

## 星地云层信道连续变量量子密钥分发密钥率研究

禹钧译<sup>1</sup>,杨林峰<sup>1\*</sup>,张振荣<sup>1</sup>,刘奥<sup>2</sup>,程锦<sup>2</sup>,陈宇杰<sup>2</sup>,陈兰剑<sup>2</sup>

(1.广西大学 计算机与电子信息学院,南宁 530004;2.国防科技大学 信息通信学院,武汉 430033)

**摘要:**为评估连续变量量子密钥分发(CV-QKD)在实际星地云层信道下的性能,基于STK-Matlab联合仿真平台,建立了星地云层信道CV-QKD模型,引入液态水含量与能见度关系,仿真分析了不同类型云层在不同轨道条件下的密钥率。仿真结果表明:高能见度云层(卷云)对密钥率影响较小,4 km厚度下密钥率仍可达 $7.8 \times 10^4$  b/s;而当云层厚度仅为30 m时,密钥率从无云条件下的 $8.2 \times 10^4$  b/s骤降至 $2.4 \times 10^4$  b/s,严重影响通信可行性;低轨道(高度为800 km)在兼顾系统覆盖能力与密钥生成性能方面具有优势;1 550 nm波长在高能见度条件下穿透性能更优。

**关键词:**量子密钥分发;自由空间;高斯调制;云层衰减信道

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)01-0111-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.019

## Research on key rate of continuous-variable quantum key distribution in satellite-to-ground cloud channel

YU Junyi<sup>1</sup>, YANG Linfeng<sup>1\*</sup>, ZHANG Zhenrong<sup>1</sup>, LIU Ao<sup>2</sup>, CHENG Jin<sup>2</sup>, CHEN Yujie<sup>2</sup>, CHEN Lanjian<sup>2</sup>

(1. School of Computer and Information Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. School of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** To evaluate the performance of continuous-variable quantum key distribution (CV-QKD) in actual satellite-to-ground cloud channels, a satellite-to-ground cloud channel CV-QKD model is established based on an STK-Matlab co-simulation platform. By introducing the relationship between liquid water content and visibility, the key rates under different types of clouds and varying orbital conditions are simulated and analyzed. The simulation results show that high-visibility clouds(cirrus) have a minor impact on the key rate, which can still reach  $7.8 \times 10^4$  b/s under a 4 km thickness. In contrast, when the stratus cloud thickness is only 30 m, the key rate drops sharply from  $8.2 \times 10^4$  b/s under cloudless conditions to  $2.4 \times 10^4$  b/s, severely affecting communication feasibility. Low earth orbit(at an altitude of 800 km) offers advantages in balancing system coverage capability and key generation performance. The 1 550 nm wavelength exhibits better penetration performance under high-visibility conditions.

**Key words:** quantum key distribution, free-space channel, Gaussian modulation, cloud attenuation channel

## 0 引言

量子密钥分发(QKD)<sup>[1-3]</sup>基于量子态的不可克隆性和测量扰动特性,能够实现理论上无条件安全的密钥传输。根据编码方式的不同,QKD主要分为离散变

量QKD(DV-QKD)与连续变量QKD(CV-QKD)两类。2017年,“墨子号”量子科学实验卫星成功实现了星地下行DV-QKD<sup>[4]</sup>,验证了空间信道中量子通信的可行性,推动了空间量子通信的进一步发展。当前,随着地面光纤QKD技术<sup>[5]</sup>的日益成熟和空间DV-QKD实验的持续突破<sup>[6]</sup>,探索CV-QKD在空间信道中的应用潜力已成为该领域的重要研究方向。

与DV-QKD相比,CV-QKD具有探测效率高、易于实现高维编码等优势,更适用于某些特定通信场景。然而,在空间信道中,大气湍流、云雾等多种因素会引起信道透射率的动态波动,从而影响CV-QKD系统的性能与稳定性。针对这一问题,已有部分研究开

