

地空量子通信流程构建及策略分析

刘会亮¹, 吴军¹, 张帅², 王泽²

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 75837 部队, 广州, 510000)

摘要 针对预警机的地空量子通信问题, 首先对影响其传输信道的主要因素进行了分析。基于分析结果, 构建一地空量子通信流程, 可使地面站与预警机在双向对准和跟踪后进行量子态的无线传输; 基于该通信流程搭建一地空量子广域网, 网络由空中平台和地面通信端等设备组成, 根据不同的通信节点剖析 3 种路由策略, 验证其可行性; 最后对量子比特传输错误率进行分析, 仿真结果表明通过提高信道系数, 缩小测量基的偏差角度以及减少纠缠交换、经典信息引起的差错率, 可有效减小传输的误码率。

关键词 预警机; 地空量子通信; 量子广域网; 路由策略; 误码率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.009

中图分类号 TN914; TN929.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0052-07

An Analysis of the Process Construction of Air-to-Ground Quantum Communication and Analysis of Routing Strategy

LIU Huiliang¹, WU Jun¹, ZHANG Shuai², WANG Ze²

(1. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 75837, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In view of air-to-ground quantum communication of the AEW platform, in this paper, the main factors influencing transmission channel are analyzed. On the basis, a process of air-to-ground quantum is constructed to facilitate two-way pointing and tracking, and then to fulfill the transmission of quantum bits. A quantum wide-area network can be established based on this communication process, which is composed of multiple air-platforms, ground stations and etc. Three kinds of routing strategies are proposed, and then analyzed based on the different communication nodes, and its feasibility is verified. Finally, the quantum bit error rate of the transmission is analyzed. The simulation results show that the improvement of channel coefficient, the reduction in the deviation angle of measurement based, error caused by entanglement swapping and classical information can result in a decrease of the transmission error rate.

Key words: AEW platform; air-to-ground quantum communication; quantum wide-area network; routing strategy; error rate

在现代战争中, 预警机作为预警探测与作战指挥平台, 承担着战场信息交互的重任。在实际作战

中, 确保预警机与地面作战单元之间的信息传输高度可靠、绝对保密, 极为重要。近年来, 量子通信技

收稿日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61503409)

作者简介: 刘会亮(1996—), 男, 湖北黄石人, 硕士生, 主要从事作战筹划方面的研究。E-mail: 1031573962@qq.com

引用格式: 刘会亮, 吴军, 张帅, 等. 地空量子通信流程构建及策略分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 52-58. LIU Huiliang, WU Jun, ZHANG Shuai, et al. An Analysis of the Process Construction of Air-to-Ground Quantum Communication and Analysis of Routing Strategy[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 52-58.

术迅猛发展^[1-3],如何将量子通信技术运用到预警机的地空通信中,成为亟需解决的问题^[4]。

量子通信根据传输信道不同,分为光纤量子通信和自由空间量子通信^[5-6]。其中,空中平台与地面平台的自由空间量子通信,称为地空量子通信^[7],其运用量子技术,通过构建量子网络进行保密通信,网络中包括多个空中通信平台、量子光学地面站(Quantum Optical Ground Station, QOGS)以及若干地面通信节点。关于地空量子通信,中科院团队^[8]研究了有关量子光学地面站与空中平台的捕获跟踪瞄准技术;任杰等^[9]分析了平流层平台与地面平台量子通信的链路衰减模型。2012年,中科大的潘建伟团队^[10]实现了距离97 km的自由空间量子隐形态传输,为低轨量子卫星实现地空量子通信的有关理论研究提供了有力验证。2013年,德国航空航天中心通信与导航研究所发表了有关实现量子地空通信的文章^[11],他们的实验有效证明了地面站与空中快速移动平台进行量子通信的可行性^[12-13]。

目前有关自由空间量子通信的文章不少,但关于其在军事通信领域应用的研究较为匮乏,且传输信道容易受各种因素影响进而导致传输错误。本文以军用预警机^[14-15]的地空通信为研究背景,基于量子通信构建一套传输方案,旨在为地空量子通信在军事通信领域的应用提出一方案设想,并为提高其传输的可靠性、安全性与准确性提供参考。论文首先分析大气因子对通信传输信道的影响,在此基础上,构建包括ATP对准系统和量子光通信系统在内的地空量子通信流程;基于该流程提出一地空量子广域网,根据网络的不同节点分析路由策略;最后对量子比特传输错误率进行分析,得出有效减小传输误码率的方案,相比传统的传输方式,能够建立更加可靠稳定的地空量子信道。

