

# 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响

刘涛<sup>1,2\*</sup>, 朱聪<sup>1</sup>, 孙春阳<sup>1</sup>, 房新新<sup>1</sup>, 王平平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003;

<sup>2</sup>北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876

**摘要** 研究了三种常见天气降雨、降雪和雾霾对采用不同波长信号的自由空间量子通信系统的安全密钥率的影响。利用建立的基于连续变量高斯调制的量子密钥分发传输模型, 分析了在个体攻击和集体攻击情况下 Bob 分别采用零差检测和外差检测时, 不同天气条件和不同信号光波长对安全密钥率的影响。随后仿真得到了不同天气情况和等级、不同波长量子信号、不同攻击类型和不同检测方式条件下安全密钥率随传输距离的变化关系, 并对结果进行了分析。研究结果可以为实际的自由空间量子通信系统的设计提供一定的参考。

**关键词** 量子光学; 自由空间; 量子通信; 连续变量量子密钥分发; 安全密钥率

中图分类号 TN911

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0227001

## Influences of Different Weather Conditions on Performance of Free-Space Quantum Communication System

Liu Tao<sup>1,2\*</sup>, Zhu Cong<sup>1</sup>, Sun Chunyang<sup>1</sup>, Fang Xinxin<sup>1</sup>, Wang Pingping<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

<sup>2</sup>Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** This paper investigates the effects of three weather conditions, such as rain, snow, and haze, on security key rate of a free-space quantum communication system using different signal wavelengths. For the cases of collective and individual attacks, analysis is conducted on why and how different weather conditions and signal wavelengths affect the security key rate based on a continuous-variable quantum key distribution model with Gaussian modulation. In the analysis, two different conditions are considered: one in which Bob uses a homodyne detector and the other in which a heterodyne detector is used. The relationship between the security key rate and transmission distance is simulated under various conditions, including different weather conditions and levels, different quantum signal wavelengths, different attack types, and different detection modes. The results of this paper can serve as an instructive reference for future practical free-space quantum communication system designs.

**Key words** quantum optics; free space; quantum communications; continuous-variable quantum key distribution; security key rate

**OCIS codes** 270.5565; 010.1290; 270.6570

## 1 引 言

量子通信是应用量子特性进行信息传输的一种通信方式, 是将量子论和信息论相结合的一个新的研究领域。目前, 量子通信技术向着远程乃至全球化量子通信网方向发展, 在此方面自由空间量子通信系统极具优势, 其具有传输损耗小、灵活性强、能

够单次传输上千千米的距离等优点<sup>[1]</sup>, 是实现全球化量子通信网的一种重要方式<sup>[2]</sup>。

在自由空间量子通信中, 光量子在自由空间中传播, 因此不可避免地会受到降雨、降雪和雾霾等常见的自然环境因素的影响, 造成通信系统性能下降甚至中断<sup>[3]</sup>。聂敏等<sup>[4]</sup>研究了 PM<sub>2.5</sub> 指数等对自由空间量子信道的影响, 分析了 PM<sub>2.5</sub> 污染程度与信

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-08-29; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61302105)、中央高校基本科研业务费专项资金

\* E-mail: taoliu@ncepu.edu.cn

道容量、信道平均保真度、信道误码率的关系。Vasylyev 等<sup>[5-6]</sup>建立了近似椭圆光束的量子光模型,在雨或雾天气下,研究了量子光信号通过湍流大气链路时的传输变化。但都未考虑不同天气条件对量子通信系统的重要参数——安全密钥率的影响。Wang 等<sup>[7]</sup>研究了大气散射、湍流等对自由空间量子通信系统的安全密钥率的影响,但未考虑降雨等具体天气条件。此外,上述研究仅使用了单一波长进行传输,而实际中不同的信号光波长所受的天气条件的影响是不同的<sup>[8-9]</sup>,因此有必要分析不同天气条件对采用不同波长的自由空间量子通信系统性能的影响,但目前此方面的研究报道较少。Gariano 等<sup>[10]</sup>分析了采用不同泵浦功率时 3 种不同波长的量子信号经过 30 km 海上信道传输后的安全密钥率,得到在泵浦功率分别衰减 10% 和 50% 的情况下,使用 1550 nm 波长可得到最高的安全密钥率,但是对于泵浦功率衰减 90% 的情况,只有使用 4 μm 波长时才能生成安全密钥率。除天气条件和信号光波长之外,系统受到的攻击类型和 Bob 端的检测方式等也都会对自由空间量子通信系统的性能产生影响<sup>[11-12]</sup>。

基于上述分析,本文研究了三种常见天气降雨、降雪和雾霾对采用不同波长信号的自由空间量子通信系统的安全密钥率的影响,首先建立基于连续变量高斯调制的量子密钥分发传输模型,给出了此模型在个体攻击和集体攻击情况下 Bob 分别采用零差检测和外差检测时的安全密钥率公式,随后分析了降雪强度、降雨强度和雾霾粒子浓度对此模型中量子信号的影响,仿真得到了不同天气条件、不同波