收稿日期:2025-03-24。

基金项目:广西重点研发计划(桂科AB23075199)资助。

作者简介:禹钧译(2002—),男,硕士研究生,现就读于广西大学计算机与电子信息学院计算机技术专业,主要从事连续变量量子密钥分发信道分析研究及其仿真验证工作。

\*通信作者:杨林峰(1979—),男,博士,教授,主要从事最优化算法、机器学习理论与算法方面的研究工作。



禹钧译, 杨林峰, 张振荣, 等: 星地云层信道连续变量量子密钥分发密钥率研究

展了相关探索: 刘旭超等人<sup>[7]</sup>分析了湍流对光信号的吸收与散射效应, 讨论了其对信道透射率和密钥率的影响; 高锟等人<sup>[8]</sup>基于雨滴分布与 Mie 散射理论, 研究了降雨对空间 CV-QKD 的消光作用及信道容量的变化; 李松朗等人<sup>[9]</sup>聚焦于蓝绿激光在云层中的传输, 探讨了云层对信噪比、能量衰减和误码率的影响; 聂敏等人<sup>[10]</sup>通过分析雷暴云中带电粒子的消光截面与浓度分布, 评估了其对 QKD 信道误码率的影响; 郭建伟等人<sup>[11]</sup>建立了冰云含水量、链路衰减系数与量子信号传输距离之间的关联模型; 胡秀寒等人<sup>[12]</sup>则从云层高度与厚度出发, 研究了云层对激光下行传输中光斑尺寸、脉冲宽度及传输效率的影响。

尽管上述工作对云层大气介质的影响已进行了有益探讨, 但现有研究多集中于云层特性对静态链路衰减的定性或半定量分析, 缺乏针对星地动态场景下 CV-QKD 系统<sup>[13]</sup>在云层信道中的密钥率进行系统性建模与量化评估。因此, 本文旨在建立星地云层信道 CV-QKD 模型, 探究其密钥率性能。

## 1 星地云层信道 CV-QKD 模型

### 1.1 星地几何模型

卫星动态运行轨道图如图 1 所示。光束受大气湍流影响的实际路径为  $L_{\text{atm}}(t)$ , 其表达式为

$$L_{\text{atm}}(t) = \sqrt{h_{\text{atm}}^2 + 2h_{\text{atm}}R_E + R_E^2 \cos^2\theta(t)} - R_E \cos\theta(t) \quad (1)$$

式中:  $h_{\text{atm}}$  为大气层高度 (通常  $h_{\text{atm}} \approx 30 \text{ km}$ ),  $R_E$  为地球的半径 (通常取值为  $6371 \text{ km}$ ),  $\theta(t)$  为卫星与地面站的实时天顶角。

大气折射虽可导致光线弯曲和天体视位置偏移 (尤其近天顶方向), 但鉴于本文设定的卫星最小仰角为  $10^\circ$ , 其实际影响很弱, 光程拉伸系数接近 1, 故在后续分析中不予考虑<sup>[14]</sup>。本文的研究场景设定为下行链路、夏季弱湍流条件, 旨在重点考察云层对星地 CV-QKD 系统的效应。

### 1.2 云层信道下 CV-QKD 渐进极限密钥率

在集体攻击与反向协商条件下, 当卫星运行至特定时段时, 系统密钥率的渐近值  $K$  可由式 (2) 所示的 Devetak-Winter 边界给出<sup>[15]</sup>。

$$K = \beta I_{\text{AB}} - \chi_{\text{BE}} \quad (2)$$

式中:  $I_{\text{AB}}$  为通信双方 Alice 和 Bob 之间的互信息<sup>[16]</sup>,  $\beta$  为反向协调效率,  $\chi_{\text{BE}}$  为窃听者 Eve 能从接收方 Bob 处得到的基于 Holevo 界的最大互信息。

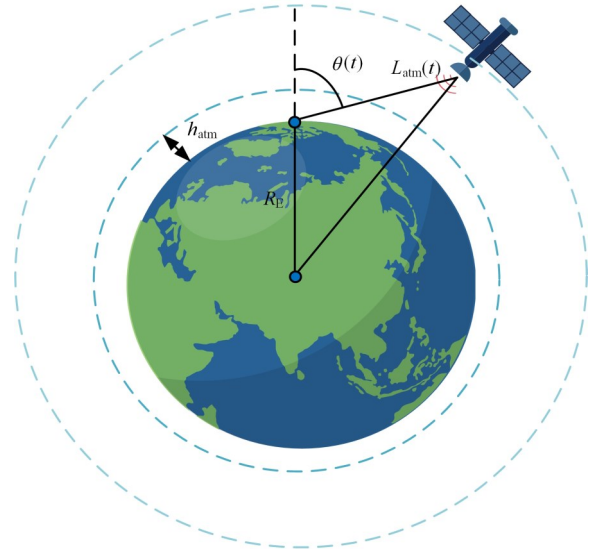


图 1 卫星动态运行轨道图

对于星地高斯调制 CV-QKD 协议而言,  $I_{\text{AB}}$  和  $\chi_{\text{BE}}$  的表达式分别如式 (3)、式 (4) 所示。

$$I_{\text{AB}} = \log_2 \frac{V + \chi_{\text{tot}}}{1 + \chi_{\text{tot}}} \quad (3)$$

$$\chi_{\text{BE}} = \sum_{i=1}^2 G\left(\frac{\lambda_i^c - 1}{2}\right) - \sum_{i=3}^5 G\left(\frac{\lambda_i^c - 1}{2}\right) \quad (4)$$

