取决于乘性噪声, 系统性能会随着信号衰减的程度而不同, 信号衰减大的系统性能较信号衰减小的系统性能差。

3 仿真实验

利用 Monte Carlo 方法对系统的误码性能分别在雷暴雨 (单位时间内的平均降雨量为 55mm)、广延雨 (单位时间内的平均降雨量为 25mm)、毛毛雨 (单位时间内的平均降雨量为 10mm) 情况下进行了仿真。仿

真参量设为:激光波长 $\lambda = 10.60\mu\text{m}$,该激光波段对应的雨介质复折射率 $m = 1.178 - i0.071$,传输距离为 1000m 。由图2可以看出,毛毛雨散射所造成的光强度衰减最小,但是光强度衰减的方差为 2.4×10^{-2} ,即散射造成的光强度衰减起伏较大;广延雨和雷暴雨散射所造成的光强度衰减的方差分别为 3.0441×10^{-4} 和 8.7762×10^{-5} ,即散射造成的光强度衰减起伏方差较小,可以近似为恒参信道,即雷暴雨与广延雨天的性能要较小雨天的好。如图4所示,在子载波数 $N = 32$ 、误比特率为 10^{-5} 时,雷暴雨天及广延雨天的性能较毛毛雨天的性能分别优越 8dB 和 3dB ;子载波数 $N = 128$,误比特率为 10^{-5} 时,雷暴雨天及广延雨天的性能

较毛毛雨天的性能分别优越 14dB 和 4dB ;子载波数 $N = 256$,误比特率为 10^{-5} 时,雷暴雨天及广延雨天的性能较毛毛雨天的性能分别优越 16dB 和 5dB 。

同时由图2可以看出,广延雨天散射造成的光强度衰减较雷暴雨天的大,在光强度衰减起伏方差相差不大的情况下,光强度衰减越小系统性能越好,因此雷暴雨天的性能较广延雨天好。如图4所示,在子载波数 $N = 32$ 、误比特率为 10^{-5} 时,雷暴雨天较广延雨天的性能优越 3dB ;子载波数 $N = 128$ 、误比特率为 10^{-5} 时,雷暴雨天较广延雨天的性能优越 4dB ;子载波数 $N = 256$ 、误比特率为 10^{-5} 时,雷暴雨天较广延雨天的性能优越 5dB 。

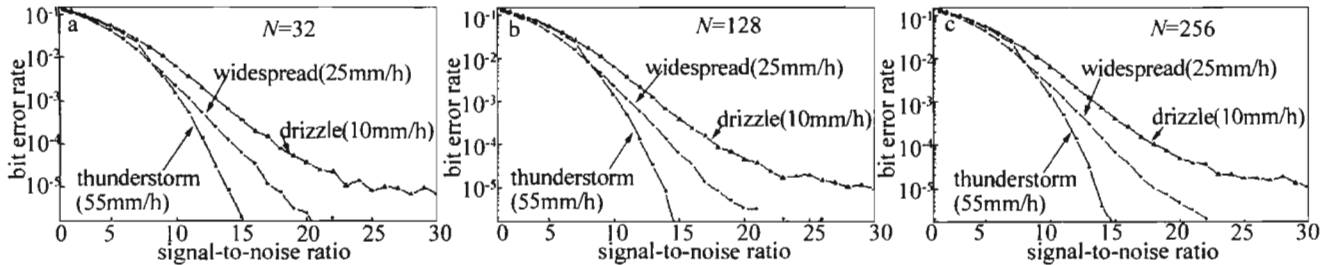


Fig. 4 The bit error rate capability

4 结论

光通信是一种超宽带通信方式,其带宽可达到 1THz ,但是由于光色散以及电子器件速度的限制,传输速率常常被限制在 10Gbit/s 或者更低。虽然有学者根据射频无线通信系统中 OFDM 技术可抵御多径效应预言,将 OFDM 技术应用于光通信中可以抵御光散射的影响,但一直以来都没有理论分析和实验结果。作者从雨粒子的物理特性及其分布出发,应用 Mie 散射理论计算了雨粒子对光波传输的衰减,计算了不同子载波条件下 FSO-OFDM 系统在不同雨天情况下的系统误比特率性能。结果表明,无论子载波数目为多少,大雨天的系统性能最优,其次是中雨天,小雨天的最差,这说明在散射信道中 FSO-OFDM 系统的性能不仅取决于散射造成的光强度衰减系数,同时也受制于光强度起伏方差。

参考文献

[1] WANG H Q, KE X Zh. MIMO free space optical communication based on orthogonal space time block code [J]. Science in China Series,

2008, F39(8):896-902 (in Chinese).

- [2] WEN T, WEI J B, MA D T. Analysis of effect of multiple scattering on laser communication in light haze weather [J]. Laser Technology, 2007, 31(5):500-502 (in Chinese).
- [3] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. Electron Lett, 2006, 42(10):587-589.
- [4] GRAINGER R G, LUCAS J, THOMAS G E, et al. Calculation of Mie derivatives [J]. Appl Opt, 2004, 43(28):5386-5393.
- [5] ZHAO Zh W, WU Zh S. Study on radiowave propagation characteristics and remote sensing of hydrometeors [D]. Xi'an: Xidian University, 2001:7-15 (in Chinese).
- [6] DONG Q F. Study of transmission effects of pulses at millimeter wavelengths through rain and fog medium [D]. Xi'an: Xidian University, 2006:10-13 (in Chinese).
- [7] SONG Zh F. Application of basic atmospheric optical [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990:11-12 (in Chinese).
- [8] OHTSUKI T. Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3):74-79.
- [9] ZHAO L, KE X Zh, LIU J. The model of frequency domain FSO-OFDM and LS channel estimation algorithm [J]. Laser Journal, 2009, 30(3):38-39 (in Chinese).