长量子信号、不同攻击类型和不同检测方式条件下的安全密钥率随传输距离的变化关系。

## 2 不同天气条件对安全密钥率的影响

### 2.1 自由空间量子信道模型

为了研究不同天气条件对自由空间量子通信系统的安全密钥率的影响,首先建立了自由空间量子信道模型,如图 1 所示。该模型采用连续变量高斯调制的量子密钥分发协议进行量子密钥分发,Alice 准备一对具有方差  $V$  的双模压缩纠缠态,将其中的模式  $A$  留在本地进行零差检测测量,其中  $x_A$  和  $p_A$  为双模压缩纠缠态的正交分量,并将另一模式  $B_0$  通过大气信道发送给 Bob,假设大气信道特性为透过率为  $T$ ,额外噪声为  $\epsilon$ ,则信道输入额外噪声  $\chi_{\text{line}}=1/T-1+\epsilon$ ,模式  $B_0$  经过大气信道传输之后变为模式  $B_1$ 。

在 Bob 端,一个量子效率为  $\eta$ 、电子噪声为  $\nu_{\text{el}}$  的实际检测器等效为一个方差为  $\nu$  的双模压缩纠缠态,其中的一个模式  $F_0$  通过分束器耦合进 Bob 并影响 Bob 最终量子信号测量值的精度,得到双模压缩纠缠态的正交分量测量值  $x_B$  和  $p_B$ ,如图 1 所示。当 Bob 采用不同的检测方式时,双模压缩纠缠态的等效方差  $\nu$  的值不同。当采用零差检测时  $\nu_{\text{hom}}=\eta\chi_{\text{hom}}/(1-\eta)=1+\nu_{\text{el}}/(1-\eta)$ ,而采用外差检测时  $\nu_{\text{het}}=(\eta\chi_{\text{het}}-1)/(1-\eta)=1+2\nu_{\text{el}}/(1-\eta)$ ,其中  $\chi_{\text{hom}}$  和  $\chi_{\text{het}}$  分别为实际零差检测器和外差检测器引入的总噪声。通信完成后,双方进行经典数据处理,通过密钥协商和保密增强过程得到最终的量子密钥。

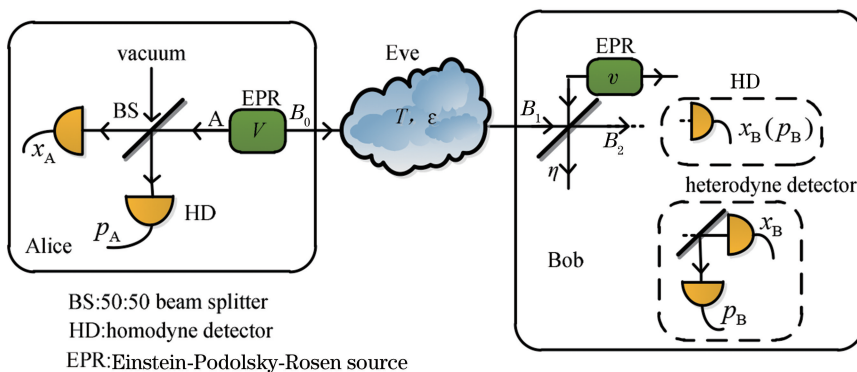


图 1 自由空间量子信道模型

Fig. 1 Free space quantum channel model

假定 Alice 和 Bob 采用反向协调方式,在个体攻击和集体攻击情况下系统的安全密钥率计算如下。

1) 个体攻击条件下的安全密钥率为

$$K_{\text{attm}} = (1 - P)(\beta I_{\text{AB}} - I_{\text{BE}}), \quad (1)$$

式中:  $P$  为到达角起伏导致的中断概率;  $\beta$  为反向协调效率;  $I_{\text{AB}}$  和  $I_{\text{BE}}$  分别为 Alice 和 Bob 及 Bob 和 Eve 之间的互信息量。

当 Bob 采用零差检测方式时, Alice 和 Bob 之间的互信息量<sup>[13]</sup>为

$$I_{AB}^{\text{hom}} = \frac{1}{2} \log_2 \left( \frac{V + \chi_{\text{tot}}}{1 + \chi_{\text{tot}}} \right), \quad (2)$$

式中:  $\chi_{\text{tot}} = \chi_{\text{line}} + \chi_{\text{h}}/T$ , 表示总额外噪声;  $\chi_{\text{line}}$  表示信道输入额外噪声;  $\chi_{\text{h}}$  表示检测器等效额外噪声。Bob 和 Eve 之间的互信息量为

$$I_{BE}^{\text{hom}} = \frac{T^2(V + \chi_{\text{tot}})(1/V + \chi_{\text{line}})}{1 + T\chi_{\text{hom}}(1/V + \chi_{\text{line}})}, \quad (3)$$