式中:  $G(x)$  为冯诺依曼熵函数,  $G(x) = (x+1) \times \log_2(x+1) - x \log_2(x)$ ;  $\chi_{\text{tot}}$  为系统在集体攻击下的总噪声<sup>[17]</sup>,  $\chi_{\text{tot}} = \frac{\chi_{\text{het}}}{\eta_{\text{tot}}} + \chi_{\text{line}}$ ;  $\chi_{\text{het}}$  为系统探测噪声,  $\chi_{\text{het}} = (2 - \eta + 2V)/\eta$ ,  $\eta$  为探测效率,  $V$  为电子噪声;  $\chi_{\text{line}}$  为信道噪声,  $\chi_{\text{line}} = \frac{1}{\eta_{\text{tot}}} - 1 + \varepsilon_{\text{fad}}$ ;  $\lambda_i^c$  为协方差矩阵  $\boldsymbol{\gamma}_{\text{AB}}$  的辛特征值<sup>[18]</sup>,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。

星地通信中传输系数  $T^2$  与协议的总噪声  $\eta_{\text{tot}}$  相等, 即  $T^2 = \eta_{\text{tot}}$ 。若只考虑大气消光、通信系统固定损耗影响, 协议的总噪声表达式为

$$\eta_{\text{tot}} = T_0^2 \exp\left[-\left(\frac{r_p}{s}\right)^\gamma\right] \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{eff}} \quad (5)$$

式中:  $r_p$  为系统中偏转半径与总噪声的关系公式<sup>[19]</sup>,  $r_p = s \left[ -\log\left(\frac{\eta_{\text{tot}}}{\eta_{\text{atm}} \eta_{\text{cloud}} \eta_{\text{eff}} T_0^2}\right) \right]^{\frac{1}{\gamma}}$ ;  $T_0$  为光束展宽<sup>[20]</sup>影响下接收端的传输效率,  $\eta_{\text{eff}}$  为系统的固定损耗 (探测损耗和电子器件热噪声),  $s$  和  $\gamma$  分别为形状参数和尺度参数<sup>[14]</sup>;  $\eta_{\text{tot}} = T_0^2 \exp\left[-\left(\frac{r_p}{s}\right)^\gamma\right] \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{eff}} \eta_{\text{cloud}}$ ,  $\eta_{\text{atm}}$ 、 $\eta_{\text{cloud}}$  分别为大气消光影响、云层衰减对星地通信影响的透射率,

$\eta_{\text{atm}} = e^{-\alpha_0 F(t)}$ ,  $\alpha_0$  为大气消光系数,  $F(t)$  为积分函数, 其表达式为

$$F(t) = \int_0^{L(t)} \exp\left[\frac{L_{\text{atm}}(t)}{h_0}\right] dt \quad (6)$$

式中:  $h_0$  为尺度高度,  $h_0 = 6\ 600\ \text{m}$ ;  $L(t)$  表示光在大气和真空中的几何传播路径长度。

假设每个时间间隔内信道的统计特性保持不变。在此间隔内, 由于空间信道的随机波动, 其传输效率表现出与固定效率光纤信道不同的起伏特性。该空间信道的协方差矩阵<sup>[21]</sup>如式(7)所示。

$$\mathbf{Y}_{\text{AB}} = \begin{pmatrix} V\mathbf{I}_2 & E[T]\sqrt{V^2-1}\boldsymbol{\sigma}_z \\ E[T]\sqrt{V^2-1}\boldsymbol{\sigma}_z & (E[T](V-1+\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{fad}})+\boldsymbol{\sigma}^2)\mathbf{I}_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中:  $E[T]$  为传输系数的期望, 期望值可以将信道的起伏传输效率近似为固定传输效率;  $V = V_A + 1$ ,  $V_A$  为制备方差;  $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{fad}}$  为 Eve 在窃听时引入的信道过量噪声,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{fad}} = \frac{E[\eta_{\text{tot}}]}{E[T]}\boldsymbol{\varepsilon} + \frac{E[\eta_{\text{tot}}] - E[T]^2}{E[T]^2}(V-1); \mathbf{I}_2 \text{ 为对角线}$$

元素全为 1 的对角矩阵,  $\boldsymbol{\sigma}_z$  为对角线元素为 1 和 -1 的对角矩阵, 等效噪声方差  $\boldsymbol{\sigma}^2 = 1 + \eta_{\text{tot}}\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{fad}}$ 。