1 地空量子通信影响因素分析

在地面站和空中预警机的通信过程中,大气因子会对量子信息的传输造成链路衰减^[9],影响较大,下面对其进行分析。

假设在完全干燥的环境中,颗粒物粒径为 D_{oi} ,在大小不等的颗粒物中,若其 D_{oi} 过小,对链路衰减影响甚微,可忽略;而 D_{oi} 过大对链路造成明显的阴影和堵塞,使误码率急剧上升,不利于正常通信,应避开此区域;综上分析,本文仅考虑粒径在 $0.5 \mu\text{m} \leq D_{oi} \leq 10 \mu\text{m}$ 范围内的颗粒物分布,另外,地空量子通信一般选择波长为 $\lambda_1 = 1.06 \mu\text{m}$ 或 $\lambda_2 = 0.8$

μm 的红外波作为光子信令的传输载体^[3]。

在不同环境中,颗粒物的 D_{oi} 会随湿度不同而发生变化。设空气湿度为 h , D_i 表示颗粒物 D_{oi} 的粒径, d 为湿度常数,可得:

$$D_i = (1-h)^{-(1/d)} D_{oi} \quad (1)$$

参考相关文献^[16-17],在空气湿度为 h 的大气环境中,颗粒物的分布函数 $N(D_i)$ 为:

$$N(D_i) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}\lg\delta_j} \exp\left[-\frac{(\lg D_i - \lg D_m)^2}{2(\lg\delta_i)^2}\right] = \frac{C_j}{\sqrt{2\pi}\lg\delta_j} \exp\left\{-\frac{[\lg(1-h)^{-1/d} D_{oi} - \lg D_m]^2}{2(\lg\delta_i)^2}\right\} \quad (2)$$

式中: C_j 表示颗粒物的浓度,取值范围为 $0 \mu\text{g}/\text{m}^3 < C_j \leq 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$; D_m 为颗粒物的平均粒径; δ_i 、 δ_j 表示 D_i 和 D_j 的标准差。

设 x_i 表示颗粒物的尺寸系数,其表达式为:

$$x_i = 2\pi D_i / \lambda_k \quad (k=1, 2) \quad (3)$$

各粒子的消光因子 $Q(m_i, x_i)$ 为:

$$Q_i(m_i, x_i) = \frac{2}{x_i^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (4)$$

式中: a_n 、 b_n 为米氏系数; m_i 表示粒子的复折射率。

设 $C = C_1 + C_2 + \dots + C_i + \dots$,不同粒径的颗粒物,浓度 C_i 不一定相同, p_i 表示为:

$$p_i = C_i / C \quad (5)$$

由米氏散射理论^[18],得信道的消光系数 A_F 为:

$$A_F = \frac{\pi}{4} \int_{0.5}^{10} D^2 N(D) Q(m, x) dD = p_1 \frac{\pi}{4} \int_{0.5}^{10} D_1^2 N(D_1) Q_1(m_1, x_1) dD_{o1} + p_2 \frac{\pi}{4} \int_{0.5}^{10} D_2^2 N(D_2) Q_2(m_2, x_2) dD_{o2} + \dots + p_i \frac{\pi}{4} \int_{0.5}^{10} D_i^2 N(D_i) Q_i(m_i, x_i) dD_{oi} \quad (6)$$

假设不考虑其它因素对光子信令传输的影响,只讨论颗粒物、空气湿度 h 与链路衰减的关系,根据式(1)~(6),光子信令在大气环境中的链路衰减 A 可表示为:

$$A = 10 A_F \lg e \quad (7)$$

根据式(7),对大气环境中颗粒物浓度 C 、空气湿度 h 与链路衰减 A 进行分析,仿真得到它们的关系曲线如图1所示。

由仿真结果可知,当颗粒物浓度和空气湿度都趋近于零时,几乎没有链路衰减,此时信道最为理想。进一步分析,当浓度 C 不变时,随着环境湿度 h 增大,链路衰减小幅增加;而当湿度 h 不变时,随着浓度 C 增大,链路衰减 A 大幅增长。由此,可看出空中颗粒物的浓度是影响通信链路衰减的主要