当 Bob 采用外差检测方式时, Alice 和 Bob 之间的互信息量为

$$I_{AB}^{\text{het}} = \log_2 \left( \frac{V + \chi_{\text{tot}}}{1 + \chi_{\text{tot}}} \right), \quad (4)$$

Bob 和 Eve 之间的互信息量为

$$I_{BE}^{\text{het}} = \log_2 \left[ \frac{T(V + \chi_{\text{tot}})(V + x_E)}{Vx_E + 1 + \chi_{\text{het}}(V + x_E)} \right], \quad (5)$$

式中:  $x_E = \frac{T(2-\epsilon)^2}{(\sqrt{2-2T+T\epsilon} + \sqrt{\epsilon})^2} + 1$ <sup>[14]</sup>。

2) 集体攻击条件下的安全密钥率为

$$K_{\text{atm}} = (1 - P)(\beta I_{AB} - \chi_{BE}), \quad (6)$$

式中:  $I_{AB}$  与个体攻击条件下 Bob 分别采用零差和外差两种检测方式的表达式相同, 即(2)式和(4)式;  $\chi_{BE}$  为 Eve 能从 Bob 获取的信息量的上限<sup>[15-16]</sup>。对于高斯态,  $\chi_{BE}$  可简化为

$$\chi_{BE} = \sum_{i=1}^2 G\left(\frac{\lambda_i - 1}{2}\right) - \sum_{i'=3}^5 G\left(\frac{\lambda_{i'} - 1}{2}\right), \quad (7)$$

式中:  $G(x) = (x + 1) \log_2(x + 1) - x \log_2 x$ ;  $\lambda_i, \lambda_{i'}$  为量子系统的协方差矩阵的第  $i, i'$  个辛本征值。当  $i' = 5$  时,  $\lambda_5 = 1$ 。当  $i = 1, 2$  时, 有

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{1}{2}(A \pm \sqrt{A^2 - 4B}), \quad (8)$$

式中:  $A = V^2(1 - 2T) + 2T + T^2(V + \chi_{\text{line}})^2$ ;  $B = T^2(V\chi_{\text{line}} + 1)^2$ 。

当  $i' = 3, 4$  时, 有

$$\lambda_{3,4}^2 = \frac{1}{2}(C \pm \sqrt{C^2 - 4D}), \quad (9)$$

式中: 采用零差检测时  $C_{\text{hom}} = \frac{A\chi_{\text{hom}} + V\sqrt{B} + T(V + \chi_{\text{line}})}{T(V + \chi_{\text{tot}})}$ ,  $D_{\text{hom}} = \sqrt{B} \frac{V + \sqrt{B}\chi_{\text{hom}}}{T(V + \chi_{\text{tot}})}$ ;

采用外差检测时  $C_{\text{het}} = \frac{1}{[T(V + \chi_{\text{tot}})]^2} \{A\chi_{\text{het}}^2 + B + 1 + 2\chi_{\text{het}}[V\sqrt{B} + T(V + \chi_{\text{line}})] + 2T(V^2 - 1)\}$ ,

$D_{\text{het}} = \left[ \frac{V + \sqrt{B}\chi_{\text{het}}}{T(V + \chi_{\text{tot}})} \right]^2$ 。

从(1)~(9)式可以看出, 安全密钥率分别受信

道透射率  $T$ 、中断概率  $P$  和信道额外噪声  $\epsilon$  影响, 其中信道透射率  $T$  与大气衰减系数有关, 而衰减系数又与信号光波长有关, 且受到不同天气条件影响。因此, 自由空间量子通信系统在不同天气条件下采用不同信号光波长时的安全密钥率是不同的。下面对一些常见的天气条件对大气衰减系数的影响进行分析, 在分析过程中, 信号光波长采用都处于大气窗口的 810 nm、1550 nm 和 3800 nm。

## 2.2 降雪强度对大气衰减系数的影响

在降雪天气条件下, 能见度与降雪类型和强度有关, 随着降雪强度的增加, 能见度均降低, 但不同的降雪类型下能见度降低的程度不同。根据中国秦皇岛山海关地区(北方地区)和南京地区(南方地区)的实际降雪测量情况可知<sup>[17]</sup>, 能见度和降雪强度的关系与干雪类型下的变化曲线比较一致, 为

$$V_v = \frac{1.4076ecg \Gamma(f + d + h + m + 1) \Delta_1^{(b-f-d-h)}}{2aS\Gamma(b + m + 1)}, \quad (10)$$

式中:  $V_v$  为能见度;  $m$  为形状因子; 参数  $a = \pi/4$ ,  $b = 2$ ,  $c = \pi/6$ ,  $d = 3$ ,  $e = 0.017$ ,  $f = -1$ ,  $g = 107$ ,  $h = 0.2$ ;  $S$  为降雪强度;  $\Gamma(\cdot)$  为完全 Gamma 分布;  $\Delta_1$  与降雪强度  $S$  有关,  $\Delta_1 = 25.5S^{-0.48}$ 。

