

PM_{2.5}大气污染对自由空间量子通信性能的影响*聂敏¹⁾ 任杰^{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)

(2015年4月12日收到; 2015年5月6日收到修改稿)

近年来, PM_{2.5}大气污染日益严重, 不仅影响空气质量与大气能见度, 而且还会对自由空间量子光信号的传输造成影响. 然而, 有关PM_{2.5}与自由空间量子通信信道参数关系的研究, 迄今尚未展开. 本文根据PM_{2.5}粒度谱分布函数及其化学成分的消光份额, 提出了PM_{2.5}指数、大气湿度与自由空间量子信道衰减的关系; 针对幅值阻尼信道和退极化信道, 分别建立了PM_{2.5}污染程度与信道容量、信道平均保真度、信道误码率的定量关系. 仿真结果表明, 当大气湿度为30%, PM_{2.5}指数分别为50和300时, 自由空间量子通信信道容量、信道平均保真度、信道误码率分别依次为0.83和0.21, 0.91和0.56, 0.0048和0.0192. 由此可见, PM_{2.5}污染程度对自由空间量子通信性能有显著的影响. 因此, 为了提高自由空间量子通信的可靠性, 应根据PM_{2.5}大气污染状况, 自适应调整系统的各项参数.

关键词: 自由空间量子通信, PM_{2.5}指数, 幅值阻尼和退极化信道**PACS:** 03.67.Hk, 92.60.hf, 03.65.Yz**DOI:** 10.7498/aps.64.150301

1 引言

PM_{2.5}是指大气中直径小于或等于2.5 μm的悬浮颗粒. 由于PM_{2.5}粒径小, 活性强, 富含大量的有毒、有害物质, 且在大气中停留时间长、输送距离远, 对人体健康、大气环境和能见度的影响巨大.

近年来, PM_{2.5}污染日益严重, 所含有的硝酸盐、硫酸盐、铵盐、有机碳等各种化学成分对光具有散射和吸收的作用, 产生消光效应, 影响大气能见度, 从而形成阴霾天气. 文献[1]定量分析了中国上海、西安等城市中PM_{2.5}气溶胶的主要来源, 以及各化学成分在PM_{2.5}质量浓度中所占的百分比, 为未来制定防控措施提供了科学依据. 文献[2]重点研究了珠三角地区PM_{2.5}在不同污染程度、不同湿度的情况下, 不同组分对能见度的消光作用及消光份额. 结果表明, PM_{2.5}在空气中浓度越高, 空气

污染越严重, 其消光作用就越明显, 对自由空间光信号的影响就越严重.

自由空间量子通信主要包括卫星量子通信和平流层量子通信, 二者是建立全球量子通信网必不可少的重要组成部分. 2012年, 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 与中科院上海技术物理研究所、光电技术研究所等单位组成的联合研究团队, 在国际上首次成功地实现了百公里量级的自由空间量子隐形传态和双向纠缠分发^[3], 证明了建立全球卫星量子通信网络的可行性, 推动了量子卫星通信网络的实用化进程. 同年, 德国Max-Planck研究所与奥地利量子光学与量子信息研究所(IQOQI), 在La PalMa岛与Tenerife岛之间, 实现了自由空间光链路超过143 km的量子隐形传态通信实验^[4], 为未来基于卫星的量子隐形传态奠定了基础. 2013年中国科技大学潘建伟团队, 在国际上首次成功实现无局域性漏洞的量子纠缠关联

* 国家自然科学基金(批准号: 61172071, 61201194)和陕西省自然科学基金(批准号: 2014JQ8318)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 450205735@qq.com

塌缩速度下限测量^[5], 对量子力学基本问题进行了一些有益探索, 为量子科学实验卫星进行大尺度理论基础检验, 奠定了必要的技术基础. 2014年, 意大利帕多瓦大学研究团队, 利用轨道角动量与光学偏振组合, 实现了量子密钥分发^[6], 为量子通信网络的实际应用提供了技术保障.

对于量子卫星通信而言, 携带信息的量子信号在自由空间传输时, 不可避免地会受到环境量子噪声的影响. 文献^[7]研究了中尺度沙尘暴对卫星量子通信的影响, 为沙尘条件下量子卫星通信的研究奠定了基础. 文献^[8]基于米氏散射理论, 定量地研究了降雨对微波电磁波的散射及衰减情况. 文献^[9]研究了冰水混合云对可见光的吸收与散射. 文献^[10]讨论了带电沙粒的散射场对电磁波传播的影响, 证明了沙尘天气静电场的作用不容忽视.