云层对光的衰减主要归因于云内水滴或冰晶的存在。云层的物理状态可由高度、数密度、液态水含量、云滴尺寸及其分布等参数描述。考虑到冰晶引起的衰减通常远低于液态水滴, 在本文的建模中, 云层物质含量被简化为单分散云滴分布。文献[22]显示, 云滴数密度一般为  $100\sim 500\ \text{颗}/\text{m}^3$ , 而液态水含量的变化范围很大, 从薄卷云的约  $3.128\times 10^{-4}\ \text{g}/\text{m}^3$  到厚积云的  $1\ \text{g}/\text{m}^3$ 。云层的云滴数浓度  $N_c$  表达式为

$$N_c = \frac{G}{\frac{4}{3}\pi r_c^3 \rho \times 10^{-6}} \quad (8)$$

式中:  $\rho$  为液态水的密度,  $\rho = 1\ \text{g}/\text{m}^3$ ;  $r_c$  为云滴半径的平均值, 考虑云层由小尺寸水滴构成, 其光学特性在散射和吸收机制上与雾具有相似性;  $G$  为云层的平均液态水含量。

本文采用液态水含量与可见度范围的经验模型<sup>[23]</sup>, 用于计算不同云层信道下产生的衰减。通过  $G$  和云滴数浓度  $N_c$ <sup>[24]</sup> 可以得到云层能见度  $v$  为

$$v = \frac{1.002}{(G \times N_c)^{0.6473}} \quad (9)$$

米氏散射主要发生在与星地通信光束波长大小相似的粒子上, 如气溶胶粒子、雾、霾和云层中的云滴

颗粒, 通过 Kim 模型<sup>[25]</sup> 得出米氏散射的衰减公式为

$$D = 4.34 \left[ \frac{3.91}{v} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-0.1} \right] \frac{h_c}{\sin \theta(t)} \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为波长,  $h_c$  为云层厚度, 不同季节和地区的  $h_c$  具有不同特性。例如, 在夏季, 西北和高原地区的平均  $h_c$  约为  $3\ \text{km}$ <sup>[26]</sup>, 最大可达  $4\ \text{km}$ ; 本文所研究的云层为单层云, 其最大  $h_c$  为  $4\ \text{km}$ 。  $k$  为 Kim 模型的经验系数<sup>[27]</sup>。云层衰减对星地通信影响的透射率表达式为

$$\eta_{\text{cloud}} = 10^{(-D/10)} \quad (11)$$

## 2 仿真结果分析

### 2.1 仿真数据与场景设置

本文采用 STK-Matlab 联合仿真平台, 综合考虑云层海拔高度的区域差异, 选取了“墨子号”在以下 2 个时段的星地通信数据进行分析:

1) 2019 年 5 月 23 日 18:10 - 18:20 (协调世界时, UTC), 与德令哈地面站的通信;

2) 2019 年 5 月 23 日 16:32 - 16:42 (UTC), 与兴隆地面站的通信。

仿真数据如表 1、表 2 所示。

表 1 星地通信墨子号仿真数据

参数名称	数值
指向误差 $\theta_p/\text{urad}$	1
光束发散角 $\theta_d/\text{urad}$	10
接收半径 $r/\text{m}$	0.5
电子噪声 $V/\text{S.N.U.}$	0.1
探测效率 $\eta/\%$	40

表 2 CV-QKD 系统参数

参数名称	数值
波长 $\lambda/\text{nm}$	1 550
反向协调效率 $\beta$	0.95
制备方差 $V_A/\text{S.N.U.}$	2
过量噪声 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{fad}}/\text{S.N.U.}$	0.01

仿真得到的“墨子号”卫星与德令哈地面站之间的传输损耗随接入时间的变化关系如图 2 所示。可以看出, 衰减随接入时间的变化呈先减小后增大的趋势, 当接入时间为  $220\ \text{s}$  时, 衰减最小 (天顶角最小时达到最小值)。

本文通过修正的伽马分布函数对云滴谱数据进行拟合, 对不同类型云层的平均云滴半径进行了参数化。云层仿真所采用的参数如表 3 所示。

禹钧译, 杨林峰, 张振荣, 等: 星地云层信道连续变量量子密钥分发密钥率研究

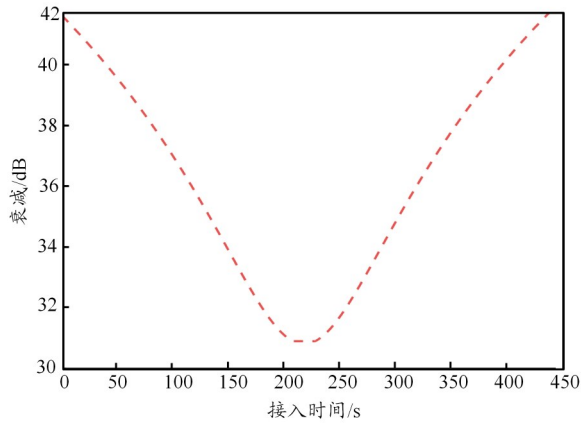


图2 星地与德令哈站间的传输损耗随接入时间的变化关系

表3 云层仿真参数

云层类型	$G/(\text{g}/\text{m}^3)$	$r_c/\mu\text{m}$
积云	1	6
层云	0.29	3.33
层积云	0.15	2.67
高层云	0.41	4.5
雨层云	0.65	4.7
卷云	0.064 05	64
薄卷云	$3.128 \times 10^{-4}$	4