由(10)式可以看出, 降雪强度的增加会造成能见度的降低, 进而影响大气衰减系数。不同波长  $\lambda$  下大气衰减系数  $\alpha$  与能见度的关系<sup>[18]</sup>为

$$\alpha(\lambda) = \left( \frac{3.91}{V_v} \right) \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^q, \quad (11)$$

式中: 参数  $q$  与能见度有关, 其取值为

$$q = \begin{cases} 1.6, & V_v > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V_v < 50 \text{ km} \\ 0.16V_v + 0.34, & 1 \text{ km} < V_v < 6 \text{ km} \\ V_v - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V_v < 1 \text{ km} \\ 0, & V_v < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (12)$$

根据上述分析, 仿真得到了三种波长对应的大气衰减系数与降雪强度的关系曲线, 如图 2 所示。由图 2 可知, 采用不同波长时衰减系数均随降雪强度的增大而增大, 并最终趋于一致。但降雪强度相同时, 一般波长越长对应的衰减系数越小。

## 2.3 降雨强度对大气衰减系数的影响

降水粒子对大气衰减系数和能见度也存在不同程度的影响, 南京地区的降雨观测记录表明 Gamma 谱分布能够基本拟合大部分情况的降水, 因此本文选用 Gamma 分布函数来表示实际的降雨谱分布,

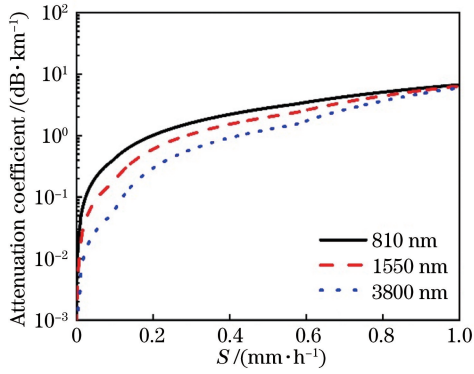


图 2 不同波长的衰减系数与降雪强度的关系  
Fig. 2 Relationship between attenuation coefficient at different wavelengths and snowfall intensity

此时降雨强度与能见度  $V_v$  的关系<sup>[19]</sup>为

$$V_v = \frac{13.76 \times \Gamma(m + 5)}{R^2 \Lambda_2^2 \Gamma(m + 3)}, \quad (13)$$

式中:  $R$  为降雨强度;  $\Lambda_2 = 4.1R^{-0.21}$  为尺度参数。

利用(11)式和(13)式仿真得到不同波长情况下大气衰减系数与降雨强度的关系,如图3所示。与降雪类似,不同波长下衰减系数也均随降雨强度的增大而增大,并最终趋于一致,且降雨强度相同时,一般波长越长对应的衰减系数越小。

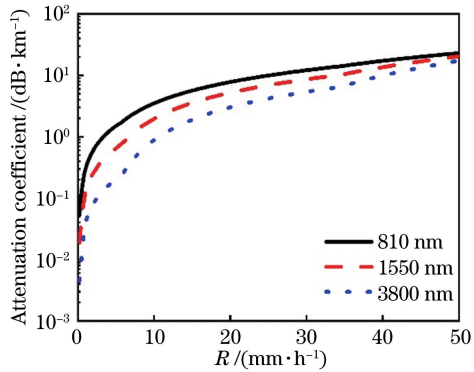


图 3 不同波长的衰减系数与降雨强度的关系  
Fig. 3 Relationship between attenuation coefficient at different wavelengths and rainfall intensity

#### 2.4 雾霾粒子浓度对大气衰减系数的影响

近年来,雾霾天气频繁出现,因此其对自由空间量子通信系统性能的影响不容忽视。雾霾由悬浮在大气中的  $PM_{2.5}$  微粒、粉尘、气溶胶等粒子在一定湿度和温度下混合而成。假设雾霾粒子成分相同,且颗粒物形状为规则球体,此时可将雾霾作为整体对待,得到能见度  $V_v$  与雾霾粒子浓度(质量浓度)  $N$  的关系<sup>[20]</sup>,可表示为

$$V_v = \left( \frac{15.29}{\sum_j \pi D_{p,j}^2 Q_{ext,j}} \right) \frac{1}{N}, \quad (14)$$

式中:  $D_{p,j}$  为雾霾粒子的直径;  $Q_{ext,j}$  表示消光率;  $j$  代表  $j$  粒径段。利用(11)式和(14)式,仿真得到不同波长情况下大气衰减系数与雾霾粒子浓度的关系,如图4所示。

