

doi:10.3788/gzxb20164509.0927004

冰水混合云对量子卫星通信性能的影响

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)

摘要:根据冰-水混合云中冰晶和水滴粒子的谱分布函数及消光因子,得到冰-水混合云的冰水含量比例与量子卫星通信信道之间的衰减关系;针对比特翻转信道和退极化信道,分别建立冰水含量比例与信道容量、信道保真度之间的方程;分析了冰水含量比例对信道建立速率的影响.仿真结果表明:当冰水含量比例分别为 1:2 和 1:9 时,比特翻转信道、退极化信道的容量分别为 0.65 和 0.92、0.59 和 0.95;当信源字符的概率为 0.9 时,比特翻转信道、退极化信道的保真度分别为 0.60 和 0.83、0.89 和 0.95;当传输距离为 2 km,纠缠粒子对保真度为 0.8 时,信道建立速率分别为 7.40 Hz 和 15.57 Hz.因此,当量子卫星信号出现较大衰减时,应根据冰-水混合云的冰水含量比例,自适应调整量子卫星通信系统的各项参量,以提高量子卫星通信的可靠性.

关键词:量子卫星通信;冰-水混合云;谱分布函数;比特翻转信道;退极化信道

中图分类号:O413.1;P426.5+1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)09-0927004-7

Influences of the Ice-water Mixed Clouds on the Performance of Quantum Satellite Communication

NIE Min¹, REN Jia-ming¹, YANG Guang^{1,2}, ZHANG Mei-ling¹, PEI Chang-xing³

(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)

Abstract: According to the spectral distribution function and the extinction factor of the ice crystal and the water droplet in the ice-water mixed clouds, the attenuation relationships between the ratio of ice and water and the channel of the quantum satellite communication were attained. For the bit flipping channels and the depolarizing channels, the equations between the ratio of ice and water and the channel capacity, and the channel average fidelity were established respectively. The effect of the ratio of ice and water in the ice-water mixed clouds on the quantum channel establishing rate was analyzed. The simulation results show that, when the ratio of ice and water in the ice-water mixed clouds is 1:2 and 1:9, for the bit flipping channel, the channel capacity is 0.65 and 0.92, and for the depolarizing channel that is 0.59 and 0.95 respectively. When the probability of the source character is 0.9, for the bit flipping channel, the channel average fidelity is 0.60 and 0.83, and for the depolarizing channel that is 0.89 and 0.95 respectively. When the transmission distance is 2 km, the fidelity of the entangled particle pair is 0.8, the quantum channel establishing rate is 7.40Hz and 15.57Hz respectively. Therefore, when the quantum satellite signs are appearing a greater attenuation, in order to improve the reliability of the

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61172071, 61201194)、陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2014JQ8318)和陕西省国际科技合作与交流计划项目(No. 2015KW-013)资助.

第一作者:聂敏(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为量子通信、移动通信、现代通信网理论和关键技术. Email:niemin@xupt.edu.cn

通讯作者:任家明(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为量子通信、移动通信. Email:1572797924@qq.com

收稿日期:2016-03-28;**录用日期:**2016-05-27

<http://www.photon.ac.cn>

quantum satellite communication, the parameters should be adjusted adaptively in light of the ratio of ice and water in the ice-water mixed clouds.

Key words: Quantum satellite communication; Ice-water mixed clouds; Spectral distribution function; Bit flipping channel; Depolarizing channel

OCIS Codes: 270.5655; 010.1615; 060.2605

0 引言

云层按照高度分为高、中、低三类,在地球大气中,约有 50% 的空间被各种云层覆盖.在中低云和高云中存在着冰晶粒子以及冰水混合粒子^[1],当在地面和卫星之间进行量子通信时,量子信息不可避免地会穿过各种云层,使其通信性能受到这些冰晶粒子以及冰水混合粒子的影响.因此,研究冰-水混合云(Ice-Water Mixed Clouds, IWMC)对量子卫星通信性能的影响对量子卫星通信具有重要意义.

IWMC 对量子光信号的散射、吸收等必然会对量子通信系统产生影响,IWMC 是由表面融化成水滴的冰晶粒子组成^[2-3],可以用 Aden 和 Kerker 的同心散射理论^[4]来计算其相关散射参量,IWMC 中冰晶和水滴粒子的谱分布又直接影响其散射参量的大小.陈万奎等^[5]研究了我国北方混合性、冷性层状云中冰晶(直径范围为 18~334 μm)尺度谱分布特征和分布函数,其相关显著性水平 $\alpha < 0.01$ 的比值在 99% 以上.严采繁等^[6]研究了用三参量(A, α, λ)来表征雨滴谱分布,使得拟合结果比双参量(A, λ)更接近于实测资料.吴举秀等^[7]探讨了不同冰云模型下冰云的雷达反射因子和衰减系数及冰水含量的关系,为我国 W 波段云雷达的数据处理提供了参考.