## 2.2 云层能见度对信道衰减的影响

本文对云层能见度对信道衰减的影响进行了仿真分析,重点考察了不同波长下光信号在信道中的衰减特性。在 $h_c$ 为4 km的条件下,信道衰减与能见度之间的变化关系如图3所示。可以看出,信道衰减随云层能见度的增加呈指数衰减趋势:在能见度为0~5 km,衰减从约6 000 dB快速下降至约10 dB;当能见度超过

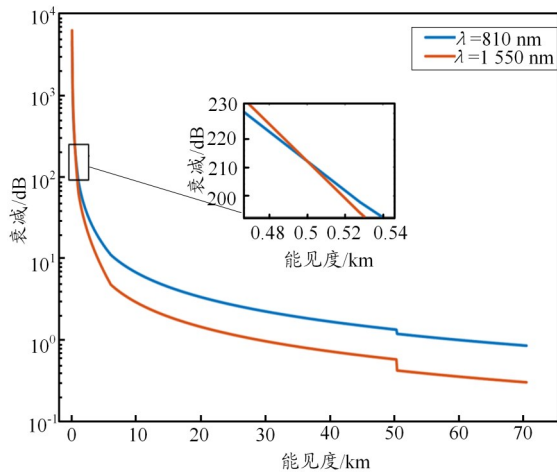


图3 信道衰减随云层能见度的变化图

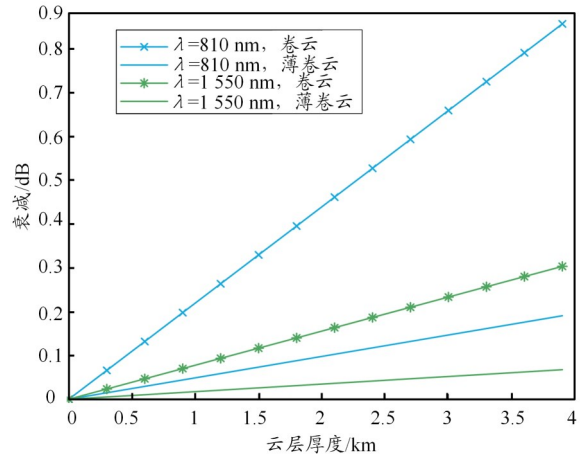
5 km后,衰减的下降速率明显减缓。此外,在能见度低于5 km时,810 nm与1 550 nm波长光束的衰减程度相近;而当能见度大于5 km时,1 550 nm波长的衰减显著低于810 nm波长,表明在高能见度条件下,1 550 nm波段具有更优的大气穿透性能。

## 2.3 不同类型云层衰减特性对比

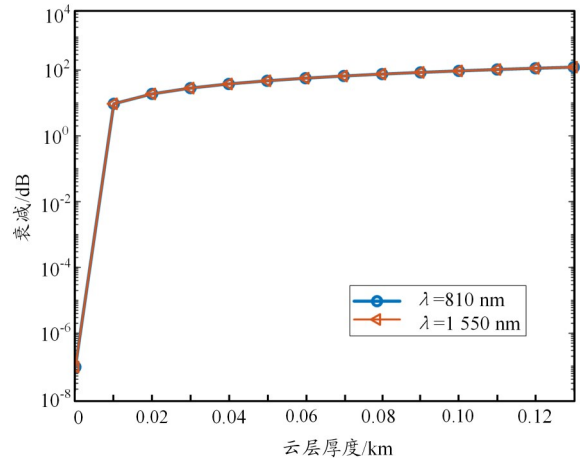
将表3中的参数代入式(9),可计算出层云、积云、雨积云与层积云的能见度差异较小。因此,本文以层云为代表,并选取卷云与薄卷云作为能见度差异较大的云层类型进行对比分析。不同云层及波长下的信道衰减特性如图4示。

从图4(a)可见,当云层厚度为0~4 km时,卷云与薄卷云引起的信道衰减近似呈线性增长。当 $\lambda=1 550 \text{ nm}$ 时,最大衰减约为0.3 dB;而当 $\lambda=810 \text{ nm}$ 时,最大衰减约为0.9 dB。