因素。

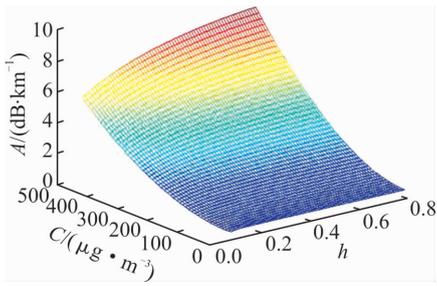


图1 颗粒物浓度与空气湿度对链路衰减的影响

由米氏散射理论,根据式(6)、(7)可知,当信令光波长 λ_k 与粒径 D 的数值相近时,链路衰减 A 的数值会比较;因此,需根据具体情况选择合适波长的信令载体,避免多余的链路衰减。

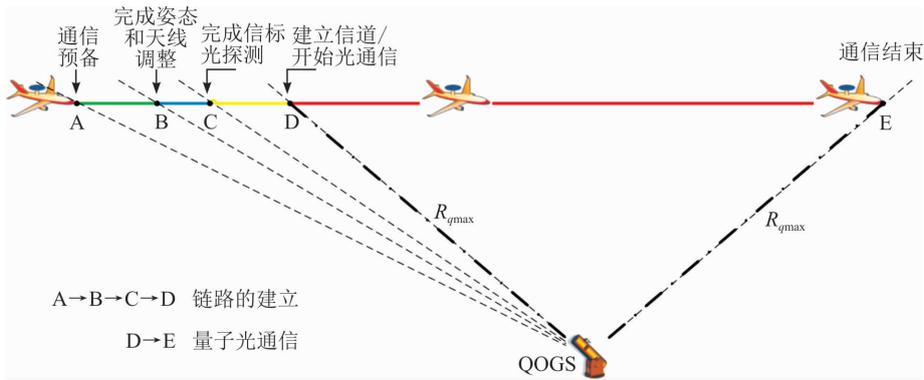


图2 地空量子通信流程示意图

2.1 ATP 对准流程

ATP 对准作为地空量子通信系统的重要组成部分,是建立高效稳定量子信道的前提,由其建立的链路直接影响后续量子光通信的质量。ATP 对准具体流程如下:

1) 预警机在 A 点时,机载通信设备将其路由信息打包成 IP 数据包,通过经典信道发送到地面站 QOGS,即发送预备通信指令,并等待 QOGS 的回复;

2) QOGS 对 IP 数据包进行判定,判定通过, QOGS 将路由信息返回给预警机,即确认通信;在收到 QOGS 回复后,从 A 点飞往 B 点的过程中,预警机根据 QOGS 的具体位置,对飞行姿态和机载量子天线的方向进行调整;

3) 预警机到达 B 点时,完成对飞行姿态和设备天线的调整,随即开始对 QOGS 进行光学定向;

4) 从 B 点到 C 点,机载量子天线开始搜索和捕获 QOGS 以预警机为圆心发射的信标光;

5) 当预警机到达 C 点时,设备完成对 QOGS 信标光的捕获;

6) 在飞往 D 点过程中,预警机的机载量子通信设备先后对 QOGS 进行粗跟踪和精跟踪,在完成闭

2 地空量子通信流程构建

地空量子通信系统分为 2 部分:对准系统^[7,19] (Acquisition, Tracking and Pointing, ATP) 和量子光通信系统。在执行通信任务之前,系统会依据环境情况、空间位置、任务区域以及信息误码率阈值等要素,估算出通信的最大可靠距离 R_{qmax} , 然后根据 R_{qmax} 数值和相关参数,构建地空量子通信的流程。由图 2 所示,构建的流程可分为 A→B→C→D→E。其中,A→B→C→D 表示链路建立的过程,即 ATP 对准过程,这个过程耗时较短;D→E 表示量子光通信过程。

环回路后,反向瞄准发射信标光到 QOGS,对其俯仰角的精度进行微调;

