

非球形气溶胶粒子及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响

聂敏 任家明 杨光 张美玲 裴昌幸

Influences of nonspherical aerosol particles and relative humidity of atmosphere on the performance of free space quantum communication

Nie Min Ren Jia-Ming Yang Guang Zhang Mei-Ling Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 190301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.190301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.190301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于分层的量子分组传输方案及性能分析

[A scheme of quantum packet transmission and its performance analysis based on hierarchical](#)

物理学报.2016, 65(13): 130302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130302>

光纤中单光子传输方程的求解及分析

[Perturbed solution and analyses for single photon transmission equation in optical fiber](#)

物理学报.2016, 65(13): 130301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130301>

基于最少中继节点约束的量子 VoIP 路由优化策略

[Voice over quantum IP routing based on least relay node constrained optimization strategy](#)

物理学报.2016, 65(12): 120302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.120302>

时域脉冲平衡零拍探测器的高精度自动平衡

[Highprecision auto-balance of the time-domain pulsed homodyne detector](#)

物理学报.2016, 65(10): 100303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100303>

基于低 Q 腔光子 Faraday 旋转的远程态制备

[Remote state preparation via photonic Faraday rotation in low-Q cavities](#)

物理学报.2016, 65(2): 020302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020302>

非球形气溶胶粒子及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响*

聂敏¹⁾ 任家明^{1)†} 杨光¹⁾²⁾ 张美玲¹⁾ 裴昌幸³⁾

1)(西安邮电大学通信与信息工程学院, 西安 710121)

2)(西北工业大学电子信息工程学院, 西安 710072)

3)(西安电子科技大学, 综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

(2016年3月20日收到; 2016年5月20日收到修改稿)

当量子光信号在自由空间中传输时, 不可避免地会穿过大气, 而存在于大气的气溶胶的光散射与吸收必然会影响量子光信号的传输. 本文根据气溶胶粒子谱分布及其消光系数, 提出了圆柱形、椭球形、Chebyshev 三种非球形气溶胶粒子与链路衰减、量子纠缠度的关系; 分析了大气相对湿度与量子纠缠度、保真度的定量关系. 仿真结果表明, 圆柱形、椭球形、Chebyshev 三种非球形气溶胶粒子对链路的衰减程度依次递增; 随着圆柱形、椭球形粒子的取向比和 Chebyshev 粒子的等效半径的增加, 纠缠度呈不同的变化趋势; 当大气相对湿度为 0.2 和 0.9 时, 纠缠度和保真度分别为 0.72, 0.32 和 0.75, 0.22. 由此可见, 非球形气溶胶粒子及大气相对湿度对量子通信系统的性能影响极大. 所以, 在实际的量子通信系统中, 应根据不同非球形气溶胶粒子和大气相对湿度, 自适应调整系统的各项参数, 以提高量子通信的可靠性.

关键词: 自由空间量子通信, 非球形气溶胶粒子, 大气相对湿度, 纠缠度

PACS: 03.67.Hk, 42.25.Dd, 92.60.jk

DOI: 10.7498/aps.65.190301

1 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称, 其中的微粒统称为气溶胶粒子. 大气气溶胶对地球大气辐射收支平衡以及全球气候变化有着不可低估的作用. 由于气溶胶粒子本身物理化学性质差异较大, 同时受多种环境因子的影响, 其散射特性有很大不同.

大气气溶胶粒子的形状极不规则, 一般情况下将粒子视为球体, 采用 Mie 理论计算其散射特性^[1], 而实际上气溶胶粒子并非严格球形, 文献^[2]表明对流层气溶胶粒子形状差异极大, 文献^[3]表明气溶胶粒子形状与组成成分有关. Mie 理论对于非球

形气溶胶粒子会造成较大误差, Hoyningen-Huene 和 Posse^[4]曾经证明了在某些情况下, 对于非球形气溶胶粒子 Mie 散射模型的计算误差可以达到 60%. 计算非球形气溶胶粒子的散射特性, 一般采用 T 矩阵法^[5], DDA^[6], PDTD^[7] 以及 GMM 等^[8]方法, 其中 T 矩阵法被公认为较为有效的方法^[9], 因为 T 矩阵法在物理概念以及实际操作中有很多的优势, T 矩阵法能够将单个粒子的计算直接应用于随机取向粒子群的散射计算, 而后使用解析解的求平均方法来计算随机取向粒子群的散射, 这比其他方法的计算效率更高. 因此, 本文采用 T 矩阵法计算圆柱形、椭球形以及 Chebyshev 三种常见非球形气溶胶粒子的散射特性.

当量子光信号在自由空间中传输时, 由于大气

* 国家自然科学基金(批准号: 61172071, 61201194)、陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号: 2014JQ8318)和陕西省国际科技合作与交流计划项目(批准号: 2015KW-013)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 1572797924@qq.com

中气溶胶粒子的存在,对量子光信号产生散射和吸收等消光效应,必然会影响信号的高保真传输,而大气相对湿度又会直接影响大气气溶胶粒子的物理性质,进而对其消光效应及信号的传输产生影响.文献[10]研究了中尺度沙尘暴对卫星通信的影响,为沙尘条件下的量子卫星通信的研究奠定了基础.文献[11]研究了PM2.5大气污染对自由空间量子通信性能的影响,为PM2.5大气污染条件下自由空间量子通信的研究奠定了基础.文献[12]建立了平流层量子通信系统地空路径上脉冲单光子源的传播模型,为晴空以及降雨条件下平流层量子通信的研究奠定了基础.文献[13]表明颗粒物平均质量消光效率随大气相对湿度的增加呈连续平滑增长趋势.

