

黑碳与硫酸盐粒子对量子干涉雷达性能的影响

张秀再 赵宇婕 张薇薇

Effects of black carbon and sulfate particles on performance of quantum interference radar

ZHANG Xiuzai, ZHAO Yujie, ZHANG Weiwei

引用本文:

张秀再, 赵宇婕, 张薇薇. 黑碳与硫酸盐粒子对量子干涉雷达性能的影响[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1344–1352. DOI: 10.5768/JAO202546.0612017

ZHANG Xiuzai, ZHAO Yujie, ZHANG Weiwei. Effects of black carbon and sulfate particles on performance of quantum interference radar[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1344–1352. DOI: 10.5768/JAO202546.0612017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微光夜视器件划代方法初探

Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices

应用光学. 2021, 42(6): 1092–1101 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604001>

微光像增强器积分灵敏度单次测量误差分析

Single test error analysis for integral sensitivity of low-light-level image intensifier

应用光学. 2020, 41(4): 791–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0404001>

基于调频连续波雷达的多干涉光路测距系统

Multi-interference optical circuit ranging system based on FMCW laser radar

应用光学. 2025, 46(4): 739–749 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0401005>

高灵敏度微位移零差干涉方法

High sensitivity micro-displacement homodyne interferometry

应用光学. 2022, 43(1): 74–80 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103001>

激光雷达快反镜扫描控制性能优化方法

Optimization method of fast steering mirror scanning control performance in laser radar

应用光学. 2025, 46(4): 750–757 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0401006>

用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构

New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing

应用光学. 2020, 41(3): 637–644 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1344-09

引用格式: 张秀再, 赵宇婕, 张薇薇. 黑碳与硫酸盐粒子对量子干涉雷达性能的影响 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1344-1352.

ZHANG Xiuzai, ZHAO Yujie, ZHANG Weiwei. Effects of black carbon and sulfate particles on performance of quantum interference radar[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1344-1352.



在线阅读

黑碳与硫酸盐粒子对量子干涉雷达性能的影响

张秀再¹, 赵宇婕², 张薇薇²

(1. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 为了研究黑碳与硫酸盐颗粒的不同混合方式对量子干涉雷达性能的影响, 基于内混合 C-S 和 M-G 模型和衰减模型, 对黑碳体积比、传输距离与链路衰减的关系进行分析; 针对不同的脉冲光子数, 分析不同混合模型下黑碳体积比与分辨率、灵敏度的关系; 依据量子损伤模型, 建立不同混合模型下黑碳体积比与生存性能间的关系模型并进行仿真。仿真分析结果表明: 在 C-S 与 M-G 模型下, 在光子数较小时, 对于不同的黑碳体积比, 分辨率和灵敏度均随着脉冲光子数的增加而增大, 生存性能则随着黑碳体积比和传输距离的增加而呈下降趋势。相对而言, 黑碳与硫酸盐粒子在 M-G 混合方式下对其探测性能影响更大, 表明黑碳与硫酸盐粒子的散射特性对量子干涉雷达具有不可忽略的影响。

关键词: 量子干涉雷达; 黑碳与硫酸盐粒子; 灵敏度; 分辨率; 生存性能

中图分类号: TN929.3

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0612017

Effects of black carbon and sulfate particles on performance of quantum interference radar

ZHANG Xiuzai¹, ZHAO Yujie², ZHANG Weiwei²

(1. Jiangsu Province Atmospheric Environment and Equipment Technology Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Electronics and Information, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To study the effect of different mixing modes of black carbon and sulfate particles on the performance of quantum interference radar, based on internal mixing C-S and M-G models and attenuation models, the relationship among black carbon volume ratio, transmission distance and link attenuation was analyzed. The relationship between black carbon volume ratio and resolution and sensitivity under different mixed models was analyzed for different pulse photon numbers. Based on the quantum damage model, the relationship model between black carbon volume ratio and survival performance under different mixed models was established and simulated. The simulation results show that under the C-S and M-G models, for different black carbon volume ratios, the resolution and sensitivity increase with the increase of pulse photon number. The survival performance decreases with the increase of black carbon volume ratio and transport distance. In contrast, the effect of M-G mixing of black carbon and sulfate particles on its detection performance is greater. Results indicate that the scattering properties of black carbon and sulfate particles have a significant effect on

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (11504176, 61601230)

第一作者: 张秀再, E-mail: xzhering@163.com

quantum interference radar.