7) 飞机到达 D 点,完成地空双向对准与跟踪,地面站准备分发纠缠资源以建立量子信道,此时 QOGS 与预警机的距离为 R_q ($R_q \leq R_{qmax}$)。

综上,简要过程如图 3 所示。

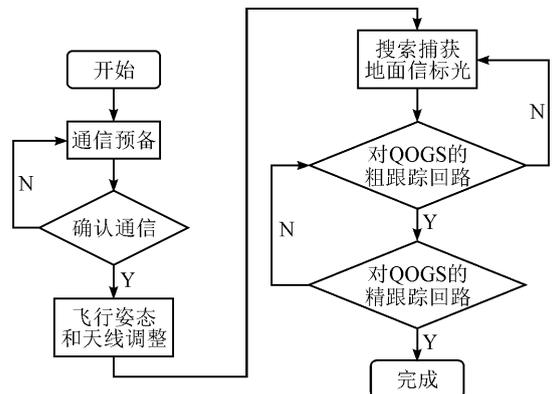


图3 ATP 对准流程图

2.2 量子光通信流程

量子光通信系统主要负责对量子态信息的传输,其中,量子光学地面站 QOGS 负责纠缠资源光子信令的生成和分发。根据前文分析,在量子光通信过程中,大气因子会对量子信息的传输造成

链路衰减,因此需要根据环境的具体情况适时选择合适波长的信令载体,降低系统损耗率,以保障地空量子通信的顺利进行。下面具体分析量子光通信流程。

在完成地空双向对准和跟踪后,预警机从D点飞往E点,即量子光通信过程;假设要传输 n 位量子态信息 $(|\varphi\rangle_1, |\varphi\rangle_2, |\varphi\rangle_3 \cdots |\varphi\rangle_n)$,具体流程如下:

1) QOGS制备 $n+y$ 对EPR光子,分为序列 S_1 和 S_2 ,序列 S_1, S_2 中各光子一一对应满足纠缠关系,随后QOGS将序列 S_2 传输给预警机;

2) 预警机收到序列 S_2 后,随机选择不同基底的测量基对其中的 y 个光子进行测量,得到测量结果后,再将使用过的测量基的基底信息和测量结果通过经典信道传输给QOGS;

3) QOGS收到信息,在比对后得到误码率,通过分析可判断通信的安全性;

4) 判断安全后,可知序列 S_1 和 S_2 使得预警机已和QOGS建立了纠缠关系,因此,可通过一系列量子门运算完成量子态隐形传输^[20],实现量子信息的安全传输;

5) 预警机通过E点,超过最大可靠距离 R_{max} ,量子信道断开,飞机撤离通信区域。

3 地空量子广域网

基于以上通信影响因素分析和地空量子通信流程,可构建一地空量子广域网络模型。

3.1 网络基本结构

地空量子广域网结构类似于蜂窝网络(Cellular Network)^[21],这种结构能够使有限的QOGS节点覆盖最大面积的通信区域。

地空量子广域网由空中通信端、QOGS、位置数据库(Position Warehouse, PW)和地面通信端组成。其中,QOGS可与在其通信覆盖范围内的预警机、地面通信节点以及相邻的QOGS进行量子数据交换,可生成和分发纠缠粒子;另外,它还可以作为网络中量子中继节点,进行远程数据的传输。

每个QOGS配备了位置数据库PW,可对该QOGS覆盖范围内的所有通信节点进行地址管理,为通信过程提供辅助信息;各PW互联互通,可实时更新和查询网络各通信节点的地址信息。

如图4所示,由多个QOGS、PW和地空通信节点组成地空量子广域网。其中,单个圆表示以QOGS和PW为控制中心的量子局域网^[22],圆心为地面站QOGS和数据库PW的所在位置,半径

R_{max} 为每个QOGS的最大覆盖距离。

在广域网中,各地面通信节点通过光纤信道与所在局域网内的QOGS连接,进而通过QOGS进行量子信息的传输;QOGS与QOGS之间通过地面光纤连接,并运用纠缠交换技术建立量子中继节点,实现本地通信节点与外地通信节点的远程信息传输;预警机通过地空量子通信链路与本地QOGS建立连接,实现与地面通信节点或其他空中通信节点的量子信息传输。

