

中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真

聂敏 尚鹏钢 杨光 张美玲 裴昌幸

Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation

Nie Min Shang Peng-Gang Yang Guang Zhang Mei-Ling Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 240303 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.240303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

在大气湍流斜程传输中拉盖高斯光束的轨道角动量的研究

Study on orbital angular momentum of Laguerre-Gaussian beam in a slant-path atmospheric turbulence

物理学报.2014, 63(15): 150301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.150301>

量子语音多带激励算法

Quantum speech multi-band excitation algorithm

物理学报.2014, 63(12): 120301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.120301>

基于非最大纠缠的五粒子 Cluster 态的高效量子态共享方案

High-efficient quantum state sharing via non-maximally five-qubit cluster state

物理学报.2013, 62(23): 230302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.230302>

量子纠缠信令网 Poisson 生存模型及保真度分析

Poisson survival model of quantum entanglement signaling network and fidelity analysis

物理学报.2013, 62(23): 230303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.230303>

量子无线广域网构建与路由策略

Quantum wireless wide-area networks and routing strategy

物理学报.2013, 62(20): 200304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.200304>

# 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真\*

聂敏<sup>1)</sup> 尚鹏钢<sup>1)†</sup> 杨光<sup>1)2)</sup> 张美玲<sup>1)</sup> 裴昌幸<sup>3)</sup>

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)

(2014年6月24日收到; 2014年8月11日收到修改稿)

中尺度沙尘暴是美国内华达州、我国北部及中东国家等地沙尘天气的常见形式. 为了研究中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响, 首先分析了沙尘暴的物理特性, 根据中尺度沙尘暴的扩散模型, 提出了中尺度沙尘特性与量子纠缠度的关系; 然后仿真了沙尘特性对量子卫星信道参数的影响. 结果表明, 如果沙尘扩散时间为12 h, 中尺度沙尘粒子半径分别为1和25  $\mu\text{m}$ , 则量子卫星信道的纠缠度依次为0.6和0.4, 信道的利用率分别为0.9和0.8, 信道容量分别为0.95和0.8. 由此可见, 量子信道的各种参数与沙尘暴的特性密切相关. 因此, 为了提高量子卫星通信的可靠性, 应根据沙尘灾变程度, 自适应调整卫星信道的各种参数.

**关键词:** 量子通信, 中尺度沙尘暴, 量子纠缠

**PACS:** 03.67.Hk, 92.40.Iv, 03.67.Mn

**DOI:** 10.7498/aps.63.240303

## 1 引言

量子卫星通信具有安全保密、覆盖面广的优势, 是当前量子通信的研究热点. 中国科技大学潘建伟等<sup>[1]</sup>在完成了五光子纠缠终端开放远程传态的实验演示之后, 又进行了多次量子通信实验, 为量子卫星通信走向大规模应用奠定了基础; 美国加州理工大学 Duan 团队<sup>[2]</sup>, 为了实现大规模量子通信, 提出了基于原子组装的非经典量子纠缠对产生方法, 为可扩展的远程量子通信协议的实现做好了准备; 德国慕尼黑普朗克研究所 (Max-Planck-Institut) 的 Theodor 团队<sup>[3]</sup>, 利用原子阱, 实现了多粒子纠缠的受控碰撞, 为量子门阵列的产生和大规模并行量子信息处理打下了基础. 最近, 我国在量子交换机构建、量子无线广域网路由策略、量子数据压缩的么正变换生成方法以及量子中继器<sup>[4]</sup>研究等方

面, 也取得了长足的进展. 文献<sup>[5]</sup>提出了一种提高量子保真度的新方法. 对于经受了振幅阻尼的三量子态, 其退相干性可采用弱测量和量子反转测量的方法得到补偿. 文献<sup>[6]</sup>针对纠缠对的分布式无线量子通信网络, 提出了一种基于多跳路由的量子隐形传态方案. 在该方案中, 量子路径不必与经典路径一致, 其路径是以分布式的方式建立的. 文献<sup>[7]</sup>提出了一种基于 Greenberger-Home-Zeilinger 态的量子广域通信方案及一次一密认证协议. 分析结果表明, 该协议不仅容易实现, 而且具有高效性和安全性. 文献<sup>[8]</sup>提出了一种量子纠缠信令网 Poisson 生存模型. 由于环境的作用, 导致量子退相干. 通过纠缠纯化, 提高量子态的保真度, 进行信令修复.