量子通信系统,按其所传输信息是经典还是量子分为二类,前者主要用于量子密钥传输,后者则用于量子隐形传态和量子纠缠分发.1993 年,6 位来自不同国家的科学家,提出了利用经典与量子结合的方法实现量子隐形传态的方案^[8].1997 年,荷兰学者波密斯特和在奥地利留学的中国青年学者潘建伟等人合作,首次实现了未知量子态的远程传输^[8].裴昌幸等^[9]提出了一种基于纠缠态的量子中继通信系统,提高了量子通信系统的吞吐率,完善了量子中继器的预期性.胡钰安等^[10]提出了一个基于四粒子 GHZ 纠缠态实现未知单粒子态的可控量子双向传态方案,提高了整个双向隐形传态的安全性.彭永刚等^[11]用费米线性光学方法,提出了一种无相互作用费米量子信道物理模型,有助于量子信道容量的进一步研究.

自由空间量子通信主要包括量子卫星通信以及平流层量子通信.2012 年,中国科技大学潘建伟教授和他的同事完成“自由空间纠缠光子的分发”实验,首次成功实现百公里量级的自由空间量子隐形传态和纠缠分发^[12],为发射全球首颗“量子通讯卫星”奠定了技术

基础.对于量子卫星通信系统而言,量子信息在地卫之间进行传输时,不可避免地会受到环境噪声的影响.聂敏等^[13]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.聂敏等^[14]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质量的提高奠定了理论基础.任杰等^[15]研究了自然环境中多因子对自由空间量子通信性能的影响,为多种自然环境下自由空间的量子通信提供了参考依据.

由于量子光信号在地卫之间进行传输时,不可避免地会穿过 IWMC,进而会产生散射、吸收等消光效应,随着 IWMC 冰水含量比例的增加,该消光效应会愈加明显,严重影响量子卫星通信系统的通信性能.

本文根据 IWMC 中冰晶和水滴粒子的谱分布函数及消光因子,得到了 IWMC 的冰水含量比例与量子卫星通信信道之间的衰减关系;针对比特翻转信道和退化信道,分别建立了冰水含量比例与信道容量、信道保真度之间的方程;分析了冰水含量比例对量子卫星信道建立速率的影响,并进行了仿真验证.

1 IWMC 对量子卫星链路的影响

当地面和卫星之间进行通信时,量子信息在量子卫星链路中传输,必然会穿过 IWMC.其示意图如图 1.

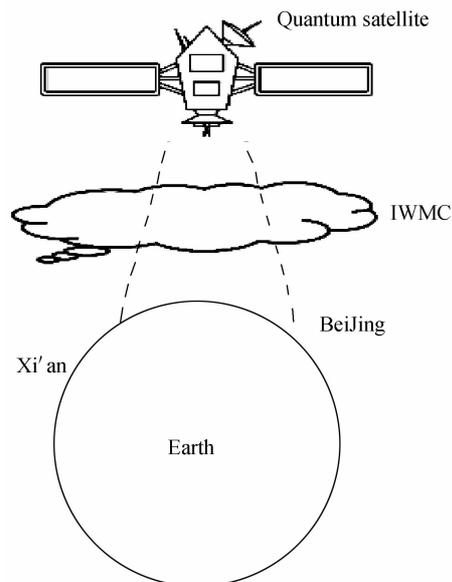


图 1 量子信息穿过 IWMC

Fig. 1 Quantum information passes through the IWMC

根据 Aden 和 Kerker 的同心散射理论^[4],可以将 IWMC 整体看成一个由表面融化成水的冰粒子组成,

其内部又由众多不同尺度的表面融化成水的冰粒子组成,而每个表面融化成水的冰粒子又可看成同心球.图2为同心球模型.同心球分为三个区域:1、2、3分别是内球、外壳以及外围媒介, a 、 b 分别为内球、外球半径,其中 a 是冰的半径^[16],区域1是冰,区域2是水.

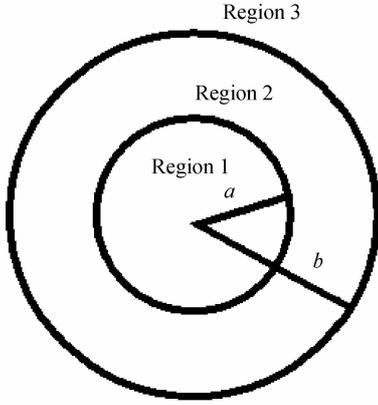


图2 同心球模型

Fig. 2 Concentric sphere model

在极端条件下,同心球模型内球半径很小或者内球半径与外球半径趋于相等时,同心球退化成不含壳层的单个球体粒子,即单个雨滴粒子或者冰晶粒子,而IWMC变为水云或者冰云.此时同心球理论与Mie理论结果相同^[2].因此同心球理论适用于冰云、水云以及IWMC的光散射特性计算.