Key words: quantum interference radar; black carbon and sulfate particles; sensitivity; resolution; survival performance

引言

随着量子技术的快速发展,量子干涉雷达(quantum interference radar, QIR)作为一种新兴的探测技术,逐渐成为雷达领域的研究热点^[1-2]。与传统雷达相比,QIR 基于量子纠缠态和量子压缩态等量子效应,具有高灵敏度、高分辨率、强抗干扰能力以及隐蔽性高等显著优势^[3]。国内外对 QIR 的研究现处于起步阶段,但随着量子技术的不断发展和应用,有望成为未来雷达领域的重要突破口。2001 年,Dowling 研究团队^[4]发现 N00N 纠缠态(即路径—光子数纠缠态)具有亚散粒噪声的超灵敏度,并能够突破瑞利衍射极限。2008 年,GILBERT G 等^[5]分析了基于 N00N 纠缠态的干涉式量子雷达在大气中应用的可行性,其探测性能会因为大气产生的衰减而降低。对此,HUVER S D 等^[6]提出采用路径纠缠 Fork 态,从理论上得出该方法在大气衰减下比采用 N00N 纠缠态具有更好的鲁棒性。2018 年,南京大学课题组^[7]推导了马赫-曾德尔干涉仪中奇偶算符期望值的一般表达式,输入端为 Fork 态和任意态。

在实际应用中,环境因素中气溶胶粒子对光量子信号具有的吸收和散射作用,导致量子态发生退相干和信号衰减,从而降低 QIR 的探测性能。岳喜林^[8]针对积云中的水凝粒子,分析其能见度、荷质比对 QIR 探测性能的影响。聂敏等^[9-10]分析了层积云的粒子浓度与液态含水量、冰晶粒子对 QIR 探测性能的影响。陶志炜等^[11]采用相位扩散主方程分析了大气相位起伏对相干态量子雷达的影响,研究发现,在弱相位起伏下宇称探测为最佳探测方案。李旭等^[12]研究了量子雷达在干扰环境下的生存性,并对不同干扰等级和生存参数对量子雷达生存性的影响进行了分析。

研究显示,大气气溶胶粒子多以内混合态分布,其结构通过核壳模型进行表征,即以黑碳为内核、非吸性气溶胶为包覆层的复合构型。其中,黑碳粒子对可见光和红外波段有强烈的吸收特性^[13],而有机碳气溶胶和硫酸盐气溶胶等非吸收性气溶胶则对可见光具有高单次散射反照率和较强的散射能力^[14]。

在 QIR 雷达探测过程中,大量的黑碳与硫酸

盐颗粒与探测光子碰撞,导致光子的能量发生衰减,降低探测质量。目前,尚未有学者研究黑碳与硫酸盐颗粒的不同混合方式对 QIR 性能的影响,因此,本文将对此展开研究。首先基于不同内混合模型,分析混合颗粒的消光系数;针对不同的发射光子数,建立分辨率、灵敏度与黑碳和硫酸盐颗粒不同混合方式之间的关系;依据量子损伤模型,建立不同混合模型下黑碳体积比与生存性能、传输距离之间的关系模型并进行数值仿真分析。仿真实验结果可为 QIR 探测系统的设计与优化提供参考。

1 黑碳与硫酸盐粒子下量子干涉雷达系统

1.1 量子干涉雷达基本模型及探测原理

基于相干态的 QIR 系统如图 1 所示。在图 1(a)系统结构中,QHD(quantum homodyne detection)为信号探测系统,用于识别特定的光量子信号,CRS(coherent radiation source)为生成相干激光信号的光源。在 QIR 系统中,利用 CRS 生成相干激光信号,信号通过分束器分成两束,一束由发射端发射出去,一束留在此系统中作为参考光子。发射