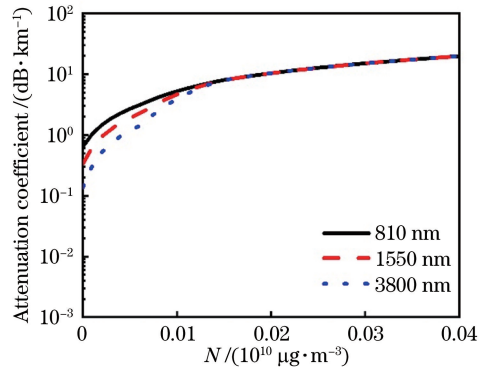


图 4 不同波长的衰减系数与雾霾粒子浓度的关系  
Fig. 4 Relationship between attenuation coefficient at different wavelengths and haze particle concentration

由图4可知,与降雪和降雨天气条件相比,虽然不同波长下大气衰减系数也随雾霾粒子浓度的增大而增大,且一般情况下波长越长受到的衰减越小,但三种波长对应的衰减系数之间的间隔与降雪和降雨天气条件相比却小了很多。此外,当雾霾粒子浓度达到一定程度后( $N > 0.015 \times 10^{10} \mu g/m^3$ ),不同波长信号的衰减程度基本一致,即此时波长变化不再影响衰减系数。

### 3 仿真结果与分析

在本文的研究过程中,采用都处于大气窗口的 810, 1550, 3800 nm 信号光波长,仿真分析常见天气条件晴天、降雪、降雨和雾霾对自由空间量子通信系统在个体攻击和集体攻击情况下 Bob 分别采用零差检测和外差检测时的安全密钥率的影响。在仿真过程中,相关参数设置为  $V_A = 18.9$ ,  $\epsilon = 0.01$ ,  $\nu_{el} = 0.01$ ,  $\eta = 0.6$ ,  $\beta = 0.9$ 。

#### 3.1 降雪对安全密钥率的影响

在下面的仿真过程中,  $S$  采用三种降雪强度,分别为 0.3, 0.7, 1.1 mm/h, 对应天气等级为小雪、中雪和大雪,此时仿真得到不同波长信号的安全密钥率与传输距离的关系,结果如图5所示,其中简称“hom”表示零差检测,“het”表示外差检测。

由图5可以看出:1)传输相同距离时,随着降雪强度的增加安全密钥率越来越恶化。2)在得到相同的安全密钥率条件下,采用长波长信号比短波长信号可以传输更远的距离,但随着降雪强度的增加,长

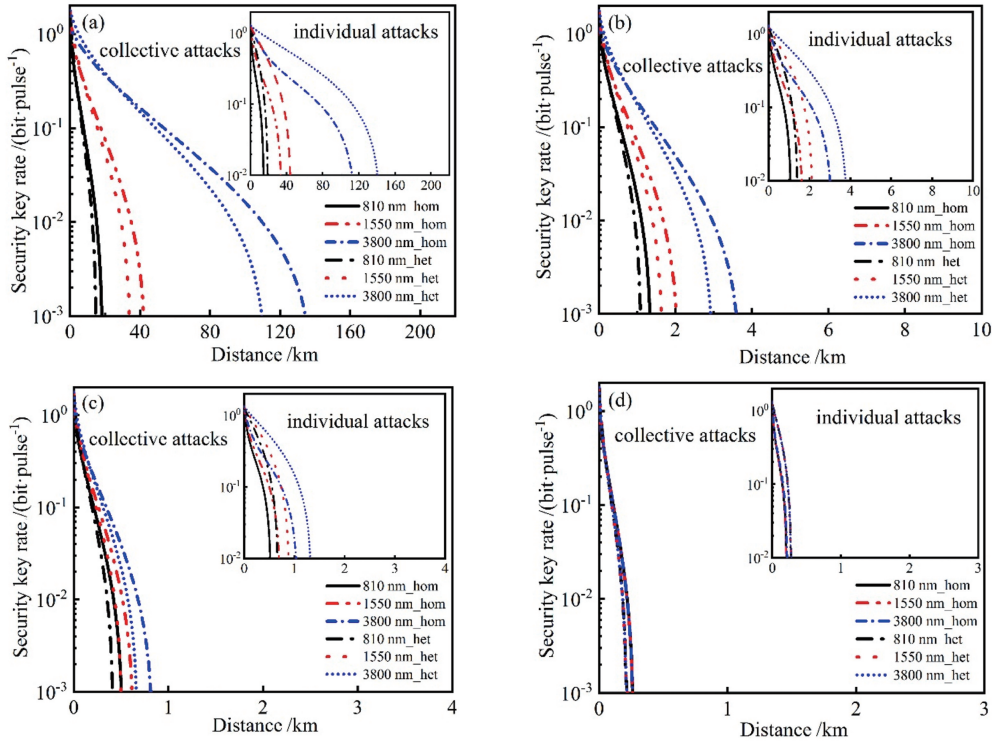


图 5 降雪条件下安全密钥率与传输距离的关系。(a)晴朗;(b)小雪;(c)中雪;(d)大雪

Fig. 5 Relationship between security key rate and transmission distance under different snowfall conditions.