由于量子光信号的波长与PM2.5尺寸相近, 当光子在自由空间中传输时, 会产生散射与吸收等消光效应. 随着PM2.5浓度的增加, 这种消光效应越来越明显, 严重影响了自由空间量子通信的系统性能.

本文针对幅值阻尼信道和退极化信道, 分析了PM2.5指数与大气湿度对信道容量、保真度和误码率的影响, 建立了它们之间的定量关系, 进行了仿真实验验证, 为PM2.5背景下自由空间量子通信系统有序运行提供参照依据.

2 PM2.5指数与大气湿度对链路衰减的影响

PM2.5指数描述了空气的质量等级. 根据环境空气质量标准, PM2.5浓度与空气质量等级的关系如表1所示.

表1 PM2.5质量浓度与空气质量等级的关系

Table 1. The relationship between PM2.5 concentration and the level of air quality.

PM2.5 日均浓度值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM2.5 指数	空气质量等级
0—35	0—50	优
35—75	50—100	良
75—115	100—150	轻度污染
115—150	150—200	中度污染
150—250	200—300	重度污染
250—500	300—500	严重污染

研究表明, PM2.5气溶胶富集的有机碳、无机盐、元素碳等化学组分是主要的消光因素, 其消光

系数^[11]可表示为

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ext}}(\text{Mm}^{-1}) &= 3(1+H)[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3] \\ &\quad + 4[\text{organics}] + 10[\text{soot}] + 1[\text{soil}] \\ &\quad + 0.6[\text{coarsemass}] \\ &\quad + 10[\text{clear_air_scattering}] \\ &= [3(1+H)P_1 + 4P_2 + 10P_3 + 1P_4 \\ &\quad + 0.6P_5] \cdot C_m + 10, \end{aligned} \quad (1)$$

上式中, 各项系数为每种化学成分的干消光率(m^2/g), H 表示大气湿度, organics, soot, soil 和 coarse mass 分别表示有机物、黑碳、扬尘和直径为 $2.5 \mu\text{m} \leq D \leq 10 \mu\text{m}$ 颗粒物的组分浓度, clear air scattering 表示清洁大气对光的散射系数, P_i 为各组分在PM2.5浓度 C_m 中所占的比例.

PM2.5气溶胶在大气中的粒度谱分布函数为^[12,13]

$$\begin{aligned} N(D) &= \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \exp \left[-\frac{(\lg(1-H)^{-\frac{1}{d}} D - \lg D_m)^2}{2(\lg \sigma)^2} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

式中, N_0 为单位体积内PM2.5的粒子数, D_m 为平均粒径, σ 为标准偏差, d 为常数, D 为干燥时PM2.5气溶胶粒子的粒径, PM2.5米氏散射的消光系数为

$$\chi_{\text{ext}} = \frac{\pi}{4} \int_0^{2.5} D^2 \cdot N(D) \cdot Q(m, x) dD, \quad (3)$$

(3) 式中, $Q(m, x)$ 为消光因子, 可表示为

$$Q(m, x) = \frac{2}{x^2} \sum_{i=1}^{\infty} (2i+1) \text{Re}(a_i + b_i), \quad (4)$$

其中, m 为PM2.5的平均复折射率, a_i, b_i 是米氏系数, x 为尺寸系数, 有

$$x = \frac{2\pi D}{\lambda}. \quad (5)$$

考虑到PM2.5的尺寸形状与化学成分的共同作用, PM2.5的总消光系数为

$$A_{\text{ext}} = \kappa \delta_{\text{ext}} + (1 - \kappa) \chi_{\text{ext}}, \quad (6)$$

式中 κ 为加权系数.

当量子信号在自由空间传输时, 由PM2.5所致的能量衰减可表示为^[14]

$$E = E_0 e^{-A_{\text{ext}} L}, \quad (7)$$

E_0 为初始能量, E 为传输距离 L 后的能量.

表2 链路衰减系数的参数取值
 Table 2. The parameters of link attenuation coefficient.