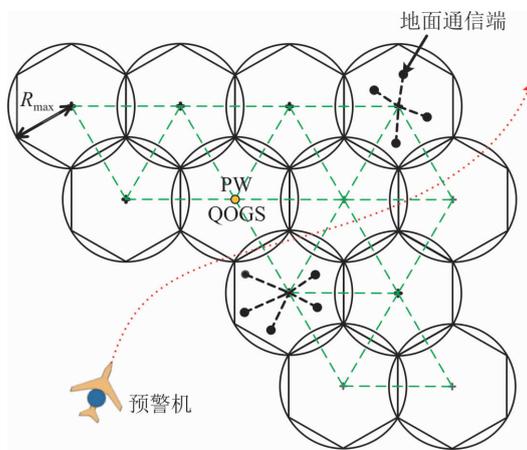


图4 地空量子广域网

3.2 路由策略分析

在该广域网中,假定某一空中节点准备发送信息给另一通信节点,我们称前者为Alice,后者为Bob、Candy或David,为建立其中的路由连接,对3种典型情况进行分析,并分别讨论其路由策略。

如图5所示,Alice与David为空中通信端,Bob和Candy为地面通信端;Alice处于地面站QOGS1的覆盖范围内,Bob是QOGS1局域网的通信端,Candy是QOGS3局域网的通信端,David处于QOGS4的覆盖范围内。

初始状态,Alice向地面站QOGS1发送通信请求。

3.2.1 Alice↔Bob路由策略

1) 在收到Alice的请求后,QOGS1通过本地数据库PW,查询到在本地局域网内Bob的地址,可知Alice与Bob都在地面站QOGS1的通信覆盖范围内;

2) QOGS1通过经典信道将Alice的通信请求转发给Bob,等待通信的确认;

3) 待双方都确认通信后,QOGS1生成纠缠粒子(EPR)对序列,并分发给Alice和Bob,建立量子信道。

综上,Alice与Bob的路由策略为: Alice↔QOGS1↔Bob。

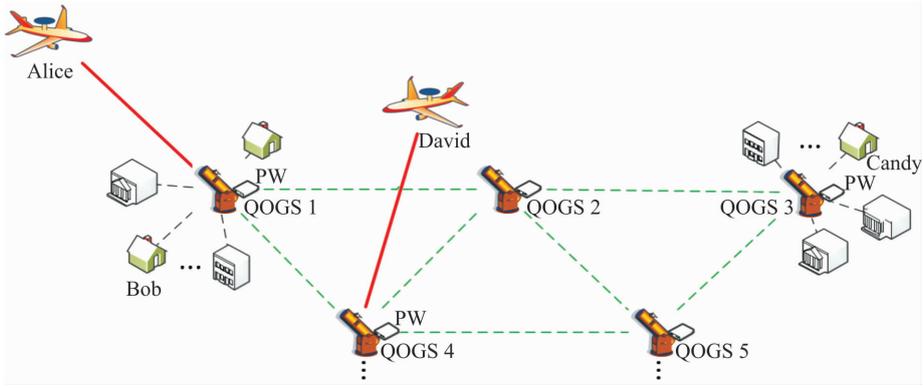


图5 网络路由策略分析示意图

3.2.2 Alice↔Candy 路由策略

1) QOGS1 在收到请求后,本地 PW 没有找到 Candy 的地址,PW 随即查询其他位置数据库的地址信息;

2) 在 QOGS3 的局域网络中查找到 Candy 的地址,可知 Alice 与 Candy 不属于同一 QOGS 的覆盖范围;

3) 待双方确认通信后,QOGS1 生成 EPR 对序列 1、2 分别发给 Alice 和 QOGS2,QOGS3 生成 EPR 对序列 3、4 分别发给 QOGS2 和 Candy;

4) 地面站 QOGS2 同时拥有纠缠粒子序列 2 和序列 3,将两序列的粒子一一对应,对其进行 Bell 测量,即通过纠缠交换,以 QOGS2、QOGS3 作为量子中继,使分别处于 Alice 和 Candy 的纠缠序列 1、4 产生纠缠关系,建立量子信道。

综上,Alice 与 Candy 的路由策略为: Alice↔QOGS1↔QOGS2↔QOGS3↔Candy。

3.2.3 Alice↔David 路由策略

1) QOGS1 收到请求,David 为空中通信节点,通过 PW 查询,David 该时刻正处于 QOGS4 的通信区域内,即 Alice 与 David 不属于同一 QOGS 的覆盖范围;