当量子信息在自由空间传输时, 不可避免地会受到沙尘暴、雾霾等恶劣天气的影响. 兰州大学大气科学院和中国气象局赵建华和张强<sup>[9]</sup>, 基于风沙两相流的相互作用和气块质量变化, 提出了闭合的

\* 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.

† 通讯作者. E-mail: shang\_penggang@163.com

沙尘大气物理约束方程组, 为沙尘大气物理的研究奠定了理论基础; 中国科学院沙漠与沙化重点实验室的张正德等<sup>[10]</sup>, 研究了腾格里沙漠近地面气象要素与输沙通量的变化趋势, 为沙漠地区沙尘暴长期、实时观测积累了数据资料; 中国气象局和南京信息工程大学王鹏祥等<sup>[11]</sup>, 研究了沙尘暴期间风沙运动的若干特征, 其成果对建立沙尘暴预警系统及数值模拟具有重要参考价值; 西安电子科技大学的裴昌幸团队<sup>[12]</sup>, 研究了平流层量子通信系统传播特性, 结果表明地空路径传播效应会对系统的量子密钥分发结果产生重要影响. 然而, 目前国内外关于中尺度沙尘暴对量子卫星信道影响的研究尚未展开. 沙尘暴的灾变程度包括沙尘扩散模式指数、扩散时间以及沙尘粒子半径等参数, 这些因素对量子卫星信道的影响如何, 是关系到量子卫星通信能否正常进行的关键. 本文根据我国西北地区、中东国家及美国内华达州等地沙尘暴的相关参数, 讨论了常见的中尺度沙尘暴的物理特性和沙尘扩散模型, 分别提出了沙尘特性与量子卫星信道纠缠度、信道利用率和信道容量的关系, 通过仿真, 研究了沙尘粒子半径、扩散模式指数和扩散时间与信道参数的关系, 为沙尘条件下量子卫星通信的研究奠定了基础.

## 2 沙尘暴的传输形式

风是沙尘传输的动力条件, 能使沙尘颗粒脱离静止状态而进入运动过程的最低风速称为起动风速, 超过起动风速的风叫起沙风. 沙尘的起动风速与沙尘的粒径有关. 沙尘在空间的分布状况与沙尘粒径大小及风速的垂直分量有密切的关系. 空间中沙尘数量与沙尘粒径大小、密度和风速有关. 风速越大, 空气中沙尘的数量越多, 大粒径粒子的数量也越多<sup>[13]</sup>.

沙尘的传输方式包括蠕动、跃迁和悬浮, 是由沙尘粒子大小和地面风速及湍流结构决定的. 沙尘在空间传输的距离和方向与大气环流的变化情况密切相关. 悬浮的沙尘粒子在大气环流的驱动下, 可在空间长距离传输. 沙尘传输的三种主要形式具体如下<sup>[13]</sup>.

1) 沙尘蠕动: 地表沙尘粒子在风力驱动下离开地面, 在地表附近滚动的情况称为沙尘蠕动.

2) 沙尘粒子跃迁: 地表沙尘在风力上扬的作用下脱离地面进入空间, 从气流中获取更大的动力继

续运动. 由于重力作用, 沙尘粒子会迅速下落. 当空气密度小于沙尘密度时, 沙尘在运动中落到地面时就有了足够大的动量, 这时沙尘可被弹射到空中继续运动, 它们对地表的冲击作用也能使冲击点的粒子飞越起来做跳跃式运动, 这种运动形式称为沙尘粒子跃迁.

3) 沙尘粒子悬浮: 沙尘在一定时间内悬浮在空间的情况, 称为沙尘粒子的悬浮运动, 其条件是风速的垂直分量不小于沙尘的沉降速度.