迄今,有关非球形气溶胶及大气相对湿度与自由空间量子通信性能关系的研究尚未展开,而椭球形、圆柱形、Chebyshev 三种非球形气溶胶及不同大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响程度又不尽相同,因此,研究非球形气溶胶及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响,具有重要意义.

本文针对圆柱形、椭球形以及 Chebyshev 三种非球形气溶胶,提出了其与链路衰减、量子纠缠度的关系;分析了大气相对湿度与量子信道纠缠度、链路通信的保真度等参量的定量关系,并进行了仿真验证,为自由空间量子通信系统在不同非球形气溶胶以及不同大气相对湿度下有条不紊的运行提供了参考依据.

2 气溶胶粒子谱分布

大气中含有固态或者液态的浮游粒子,即大气气溶胶.气溶胶是大气的重要成分之一,对地球大气辐射收支平衡和全球气候变化有着重要的作用.气溶胶粒子谱表征了大气中气溶胶粒子在不同的粒径区间内的数量分布,对气溶胶辐射特性的研究需要对气溶胶粒子谱分布[5]进行拟合.气溶胶粒子谱分布可以采取如下对数正态分布来拟合:

$$N(r) = \frac{C}{(2\pi)^{1/2} r \ln \sigma_{gm}} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_{gm})^2}{2 \ln^2 \sigma_{gm}} \right], \quad (1)$$

上式中 r 表示球形粒子或具有相同表面积粒子的等效球半径,本文取 $0.1 \mu\text{m} \leq r \leq 3 \mu\text{m}$, r_{gm} 为几何

平均半径, σ_{gm} 为几何标准偏差, C 为归一化常数,满足:

$$\int_{0.1}^3 N(r) dr = 1, \quad (2)$$

圆柱形、椭球形以及 Chebyshev 是三种常见非球形气溶胶粒子,三种粒子以及入射量子光信号与粒子取向(以椭球形粒子为例)如图 1 所示:

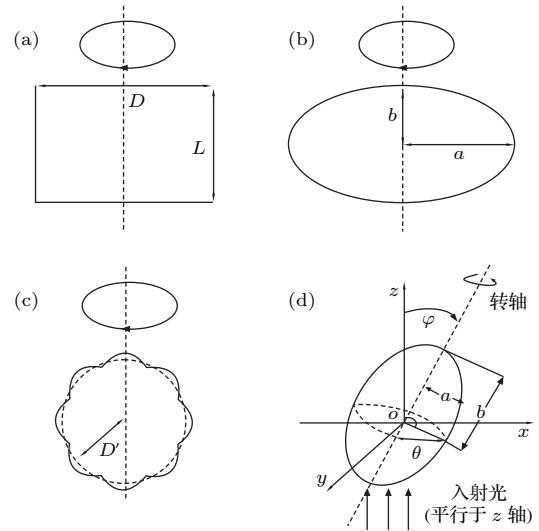


图 1 非球形气溶胶粒子 (a) 圆柱形粒子; (b) 椭球形粒子; (c) Chebyshev 粒子; (d) 入射量子光信号与粒子取向
Fig. 1. Non spherical aerosols: (a) Cylindrical aerosol particles; (b) ellipsoidal aerosol particles; (c) Chebyshev particles; (d) direction of incident optical signal and aerosol particles.

图 1 中 D 和 L 分别表示圆柱形粒子的横截面长度和宽度, a 和 b 分别表示椭球形粒子的长短轴, D' 表示与 Chebyshev 粒子具有相同表面积球的半径, ϕ 为天顶角, θ 为方位角.

3 非球形气溶胶粒子与链路衰减的关系

当量子光信号穿过气溶胶粒子时,气溶胶粒子必然会产生消光、散射等特性.气溶胶粒子的消光系数可以表示为

$$A_{\text{ext}} = \frac{C_{\text{ext}}}{\pi r_{\text{eff}}^2}, \quad (3)$$

式中 r_{eff} 为有效半径,可以表示为

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{0.1}^3 \pi r^3 N(r) dr}{\int_{0.1}^3 \pi r^2 N(r) dr}, \quad (4)$$

C_{ext} 为消光截面, 可以用 \mathbf{T} 矩阵^[5] 表示为

$$\begin{aligned} C_{\text{ext}} &= -\frac{1}{k^2 |G|^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [c_{mn} (p_{mn})^* \\ &\quad + d_{mn} (q_{mn})^*] \\ &= -\frac{2\pi}{k^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [\mathbf{T}_{mnmn}^{11} + \mathbf{T}_{mnmn}^{22}], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 k 为环境介质的波数, 可以表示为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (6)$$

G 为入射场的球谐波函数; c_{mn} , d_{mn} , p_{mn} , q_{mn} 为球面波的展开系数.