(a) Clear day; (b) light snow; (c) moderate snow; (d) heavy snow

波长信号传输距离的优势越来越不明显。当达到大雪等级时,三种波长对应的安全密钥率曲线出现了重合,即波长的变化不再对安全密钥率有影响,如图 5(d)所示。3)在个体攻击条件下, Bob 端采用外差检测比采用零差检测时,信号可以传输更远的距离,但随着降雪强度的增加,二者之间的差距越来越小。4)在集体攻击条件下,当传输距离较短时,采用 810 nm 和 1550 nm 波长时零差检测可以得到与外差检测几乎相同的安全密钥率,但采用 3800 nm 波长时外差检测的安全密钥率却比零差检测的好;当传输较远距离时,对三种波长信号进行零差检测所得安全密钥率均比采用外差检测得到的结果要好。

由上述分析可知,要想获得较好的安全密钥率或传输较长的距离,实际中推荐采用较长波长的量子信号;在面对不同的攻击类型时,并不是采用外差检测均可获得较好的安全密钥率。这些结论可以为实际的自由空间量子通信系统的设计提供一定的技术参考。

### 3.2 降雨对安全密钥率的影响

在下面的仿真过程中,小雨、中雨和大雨三种等级降雨强度  $R$  分别取 2.5, 7.5, 15 mm/h, 此时仿真得到不同波长信号的安全密钥率与传输距离之间的关系,如图 6 所示。

与降雪情况类似,由图 6 可知,在降雨天气条件下长波长量子信号与短波长量子信号相比,在传输相同距离时可以获得更好的安全密钥率,在获得相同安全密钥率时可以传输更远距离,但随着降雨强度的增加长波长量子信号的优势将越来越不明显。此外,不同攻击类型和 Bob 采用不同检测方式对三种不同波长信号的安全密钥率的影响也与降雪天气情况类似,在此不再重复。但需要注意的是,在集体攻击情况下,当外差检测比零差检测可以获得更好的安全密钥率时,对应的传输距离在降雨天气条件下要比降雪天气条件下大很多。例如,对比图 5(b)和图 6(b)可以看出,当采用 3800 nm 长波长信号时,在小雪天气条件下,传输距离在 0.71 km 以内时外差检测比零差检测可以获得更好的安全密钥率;但在小雨天气条件下,这一传输距离却增加至 23.7 km。

### 3.3 雾霾对安全密钥率的影响

按照雾霾浓度的不同,将雾霾天气分为轻度雾霾 ( $2 \text{ km} < V_v < 3 \text{ km}$ ), 中度雾霾 ( $< 1 \text{ km} < V_v < 2 \text{ km}$ ), 重度雾霾 ( $V_v < 1 \text{ km}$ ) 三个等级。在下面的仿真过程中,这三种等级  $V_v$  分别取 0.5, 1.5, 2.5 km, 此时仿真得到不同波长信号的安全密钥率与传输距离之间的关系,如图 7 所示。