$\lambda/\mu\text{m}$	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	d	D_m	σ	m	κ
0.86	0.25	0.14	0.2	0.4	0	9	0.86	2.98	$1.76 + 0.45i$	0.95

采用对数形式, 可得PM2.5的链路衰减系数 A_{atm} 为

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

采用波长 $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$ 的光信号进行量子通信, 其参数^[2,11,13]如表2所示, PM2.5指数与大气湿度对链路衰减的关系如图1所示。

图1中, X 轴表示大气湿度, 取值范围为0—1, Y 轴表示PM2.5指数, 取值范围为10—350, Z 轴表示链路的衰减程度, 单位为dB/km. 可以看出, 当PM2.5指数和大气湿度都为0时, 此时为理想信道, 链路无衰减; 随着PM2.5指数和大气湿度的增加, 链路衰减也急剧增加, 当PM2.5指数为300, 大气湿度 $H = 0.6$ 时, 链路衰减已达4 dB/km. 由此可见, 当PM2.5浓度很高时, 会严重影响自由空间量子通信的系统性能。

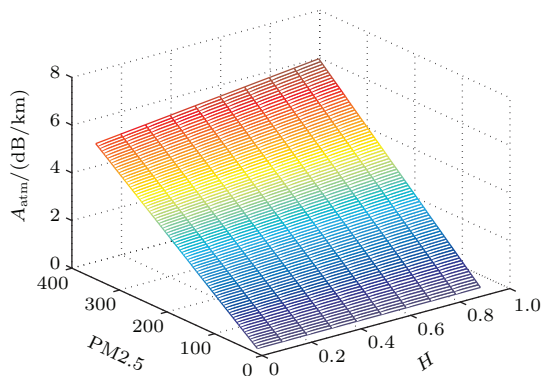


图1 (网刊彩色) PM2.5指数、大气湿度与链路衰减的关系
 Fig. 1. (color online) Relationship between link attenuation and PM2.5 index, atmospheric humidity.

3 PM2.5指数与大气湿度对信道容量的影响

量子信号在自由空间中传输时, 光量子态与PM2.5环境量子态的复合系统经受联合么正演化, 导致消相干^[15,16]。

3.1 幅值阻尼信道的信道容量

对于幅值阻尼信道, 其运算算子为^[17]

$$T_k = \sum_n \sqrt{\binom{n}{k}} \sqrt{(1-\gamma)^{n-k} \gamma^k} |n-k\rangle \langle n|, \quad (9)$$

式中, $|k\rangle, \langle n|$ 分别为PM2.5环境与量子系统湮没算子的本征态, γ 表示受PM2.5影响丢失一个光子的概率, 可表示为

$$\gamma = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - e^{-A_{\text{ext}}} = 1 - 10^{-0.1 A_{\text{atm}}}. \quad (10)$$

对于单量子比特状态, 有

$$\rho = \begin{pmatrix} a & b \\ b^* & c \end{pmatrix}, \quad (11)$$

经过幅值阻尼信道后变换为

$$\varepsilon(\rho) = \begin{bmatrix} 1 - (1-\gamma)(1-a) & b\sqrt{1-\gamma} \\ b^*\sqrt{1-\gamma} & c(1-\gamma) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

设信道容量为 C , 信源为 $\{p_i, \rho_i\}$, 其中 p_i 为信源的量子字符取 ρ_i 时的概率, 量子信道为 $c_i = \varepsilon(\rho_i)$, 当输入字符 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|, \rho_2 = |1\rangle\langle 1|$ 时, 有

$$\begin{aligned} & \varepsilon \left(\sum_i p_i \rho_i \right) \\ &= \varepsilon[p_1 \rho_1 + (1-p_1) \rho_2] \\ &= p_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + (1-p_1) \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & 1-\gamma \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} p_1 + (1-p_1)\gamma & 0 \\ 0 & (1-p_1)(1-\gamma) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

其对应的诺依曼熵为

$$\begin{aligned} & s \left[\varepsilon \left(\sum_i p_i \rho_i \right) \right] \\ &= -[(p_1 + (1-p_1)\gamma) \log(p_1 + (1-p_1)\gamma) \\ & \quad + (1-p_1)(1-\gamma) \log(1-p_1)(1-\gamma)]. \end{aligned} \quad (14)$$