当量子信号在自由空间传输时, 由气溶胶粒子所致的能量衰减^[14,15] 为

$$P = P_0 e^{-A_{\text{ext}} d}, \quad (7)$$

式中 P_0 为量子信号的初始能量, P 为量子信号传输距离 d 后的能量.

采用对数形式可以将气溶胶粒子引起的链路衰减 Q_{lac} 表示为

$$Q_{\text{lac}} = 10 \cdot d \cdot A_{\text{ext}} \cdot \lg e. \quad (8)$$

在 \mathbf{T} 矩阵法可以精确计算的范围内, 并结合文献中实测数据^[16], 采用 λ 为 $0.5 \mu\text{m}$ 的光信号进行量子通信, 其余参数取值列于表 1.

表 1 链路衰减参数取值

Table 1. The parameters of link attenuation coefficient.

r_{gm}	σ_{gm}	ϕ	θ	x
0.47	2.51	0°	0°	$1.53 - 0.008i$

表 1 中的 x 表示复折射指数, 三种非球形粒子在粒子谱分布下的有效半径 $r_{\text{eff}} = 1.2$ 的情况下, 分别对圆柱形气溶胶粒子、椭球形气溶胶粒子、Chebyshev 粒子引起的链路衰减与传输距离的关系进行仿真, 其仿真结果如图 2 所示.

图 2 中 X 轴为传输距离, 取值范围为 1—10 km, Y 轴表示链路的衰减程度, 取值范围为 0—8 dB. 从图 2 中可以看出, 随着传输距离的增大, 量子光信号在传输过程中穿过的气溶胶粒子越多, 产生的消光效应愈加明显, 能量所导致的衰减越大, 链路衰减呈增长趋势. 当传输距离一定时, 圆柱形、椭球形、Chebyshev 非球形气溶胶对链路的衰减程度依次递增, 因为圆柱形、椭球形、Chebyshev

非球形气溶胶粒子的形状系数^[16] 与球形粒子的接近程度依次递增, 而球形气溶胶粒子可以较大地提高量子光信号的衰减效率.

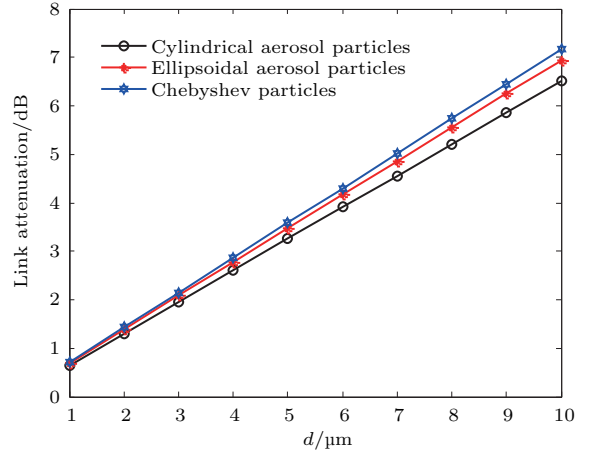


图 2 (网刊彩色) 三种非球形粒子链路衰减与传输距离的关系

Fig. 2. (color online) Relationship between link attenuation of three kinds of non spherical aerosol particles and transmission distance.

4 非球形气溶胶粒子与量子信道纠缠度的关系

大气气溶胶粒子传输的动力条件是风, 下面以沙尘气溶胶粒子为例, 探讨其与量子信道纠缠度的关系. 包含非球形沙尘气溶胶粒子混浊大气的湍流, 散射及消光都会导致消相干, 进而导致量子态所携带的量子信息的丢失, 量子纠缠度下降, 从而影响自由空间的量子通信.

量子纠缠度可以表示为

$$\begin{aligned} E &= S(\rho_{A_0}) = S(\rho_{B_0}) \\ &= -\text{Tr}(\rho_{A_0} \log_2 \rho_{A_0}). \end{aligned} \quad (9)$$

上式中非球形沙尘气溶胶粒子为系统 A_0 , 自由空间的量子信道为系统 B_0 , $S(\rho_{A_0})$ 和 $S(\rho_{B_0})$ 分别表示系统 A_0 和 B_0 的量子熵, ρ 表示密度矩阵, Tr 表示求迹. 假设非球形沙尘气溶胶环境和量子态相互作用的初态为

$$|\psi\rangle = |e_0\rangle |\phi_0\rangle = \sum_i \sqrt{p_i} |n\rangle |e_0\rangle, \quad (10)$$

式中 $|e_0\rangle$ 为非球形沙尘气溶胶环境的初始态, $|\phi_0\rangle$ 为量子态, $\sqrt{p_i}$ 是系统 A_0 和 B_0 约化密度矩阵共同的非零本征值, $|n\rangle$ 是 Hilbert 空间中的一组完备基.