## 3 中尺度沙尘输送扩散模式方程

中尺度沙尘动力模式通过以下方程组来描述<sup>[14,15]</sup>:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}, \quad (1)$$

$$p^* = p_s - p_t, \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  是沙尘扩散模式指数, 它描述了沙尘灾变的程度;  $p$  是大气压强,  $p_t$  和  $p_s$  是分别对应于不同  $\sigma$  的高层和底层大气压强,  $p^*$  表示沙尘动力模式最大压强差. 沙尘输送方程为<sup>[14,15]</sup>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(p^*n(r))}{\partial t} \\ &= -m^2 \left[ \frac{\partial(p^*un(r))}{\partial x} + \frac{\partial(p^*vn(r))}{\partial y} \right] \\ & \quad - \frac{\partial(p^*\sigma n(r))}{\partial \sigma} + F_H n(r) \\ & \quad + F_V n(r) + \left. \frac{\partial p^*n(r)}{\partial t} \right|_D + \left. \frac{\partial p^*n(r)}{\partial t} \right|_S, \quad (3) \end{aligned}$$

在上式中,  $r$  是粒子半径,  $n(r)$  是半径为  $r$  的中尺度沙尘粒子浓度,  $p^*n(r)$  代表了压强差是沙尘浓度的函数;  $\frac{\partial(p^*n(r))}{\partial t}$  表示一定压强差下沙尘浓度对时间的变化率; 下标  $D$  表示沙尘沉降, 下标  $S$  表示沙尘源,  $F_H n(r)$  代表粒子浓度的水平扩散,  $F_V n(r)$  表示粒子浓度的垂直扩散,  $m$  为沙尘放大因子.

根据方程(3), 中尺度沙尘粒子的传输时间为  $\tau$ , 被输送的平均高度与湍流交换系数及粒子沉降速度有关<sup>[13]</sup>, 其中沙尘传送高度可表示为

$$H = (2\varepsilon\tau)^{1/2}. \quad (4)$$

在(4)式中,  $\tau = \frac{2\varepsilon}{u_f^2}$ ,  $H$  为沙尘输送的平均高度,  $\varepsilon$  为湍流交换系数,  $u_f$  为中尺度沙尘粒子的沉降速率. 由(4)式可见, 粒子的沉降速率越小, 大气湍流交换系数越大, 粒子在垂直方向上的输送距离越大.

根据文献[13], 沙尘粒子被水平输送的最大距离可表示为

$$L = \bar{u}\tau = \frac{\bar{u}^2 \varepsilon}{k^2 R^4}, \quad (5)$$

其中,  $L$  为悬浮沙尘粒子被输送的水平距离,  $\bar{u}$  为平均风速,  $\tau$  为沙尘粒子的传输时间,  $\varepsilon$  为湍流交换系数,  $R$  为粒子直径,  $k$  为输送系数.

#### 4 中尺度沙尘特性对量子信道纠缠度的影响

在沙尘暴天气下, 沙尘粒子的湍流、散射会导致量子态相干性的破坏, 这种情况称为量子消相干. 消相干导致量子态所携带的信息丢失, 量子纠缠度下降, 从而影响量子通信.

根据文献[16], 纠缠度可表示为

$$E = S(\rho_A) = S(\rho_B) = -\text{Tr}(\rho_A \log_2 \rho_A). \quad (6)$$

在本文中, 沙尘为子系统  $A$ , 量子信道为子系统  $B$ , 子系统  $A$  的约化密度矩阵可表示为[17]

$$\rho_A = \text{Tr}_B(\rho_{AB}). \quad (7)$$

设沙尘环境与量子态相互作用的初态为

$$|\psi\rangle = |e_0\rangle|\phi_0\rangle = \sum_i \sqrt{p_i}|n\rangle|e_0\rangle, \quad (8)$$

其中  $|n\rangle$  是 Hilbert 空间中的一组完备基,  $|e_0\rangle$  为沙尘环境的初始状态,  $\sqrt{p_i}$  是系统  $A$  和  $B$  约化密度矩阵共同的非零本征值, 随着时间的演化, 沙尘环境与系统纠缠最终演化为

$$|\psi\rangle = \sum_i \sqrt{p_i}|n\rangle|e_s\rangle, \quad (9)$$

其中,  $|e_s\rangle$  是量子态与沙尘环境相互作用的终态.

由(8)和(9)式可知, 量子信道纠缠度与中尺度沙尘暴的各物理性质有关. 根据沙尘输送方程(3), 沙尘条件下的量子信道纠缠度定义如下:

$$E = \frac{\omega t}{\sigma \exp[r(h - h_0)]} (0.3)^b, \quad (10)$$

其中,  $E$  是量子信道纠缠度,  $r$  为沙尘粒子半径,  $h$  为沙尘暴的扩散高度,  $h_0$  为卫星地面站海拔高度,  $t$  是对沙尘扩散观测的时间,  $\sigma$  为沙尘传输模式指数,  $\omega$  为沙尘临界风速,  $b$  是沙尘灾害系数.