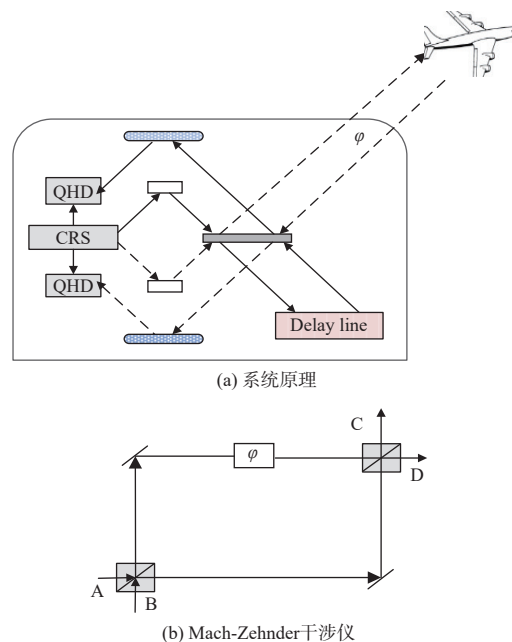


图 1 量子干涉雷达系统

Fig. 1 Quantum interference radar system

出去的探测光子对目标实施检测,当目标被侦测后,其反射信号回到本地雷达系统中。探测光子与参考光子之间会产生一定的相位差 $\Delta\varphi$,可用量子力学的方法对其进行相干检测,进而得到目标的位置信息。

QIR的核心部件是Mach-Zehnder干涉仪^[15],其基本原理如图1(b)所示,使用分振动幅法将单束光转换为双束光,并在分束器处进行干涉。图1(b)中,利用Mach-Zehnder干涉仪对2个相干光子束的干涉信号进行分析,从A、B端输入的两束光在传输过程中,会受到大气影响发生衰减,两束光的衰减系数分别由 C_1 和 C_2 表示,探测光经过相位 φ 到达D端,与AD路径存在相位差 $\Delta\varphi$,对C端与D端的信号进行检测,可得到目标相关信息。

1.2 黑碳与硫酸盐粒子在不同混合方式下的光学特性分析

黑碳气溶胶(black carbon, BC)主要是在不完全燃烧含碳燃料的过程中产生的一种细颗粒物。当颗粒进入大气后,在复杂理化过程作用下,其初始团聚态结构与悬浮的硫酸盐、有机碳等非吸性气溶胶发生异相吸附,逐步形成多层包覆结构。在演化过程中,黑碳核体与包覆物质的结合改变了颗粒的光学特性,处于外混合状态。由于大气中各个分子持续的碰撞和演化,气溶胶粒子逐渐形成包覆结构,进入内混合状态。不同的混合方式会影响气溶胶粒子的折射率、形状等^[16],从而引起其光学特性发生变化。

粒子在不同混合状态下的基本模型如图2所示。图2(a)为典型的外混合模型,此模型中各粒子以球型存在,各个部分不发生多次散射;图2(b)为内混合 core-shell(C-S)模型,其特征为黑碳核心被硫酸盐、有机碳等非吸性气溶胶以同心球层结构包覆的结构;图2(c)为内混合 maxwell-garnett(M-G)模型,该模型以黑碳颗粒为随机分布的内核,由

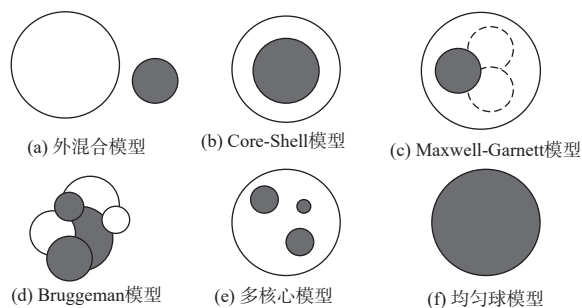


图2 粒子混合模型

Fig. 2 Aerosol mixing mode

硫酸盐、有机碳等非吸性气溶胶构成外壳;图2(d)为Bruggeman模型,硫酸盐、有机碳等非吸收性粒子和黑碳颗粒之间互相粘连但并未包裹,将各个部分简化为球形处理;图2(e)为多核心模型,由非吸收性的粒子包裹多个黑碳颗粒组成;图2(f)为均匀球模型,将多个气溶胶粒子混合形成同性球型,广泛用于对气溶胶粒子的光学性质对比。