最终, 非球形沙尘气溶胶环境和系统纠缠变为

$$|\psi\rangle = \sum_i p_i |n\rangle |e'\rangle, \quad (11)$$

式中 $|e'\rangle$ 是非球形沙尘气溶胶环境和量子态相互作用的终态. 由 (11) 式可知, 非球形沙尘气溶胶环境下, 量子信道纠缠度与非球形气溶胶粒子的各物理性质有关. 定义非球形沙尘气溶胶环境下的量子信道纠缠度^[10]为

$$E = \frac{wt}{u \exp[r(h - h_0)]} (0.3)^{k'}, \quad (12)$$

式中, w 为沙尘启动风速, t 为沙尘传输扩散的时间, u 为沙尘传输模式指数, r 为球形沙尘气溶胶粒子或具有相同表面积的非球形沙尘气溶胶粒子的等效半径, h 为沙尘扩散的高度, h_0 为卫星地面站高度, k' 为沙尘灾数系数. 其参数取值如表 2 所列.

表 2 量子信道纠缠度参数取值

Table 1. The parameters of the degree of quantum entanglement.

$w/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	u	$D/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	h/km	h_0/km	k'
4.4	0.8	0.1	0.1	10	1	1

分别对圆柱形气溶胶粒子取向比、椭球形气溶胶粒子取向比、Chebyshev 粒子等效半径和传输扩散时间以及量子信道纠缠度进行仿真, 仿真结果如图 3 所示.

图 3 中 X 轴分别为 a/b , D/L , Chebyshev 粒子等效半径 r_3 , 取值范围都为 0.5—3; Y 轴表示传输扩散时间, 取值范围为 0—15 h, Z 轴表示量子信道纠缠度, 取值范围为 0—1. 从图 3 中可以看出, 三幅图的相同点为: 当圆柱形气溶胶粒子取向比、椭球形气溶胶粒子取向比以及 Chebyshev 粒子等效半径保持不变时, 随着非球形沙尘气溶胶粒子传输扩散时间的增大, 沙尘粒子的漂浮密度越来越小, 量子信道纠缠度呈增长趋势. 三幅图的异同点为:

当沙尘粒子传输扩散时间保持不变时, 图 3(a) 中, 圆柱形气溶胶粒子的表面积可以表示为

$$S_1 = DL + 2\pi \left(\frac{L}{2}\right)^2 = 4\pi r_1^2, \quad (13)$$

所以具有和圆柱形气溶胶粒子相同表面积的等效球半径可以表示为

$$r_1 = \sqrt{\frac{DL}{4} + \frac{L^2}{8}}, \quad (14)$$

同时令圆柱形气溶胶粒子取向比 $D/L = x_1$, 代入上式可得 r_1 和圆柱形气溶胶粒子取向比之间的关系为

$$r_1 = \sqrt{\frac{D}{4x_1} + \frac{D}{8x_1^2}}, \quad (15)$$

由上式可知, 保持圆柱形气溶胶粒子横截面长度 D 不变, 随着取向比的增大, 粒子尺度 $2\pi r_1/\lambda$ 减小, 量子光信号穿过气溶胶的概率及数量随之减小, 其消光效应愈小, 消相干导致量子态丢失的量子信息越少, 能量所导致的衰减越小, 量子信道纠缠度越大.

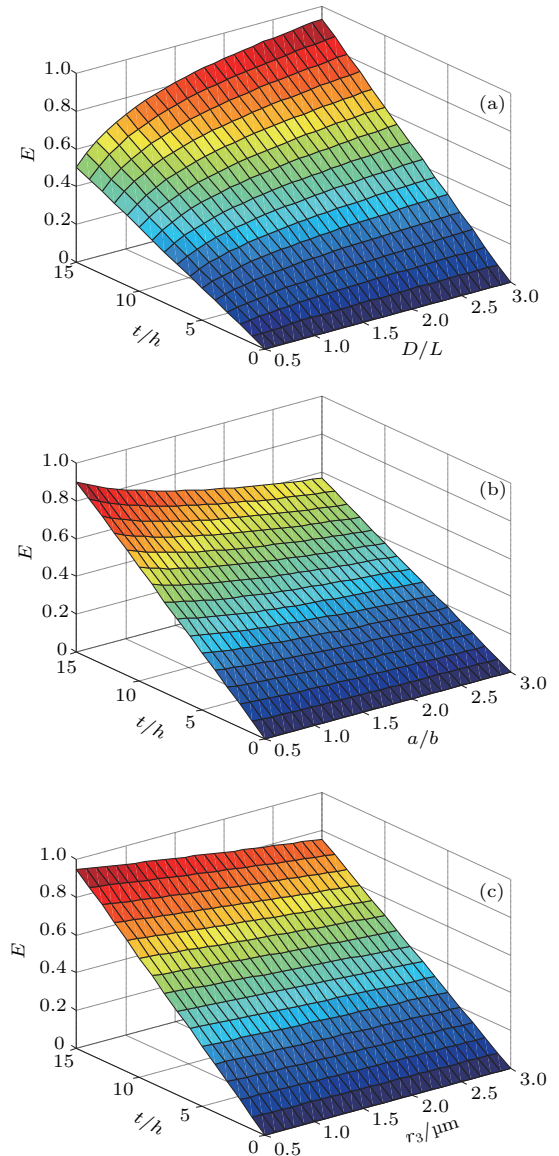


图 3 (网刊彩色) 量子纠缠度 (a) 圆柱形气溶胶粒子; (b) 椭球形气溶胶粒子; (c) Chebyshev 气溶胶粒子
Fig. 3. (color online) Degree of quantum entanglement: (a) Cylindrical aerosol particles; (b) ellipsoidal aerosol particles; (c) chebyshev aerosol particles.