从图4(b)可见,在层云信道中,810 nm与1 550 nm



(a) 卷云和薄卷云衰减变化



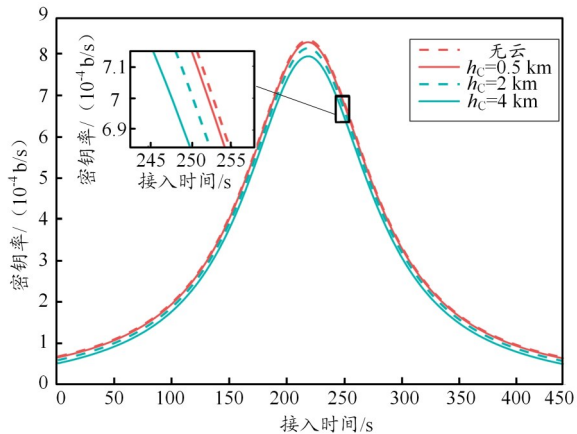
(b) 层云衰减变化

图4 不同云层与波长下衰减变化图

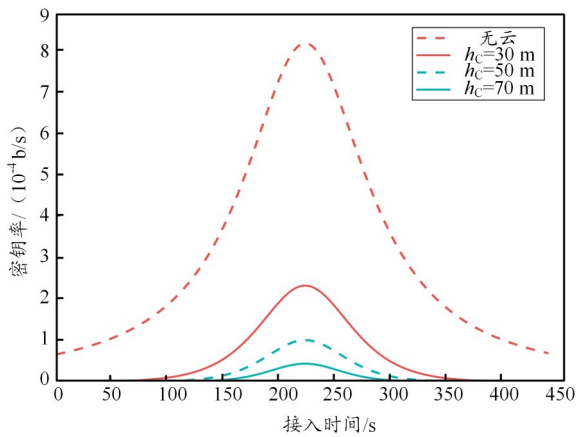
波长的衰减几乎重合,表明波长对层云引起的衰减影响较小。然而,当层云厚度仅为 100 m 时,信道衰减已达到约 10 dB,说明层云即使在很薄的情况下也会对光信号造成严重衰减,其厚度的微小增加将导致信道性能急剧恶化。

#### 2.4 不同云层信道下的密钥率分析

本文根据表 1 及式 (5)、式 (8) 和式 (9),计算了不同云层的云滴数浓度与能见度,并选取高能见度的卷云与低能见度的层云进行仿真分析,得出不同  $h_c$  时地面站的密钥率如图 5 所示。



(a) 卷云信道德令哈站密钥率图



(b) 层云信道兴隆站密钥率图

图 5 不同云层信道地面站密钥率图

从图 5(a)可以看出,在卷云条件下,链路密钥率损失较小。在接入时间约为 220 s 时,即使  $h_c$  达到最大值 4 km,密钥率仍可达  $7.8 \times 10^{-4}$  b/s,仅略低于无云条件下的  $8.5 \times 10^{-4}$  b/s。

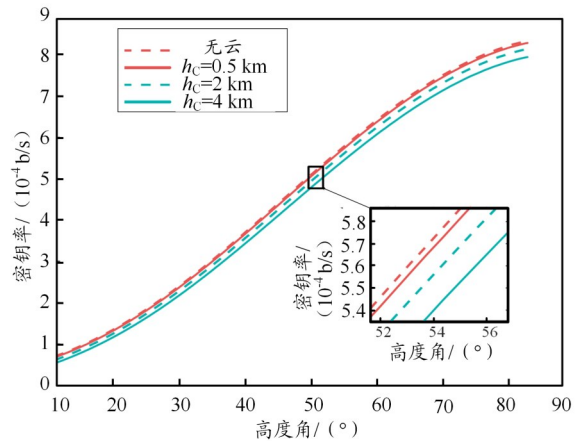
从图 5(b)可以看出,当层云  $h_c = 30$  m 时,密钥率已从无云条件下的  $8.2 \times 10^{-4}$  b/s 急剧下降至  $2.4 \times 10^{-4}$  b/s;当  $h_c = 50$  m 时,密钥率进一步降至  $1 \times 10^{-4}$  b/s;  $h_c = 70$  m

时,密钥率约为  $0.5 \times 10^{-4}$  b/s。实际大气中层云  $h_c$  通常远大于 70 m,其存在将导致密钥率严重衰减,在多数情况下使星地 QKD 系统无法正常运行。