根据(10)式, 假设沙尘灾害系数  $b$  一定, 由于不同地形、天气等环境因素的影响, 不同的沙尘传输模式, 其模式指数  $\sigma$  不同; 在相同观测时间  $t$  下,

量子信道纠缠度  $E$  与沙尘粒子半径大小  $r$  有关. 下面分两种情况讨论量子信道纠缠度  $E$  与观测时间  $t$ 、沙尘传输模式指数  $\sigma$  和沙尘粒子半径  $r$  的关系.

1) 沙尘扩散模式指数、观测时间与量子信道纠缠度的关系

沙尘粒子半径  $r = 1\text{--}25 \mu\text{m}$ , 观测时间  $t = 1\text{--}12 \text{h}$ , 地面站高度  $h_0 = 100 \text{m}$ , 观测高度  $h = 10 \text{km}$ , 沙尘扩散模式指数  $\sigma = 0.6\text{--}1$ , 沙尘的临界风速  $\omega = 0.3 \text{m/s}$ . 对量子信道纠缠度与沙尘扩散模式指数和观测时间的关系进行仿真, 结果如图1.

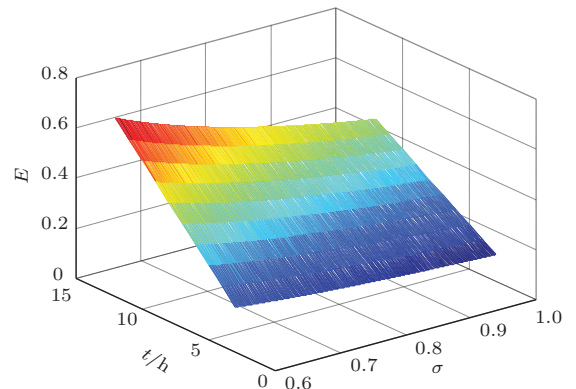


图1 (网刊彩色) 沙尘扩散模式指数、观测时间与量子信道纠缠度的关系

图1是三维坐标,  $Z$  轴代表量子信道纠缠度  $E$ ,  $X$  轴是观测时间  $t(\text{h})$ ,  $Y$  轴表示模式指数  $\sigma$ . 由图1可知, 在沙尘粒子半径  $r = 1 \mu\text{m}$ , 灾害系数  $b = 1$ , 沙尘扩散模式指数  $\sigma = 0.6\text{--}1$ , 观测时间  $t = 1\text{--}12 \text{h}$  条件下, 沙尘扩散模式指数  $\sigma$  越大, 量子信道纠缠度  $E$  越小; 在  $\sigma$  相同下, 沙尘扩散时间越长, 沙尘粒子漂浮的密度逐渐变小, 量子信道纠缠度趋于增大.

2) 沙尘粒子半径、观测时间与量子信道纠缠度的关系

对观测时间和沙尘粒子半径与量子信道纠缠度的仿真, 结果如图2所示.

图2中,  $Y$  轴表示沙尘粒子半径,  $X$  轴、 $Z$  轴与图1相同. 可以看出, 在  $\sigma = 0.8$ ,  $b = 1$ ,  $r = 1\text{--}25 \mu\text{m}$ ,  $t = 3\text{--}12 \text{h}$  条件下, 沙尘粒子半径越大, 量子信道纠缠度  $E$  越小; 在相同沙尘粒子半径下, 沙尘扩散时间越长, 沙尘粒子漂浮的密度逐渐变小, 量子信道纠缠度趋于增大.