图 3(b) 中, 椭球形气溶胶粒子的表面积可以表示为

$$S_2 = \pi ab = 4\pi r_2^2, \quad (16)$$

所以具有和椭球形气溶胶粒子相同表面积的等效球半径可以表示为

$$r_2 = \frac{\sqrt{ab}}{2}. \quad (17)$$

同时令椭球形气溶胶粒子的取向比 $a/b = x_2$, 代入上式可得 r_2 和椭球形气溶胶粒子取向比之间的关系为

$$r_2 = \frac{b}{2}\sqrt{x_2}. \quad (18)$$

由 (18) 式可知, 保持椭球形气溶胶粒子的短轴 b 不变, 随着取向比的增大, 粒子尺度 $2\pi r_2/\lambda$ 增大, 量子光信号穿过气溶胶的概率及数量随之增大, 其消光效应愈加明显, 消相干导致量子态丢失的量子信息越多, 能量所导致的衰减越大, 量子信道纠缠度越小;

图 3(c) 中, 由于 Chebyshev 气溶胶粒子主要用于描述表面受扰动的液态球形粒子或者是表面粗糙的固态球形粒子, 本文将 Chebyshev 气溶胶粒子的表面积近似为球的表面积, 即

$$S_3 = 4\pi D'^2 = 4\pi r_3^2, \quad (19)$$

随着 Chebyshev 气溶胶粒子等效半径 r_3 的增大, 粒子尺度 $2\pi r_3/\lambda$ 增大, 量子光信号穿过气溶胶的概率及数量随之增大, 其消光效应愈加明显, 消相干导致量子态丢失的量子信息越多, 能量所导致的衰减越大, 量子信道纠缠度越小。

5 大气相对湿度与量子信道纠缠度的关系

当大气相对湿度 H 较大时, 气溶胶就会吸附水汽而凝结增长, 对于不同的大气相对湿度, 气溶胶吸湿所导致的等效半径变化量不同, 气溶胶粒子的等效半径变化量^[17]可以表示为

$$r = (1 - H)^{-1/s} \cdot r_0, \quad (20)$$

式中 s 为常数, 这里取 1; r_0 为干气溶胶粒子等效半径, 这里取 $0.01 \mu\text{m}$ 。当沙尘传输模式指数为 0.8 时, 结合 (12) 式和 (20) 式对大气相对湿度、传输扩

散时间以及量子信道纠缠度进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。

图 4 中 X 轴表示大气相对湿度, 取值范围为 0—1; Y 轴表示传输扩散时间, 取值范围为 0—15 h; Z 轴表示量子信道纠缠度, 取值范围为 0—1。从图 4 中可以看出, 当传输扩散时间保持不变时, 随着大气相对湿度的增大, 湿粒子尺度随之增大, 其消光效应愈加明显^[13], 消相干导致量子态丢失的量子信息越多, 能量所导致的衰减越大, 量子信道纠缠度呈衰减趋势。当传输扩散时间为 12 h, 大气相对湿度为 0.2 和 0.9 时, 量子信道纠缠度分别为 0.72, 0.32。由此可见, 大气相对湿度对量子信道纠缠度的影响很大。

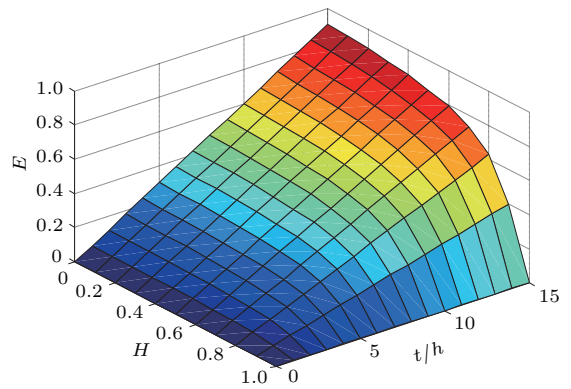


图 4 (网刊彩色) 大气相对湿度与量子纠缠度、传输扩散时间的关系

Fig. 4. (color online) Relationship between degree of quantum entanglement and relative humidity of the atmosphere, transmission time.

6 大气相对湿度与量子链路通信保真度的关系

平流层量子通信系统是利用悬浮在平流层的通信平台与地面实现通信, 平流层量子通信系统如图 5 所示。

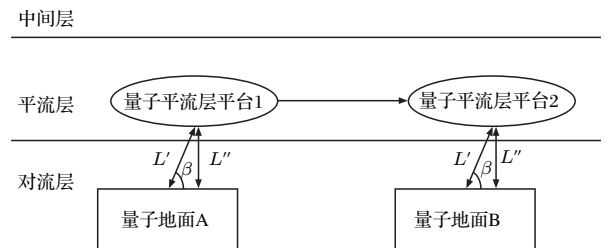


图 5 平流层量子通信系统

Fig. 5. Stratospheric quantum communication system.