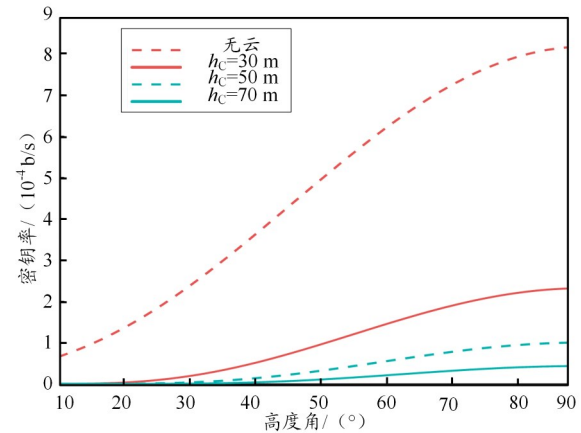
#### 2.5 高度角与轨道高度对密钥率的影响

本文仿真分析了卫星高度角在卷云和层云信道下对密钥率的影响,结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,在卷云信道中,密钥率随高度角的增大呈指数衰减趋势。当高度角为  $10^\circ$  时,密钥率较天顶方向(高度角大于  $80^\circ$ )下降超过 50%。这是由于高度角对应更长的大气斜路径,导致光子损耗显著增加。因此,在低高度角观测条件下,可通过云信道建模与自适应光学或波长选择等手段进行补偿,以缓解长路径传输带来的累积衰减效应。

与卷云信道相比,在图 6(b)中,层云因其高液态水含量和强散射特性,在同等高度角条件下,即使  $h_c = 30$  m,也会使密钥率降幅超过一倍;当  $h_c = 50$  m 以上时,降幅进一步扩大。由于层云信道下密钥率对天顶角的变化相对不敏感,其衰减主要由云层本身光学厚



(a) 卷云信道



(b) 层云信道

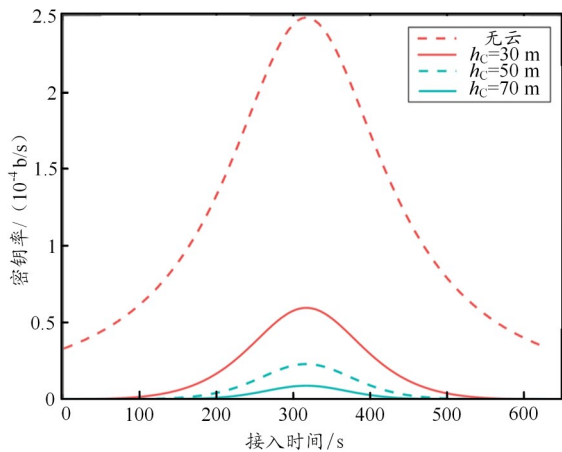
图 6 卷云、层云信道高度角与密钥率的关系曲线

禹钧译, 杨林峰, 张振荣, 等: 星地云层信道连续变量量子密钥分发密钥率研究

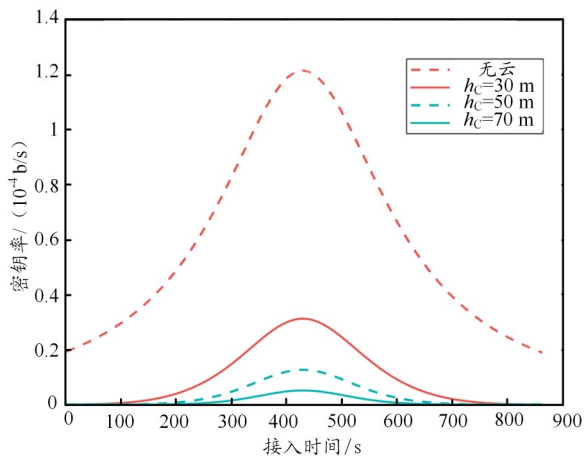
度主导, 而非几何路径长度。这表明在层云主导的天气条件下, 优化工作波长(如选用 1 550 nm 而非 810 nm) 或提升探测系统信噪比, 可能比依赖几何条件更有效, 有助于增强星地量子密钥分发系统的鲁棒性。

兴隆站层云信道中轨道高度与密钥率的关系如图 7 所示。可以看出, 800 km 轨道在密钥率与接入时间之间表现出较优的折中特性: 相较于 1 200 km 轨道, 其信道损耗更低, 从而维持了相对较高的密钥率。因此, 800 km 轨道在兼顾系统覆盖能力与密钥生成性能方面具有优势。

此外, 层云对密钥率的负面影响在高轨道条件下尤为显著。在 1 200 km 轨道高度下, 当层云厚度超过 50 m 时, 密钥率已降至  $10^{-5}$  b/s 量级(或更低), 基本丧失实用价值; 卷云在相同条件下对密钥率的影响明显较小。这表明, 在高轨道星地量子密钥分发系统中, 层云是限制链路可用性的关键因素。