IWMC的光散射特性是由大量不同尺寸同心球粒子的光学散射特性在确定尺度分布下的统计平均,因此IWMC的平均消光因子^[2]可以表示为

$$\langle Q_e \rangle_{\text{def}} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q_e(D) A(D) N_m(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} A(D) N_m(D) dD} \quad (1)$$

式中: D 是同心球粒子的直径; $A(D)$ 是同心球粒子的投影面积,取 $A(D) = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi b^2$; $N_m(D)$ 是同心球粒子的谱分布; D_{\max} 和 D_{\min} 是同心球粒子尺寸的上下限, $D_{\max} = 12.56 \mu\text{m}$, $D_{\min} = 1.256 \mu\text{m}$; $Q_e(D)$ 是同心球粒子的消光效率因子,可以表示为

$$Q_e(D) = Q_e(m, x) = \frac{2}{v^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2)$$

式中: m 是IWMC在入射波长 λ 下的复折射率^[16]; a_n 、 b_n 是米氏系数^[17]; x 与同心球粒子的尺度有关,可以表示为

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (3)$$

v 是尺寸系数,可以表示为

$$v = \frac{2\pi b}{\lambda} \quad (4)$$

冰晶谱分布^[5]为

$$N_i = N_{0i} \exp(-\lambda_i D_i) \quad (5)$$

式中: D_i 、 N_{0i} 和 λ_i 表示冰晶粒子的谱分布参量; D_i 表示冰晶粒子的直径, $18 \mu\text{m} \leq D_i \leq 334 \mu\text{m}$; N_{0i} 为冰晶数浓度, λ_i 表示冰晶粒子谱分布的斜率, $N_{0i} = 7.09 \text{ cm}^{-3}$, $\lambda_i = 158.0 \text{ cm}^{-3}$.

雨滴谱分布^[6]为

$$N_w = N_{0w} D_w^2 \exp(-\lambda_w D_w) \quad (6)$$

式中: N_{0w} 、 D_w 以及 λ_w 表示雨滴的谱分布参量; λ_w 表示雨滴谱分布的斜率, $\lambda_w = (10\pi\rho_L N_{0w}/Q_w)^{1/3}$; D_w 表示雨滴谱的直径, $D_w = 3\lambda_w^{-1}$; N_{0w} 表示雨滴数浓度, $N_{0w} = 342 \text{ cm}^{-3}$; Q_w 表示雨滴含水量, $Q_w = 2.276 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_L 表示雨滴的密度, $\rho_L = 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

因此,由IWMC同心球模型中的冰水含量比例,定义同心球粒子的谱分布为

$$N_m(D) = \frac{a^3}{b^3} N_{0i} \exp(-\lambda_i D_i) + \left(1 - \frac{a^3}{b^3}\right) N_{0w} D_w^2 \exp(-\lambda_w D_w) \quad (7)$$

当量子信息在地面卫星之间进行传输时,由IWMC所导致的能量衰减^[18]为

$$P = P_0 \exp[-\langle Q_e \rangle_{\text{def}} \cdot d] \quad (8)$$

式中, P_0 为量子信息的初始能量, P 为量子信息传输距离 d 后的能量.

若采用对数形式,可得IWMC的链路衰减因子为

$$Q_{\text{def}} = 10 \cdot \langle Q_e \rangle_{\text{def}} \cdot \lg e \cdot d \quad (9)$$

若采用波长为 $\lambda = 1.35 \mu\text{m}$ 的光信号在地卫之间进行量子通信,其余参量取值如表1.

表1 链路衰减参量取值

Table 1 The parameters of link attenuation coefficient

$a/\mu\text{m}$	m	$D_i/\mu\text{m}$	d/km
0.628	$1.327 - 3.23 \times 10^{-5}i$	158	1

IWMC的冰水含量比例与链路衰减的关系如图3.

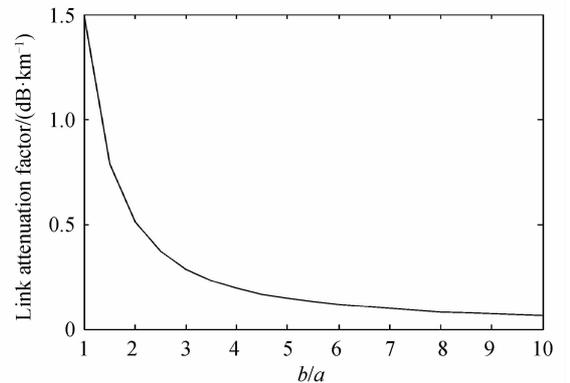


图3 IWMC的冰水含量比例与链路衰减的关系

Fig. 3 Relationship between link attenuation and ratio of ice and water in the IWMC

图3中X轴表示IWMC的冰水含量比例,取值范围为1~10;Y轴表示链路的衰减程度,单位为dB/km.当 $b/a = 1$ 时,可视为冰云,当 $b/a = 10$ 时,可视为水云^[2, 16],所以该取值范围表示冰云到水云的变化过程.