L' 为量子地面至量子平流层平台之间的传输长度, 可以表示为

$$L' = \sqrt{R^2 \sin^2 \beta + L''^2 + 2RL'' - R \sin \beta}, \quad (21)$$

式中 R 为地球曲率半径, β 为发射或者接收望远镜的倾角, L'' 为量子平流层平台距地面的垂直距离.

链路通信之间的保真度^[18]为

$$F = \text{Tr} \left(\sqrt{\langle \text{NOON} | \rho | \text{NOON} \rangle} \right) \\ = \exp [2L' / ((\ln 0.02) \cdot V)], \quad (22)$$

式中 $\langle \text{NOON} | \rho | \text{NOON} \rangle$ 表示多光子纠缠态 $|\text{NOON}\rangle$ 和 $\rho |\text{NOON}\rangle$ 的内积, V 为大气能见度. 大气能见度取决于大气中消光系数的分布^[19]:

$$V = \frac{3.912}{A} = \frac{3.912}{A_{\text{ext}} + A_{\text{other}}}. \quad (23)$$

由(23)式可以看出, 气溶胶粒子的消光系数和大气能见度成负相关性.

根据文献中不同相对湿度下大气能见度的年平均数据^[20], 拟合出大气相对湿度与大气能见度的关系, 如图6所示.

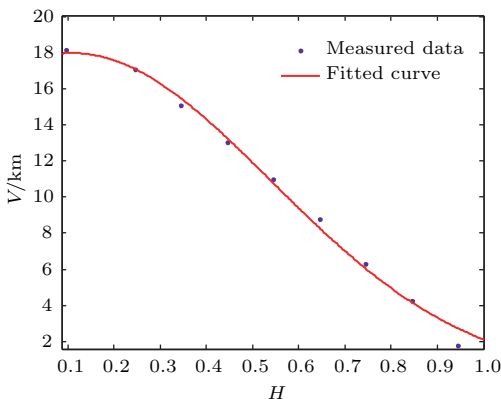


图6 (网刊彩色) 大气相对湿度与大气能见度的关系

Fig. 6. (color online) Relationship between relative humidity of the atmosphere and atmospheric visibility.

图6中 X 轴表示大气相对湿度, 取值范围为0—1, Y 轴表示大气能见度, 取值范围为0—20 km. 拟合曲线表达式为

$$V = 17.97 \exp \left(- \left(\frac{H - 0.1076}{0.611} \right)^2 \right). \quad (24)$$

结合(23)式, 从图6可以看出大气能见度与大气相对湿度呈负相关性, 当干气溶胶粒子谱分布一定时, 随着大气相对湿度的增加, 湿粒子的半径也在增加, 消光随之增大, 大气能见度随之降低.

由(22)和(24)式对大气相对湿度、传输距离以及链路通信之间的保真度进行仿真, 仿真结果如图7所示.

图7中 X 轴表示大气相对湿度, 取值范围为0—1; Y 轴表示传输距离, 取值范围为0—10 km; Z 轴表示链路通信之间的保真度, 取值范围为0—1. 从图中可以看出, 当大气相对湿度保持不变时, 随着传输距离的增加, 量子信号在传输过程中穿过的气溶胶越多, 其消光效应越来越大, 消相干导致量子态丢失的量子信息越多, 能量所导致的衰减越大, 链路保真度呈衰减趋势. 当传输距离保持不变时, 随着大气相对湿度的增加, 湿粒子的消光效应会愈加明显, 消相干导致量子态丢失的量子信息越多, 能量所导致的衰减越大, 从而导致链路保真度呈衰减趋势. 当传输距离为10 km, 大气相对湿度分别为0.2和0.9时, 链路保真度为0.75和0.22. 由此可见, 当大气相对湿度很大时, 将严重影响自由空间的量子通信.

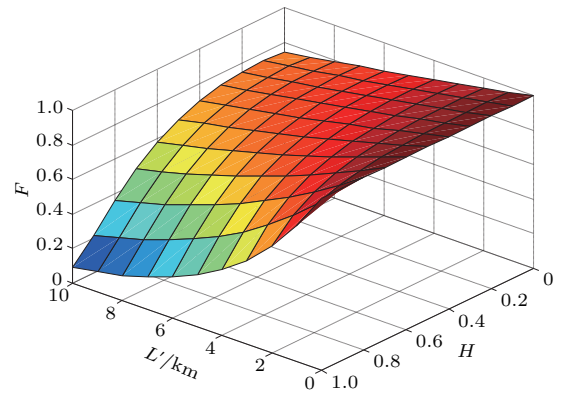


图7 (网刊彩色) 大气相对湿度与保真度、传输距离的关系

Fig. 7. (color online) Relationship between relative humidity of the atmosphere and fidelity of quantum communication, transmission distance.