接收到字符的诺依曼熵为

$$\sum_i p_i s[\varepsilon(\rho_i)] = (1-p_1) H_2(\gamma), \quad (15)$$

$H_2(\gamma)$ 为二元香农熵, 信道容量为

$$C = \max \left\{ s \left[\varepsilon \left(\sum_i p_i \rho_i \right) \right] - \sum_i p_i s[\varepsilon(\rho_i)] \right\}. \quad (16)$$

对 (16) 式求导, 当

$$p_1 = \frac{t(1-\gamma) - \gamma}{(1+t)(1-\gamma)}, \quad t = 2^{\frac{H_2(\gamma)}{1-\gamma}} \quad (17)$$

时, (16) 式取最大值, 因此幅值阻尼信道的信道容量为

$$C_1 = -[(p_1 + (1-p_1)\gamma) \log(p_1 + (1-p_1)\gamma) + (1-p_1)(1-\gamma) \log(1-p_1)(1-\gamma)] - (1-p_1)H_2(\gamma) \quad (18)$$

由此可见, 在幅值阻尼信道中, 信道容量与 PM2.5 指数、大气湿度和信源字符的取值概率密切相关。

3.2 退极化信道的信道容量

对于退极化信道, 量子态密度算子 ρ 可由其自旋极化矢量 $\mathbf{S}$ 描述为

$$\rho = \frac{1}{2}(I + \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\nu}). \quad (19)$$

设初始量子态为 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, PM2.5 环境量子态为 $|e\rangle$, 经过退极化信道后, 初始量子态演变为

$$\begin{aligned} & |e\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \\ & \rightarrow [|e_+\rangle I + |e'_+\rangle X + |e'_-\rangle Y + |e_-\rangle Z] \end{aligned}$$

$$\otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle). \quad (20)$$

令 $|e_+\rangle = |e_I\rangle, |e'_+\rangle = |e_X\rangle, |e'_-\rangle = |e_Y\rangle, |e_-\rangle = |e_Z\rangle$, 则复合系统的么正演化为

$$\begin{aligned} U: |\varphi\rangle|e_I\rangle & \rightarrow \sqrt{1-p}I|\varphi\rangle \otimes |e_I\rangle \\ & + \sqrt{\frac{p}{3}}[X|\varphi\rangle \otimes |e_X\rangle \\ & + Y|\varphi\rangle \otimes |e_Y\rangle + Z|\varphi\rangle \otimes |e_Z\rangle]. \end{aligned} \quad (21)$$

对正交基 $\{|e_I\rangle, |e_X\rangle, |e_Y\rangle, |e_Z\rangle\}$ 求偏迹, 最终得到量子态的密度算子演变^[15]为

$$\rho' = \frac{1}{2} \left[\left(I + \left(1 - \frac{4}{3}p \right) \mathbf{S} \right) \cdot \boldsymbol{\nu} \right]. \quad (22)$$

由此可见, 自旋极化矢量以 $p' = \frac{4}{3}p$ 的概率退极化, 且衰减

$$A_P = 1 - p', \quad (23)$$

式中, $p = \frac{3}{4}(1 - 10^{-0.1A_{\text{atm}}})$.

则当输入字符 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|, \rho_2 = |1\rangle\langle 1|$ 时, 退极化信道的信道容量为