2) 待双方确认通信后,QOGS1 生成 EPR 序列 1、2,QOGS4 生成 EPR 序列 3、4,通过无线接口经地空链路将序列 1、3 各自分发给 Alice 和 David,通过有线接口,QOGS1 将序列 2 分发给 QOGS4,QOGS4 保留序列 4;

3) 最后,QOGS4 将序列 2 和序列 4 进行 Bell 测量,使得序列 1 与序列 3 中对应的粒子建立纠缠关系,即 Alice 与 David 之间建立量子信道。

综上,Alice 与 David 的路由策略为: Alice↔QOGS1↔QOGS4↔David。

3.3 量子比特传输错误率分析

通过上述的路由策略分析,地空量子网络中各通信节点得以顺利进行信息的传输,但存在一些因

素,会对量子比特的传输造成影响,导致其传输错误,其中影响较大的有大气环境、纠缠度损耗、ATP 对准精度、测量基偏差、经典信息的传输错误和外界的噪声干扰^[6]。

为提高信息在地空量子通信网络中传输的准确性与可靠性,首先建立单个量子比特错误概率模型,并对其中影响关系进行分析,基于此,得出有效降低错误率的参考依据。设由信道噪声引起比特错误率为 P_n ;由测量基与制备基的角度偏差引起比特错误率为 P_m ;由经典信息引起的比特错误率为 P_c ;由纠缠交换引起比特错误率为 P_e 。已知事件 P_n 、 P_m 、 P_c 和 P_e 之间相互独立,得到传输单个量子比特的错误概率 P_S 为:

$$P_S = 1 - (1 - P_n)(1 - P_m)(1 - P_c)(1 - P_e) \quad (8)$$

式中: P_n 可表示为:

$$P_n = (1 - 2|r|^2)(1 + \sigma), |r| < 1/\sqrt{2} \quad (9)$$

式中: r 为归一化信道系数; σ 为 ATP 精度对准系数;链路衰减 A 越小,信道系数 r 就越大;ATP 对准精度越高, σ 数值就越小。

考虑由测量基与制备基的角度偏差引起的比特错误率。由 QOGS 制备生成纠缠粒子序列,其最大纠缠态为: $|\varphi\rangle = (|00\rangle \pm |11\rangle)/\sqrt{2}$ 。经信道传输后,演化为部分纠缠态: $|\varphi'\rangle = a|00\rangle \pm b|11\rangle$, $\|a\|^2 + \|b\|^2 = 1$,其中 $|x\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ 对应编码 0, $|y\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ 对应编码 1。

设测量基与制备基的角度偏差为 θ ,制备基为 $\{|x\rangle, |y\rangle\}$,测量基为 $\{|x(\theta)\rangle, |y(\theta)\rangle\}$,可表示为 $|x(\theta)\rangle = \cos\theta|x\rangle + \sin\theta|y\rangle$ 和 $|y(\theta)\rangle = -\sin\theta|x\rangle + \cos\theta|y\rangle$ 。

定义信息接收方的测量算符 $M_0 = |x(\theta)\rangle\langle x(\theta)|$ 、 $M_1 = |y(\theta)\rangle\langle y(\theta)|$,可得到每次测量的错误率 P_m 为:

$$P_m = 1 - \frac{1}{2}(\langle x|M_0|x\rangle + \langle y|M_1|y\rangle) = \sin^2\theta \quad (10)$$

分析纠缠交换引起的比特错误率。在预警机与

地面站 QOGS 的通信中,光子信令的纠缠度 E_{xy} 数值不断变化,由小到大,再到小,期间不可避免会造成纠缠度丢失,从而引起信息比特错误,令 η 为纠缠度系数,则:

$$P_e = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (11)$$

由式(8)~(11),得到量子比特的错误率 P_Σ 为:

$$P_\Sigma = 1 - (1 - P_n)(1 - P_m)(1 - P_c)(1 - P_e) = 1 - [1 - (1 - 2|r|^2)(1 + \sigma)](1 - \eta)^2(1 - P_m) \cdot (1 - P_c) = 1 - [1 - (1 - 2|r|^2)(1 + \sigma)] \cdot (1 - \eta)^2(1 - \sin^2\theta)(1 - P_c) \quad (12)$$