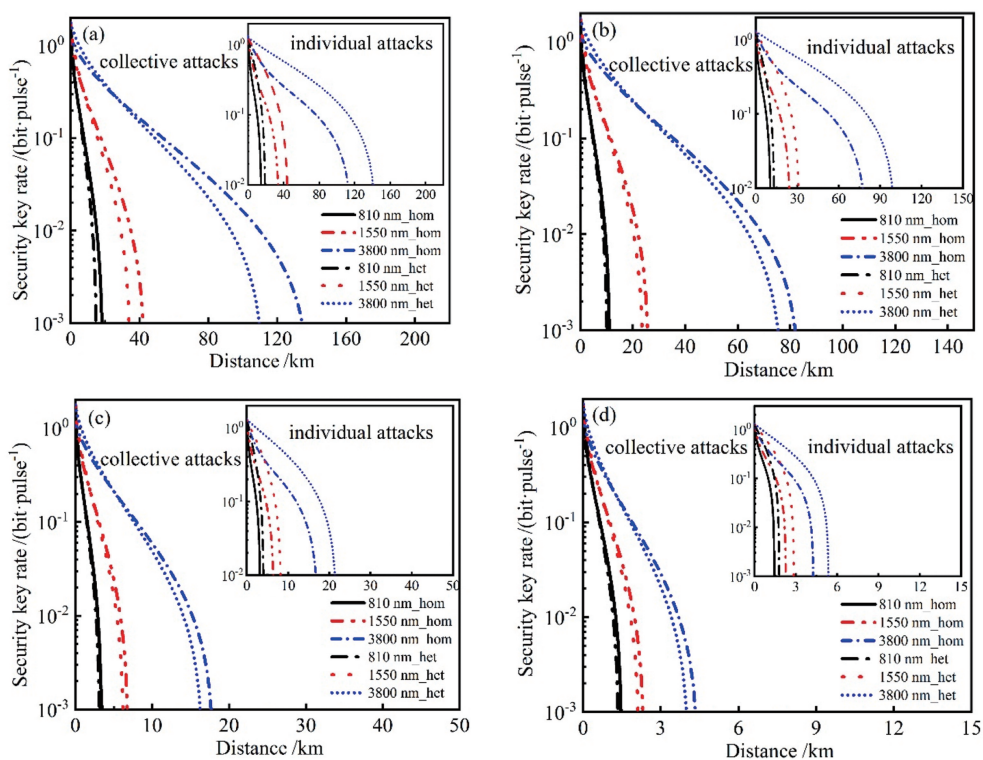


图 6 降雨条件下安全密钥率与传输距离的关系。(a)晴朗;(b)小雨;(c)中雨;(d)大雨

Fig. 6 Relationship between security key rate and transmission distance under different rainfall conditions.

(a) Clear day; (b) light rain; (c) moderate rain; (d) heavy rain

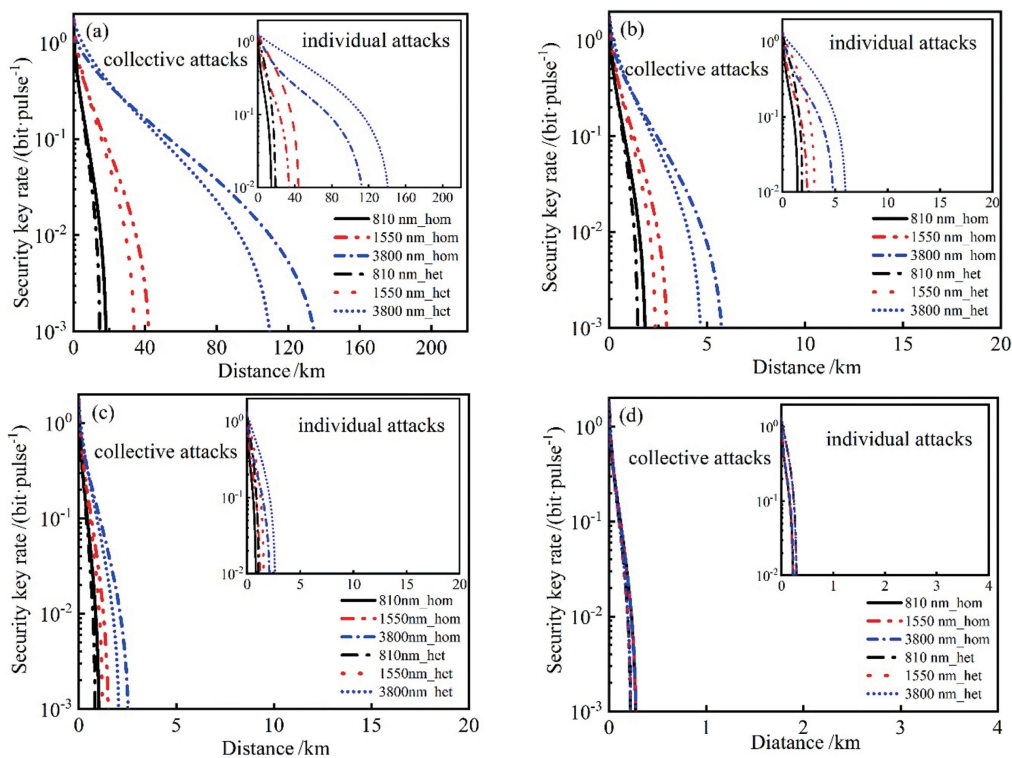


图 7 雾霾条件下安全密钥率与传输距离的关系。(a)晴朗;(b)轻度雾霾;(c)中度雾霾;(d)重度雾霾

Fig. 7 Relationship between security key rate and transmission distance under different haze conditions.

(a) Clear day; (b) slight haze; (c) moderate haze; (d) heavy haze

由图 7 可知,雾霾对不同攻击类型下采用不同波长信号和不同检测方式时的安全密钥率的影响规律与降雪天气条件下非常类似,且当达到重度雾霾天气时,如图 7(d)所示,波长对安全密钥率基本不再产生影响。

通过综合对比降雪、降雨和雾霾三种天气条件可以看出,降雨对自由空间量子通信系统安全密钥率的影响最小,降雪和雾霾的影响都较大。例如,对于大雪、大雨和重度雾霾天气,由图 5(d)、6(d)和 7(d)可以看出,在集体攻击下采用零差检测和 3800 nm 波长时,大雨天气下信号能传输约 4.3 km,而在重度雾霾和大雪天气下却只能分别传输约 0.28 km 和 0.26 km。