$$C_2 = 1 - H_2\left(\frac{1}{2}p'\right). \quad (24)$$

因此, 在退极化信道中, 信道容量与 PM2.5 指数及大气湿度密切相关。

3.3 仿真分析

基于上述分析, 对信道容量与 PM2.5 指数、大气湿度的关系进行了仿真, 结果如图 2 所示。

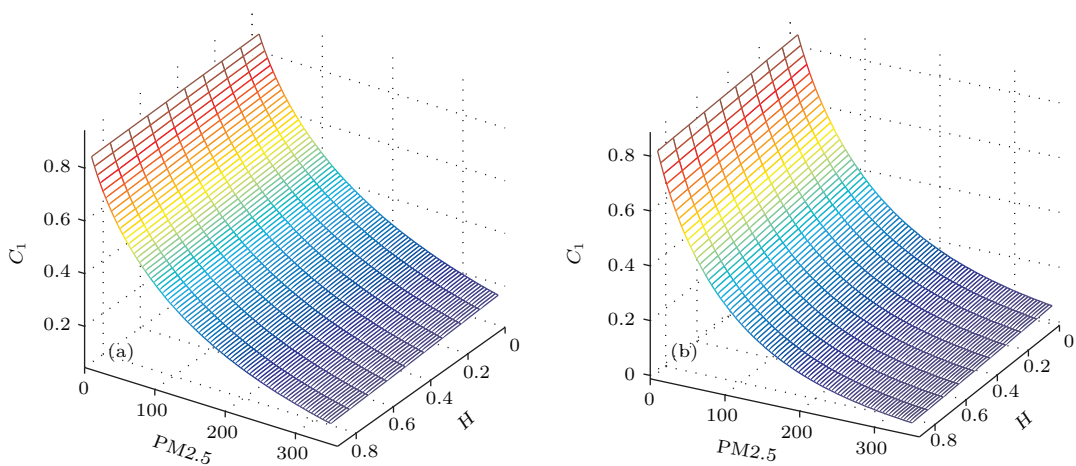


图 2 (网刊彩色) 信道容量 (a) 幅值阻尼信道; (b) 退极化信道

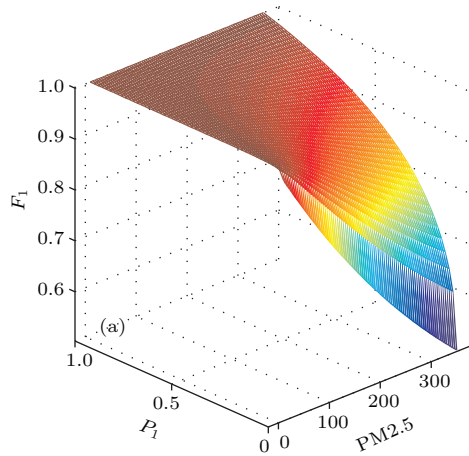
Fig. 2. (color online) The capacity of the channel: (a) amplitude damping channel; (b) The depolarizing channel.

图2(a)和(b)分别为幅值阻尼信道和退极化信道的信道容量, X 轴表示大气湿度, Y 轴表示PM2.5指数, Z 轴为信道容量. 可以看出, 随着PM2.5指数与大气湿度的增加, 幅值阻尼信道与退极化信道的信道容量成指数衰减; 当PM2.5指数与大气湿度都为0时, 信道为理想信道, 容量为1; 当PM2.5指数为100, 大气湿度为0.3时, 空气轻度污染, 幅值阻尼信道的信道容量为0.5, 退极化信道的信道容量为0.4. 因此, PM2.5污染对信道容量的衰减较大, 退极化信道比幅值阻尼信道所受到的影响更加严重.

4 PM2.5指数与信源字符概率对信道平均保真度的影响

定义PM2.5信道的平均保真度 F 为^[18,19]

$$F = \frac{\text{tr} \left\{ \left[\left(\sum_i p_i \rho_i \right)^{0.5} \varepsilon \left(\sum_i p_i \rho_i \right) \right] \right\}}{\text{tr} \left\{ \left(\sum_i p_i \rho_i \right)^{0.5} \right\}} \quad (25)$$



对于幅值阻尼信道, 平均保真度为

$$F_1 = (p_1(p_1 + (1 - p_1)\gamma))^{1/2} + (1 - p_1)\sqrt{1 - \gamma}, \quad (26)$$

式中 p_1 表示信源输出字符 $|0\rangle$ 的概率.

对于退极化信道, 结合(22)式, 得

$$\varepsilon \left(\sum_i p_i \rho_i \right) = \begin{pmatrix} \frac{p' + 2(1 - p')p_1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{p' + 2(1 - p')(1 - p_1)}{2} \end{pmatrix}. \quad (27)$$

则退极化信道的平均保真度为

$$F_2 = \sqrt{\frac{p' + 2(1 - p')p_1}{2} p_1} + \sqrt{\frac{p' + 2(1 - p')(1 - p_1)}{2} (1 - p_1)}. \quad (28)$$

当大气湿度 $H = 0.3$ 时, 对信道平均保真度与PM2.5指数、信源概率的关系进行了仿真, 结果如图3所示.