用同心球模型反演 IWMC^[3], 在极端条件下, 量子光信号在冰云和水云中的传输模型^[19]如图 4.

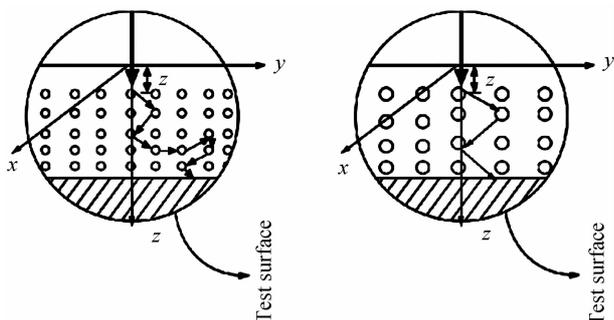


图 4 云层传输模型

Fig. 4 Model of the cloud transport

从图 3 和图 4 中可以看出, 保持冰晶粒子半径不变, 当水滴粒子半径增大时, 浓度减小, 粒子更加稀疏, 光子在水云内部发生的碰撞次数减少, 多次散射随之减少, 消光效应愈小. 因而随着 IWMC 的冰水含量比例的减少, 链路衰减急剧增加. 当 IWMC 的冰水含量比例为 2 时, 链路衰减已达 0.51 dB/km^[7]. 由此可见, 当 IWMC 的冰水含量比例越来越小时, 即 IWMC 中冰的含量越来越大时, 会严重影响量子卫星通信系统的性能.

2 IWMC 对信道容量的影响

量子信息在地卫之间传输时, 光量子态会和 IWMC 环境量子态的复合系统经受联合么正演变, 进而导致消相干^[18, 20].

2.1 比特翻转信道

对于比特翻转信道, 其运算元为

$$E_0 = \sqrt{p}I = \sqrt{p} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, E_0 表示比特翻转信道将量子比特的状态以概率 p 从 $|1\rangle$ 翻转到 $|0\rangle$, I 表示力学量算子.

$$E_1 = \sqrt{1-p}X = \sqrt{1-p} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, E_1 表示比特翻转信道将量子比特的状态以概率 $1-p$ 从 $|0\rangle$ 翻转到 $|1\rangle$, X 表示力学量算子.

量子系统经过比特翻转信道后的状态为

$$\epsilon(\rho_i) = (1-p_i)\rho_i + p_i X \rho_i X \quad (12)$$

式中, ϵ 表示状态, 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, 输入字符为 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|$, $\rho_2 = |1\rangle\langle 1|$, 则

$$\epsilon(\sum_i p_i \rho_i) = \epsilon[p_1 \rho_1 + p_2 \rho_2] = \begin{pmatrix} p+p_1-2pp_1 & 0 \\ 0 & 1-[p+p_1-2pp_1] \end{pmatrix} \quad (13)$$

对应的诺依曼熵为

$$A = S[\epsilon(\sum_i p_i \rho_i)] = -\{(p+p_1-2pp_1)\log(p+p_1-2pp_1) + [1-(p+p_1-2pp_1)]\log[1-(p+p_1-2pp_1)]\} = f(p+p_1-2pp_1) \quad (14)$$

式中, S 表示对状态 ϵ 求迹, f 表示平均自信息量.

最终收到的字符的诺依曼熵为

$$B = \sum_i p_i S[\epsilon(\rho_i)] = f(p) \quad (15)$$

因此比特翻转信道的信道容量为

$$C(p, p_1) = \max_{p_1} (C) = \max_{p_1} (A-B) = \max_{p_1} [f(p+p_1-2pp_1) - f(p)] \quad (16)$$

当 p_1 取 1/2 时, 式(16)取最大. 因此比特翻转信道的信道容量为

$$C_1 = 1 - f(p) \quad (17)$$

式中, p 为量子位在比特翻转信道中, 受 IWMC 影响丢失一个光子的概率^[14], 可以表示为

$$p = \frac{P_0 - P}{P_0} = 1 - \exp[-\langle Q_c \rangle_{\text{ref}} \cdot d] = 1 - 10^{-0.1Q_{\text{ext}} \cdot d} \quad (18)$$

对比特翻转信道的信道容量与 IWMC 的冰水含量比例进行仿真, 仿真结果如图 5.