## 4 结 论

本文研究了自由空间量子通信中降雪、降雨、雾霾天气条件下不同波长量子信号对安全密钥率的影响,利用连续变量高斯调制的量子密钥分发模型,仿真得到了不同天气条件、不同波长量子信号、不同攻击类型和不同检测方式条件下的安全密钥率随传输距离的变化关系。结果表明,对于上述三种天气条件,长波长量子信号与短波长量子信号相比在传输相同距离时可以获得更好的安全密钥率,在得到相同安全密钥率时可以传输更远的距离,但随着天气条件的恶化长波长量子信号的距离优势越来越不明显。此外,在个体攻击条件下,采用外差检测比采用零差检测时信号可以传输更远的距离。但是,在集体攻击条件下,随着传输距离的增加,利用零差检测和外差检测获得的安全密钥率性能优劣出现交替:当传输距离较短时,采用 810 nm 和 1550 nm 波长时外差检测得到的安全密钥率与零差检测的结果几乎相同,而采用 3800 nm 波长时外差检测的安全密钥率却比零差检测的好;当传输距离较长时,对三种波长信号进行零差检测得到的安全密钥率均比采用外差检测所得结果要好。综合对比降雪、降雨和雾霾三种天气条件,可以得到降雨对自由空间量子通信系统安全密钥率的影响最小,降雪和雾霾的影响都较大。本文的研究成果可以为实际的自由空间量子通信系统的设计提供一定的参考。

## 参 考 文 献

- [1] Miao E L, Han Z F, Gong S S, et al. Background noise of satellite-to-ground quantum key distribution [J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7: 215.
- [2] Yang R, Li Y X, Meng W, et al. Channel characteristics of continuous variable quantum communication system on aviation platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0927002.  
杨汝, 李云霞, 蒙文, 等. 航空平台连续变量量子通信系统的信道特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0927002.
- [3] Lukin I P, Rychkov D S, Falits A V, et al. A phase screen model for simulating numerically the propagation of a laser beam in rain [J]. *Quantum Electronics*, 2009, 39(9): 863-868.
- [4] Nie M, Ren J, Yang G, 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.
- [5] Vasylyev D, Semenov A, Vogel W. Atmospheric quantum channels with weak and strong turbulence [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(9): 090501.
- [6] Vasylyev D, Semenov A A, Vogel W, et al. Free-space quantum links under diverse weather conditions [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(4): 043856.
- [7] Wang S Y, Huang P, Wang T, et al. Atmospheric effects on continuous-variable quantum key distribution[J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(8): 083037.
- [8] Singal P, Rai S, Punia R, et al. Comparison of different transmitters using 1550 nm and 10000 nm in FSO communication systems [J]. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2015, 7(3): 107-113.
- [9] Liu T, Zhang J Z, Zhu C, et al. Investigation of the wavelength selection for the free space optical communication system [C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2018: 18382444.
- [10] Gariano J, Djordjevic I, Liu T. Optimal wavelength selection for entangled quantum key distribution [C]//2017 IEEE Photonics Conference (IPC), October 1-5, 2017, Orlando, FL, USA. New York: IEEE, 2017: 721-722.
- [11] Xu B J, Tang C M, Chen H, et al. Improving the maximum transmission distance of continuous variable no-switching QKD protocol[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(7): 070301.  
徐兵杰, 唐春明, 陈晖, 等. 利用无噪线性光放大器增加连续变量量子密钥分发最远传输距离[J]. *物理*

- 学报, 2013, 62(7): 070301.
- [12] García-Patrón R, Cerf N J. Unconditional optimality of Gaussian attacks against continuous-variable quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(19): 190503.
- [13] Fossier S, Diamanti E, Debuisschert T, et al. Improvement of continuous-variable quantum key distribution systems by using optical preamplifiers [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2009, 42(11): 114014.
- [14] Lodewyck J, Grangier P. Tight bound on the coherent-state quantum key distribution with heterodyne detection [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(2): 022332.
- [15] Navascués M, Acín A. Security bounds for continuous variables quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(2): 020505.
- [16] Lodewyck J, Bloch M, García-Patrón R, et al. Quantum key distribution over 25 km with an all-fiber continuous-variable system [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 042305.
- [17] Gao T C, Liu X C, Zhang Y T, et al. Relationship research between snowfall and visibility [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(4): 403-408.
- 高太长, 刘西川, 张云涛, 等. 降雪现象与能见度关系的探讨 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(4): 403-408.
- [18] Kim I I, McArthur B, Korevaar E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4214: 26-37.
- [19] Liu X C, Gao T C, Liu L, et al. Influences of precipitation on atmospheric extinction coefficient and visibility [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(4): 433-441.
- 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响 [J]. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 433-441.
- [20] Nie M, Chen W, Zhang M L, et al. Effects of haze on the free-space quantum state transfer [J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2015, 20(1): 19-23.
- 聂敏, 陈伟, 张美玲, 等. 雾霾对自由空间量子态传输的影响 [J]. *西安邮电大学学报*, 2015, 20(1): 19-23.