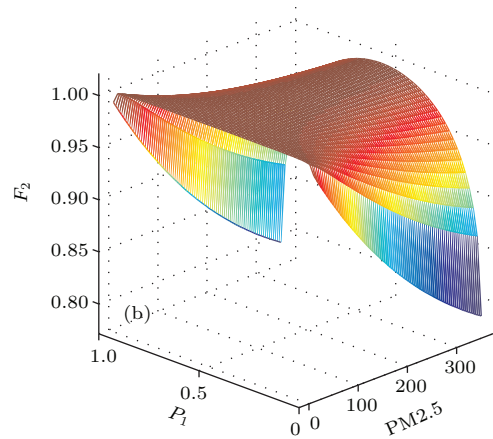


图3 (网刊彩色) 信道平均保真度 (a) 幅值阻尼信道; (b) 退极化信道

Fig. 3. (color online) The channel average fidelity: (a) amplitude damping channel; (b) The depolarizing channel.

图3中, X 轴表示PM2.5指数, 取值范围为10—350; Y 轴表示信源字符取 $|0\rangle$ 时的概率, 取值范围为0—1; Z 轴为信道平均保真度. 可以看出, 图(a)与(b)的共同点是: 当信源取字符 $|0\rangle$ 的概率 p_1 一定时, 幅值阻尼信道和退极化信道的平均保真度都随着PM2.5指数的增大而减小. 图3(a)与

(b)的异同点是: 对于幅值阻尼信道而言, 量子态与环境相互作用仅对状态 $|1\rangle$ 有影响, 使状态 $|1\rangle$ 变为 $|0\rangle$, 而对 $|0\rangle$ 无影响, 从图(a)中可以看出, 当 $p_1 = 1$ 时, 保真度 $F_1 = 1$. 随着 p_1 的减小, PM2.5指数的增大, 信道平均保真度呈现不同程度的衰减; 对于退极化信道而言, 量子态与环境相互作用对状态

|1⟩ 和对状态 |0⟩ 的影响是等同的, 故图 (b) 中 p_1 取 0—0.5 时与 p_1 取 0.5—1 时, 会出现二者相互对称的形式, 且信道平均保真度变化幅度较小.

5 PM2.5 指数、大气湿度对信道误码率的影响

基于 BB84 协议的量子密钥分发系统, 量子误码率 R_B 为接收到的误码比特率 R_e 与总比特率 R_s 的比值 [20,21], 即

$$R_B = \frac{R_e}{R_s} = \frac{\eta n_a (1 - \zeta) e^{-4\eta n_a} + \zeta \eta n_a e^{-\eta M}}{F_s R_r (1 - e^{-u T_c P T_a \eta F_c})}, \quad (29)$$

式中, η 为光电探测量子效率, $M = e^{-A_{\text{ext}} L} + 4n_a$, L 为传输距离, $n_a = n_B/2 + n_D$, n_B 为背景噪声引起的光子计数, n_D 为光电探测器的暗电流计数, ζ 为退极化效应因子, F_s 为筛选因子, R_r 为发射脉冲

重复率, F_c 为测量因子, μ 为激光脉冲平均光子数, T_a 为系统传输率, P 为单光子俘获率, T_c 为信道传输因子.

信道传输因子为

$$T_c = T_0^{\sec \theta} = \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\sec \theta} = 10^{-0.1 A_{\text{atm}} \theta}, \quad (30)$$

θ 为高斯光束远场发射角.

取量子光信号波长 $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$, 采用高斯基模光束作为光源脉冲, 其余参数取值如表 3 所示, 结合 (10) 式、(23) 式和 (29) 式, 对 PM2.5 指数、大气湿度和信道误码率的关系进行了仿真, 结果如图 4 所示.

图 4 中, X 轴表示大气湿度, Y 轴表示 PM2.5 指数, Z 轴为信道误码率. 可以看出, 随着 PM2.5 指数与大气湿度的增加, 幅值阻尼信道和退极化信道的误码率呈指数形式增加; 当 PM2.5 指数一定时, 大气湿度对误码率的影响很大, 两种信道的误码率变化情况相近.

表 3 信道误码率的各参数取值
Table 3. The parameters of channel bit error rate.