7 实验验证

实验采用苏州华宇净化设备有限公司型号为TAB-4B的气溶胶发生器^[21], 发生器内有pao油, 利用清洁的压缩空气就可以发出次微米级的气溶胶. 本文采用双通道测量方法, 利用半透半反镜将量子光信号分为两束, 分别通过普通大气和滤除大气气溶胶的大气, 同时检测两个通道的出射光强, 由此得到大气气溶胶的消光系数, 而后得到链路衰减系数. 对非球形气溶胶消光系数的测量, 在检测系统中加入一种增强型CCD相机在线采集单个气溶胶粒子, 从散射图像和反演计算结果区分非球形气溶胶粒子, 链路衰减和大气湿度的实验数据^[22,23]如表3所列.

表3 链路衰减和大气湿度的实验数据

Table 3. The experimental data of link attenuation and relative humidity of the atmosphere.

Experiment time	Weather	Receive energy/mJ	V/km	H	Link attenuation/dB·km ⁻¹
18 : 00—19 : 30	Clearly	0.29	20	0.52	0.29
15 : 25—15 : 45	Clearly	0.22	20	0.34	0.29
15 : 55—16 : 15	Clearly	0.14	20	0.37	0.29
16 : 20—16 : 40	Clearly	0.13	14	0.71	0.38
17 : 00—17 : 40	Clearly	0.13	12	0.71	0.41
5 : 50—6 : 20	Clearly	0.21	10	0.86	0.43
14 : 00—15 : 10	Clearly	0.13	10	0.80	0.43
6 : 20—7 : 40	Mist	0.18	5	0.72	0.81
5 : 30—6 : 30	Mist	0.11	5	0.85	0.81
6 : 15—7 : 15	Mist	0.15	3	0.96	1.25
6 : 20—7 : 20	Mist	0.19	2.5	0.90	1.47
5 : 30—6 : 50	Mist	0.14	2.5	0.90	1.47

从表3中的实验数据可以看出,随着大气能见度的降低,大气相对湿度随之增加,链路衰减系数随之增大,能量衰减增大,因此量子纠缠度、量子保真度随之减小,且与上述仿真所得理论结果保持一致.

8 结 论

本文研究了非球形气溶胶粒子、大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响.根据气溶胶粒子谱分布及其消光系数,分别提出了圆柱形、椭球形以及Chebyshev三种非球形气溶胶粒子与链路衰减、量子纠缠度的关系;分析了大气相对湿度与量子信道纠缠度、链路通信的保真度等参量的定性和定量关系.仿真结果表明,圆柱形、椭球形、Chebyshev三种非球形气溶胶对链路的衰减程度依次递增;随着圆柱形、椭球形气溶胶粒子的取向比、Chebyshev粒子的等效半径的增加,量子信道纠缠度呈不同的变化趋势;随着大气相对湿度的增加,量子信道纠缠度以及通信链路的保真度相应地发生衰减.因此,本文所提出的各参量之间的定性和定量关系可为自由空间量子通信提供参考依据,使量子通信系统自适应地调整各项通信参量,从而降低非球形气溶胶粒子及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响.根据本文所得的结论,若

在一般检测气溶胶消光系数的装置中增加对不同非球形气溶胶粒子形状的认识,以此得出的结论将提高未来自由空间量子通信的可靠性.

参考文献

- [1] Aden A L, Kerker M 1951 *Appl. Phys.* **22** 1242
- [2] Xu L, Pan X B, Shi G Y, Yan B T X, Ao Y J Y, Yuan G Y L, Gong Z B, Zhou J 1998 *J. Acta Meteorol. Sin.* **56** 551 (in Chinese) [许黎, 攀小标, 石广玉, 岩坂泰信, 奥原靖彦, 原圭一郎, 龚知本, 周军 1998 气象学报 **56** 551]
- [3] Hudson P K, Gibson E R, Yong M A 1997 *J. Geophys. Res.* **113** D01201
- [4] Hoyningen-Huene W, Posse P 1997 *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* **57** 651
- [5] Waterman P C 1999 *J. Opt. Soc. Am. A* **16** 2968
- [6] Draine B T, Flatau P J 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 1491
- [7] Yee K 1996 *IEEE Trans. Antenn. Prop.* **14** 302
- [8] Xu Y, Gustafson B S 2001 *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* **70** 395
- [9] Fan M, Chen L F, Li S S, Tao J H, Su L, Zou M M, Zhang Y, Han D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 204202 (in Chinese) [范萌, 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 苏林, 邹铭敏, 张莹, 韩东 2012 物理学报 **61** 204202]
- [10] Nie M, Shang P G, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240303 (in Chinese) [聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2014 物理学报 **63** 240303]
- [11] Nie M, Ren J, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 150301 (in Chinese) [聂敏, 任杰, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2015 物理学报 **64** 150301]