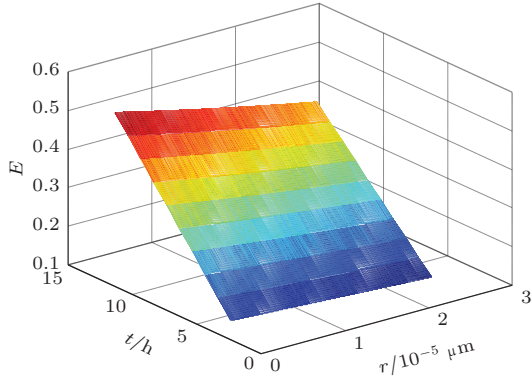


图2 (网刊彩色) 沙尘粒子半径、观测时间与量子信道纠缠度的关系

### 5 中尺度沙尘对量子信道利用率的影响

设卫星地面站发射端的量子比特为  $R_T$ , 量子态经过沙尘暴后卫星接收端接收到的量子比特为  $R_r$ , 则中尺度沙尘暴天气条件下量子链路比特变化率为

$$\eta = \frac{R_r}{R_T}. \quad (11)$$

根据文献 [18], 链路的时间利用率为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{t_q}{N(t_q + t_d + t_f + t_d)} \\ &= \frac{1-p}{\left(1 + \frac{t_d}{t_q} + \frac{t_f}{t_q} + \frac{t_d}{t_q}\right)}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $p$  代表误码率,  $t_q$  表示信令的传输时间,  $t_d$  表示信道的传输时延,  $t_f$  为反馈应答时延.

根据信道的物理特性, 沙尘天气下链路的时间利用率可表示为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{t_q}{N(t_q + t_d + t_f + t_d)} \\ &= \frac{1-p}{\left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma} + \frac{t_0}{t} + \frac{r_0}{r}\right)}. \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式中,  $\sigma_0$  表示其他环境下的模式指数,  $\sigma$  是沙尘扩散模式指数,  $t_0$  代表传输时延,  $t$  表示对沙尘暴传输的观测时间,  $r_0$  代表大气中杂物粒子半径,  $r$  表示沙尘粒子半径.

中尺度沙尘条件下, 量子链路的有效利用率为

$$U = \left(\frac{R_r}{R_T}\right)^b \times \frac{1-p}{\left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma} + \frac{t_0}{t} + \frac{r_0}{r}\right)}. \quad (14)$$

取  $\eta = 0.8$ ,  $p = 0.01$ ,  $\sigma_0 = 0.1$ ,  $t_0 = 1 \text{ h}$ ,  $r_0 = 3 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ . 对沙尘扩散模式指数、观测时间与信道有效利用率的关系进行仿真, 结果如图 3 所示.

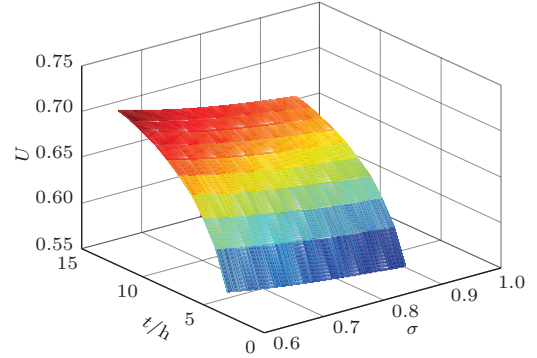


图3 (网刊彩色) 沙尘扩散模式指数、观测时间与信道有效利用率的关系

在图 3 中,  $Z$  轴是信道有效利用率,  $X$  轴和  $Y$  轴与图 1 相同. 可以看出, 在沙尘粒子半径  $r = 1 \mu\text{m}$ , 沙尘灾害系数  $b = 1$ , 沙尘扩散模式指数  $\sigma = 0.6-1$ , 观测时间  $t = 1-12 \text{ h}$  条件下, 随着沙尘扩散模式指数的增大, 信道有效利用率  $U$  越小; 在相同扩散模式指数下, 沙尘扩散时间越长, 沙尘粒子漂浮的密度逐渐变小, 信道有效利用率  $U$  逐渐增大.

对沙尘粒子半径、观测时间与信道利用率的关系进行仿真, 结果如图 4 所示.

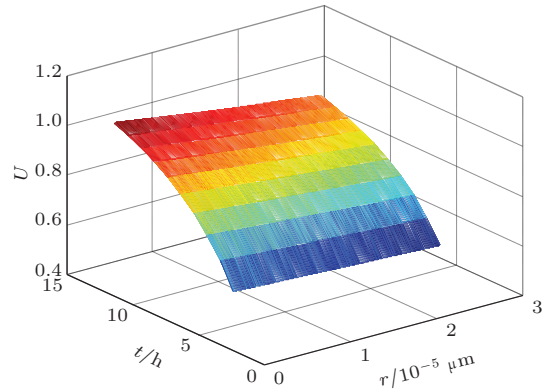


图4 (网刊彩色) 沙尘粒子半径、观测时间与信道有效利用率的关系

图 4 中,  $Y$  轴表示沙尘粒子半径,  $X$  轴、 $Z$  轴与图 1 相同. 可以看出, 在  $\sigma = 0.8$ ,  $b = 1$ ,  $r = 1-25 \mu\text{m}$ ,  $t = 3-12 \text{ h}$  条件下, 随着沙尘粒子半径的增大, 信道有效利用率  $U$  越小; 在相同沙尘粒子半径下, 沙尘扩散时间越长, 沙尘粒子漂浮的密度逐渐变小, 信道有效利用率  $U$  逐渐增大.