η	F_c	F_s	R_r	n_D	n_B	P	T_a	θ	ζ	μ
0.65	1	0.5	0.5	10^{-6}	10^{-3}	0.5	1	20	p'	1

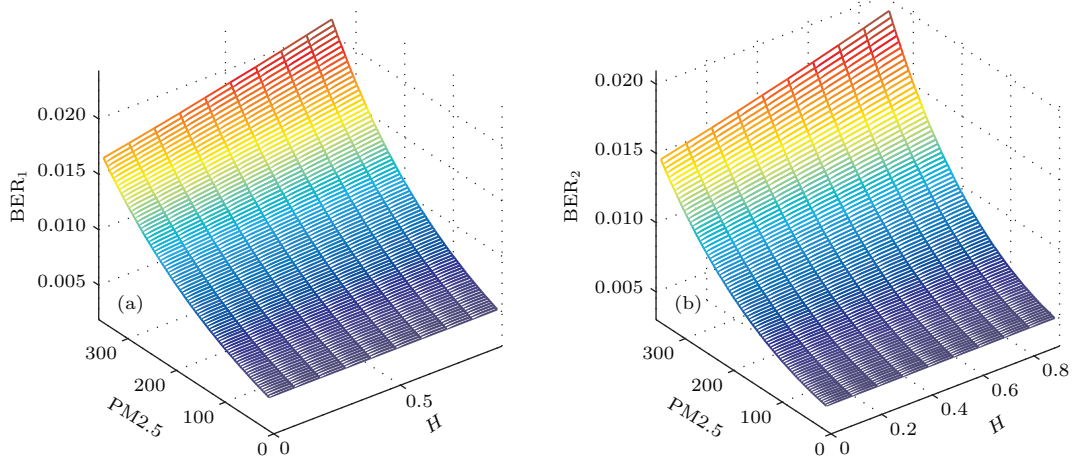


图 4 (网刊色彩) 信道误码率 (a) 幅值阻尼信道; (b) 退极化信道

Fig. 4. (color online) The channel bit error rate: (a) amplitude damping channel; (b) The depolarizing channel.

6 结 论

本文研究了 PM2.5 指数与大气湿度对自由空间量子通信信道的影响. 根据 PM2.5 粒子尺度及

化学成分, 提出了 PM2.5 的消光特性与自由空间量子信道衰减的关系. 针对幅值阻尼信道和退极化信道, 分析了 PM2.5 的污染程度对信道容量、信道平均保真度和信道误码率的影响. 仿真结果表明, 随着 PM2.5 指数和大气湿度的增加, 自由空间量子通

信的各种性能指标均受到不同程度的影响. 因此在自由空间量子通信中, PM2.5 大气污染、湿度等客观因素不容忽视, 需根据具体的空气质量指数, 自适应调整系统参数, 以降低背景噪声对通信性能的影响.