根据上式,分析量子比特错误率 P_Σ 与信道系数 r 的关系,取 $\eta = 10^{-4}$, $\theta = 10^{-5}$, $P_c = 10^{-6}$,如图 6 所示,比特错误率 P_Σ 随着信道系数 r 的增大而减小,在 r 到达 $\sqrt{2}$ 时, P_Σ 趋近于最小值。

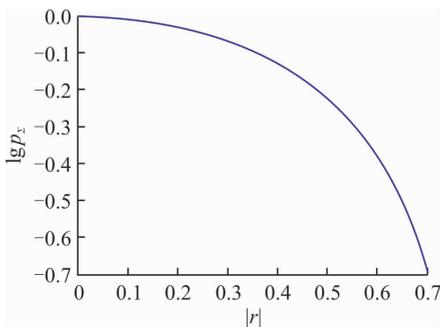


图 6 P_Σ 与信道系数 r 关系曲线 1

当 η 取不同值时,比特错误率 P_Σ 随量子信道系数 r 的变化曲线,如图 7 所示。随着 η 数值的减小, P_Σ 的数值降低得也就越快,在 $\eta < 10^{-4}$ 时, P_Σ 曲线趋近于临界值,变化趋势不再明显。

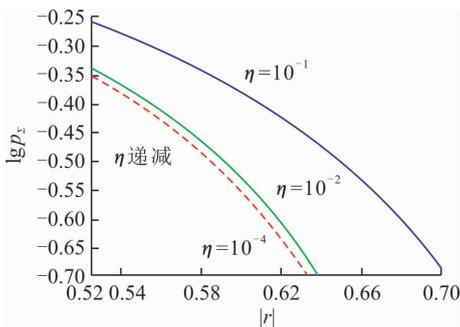


图 7 P_Σ 与信道系数 r 关系曲线 2

分析 r 在取不同值时 ($r = 1/\sqrt{2} - 10^{-4}$, $1/\sqrt{2} - 10^{-5}$, $1/\sqrt{2} - 10^{-6}$, $1/\sqrt{2}$), 错误率 P_Σ 与角度偏差 θ 的关系;取 $\eta = 10^{-6}$, $P_c = 10^{-7}$,如图 8 所示。

当 r 数值一定时,错误率 P_Σ 随着角度偏差 r 的增大而增大;但随着 θ 数值的减小, P_Σ 的数值减小,且当 $r \leq 1/\sqrt{2} - 10^{-6}$ 时, P_Σ 处于较低的数值,量子信道的性能得到明显提高。

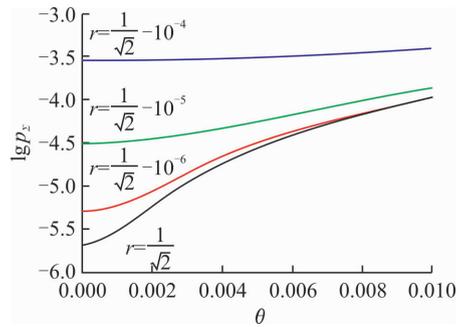


图 8 P_Σ 与角度偏差 θ 关系曲线

通过以上分析,可知若要降低量子比特错误率 P_Σ ,提高信息传输的准确度,需提高其信道系数,减少测量基与制备基的角度偏差 θ ,同时还需减小由纠缠交换和经典信息引起的差错率。

4 结语

本文通过颗粒物模型分析,得知大气中的颗粒物浓度是影响地空链路衰减的主要因素,可通过对大气环境的实时监控,以及选择合适波段的信令载体,减小链路的衰减,基于此,提出一种地空量子信息的传输方案,以军用预警机为空中平台构造一种传输模型,并对传输错误率进行分析,得出有效减小错误率的方案,相比于传统的传输方式,能建立更加可靠稳定的地空量子信道,为地空量子通信的研究及其在军事通信领域的应用提供了一定参考。

参考文献(References):