(a) 800 km 轨道密钥率关系曲线



(b) 1 200 km 轨道密钥率关系曲线

图 7 兴隆站层云信道中轨道高度与密钥率的关系曲线

### 3 结束语

本研究构建了星地云层信道 CV-QKD 模型, 通过 STK-Matlab 仿真揭示了云层类型与厚度对密钥率的差异化影响: 高能见度云层(卷云)对密钥率影响较小, 4 km 厚度下密钥率仍可达  $7.8 \times 10^4$  b/s; 而当层云厚度仅为 30 m 时, 密钥率从无云条件下的  $8.2 \times 10^4$  b/s 骤降至  $2.4 \times 10^4$  b/s, 严重影响通信可行性; 低轨道(高度为 800 km)在兼顾系统覆盖能力与密钥生成性能方面具有优势; 在能见度高于 5 km 的条件下, 1 550 nm 波长相比 810 nm 波长表现出更优的大气穿透性能。

本文研究基于均匀云层与静态信道假设, 未考虑云层不均匀性及动态湍流耦合效应。后续可结合实际气象数据与自适应光学技术, 开展多场景优化与智能补偿研究, 以提升系统在实际环境中的鲁棒性。

### 参考文献:

- [1] Bennett C, Brassard G. Proceedings of the IEEE international conference on computers, systems and signal processing, december 9-12, 1984 [C]. New York: IEEE, 1984.
- [2] Ekert A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(6): 661-663.
- [3] Shor P W, Preskill J. Simple proof of security of the BB84 quantum key distribution protocol[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(2): 441-444.
- [4] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Nature, 2017, 549: 43-47.
- [5] Jennewein T, Simon C, Weihs G, et al. Quantum cryptography with entangled photons[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(20): 4729-4732.
- [6] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. Science, 2017, 356: 1140-1144.
- [7] 刘旭超, 温佳旭, 李少波, 等. 湍流信道下连续变量量子密钥分发密钥率研究[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1412002-1-1412002-7.
- [8] 高锐, 聂敏, 杨光, 等. 降雨背景下自由空间量子通信的性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012701-1-012701-8.
- [9] 李松朗, 毛忠阳, 刘传辉, 等. 云层厚度对蓝绿激光通信性能的影响分析[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190389-1-190389-7.
- [10] 聂敏, 石力, 杨光, 等. 雷暴云对星地量子链路性能的影响及参数仿真[J]. 通信学报, 2017, 38(5): 31-38.
- [11] 郭建伟, 聂敏, 杨光, 等. 冰云对量子卫星通信性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0506005-1-0506005-9.
- [12] 胡秀寒, 周田华, 朱小磊, 等. 云对激光下行传输影响的仿真研究[J]. 红外, 2015, 36(2): 8-12.
- [13] Djordjevic I B. Optimized-eight-state CV-QKD protocol outperforming gaussian modulationbased protocols[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1-10.
- [14] Vasylyev D, Vogel W, Moll F. Satellite-mediated quantum atmospheric links[J]. Physical Review A, 2019, 99(5): 053830-1-053830-30.
- [15] Devetak I, Winter A. Distillation of secret key and entanglement from

- quantum states[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and engineering sciences, 2005, 461: 207–235.
- [16] Shin M, Lee J, Jeong K. Estimating quantum mutual information through a quantum neural network[J]. Quantum Information Processing, 2024, 23(2): 57.
- [17] Sidhu J S, Joshi S K, Gündoğan M, et al. Advances in space quantum communications[J]. IET Quantum Communication, 2021, 2(4): 182–217.
- [18] Kasliwal K, Jayanthi P N, Jain A, et al. Enhancing satellite-to-ground communication using quantum key distribution[J]. IET Quantum Communication, 2023, 4(2): 57–69.
- [19] 吴治庚,李明,姚正皓,等.自由空间连续变量量子密钥分发的信道透射率起伏特性仿真研究[J].红外与激光工程,2024(8):155–163.
- [20] Chu Y Y. Beam broadening effect on oblique MST radar doppler spectrum[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(12): 1955–1967.
- [21] 柴庚.自由空间连续变量量子密钥分发关键技术研究[D].西安:西北大学,2020.
- [22] Awan M S, Leitgeb E, Hillbrand B, et al. Cloud attenuations for free-space optical links[C]//IEEE. Proceedings of 2009 International workshop on satellite and space communications. Siena, Italy: IEEE, 2009: 274–278.
- [23] Alzenad M, Shakir M Z, Yanikomeroglu H, et al. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 218–224.
- [24] Gultepe I, Milbrandt J A. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164: 1161–1178.
- [25] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005.
- [26] 程天海,顾行发,陈良富,等.卷云多角度偏振特性研究[J].物理学报,2008,57(8):5323–5332.
- [27] Dequal D, Trigo V L, Roman R V, et al. Feasibility of satellite-to-ground continuous-variable quantum key distribution[J]. NPJ Quantum Information, 2021, 7(1): 1.