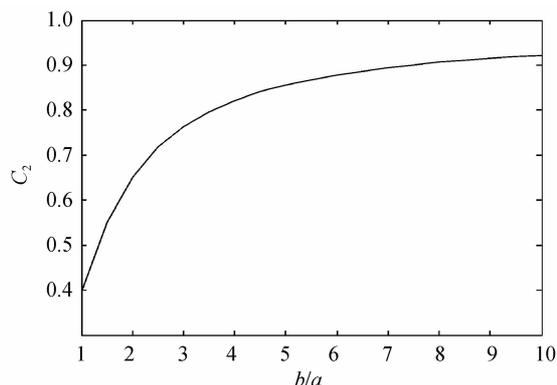


图 5 比特翻转信道的信道容量和 IWMC 冰水含量比例的关系

Fig. 5 Relationship between channel capacity of the bit flipping channel and ratio of ice and water in the IWMC

图 5 中 X 轴表示 IWMC 的冰水含量比例, 取值范围为 1~10; Y 轴表示比特翻转信道的信道容量, 取值范围为 0~1. 可以看出随着 IWMC 的冰水含量比例的增加, 比特翻转信道的信道容量呈指数增长. 当 IWMC 的冰水含量比例分别为 2 和 6 时, 比特翻转信道的信道容量分别为 0.65 和 0.88^[11]. 由此可见, 当 IWMC 的冰水含量比例越来越小时, 即 IWMC 中冰的含量越来越大时, 对比特翻转信道的信道容量的衰减越大.

2.2 退极化信道

对于退极化信道, 一个量子位的密度算子可以通过其自旋极化矢量 \mathbf{H} 来表示, 即

$$\rho = \frac{1}{2} (I + \mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \quad (19)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 表示力学量算符.

一个量子位的一般态与 IWMC 环境的联合演化可以表示为

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle)\rightarrow\alpha(|e_0\rangle|0\rangle+|e'_0\rangle|1\rangle)+\beta(|e_1\rangle|1\rangle+|e'_1\rangle|0\rangle) \quad (20)$$

式中, $|e\rangle$ 表示 IWMC 环境量子态, $\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$ 表示一个量子位的一般态, $|e_0\rangle$ 、 $|e'_0\rangle$ 和 $|e_1\rangle$ 、 $|e'_1\rangle$ 表示演化态中量子位态的对偶量子态, $|e_0\rangle|0\rangle+|e'_0\rangle|1\rangle$ 和 $|e_1\rangle|1\rangle+|e'_1\rangle|0\rangle$ 表示纠缠态。

一个量子位的一般态经过退极化信道后演变为

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle)\rightarrow(|e_+\rangle I+|e_-\rangle Z+|e'_+\rangle X+|e'_-\rangle Y)\otimes(\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle) \quad (21)$$

式中, Z 和 Y 表示力学量算子, $|e_+\rangle$ 、 $|e_-\rangle$ 、 $|e'_+\rangle$ 、 $|e'_-\rangle$ 表示四种特殊的 IWMC 环境量子态, \otimes 表示张量积, 即复合系统的状态。

若规定

$$\begin{cases} |e_+\rangle=|e_I\rangle \\ |e'_+\rangle=|e_X\rangle \\ |e_-\rangle=|e_Z\rangle \\ |e'_-\rangle=|e_Y\rangle \end{cases} \quad (22)$$

式中, $|e_I\rangle$ 表示 IWMC 环境的初态, $|e_X\rangle$ 、 $|e_Y\rangle$ 、 $|e_Z\rangle$ 表示三种等概率出现的错误 IWMC 环境量子态。

因此量子位和 IWMC 环境构成的复合系统的么正演化^[15]可以表示为

$$U:|\varphi\rangle|e_I\rangle\rightarrow\sqrt{1-p}I|\varphi\rangle\otimes|e_I\rangle+\sqrt{\frac{p}{3}}[X|\varphi\rangle\otimes|e_X\rangle+Y|\varphi\rangle\otimes|e_Y\rangle+Z|\varphi\rangle\otimes|e_Z\rangle] \quad (23)$$

式中, $|\varphi\rangle$ 表示量子位, p' 表示量子位经过退极化信道出错的概率。

别对正交基 $\{|e_I\rangle, |e_X\rangle, |e_Z\rangle, |e_Y\rangle\}$ 求偏迹, 可得到如下四个 Kraus 算子元素为

$$\begin{cases} A_0=\sqrt{1-p'}I, A_1=\sqrt{\frac{p'}{3}}X \\ A_2=\sqrt{\frac{p'}{3}}Y \\ A_3=\sqrt{\frac{p'}{3}}Z \end{cases} \quad (24)$$

由此可以得到 t 时刻量子位的密度算子^[21]为

$$\rho_A(t)=\frac{1}{2}\left[I+\left(1-\frac{4}{3}p'\right)H(0)\cdot\sigma\right] \quad (25)$$

式中, $H(0)$ 表示 0 时刻自旋极化矢量, 因此自旋化矢量 \mathbf{H} 是以 $\rho_A(t)=\frac{4}{3}p'$ 的概率退极化, 其中 $p'=\frac{3}{4}(1-10^{-0.1Q_m\cdot d})$ 。