### 6 中尺度沙尘对量子信道容量的影响

沙尘暴会导致量子态相干性的破坏, 量子信道噪声引起信道容量的变化. 下面以退极化信道为例, 建立沙尘物理特性与信道容量的关系.

退极化信道可表示为<sup>[19]</sup>

$$\varepsilon(\rho_i) = \frac{I}{2} + (1-q)\rho_i, \quad (15)$$

其中,  $\rho_i$  表示量子比特,  $q$  表示量子态去极化的概率,  $I/2$  表示完全混合态,  $\varepsilon(\rho_i)$  表示量子系统经过退极化信道后的状态.

设输入字符  $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|$ ,  $\rho_2 = |1\rangle\langle 1|$ , 则量子信道的状态为

$$\begin{aligned} \varepsilon\left[\sum_i q_i \rho_i\right] &= \varepsilon[q_1 \rho_1 + (1-q_1)\rho_2] \\ &= \frac{q}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + (1-q)q_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &\quad + (1-q) \left(1-q_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{q}{2} + (1-q)q_1 & 0 \\ 0 & \frac{q}{2} + (1-q)(1-q_1) \end{bmatrix}, \quad (16) \end{aligned}$$

其对应的诺依曼熵为

$$\begin{aligned} s\left(\varepsilon\left[\sum_i q_i \rho_i\right]\right) &= -\left[\frac{q+2(1-q)q_1}{2} \log \frac{q+2(1-q)q_1}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{q+2(1-q)(1-q_1)}{2} \log \frac{q+2(1-q)(1-q_1)}{2}\right], \quad (17) \end{aligned}$$

则接收到的诺依曼熵为

$$s(\varepsilon[\rho_1]) = s(\varepsilon[\rho_2]) = H_2\left(\frac{q}{2}\right). \quad (18)$$

(18) 式中,  $H_2\left(\frac{q}{2}\right)$  是二元香农熵, 所以

$$\begin{aligned} \sum_i q_i s(\varepsilon[\rho_i]) &= q_1 H_2\left(\frac{q}{2}\right) + (1-q_1) H_2\left(\frac{q}{2}\right) \\ &= H_2\left(\frac{q}{2}\right). \quad (19) \end{aligned}$$

因此, 信道容量为

$$\begin{aligned} C(q, q_1) &= s\left(\varepsilon\left[\sum_i q_i \rho_i\right]\right) - \sum_i q_i s(\varepsilon[\rho_i]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -\left\{\left[\frac{q+2(1-q)q_1}{2} \log \frac{q+2(1-q)q_1}{2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{q+2(1-q)(1-q_1)}{2} \log \frac{q+2(1-q)(1-q_1)}{2}\right]\right\} \\ &\quad - H_2\left(\frac{q}{2}\right). \quad (20) \end{aligned}$$

当  $q = \frac{1}{2}$  时,  $s\left(\varepsilon\left[\sum_i q_i \rho_i\right]\right)$  取最大值. 此时,

$$s\left(\varepsilon\left[\sum_i q_i \rho_i\right]\right) = H_2\left(\frac{1}{2}\right) = 1.$$

故信道容量为<sup>[19]</sup>

$$C = \max C\left(q, \frac{1}{2}\right) = 1 - H_2\left(\frac{q}{2}\right). \quad (21)$$

根据激光斜程与大气透射率的关系<sup>[20]</sup>, 量子态的退极化的概率为

$$q = \exp\left\{\frac{-t \cdot \omega}{\sigma} [1 - \exp(-10^3 r)]\right\}, \quad (22)$$

其中, 沙尘观测时间  $t = 3-12$  h, 沙尘临界风速  $\omega = 0.4$  m/s, 沙尘暴的扩散模式指数  $\sigma = 0.6-1$ , 沙尘粒子半径  $r = 1-25$   $\mu\text{m}$ .

对沙尘扩散模式指数、观测时间与信道容量的关系进行仿真, 结果如图 5 所示.