参考文献

- [1] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, Ho K F, Cao J J, Zotter P, Canonaco F, Wolf R, Crippa M, Baltensperger U, Zimmermann R, Szidat S, Haddad I E 2014 *Nature* **514** 218
- [2] Deng X, Wu D, Yu J, Lau A K, Li F, Tan H, Yuan Z, Ng W M, Deng T, Wu C, Zhou X 2013 *Journal of the Air & Waste Management Association* **63** 1012
- [3] Yin J, Ren J G, Lu H, Cao Y, Yong H L, Wu Y P, Liu C, Liao S K, Zhou F, Jiang Y, Cai X D, Xu P, Pan G S, Jia J J, Huang Y M, Yin H, Wang J Y, Chen Y A, Peng C Z, Pan J W 2012 *Nature* **488** 185
- [4] Ma X S, Thomas H, Thomas S, Wang D Q, Sebastian K, William Nr, Bernhard W, Alexandra M, Johannes K, Elena A, Vadim M, Thomas J, Rupert U, Anton Z 2012 *Nature* **489** 269
- [5] Yin J, Cao Y, Yong H L, Ren J G, Liang H, Liao S K, Zhou F, Liu C, Wu Y P, Pan G S, Li L, Liu N L, Zhang Q, Peng C Z, Pan J W 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 260407
- [6] David E B, Thomas M B, Mohsen R, Almut B 2014 *Phys. Rev. A* **90** 032306
- [7] 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]
- [8] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2156 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 秦健, 刘磊 2010 物理学报 **59** 2156]
- [9] Sun X M, Han Y P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 682 (in Chinese) [孙贤明, 韩一平 2006 物理学报 **55** 682]
- [10] He Q S, Zhou Y H, Zheng X J 2005 *Science in China(Series G:Physics,Mechanics & Astronomy)* **35** 308 (in Chinese) [何琴淑周又和郑晓静 2005 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学 **35** 308]
- [11] Yao Q, Han S Q, Bi X H 2012 *China Environmental Science* **32** 214 (in Chinese) [姚青韩素芹毕晓辉 2012 中国环境科学 **32** 214]
- [12] Min X, Li X C, Li X W, Ma X 2015 *Acta Optica Sinica* **35** 413 (in Chinese) [闵星, 李兴财, 李新碗, 马鑫 2015 光学学报 **35** 413]
- [13] Cai J, Gao J, Fan Z G, Feng 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]
- [14] Marco L(translated by Zhou W X, Wu M Y, Hu M C, Jin L) 2013 *Quantum Radar* (Beijing:Publishing House Of Electronics Industry) p15-17 (in Chinese) [马尔科 L 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] Yin H, Ma H X 2006 *Introduction to quantum communication in military* (Beijing: Military Science Press) p49 (in Chinese) [尹浩, 马怀新 2006 军事量子通信概论(北京: 军事科学出版社) 第 49 页]
- [16] Zhang D Y, 2013 *Quantum logic gates and quantum decoherence* (Beijing: Science Press) pp90-110 (in Chinese) [张登玉 2013 量子逻辑门与量子退相干(北京: 科学出版社) 第 90—110 页]
- [17] Yin H, Han Y 2013 *Quantum Communication Theory And Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp76-83 (in Chinese) [尹浩, 韩阳 2013 量子通信原理与技术(北京: 电子工业出版社) 第 76—83 页]
- [18] Liao X P, Fang M F, Fang J S, Zhu Q Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 020304
- [19] Nielsen A, Chuang I(translated by Zheng D Z, Zhao Q C) 2005 *Quantum Computation and Quantum Information* (Vol. 2) (Beijing:TsingHua University Press) pp57-60 (in Chinese) [尼尔森, 庄著(郑大钟, 赵千川译) 2005 量子计算和量子信息(二)(北京: 清华大学出版社) 第 57—60 页]
- [20] Yan Y, 2009 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [阎毅 2009 博士学位论文(西安: 西安电子科技大学)]
- [21] Yan Y, Pei C X, Han B B, Zhao N 2008 *Chin. J. Radio Sci.* **23** 834 (in Chinese) [闫毅, 裴昌幸, 韩宝彬, 赵楠 2008 电波科学学报 **23** 834]

Influences of PM2.5 atmospheric pollution on the performance of free space quantum communication^{*}

Nie Min¹⁾ Ren Jie^{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 12 April 2015; revised manuscript received 6 May 2015)

Abstract

In recent years, the PM2.5 air pollution has been increasingly serious, which not only affects the air quality and visibility, but also has effects on free space optical signal transmission. However, the research about the relationship between the PM2.5 air pollution and the free space quantum communication has not yet been started. To investigate this relationship, the PM2.5 distribution function and its chemical extinction should be analyzed first. According to the degree of PM2.5 atmospheric pollution and the humidity of the atmosphere, the relationships among the PM2.5 index, the humidity of the atmosphere and the channel attenuation of the free space quantum communication can then be established. According to the amplitude damping channel and the depolarizing channel, the effects of the degree of PM2.5 air pollution on channel capacity, channel average fidelity, channel bit error rate are put out and simulated finally. Simulation results show that, if the air humidity is 30% and the PM2.5 index is 50, the channel capacity, channel average fidelity and the channel bit error rate of free space quantum communication will be 0.83, 0.91 and 0.0048 respectively. While the air humidity is 30% and the PM2.5 index is 300, the above channel parameters will be respectively 0.21, 0.56 and 0.0192. Further more, the channel average fidelity has an obvious difference between the two kinds of channel, and it is also related to the probability of the value of the source characters. Thus, the degree of PM2.5 air pollution has a significant effect on the performance of free space quantum communication. And, in order to improve the reliability of quantum communication in free space, the parameters should be adjusted adaptively based on the status of PM2.5 air pollution.

Keywords: free space quantum communication, PM2.5 index, amplitude damping and depolarizing channel

PACS: 03.67.Hk, 92.60.hf, 03.65.Yz

DOI: 10.7498/aps.64.150301

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172071, 61201194), and the Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2014JQ8318).

[†] Corresponding author. E-mail: 450205735@qq.com