- [1] 龙桂鲁,王川,李岩松,等. 量子安全直接通信[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2011, 41(4):382-386. LONG G L, WANG C, LI Y S, et al. Quantum Secure Direct Communication[J]. Science Sinica Phys, Mech Astron,2011, 41(4):382-386. (in Chinese)
- [2] 裴昌幸,朱畅华,聂敏,等. 量子通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2013. PEI C X, ZHU C H, NIE M, et al. Quantum Communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 吴华,王向斌,潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学:信息科学,2014, 44(3):296-311. WU H, WANG X B, PAN J W. Quantum Communication: Status and Propects[J]. Science Sinica Informationis, 2014, 44(3): 296-311. (in Chinese)
- [4] 尹浩,马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京:军事科学出版社,2006:185-189. YIN H, MA H X. Introduction to Military Quantum Communication[M]. Beijing: Military Science Publishing House, 2006: 185-189. (in Chinese)

- [5] PATEL K A, DYNES J F, CHOI I, et al. Coexistence of High-Bit-Rate Quantum Key Distribution and Data on Optical Fiber[J]. *Physical Review X*, 2012, 2(4):773-777.
- [6] 阎毅. 自由空间量子通信若干问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.
YAN Y. Research on Quantum Communication in Free Space[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [7] 亓波. 量子通信光学地面站 ATP 关键技术研究[D]. 中国科学院大学, 2014.
QI B. Study on Acquisition, Tracking and Pointing Key Technology of Optical Ground Station for Quantum Communication [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [8] 杨海马. 自由空间量子密钥分配中运动平台姿态跟踪关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
YANG H M. Research on the Key Technology of Motion Platform Attitude Tracking in Free Space Quantum Key Distribution [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2015. (in Chinese)
- [9] 任杰, 裴敏, 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): 140-144.
REN J, NIE M, YANG G, et al. Effects of Multiple Factors in Natural Environment on Quantum Communication Performance in Free Space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(12):140-144. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] NAUERTH S, MOLL F, RAU M, et al. Air-to-Ground Quantum Communication[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5):382-386.
- [12] MOLL F, WEINFURTER H, RAU M, et al. Aerospace Laser Communications Technology as Enabler for Worldwide Quantum Key Distribution[C]// SPIE 9900, *Quantum Optics*. Brussels, Belgium: SPIE, 2016:232-241.
- [13] MOLL F, NAUERTH S, FUCHS C, et al. Communication System Technology for Demonstration of BB84 Quantum Key Distribution in Optical Aircraft Downlinks[M]// *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2012.
- [14] STACEY D. *Aeronautical Radio Communication Systems and Networks*[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [15] LONG M L. *Airborne Early Warning System Concepts*[M]. [S.l.]: Lincoln Laboratory, 2004.
- [16] 闵星, 李兴财, 李新碗, 等. 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(1):405-412.
MIN X, LI X C, LI X W, et al. Effect of Charged Sandstorm on Electromagnetic Wave Propagation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 405-412. (in Chinese)
- [17] 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.
CAI J, GAO J, FAN Z G, et al. The Polarization Characteristic Research of Aerosol Particles Under The Humidity Influence [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 639-644. (in Chinese)
- [18] 沈法华, 王忠纯, 刘成林, 等. 米氏散射多普勒激光雷达探测大气风场[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1537-1541.
SHEN F H, WANG Z C, LIU C L, et al. Measurement on Wind Field with Mie Doppler Lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1537-1541. (in Chinese)
- [19] 钱锋. 星地量子通信高精度 ATP 系统研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
QIAN F. Research on the High Precision ATP System in Satellite-to-Earth Quantum Communications [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [20] BENNETT C H, BRASSARD G, CRÉPEAU C, et al. Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(13):1895.
- [21] 藤颖蕾, 宋梅, 刘梦婷. 蜂窝异构网络基础理论及其关键技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2016: 223.
TENG Y L, SONG M, LIU M T. *Fundamental Theories and Key Technologies of Cellular Heterogeneous Networks*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2016: 223. (in Chinese)
- [22] 张帅, 吴军, 张欢, 等. 基于纠缠交换协议的令牌环局域网网络传输模型[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 18(4): 46-52.
ZHANG S, WU J, ZHANG H, et al. Transmission Model of LAN of Token-Ring Based on Quantum Entanglement Swapping Protocol [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2017, 18(4): 46-52. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)