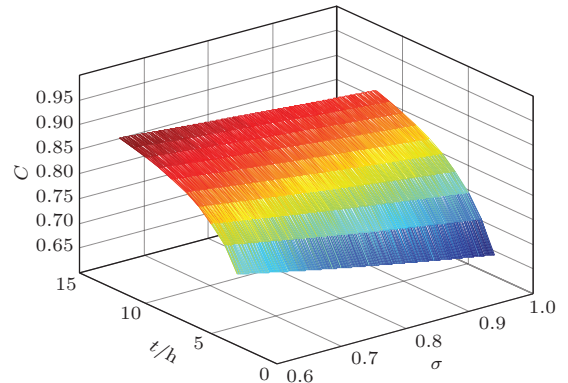


图5 (网刊彩色) 沙尘扩散模式指数、观测时间与信道容量的关系

在图 5 中,  $Z$  轴是信道容量,  $X$  轴和  $Y$  轴与图 1 相同. 可以看出, 在沙尘粒子半径  $r = 1$   $\mu\text{m}$ , 沙尘灾害系数  $b = 1$ , 沙尘扩散模式指数  $\sigma = 0.6-1$ , 观测时间  $t = 1-12$  h 条件下, 随着沙尘扩散模式指数的增大, 信道容量逐渐变小; 在相同扩散模式指数下, 沙尘扩散时间越长, 沙尘粒子漂浮的密度逐渐变小, 信道容量趋于增大.

对沙尘粒子半径、观测时间与信道容量的关系进行仿真, 结果如图 6 所示.

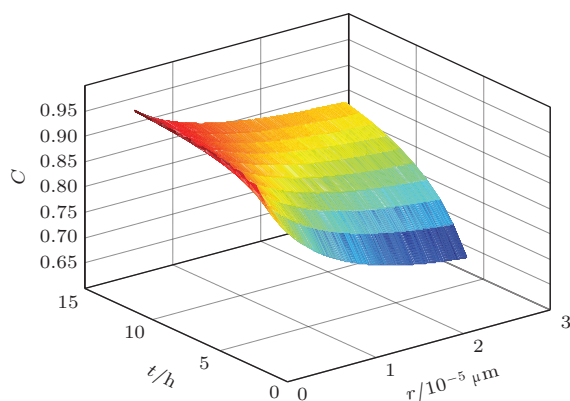


图 6 (网刊彩色) 沙尘粒子半径、观测时间与信道容量的关系

在图 6 中,  $Y$  轴代表沙尘粒子半径,  $X$  轴、 $Z$  轴与图 1 相同. 可以看出, 在  $\sigma = 0.8$ ,  $b = 1$ ,  $r = 1\text{--}25\ \mu\text{m}$ ,  $t = 3\text{--}12\ \text{h}$  条件下, 沙尘粒子半径越大, 信道容量越小; 在沙尘粒子半径相同时, 随着沙尘扩散时间的延长, 沙尘粒子漂浮的密度逐渐变小, 信道容量趋于增大.

## 7 结 论

本文研究了中尺度沙尘暴对量子卫星信道的影响, 根据沙尘输送模型分别建立了量子信道纠缠度、信道有效利用率和信道容量与沙尘特性的关系. 仿真结果表明, 随着沙尘扩散模式指数的增大, 信道纠缠度、信道利用率和信道容量均有不同程度的下降; 沙尘扩散指数越高, 对信道的影响越大. 因此, 在量子卫星通信系统中, 应根据不同的沙尘特性, 对系统参数进行自适应调整, 以降低沙尘灾变对量子卫星通信的影响.

## 参考文献

[1] Zhao Z, Chen Y A, Zhang A N, Yang T, Briegel H J, Pan J W 2004 *Nature* **430** 54  
 [2] Kuzmich A, Bowen W P, Boozer A D, Chou C W, Duan L M, Kimble H J 2003 *Nature* **423** 731  
 [3] Mandel O, Greiner M, Widera A, Rom T, Theodor W, Bloch I 2003 *Nature* **425** 937