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

$$C_2=1-f\left(\frac{1}{2}p_A(t)\right) \quad (26)$$

对退极化信道的信道容量和 IWMC 的冰水含量比例进行仿真, 仿真结果如图 6。

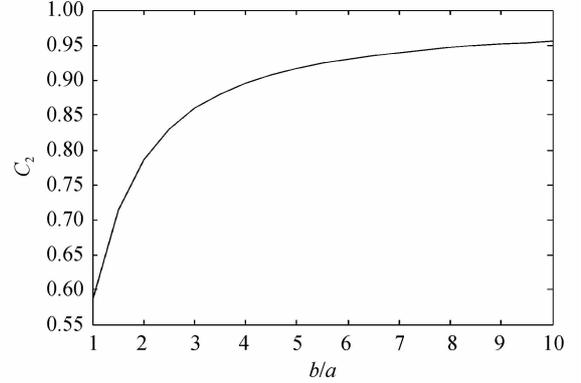


图 6 退极化信道的信道容量和 IWMC 冰水含量比例的关系

Fig. 6 Relationship between channel capacity of the depolarizing channel and ratio of ice and water in the IWMC

图 6 中 X 轴表示 IWMC 的冰水含量比例, 取值范围为 1~10; Y 轴表示退极化信道的信道容量, 取值范围为 0~1。可以看出随着 IWMC 的冰水含量比例的增加, 退极化信道的信道容量呈指数增长。当 IWMC 的冰水含量比例分别为 2 和 6 时, 退极化信道的信道容量分别为 0.79 和 0.93。由此可见, 当 IWMC 的冰水含量比例越来越小时, 即 IWMC 中冰的含量越来越大时, 对退极化信道的信道容量的衰减越大。

3 IWMC 对信道保真度的影响

定义 IWMC 信道的平均保真度^[14, 22] F 为

$$F\left(\sum_i p_i \rho_i, \varepsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right)\right)=\text{tr}\left\{\left[\left(\sum_i p_i \rho_i\right)^{1/2}\cdot\varepsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right)\times\left(\sum_i p_i \rho_i\right)^{1/2}\right]^{1/2}\right\} \quad (27)$$

式中, tr 表示求迹。

则比特翻转信道的平均保真度可以表示为

$$F_1=\sqrt{p_1(p+p_1-2pp_1)}+\sqrt{(1-p_1)[1-(p+p_1-2pp_1)]} \quad (28)$$

式中, p_1 表示信源输出符为 $|0\rangle$ 的概率, $1-p_1$ 表示信源输出符为 $|1\rangle$ 的概率。

退极化信道的平均保真度可以表示为

$$F_2=\sqrt{\frac{p'+2(1-p')p_1}{2}}p_1+\sqrt{\frac{p'+2(1-p')(1-p_1)}{2}}(1-p_1) \quad (29)$$

对 IWMC 的冰水含量比例、信源字符的概率以及信道的平均保真度进行仿真, 仿真结果如图 7。

图 7 中 X 轴表示 IWMC 的冰水含量比例, 取值范围为 1~10; Y 轴表示信源字符取 $|0\rangle$ 时的概率, 取值范围为 0~1; Z 轴表示信道的平均保真度, 取值范围为

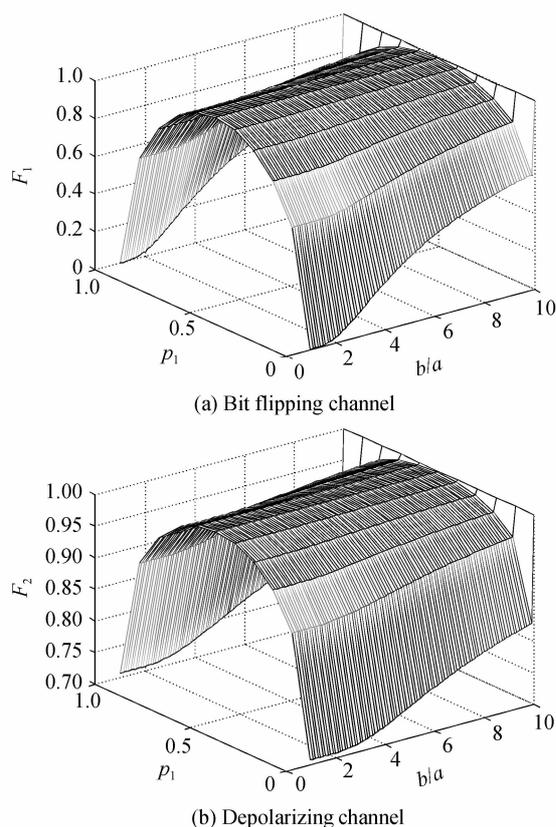


图7 信道的平均保真度

Fig. 7 The channel average fidelity

0~1.可以看出二图的共同点是:当信源字符 $|0\rangle$ 的概率一定时,比特翻转信道和退极化信道的平均保真度都随着IWMC的冰水含量比例的增大而增大.由此可见,当IWMC的冰水含量比例越来越小时,即IWMC中冰的含量越来越大时,对信道的平均保真度的衰减越大;当IWMC的冰水含量比例一定时,比特翻转信道和退极化信道的平均保真度都随着信源字符 $|0\rangle$ 的概率从0~0.5变化时,呈指数增长趋势;从0.5~1变化时,呈指数衰减趋势;当信源字符 $|0\rangle$ 的概率为0.5时,二者的信道平均保真度均达到最大值1;由于量子态与环境态对状态 $|1\rangle$ 和 $|0\rangle$ 的影响是等同的,因此信源字符 $|0\rangle$ 的概率取0~0.5和0.5~1时,都会出现相互对称的形式^[14].二图的异同点为:在本文所取IWMC的冰水含量比例和信源字符 $|0\rangle$ 的概率变化范围内,比特翻转信道的平均保真度在0~1之间变化;而退极化信道的平均保真度在0.7~1之间变化.由此可见,比特翻转信道的平均保真度变化幅度较大.