- [12] Yan Y, Pei C X, Han B B, Zhao N 2008 *Chin. J. Radio Sci.* **23** 834 (in Chinese) [阎毅, 裴昌幸, 韩宝彬, 赵楠 2008 电波科学学报 **23** 834]
- [13] Tao J H, Wang Z F, Xu Q, Li L J, Fan M, Tao M H, Su L, Chen L F 2015 *J. Remot. Sens.* **19** 12 (in Chinese) [陶金花, 王子峰, 徐谦, 李令军, 范萌, 陶明辉, 苏林, 陈良富 2015 遥感学报 **19** 12]
- [14] Lanzagorta M (translated by Zhou W X, Wu M Y, Hu M C, Jin L) 2013 *Quantum Radar* (Beijing: Publishing House Of Electronics Industry) pp15–17 (in Chinese) [兰萨戈尔塔 M 著 (周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 金林 译) 2013 量子雷达 (北京: 电子工业出版社) 第 15—17 页]
- [15] Shao C C, Ma J J 2010 *J. At. Mol. Phys.* **27** 475 (in Chinese) [邵长城, 麻金继 2010 原子与分子物理学报 **27** 475]
- [16] Kaegi R 2004 *J. Aerosol Sci.* **35** 621
- [17] Cai J, Gao J, Fan Z G, Fen S, Fang J 2013 *Chin. J. Lumin.* **34** 639 (in Chinese) [蔡嘉, 高隽, 范之国, 冯岫, 方静 2013 发光学报 **34** 639]
- [18] Ren J, Nie M, Yang G, Pei C X 2015 *Acta Phot. Sin.* **44** 1227003 (in Chinese) [任杰, 聂敏, 杨光, 裴昌幸 2015 光子学报 **44** 1227003]
- [19] Middleton W E K 1954 *Phys. Today* **7** 254
- [20] Wang J, Niu S J, Yu X N 2013 *Chin. Environ. Sci.* **33** 201 (in Chinese) [王静, 牛生杰, 于兴娜 2013 中国环境科学 **33** 201]
- [21] Gong C W, Li X B, Li J Y, Cao Y N, Zhu W Y, Xu Q S, Wei H L 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 16 (in Chinese) [宫纯文, 李学彬, 李建玉, 曹亚楠, 朱文越, 徐青山, 魏合理 2014 光学学报 **34** 16]
- [22] Bu Y C, Zhao Y K, Chen Z Y, Zhang P, Huang H J 2015 *Chin. J. Laser* **42** 288 (in Chinese) [卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 张佩, 黄惠杰 2015 中国激光 **42** 288]
- [23] Chen Y R, Li Q, Liu T J, Feng F Q 2011 *Optoe. Eng.* **38** 42 (in Chinese) [陈玉茹, 李晴, 刘庭杰, 冯富强 2011 光电工程 **38** 42]

Influences of nonspherical aerosol particles and relative humidity of atmosphere on the performance of free space quantum communication*

Nie Min¹⁾ Ren Jia-Ming^{1)†} Yang Guang¹⁾²⁾ Zhang Mei-Ling¹⁾ Pei Chang-Xing³⁾

1) (School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710121, China)

2) (School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

3) (State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xi'an University of Electronic Science and Technology, Xi'an 710071, China)

(Received 20 March 2016; revised manuscript received 20 May 2016)

Abstract

When the optical signal is transmitted in the free space, it inevitably passes through the atmosphere. The atmospheric aerosol is one of the most important components of the atmosphere, which not only affects the regional climate, but also influences the transmission of the free space optical signal. However, the study on the relationship between the non-spherical aerosols and the parameters of the free space quantum communication channel has not been carried out so far. To investigate this relationship, the spectral distribution function of the aerosol and its extinction factor should be analyzed first. According to three nonspherical aerosol particles: cylindrical particles, ellipsoidal particles and Chebyshev particles, the equation between channel attenuation of the free space quantum communication and the degree of quantum entanglement can then be established. After that, the effects of the relative humidity of the atmosphere on the degree of quantum entanglement and the fidelity of quantum communication can be analyzed and simulated finally. The simulation results show that the channel attenuations of the free space quantum communication are sequenced in ascending order as cylindrical particles, ellipsoidal particles, and Chebyshev particles, and their influences on the degree of quantum entanglement have different changing trends. When the transmission time is fixed, with the increase of aspect ratio of ellipsoidal particles, the degree of quantum entanglement shows a growing trend, with the increase of aspect ratio of cylindrical particles, the degree of quantum entanglement shows descending trend. With the increase of Chebyshev particle equivalent radius, the degree of quantum entanglement also shows the descending trend. When the relative humidity of the atmosphere is 0.2(0.9), the degree of quantum entanglement and the fidelity of quantum communication will be 0.72(0.75) and 0.32(0.22), respectively. It can be seen that the nonspherical aerosol particles and the relative humidity of the atmosphere each have a significant effect on the function of the free space quantum communication system. Therefore, in a practical free space quantum communication system, the shape factor of nonspherical aerosol particle, orientating factor, equivalent radius and the relative humidity of the atmosphere cannot be ignored, in order to improve the effectiveness and reliability of the free space quantum communication, the different parameters of the communication system should be adjusted adaptively.

Keywords: free space quantum communication, non spherical aerosol particles, relative humidity of the atmosphere, degree of quantum entanglement

PACS: 03.67.Hk, 42.25.Dd, 92.60.jk

DOI: 10.7498/aps.65.190301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172071, 61201194), the Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2014JQ8318) and the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province, China (Grant No. 2015KW-013).

† Corresponding author. E-mail: 1572797924@qq.com