[4] Xue L, Nie M, Liu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 170305 (in Chinese) [薛乐, 聂敏, 刘晓慧 2013 物理学报 **62** 170305]  
 [5] Liao X P, Fang M F, Fang J S, Zhu Q Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 020304  
 [6] Yu X T, Zhang Z C, Xu J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 010303  
 [7] Chang Y, Xu C X, Zhang S B, Yan L L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 010305  
 [8] Nie M, Zhang L, Liu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 230303 (in Chinese) [聂敏, 张琳, 刘晓慧 2013 物理学报 **62** 230303]  
 [9] Zhao J H, Zhang Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8954 (in Chinese) [赵建华, 张强 2010 物理学报 **59** 8954]  
 [10] Zhang Z S, Dong Z G, Zhao A G 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 1953 (in Chinese) [张正德, 董治国, 赵爱国 2008 科学通报 **53** 1953]  
 [11] Wang P X, Sun L D, Yue P, Niu S J 2007 *J. Desert Res.* **27** 1077 (in Chinese) [王鹏祥, 孙兰东, 岳平, 牛生杰 2007 中国沙漠 **27** 1077]  
 [12] 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]  
 [13] Wang Y T, Zhao Y H, Yang X X, Zhao Z G, Xue Y L, Gao Q X, Ren Z H 2002 *J. Safety Environ.* **2** 18 (in Chinese) [王耀庭, 赵燕华, 杨新兴, 张志刚, 薛玉兰, 高庆先, 任阵海 2002 安全与环境学报 **2** 18]  
 [14] Liu C T, Cheng L S 1997 *Acta Meteorologica Sin.* **55** 726 (in Chinese) [刘春涛, 程麟生 1997 气象学报 **55** 726]  
 [15] Anthes R A, Lü Y H, Guo X R 1991 *Meteorol. Sci. Technol.* **1** 40 (in Chinese) [Anthes R A, 吕越华, 郭肖容 1991 气象科技 **1** 40]  
 [16] Zhang Y D 2010 *Quantum Mechanics* (Beijing: Science Press) p343 (in Chinese) [张永德 2010 量子力学 (北京: 科学出版社) 第 343 页]  
 [17] Zhang Y D 2010 *Advanced Quantum Mechanics* (Beijing: Science Press) p24 (in Chinese) [张永德 2010 高等量子力学 (北京: 科学出版社) 第 24 页]  
 [18] Li J D, Sheng M, Li H Y 2011 *Communications Network Infrastructure* (Vol. 2) (Beijing: Higher Education Press) pp94–101 (in Chinese) [李建东, 盛敏, 李红艳 2011 通信网络基础 (第二版) (北京: 高等教育出版社) 第 94–101 页]  
 [19] Yin H, Han Y 2013 *Quantum Communication Theory and Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p83 (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 83 页]  
 [20] Yan Y, Pei C X, Shi R J, Han B B, Zhang L 2007 *J. Xidian Univ. (Nature Science Edition)* **34** 708 (in Chinese) [闫毅, 裴昌幸, 师瑞娟, 韩宝彬, 张磊 2007 西安电子科技大学学报 (自然科学版) **34** 708]

# Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation\*

Nie Min<sup>1)</sup> Shang Peng-Gang<sup>1)†</sup> Yang Guang<sup>1)2)</sup> Zhang Mei-Ling<sup>1)</sup> Pei Chang-Xing<sup>3)</sup>

1) (*School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, 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 24 June 2014; revised manuscript received 11 August 2014 )

## Abstract

Mesoscale sandstorm is a common form of dust weather in Nevada in the US, the northern part in China, and the Middle East countries in the Asia. To investigate the influence of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channels, the physical characteristics of the dust storms are analyzed first. According to the diffusion model of mesoscale storms, the relationship between the proposed scale dust features and the degree of quantum entanglement is established then. The effect of dust on properties of the quantum satellite channel is simulated finally. The results show that if the diffusion time for the dust is 12 hours, the dust particle radii are 1 and 25  $\mu\text{m}$ , the entanglement degrees of quantum satellite channels are 0.6 and 0.4, the utilization rates of quantum satellite channels are 0.9 and 0.8, the capacities of quantum satellite channels are 0.95 and 0.8. The characteristic parameters of the quantum channels are closely related to sandstorms. Therefore, in order to improve the reliability of quantum satellite communications, the parameters of quantum satellite channels should be adjusted adaptively.

**Keywords:** quantum communication, mesoscale sandstorms, quantum entanglement

**PACS:** 03.67.Hk, 92.40.Iv, 03.67.Mn

**DOI:** 10.7498/aps.63.240303

---

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

† Corresponding author. E-mail: [shang\\_penggang@163.com](mailto:shang_penggang@163.com)