4 IWMC对信道建立速率的影响

二节点间量子卫星信道的建立速率^[23]为

$$R(F') = f_{\max} p_g(F') \quad (30)$$

式中, f_{\max} 为节点光子产生纠缠粒子操作的最大频率,可以表示为

$$f_{\max} = \frac{Mc}{4d} \quad (31)$$

式中, M 为节点纠缠粒子存储空间,取 $M=4m^2/3$, c 为光速; $p_g(F')$ 是节点产生一定保真度 F' 的纠缠粒子对的成功率,可以表示为

$$p_g(F') = 0.5 [1 - (2F' - 1)^{2\eta/(1-\eta)}] \quad (32)$$

式中, η 为衰减因子,可以表示为

$$\eta = e^{-\zeta d} \quad (33)$$

式中, ζ 为衰减率,可以表示为

$$\zeta = \rho = \frac{P_0 - P}{P_0} \quad (34)$$

当量子信息在IWMC中进行传输,传输距离 $d=2$ km时,对IWMC的冰水含量比例、节点产生的纠缠粒子对的保真度以及二节点间量子信道的建立速率进行仿真,仿真结果如图8.

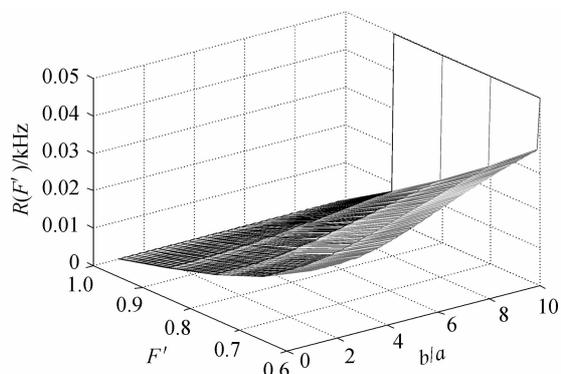


图8 IWMC的冰水含量比例、纠缠粒子对的保真度以及量子信道的建立速率的关系

Fig. 8 Relationship between ratio of ice and water in the IWMC and the fidelity of entangled particles, the quantum channel establishing rate

图8中X轴表示IWMC的冰水含量比例,取值范围为1~10;Y轴表示节点产生的纠缠粒子对的保真度,取值范围为0.6~1;Z轴表示二节点间量子信道的建立速率,单位为kHz.可以看出当纠缠粒子对的保真度一定时,随着IWMC的冰水含量比例的增加,二节点间量子信道的建立速率呈指数增长.当纠缠粒子对的保真度为0.8,IWMC的冰水含量比例分别为2和9时,二节点间量子信道的建立速率分别为7.40 Hz和15.57 Hz.由此可见,当IWMC的冰水含量比例越来越小时,即IWMC中冰的含量越来越大时,对量子卫星信道的建立速率的衰减越大.

5 结论

本文研究了IWMC对量子卫星通信性能的影响.根据IWMC中冰晶和水滴粒子的谱分布函数及消光因子,得到了IWMC的冰水含量比例与量子卫星通信信道之间的衰减关系;针对比特翻转信道和退极化信道,分别建立了冰水含量比例与信道容量、信道保真度

之间的方程;分析了冰水含量比例对量子卫星信道建立速率的影响。仿真结果表明,随着 IWMC 的冰水含量比例的减小,量子卫星的链路衰减越大,信道容量、信道保真度以及信道建立速率越小。所以,在量子卫星通信中,IWMC 的冰水含量比例等客观因素不容忽视,要根据具体的 IWMC 的冰水含量比例自适应调整系统的各项参量,从而降低背景噪声等对量子卫星通信性能的影响。根据本文的结论,若在 IWMC 模型中增加不同混合气体的消光特性,以此构建的模型将提高未来量子卫星通信的可靠性。

参考文献

[1] SUN Z, SHINE K P. Studies of the radiative properties of ice and mixed-phase clouds[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1994, **120**(515): 111-137.

[2] YAN Zhao-jun, HAN Fang-fang, YI Fan, *et al.* Study on ice-water mixed cloud radiation properties [J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(1): 56-60.
严赵军, 韩芳芳, 易凡, 等. 冰水混合云红外辐射传输特性研究[J]. *红外技术*, 2013, **35**(1): 56-60.

[3] YAN Zhao-jun, HE Cao, SHI Jun-qiang, *et al.* Ice-water mixed cloud are retrieved based on ice-water concentric spheres model[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, **12**(6): 35-39.
严赵军, 何超, 石俊强, 等. 利用冰水同心球模型反演冰水混合云[J]. *光学与光电技术*, 2014, **12**(6): 35-39.

[4] ADEN A L, KERKER M. Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres[J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, **22**(10): 1242-1246.

[5] CHENG Wan-kui, YAN Cai-fan. The size distribution of ice crystals within clouds[J]. *Meteorological Monthly*, 1987, **13**(11): 13-17.
陈万奎, 严采繁. 云中冰晶尺度谱特征与分布函数[J]. *气象*, 1987, **13**(11): 13-17.

[6] YAN Cai-fan, CHENG Wan-kui. Raindrop particle size distribution in the lower troposphere[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1990, **1**(2): 191-198.
严采繁, 陈万奎. 对流层下部雨滴谱分布[J]. *应用气象学*, 1990, **1**(2): 191-198.

[7] WU Ju-xiu, WEI Ming, HUANG Lei, *et al.* Back scattering and attenuation of non-spherical ice crystals with 94 GHz millimeter-wavelength[J]. *Journal of Meteorological Science*, 2016, **36**(1): 63-70.
吴举秀, 魏鸣, 黄磊, 等. 对非球形冰晶 94GHz 云雷达后向散射和衰减的研究[J]. *气象科学*, 2016, **36**(1): 63-70.

[8] SU Xiao-qing, GUO Guang-can. Quantum teleportation[J]. *Progress In Physics*, 2004, **24**(3): 259-273.
苏晓琴, 郭光灿. 量子隐形传态[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3): 259-273.

[9] PEI Chang-xing, YAN Yi, LIU Dan, *et al.* A quantum repeater communication system based on entanglement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2422-2426.
裴昌幸, 阎毅, 刘丹等. 一种基于纠缠态的量子中继通信系统[J], *光子学报*, 2008, **37**(12): 2422-2426.

[10] HU Yu-an, YE Zhi-qing. Controlled two-way quantum

teleportation via ghz quadripartite entangled state and security [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **43**(8): 0827001.

胡钰安, 叶志清. 基于四粒子 GHZ 态的可控量子双向隐形传态及安全性[J]. *光子学报*, 2004, **43**(8): 0827001.

[11] PENG Yong-gang, GONG Long-yan. Tensor product state capacity of non-interacting fermion quantum channel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1392-1396.
彭永刚, 巩龙葵. 无相互作用费米量子信道直积态容量研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1392-1396.

[12] YIN J, REN J G, LU H, *et al.* Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels[J]. *Nature*, 2012, **488**(7410): 185-188.

[13] NIE Min, SHANG Peng-gang, YANG Guang, *et al.* Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(24): 240303.
聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真[J]. *物理学报*, 2014, **63**(24): 240303.

[14] NIE Min, REN Jie, YANG Guang, *et al.* Influences of PM2.5 atmospheric pollution on the performance of free space quantum communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(15): 150301.
聂敏, 任杰, 杨光, 等. PM2.5 大气污染对自由空间量子通信性能的影响[J]. *物理学报*, 2015, **64**(15): 150301

[15] REN Jie, NIE Min, YANG Guang, *et al.* Influence of multiple factors of natural environment on the performance of free space quantum communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(12): 1227003.
任杰, 聂敏, 杨光, 等. 自然环境中多因子对自由空间量子通信性能的影响[J]. *光子学报*, 2015, **44**(12): 1227003.

[16] FENN R W, OSER H. Scattering properties of concentric soot-water spheres for visible and infrared light[J]. *Applied Optics*, 1965, **4**(11): 1504-1509.

[17] WISCOMBE W J. Improved mie scattering algorithms[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(9): 1505-1509.

[18] LANZAGORTA M. 量子雷达[M]. 周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 等. 译, 北京: 电子工业出版社, 2013: 15-17.

[19] 洪伟伟. 近红外光在云层中的传输特性与偏振分布研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 38-45.

[20] CAI Jia, GAO Juan, FAN Zhi-guo, *et al.* The polarization characteristic research of aerosol particles under the humidity influence[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(5): 639-644.
蔡嘉, 高隽, 范之国, 等. 湿度影响下的气溶胶粒子的偏振特性[J]. *发光学报*, 2013, **34**(5): 639-644.

[21] 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版, 2006: 227-228.

[22] NIELSEN M A, CHUANG I L. 量子计算和量子信息(二)[M]. 郑大钟, 赵千川, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005: 57-60.

[23] CHEN Peng, CAI You-xun, CAI Xiao-fei, *et al.* Quantum channel establishing rate model of quantum communication network based on entangled states[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(4): 040301.
陈鹏, 蔡有勋, 蔡晓菲, 等. 基于纠缠态的量子通信网络的量子信道建立速率模型[J]. *物理学报*, 2015, **64**(4): 040301.

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