在大气传输过程中,光量子信号与气溶胶粒子相互作用引发能量损耗,产生的衰减强度可通过消光系数进行量化表征。气溶胶光学特性研究中关键参数为复折射率,其数值特征具有重要物理意义,实部反映粒子对光的折射能力,虚部则表征材料对光辐射的吸收特性。在潮解过程中,硫酸盐与有机碳等与环境中的水分子结合,引发颗粒介电常数发生变化,进而改变光散射行为特性。气溶胶粒子在不同湿度下的复折射率表示为^[17]

$$m = m_w + \frac{(m_d - m_w)(r_m^3 - r_d^3)}{r_m^3} \quad (1)$$

式中: m_w 为颗粒在未经潮解过程前的折射率; m_d 为大气中普遍存在的水汽折射率; r_m 为潮解后的粒子半径; r_d 为未潮解前的有效半径。

选取在实际环境中常见的两种内混合模型对黑碳和硫酸盐粒子进行研究。当混合粒子在C-S模型情况下,采用分层球Mie散射可得混合粒子的消光系数为

$$k_{\text{ext}1} = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{el}}(r) C(r) n_m(r) dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} C(r) n_m(r) dr} \quad (2)$$

式中: $C(r)$ 为同心球气溶胶的投影面积,表示为 $C(r) = \pi r_m^2$; $n_m(r)$ 为C-S混合模型下气溶胶粒子的谱分布,表示为

$$n_m(r) = f_c n_1(r) + (1 - f_c) n_2(r) \quad (3)$$

式中: $n_1(r)$ 、 $n_2(r)$ 分别为硫酸盐和黑碳粒子在正态分布下的谱分布函数; $Q_{\text{el}}(r)$ 为C-S模型下气溶胶粒子的消光效率因子,表示为

$$Q_{\text{el}}(r) = \frac{2}{y^2} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1) \text{Re}(a'_n + b'_n)] \quad (4)$$

式中: $y = 2\pi r_m / \lambda$ 为内混合黑碳与硫酸盐颗粒的粒径分布参数; n 为内混合黑碳与硫酸盐颗粒的数浓度; a'_n 、 b'_n 为C-S模型下的散射系数。

M-G模型是将混合物中的黑碳视为核心,硫酸盐、有机碳等非吸收性物质视为壳的一种核心

壳结构。假设混合粒子的空间样本无限大, 采用统计分析得到混合气溶胶粒子的等效复折射率 m 为^[18]

$$m = \left(m_s^2 \frac{m_c^2 + m_s^2 + 2f_c(m_c^2 - m_s^2)}{m_c^2 + 2m_s^2 - f_c(m_c^2 - m_s^2)} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: m_s 为核的复折射率; m_c 为壳的复折射率; $f_c = r_c^3/r_m^3$ 为黑碳相对于混合粒子的整体的比例, 也称为黑碳体积比; r_c 为黑碳气溶胶的半径; r_m 为混合气溶胶粒子的有效半径。

当混合粒子处于 M-G 模型的情况下, 结合 Mie 散射可得混合粒子的消光系数为

$$k_{\text{ext}2} = \pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{e2}(r, \lambda, m) n(d) r^2 dr \quad (6)$$

式中: $r_{\max}$ 、 $r_{\min}$ 分别为粒子有效半径的最大值和最小值, 分别取值为 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$; Q_{e2} 为消光效率因子, 表示为

$$Q_{e2}(r) = \frac{2}{y^2} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)\text{Re}(a_n + b_n)] \quad (7)$$

式中: a_n 、 b_n 为球形粒子的 Mie 散射系数; $n(r)$ 为用正态分布表示的混合颗粒的浓度谱函数, 表示为

$$n(r) = \frac{n_0}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln(\sigma_0)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \ln r_0}{\ln \sigma_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中: n_0 为粒子单位体积内的个数; $r_0 = 0.13 \mu\text{m}$, $\sigma_0 = 1.8$ 。

在波长 860 nm 与相对湿度为 35% 条件下, 选定黑碳、硫酸盐及有机碳气溶胶的光学常数, 复折射率分别为 $m_c = 1.75 - 0.44i$ 、 $m_{s1} = 1.43 - 1.0 \times 10^{-8}i$ 、 $m_{s2} = 1.53 - 0.0059i$ 。结合式 (2) 和式 (6), 对两种混合粒子的等效半径和消光系数展开仿真计算, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 两种混合气溶胶粒子的消光系数在不同的内混合方式下随着粒子半径的增大呈上升趋势, 相较而言, 在 M-G 混合方式下气溶胶粒子等效半径对消光系数影响更大。

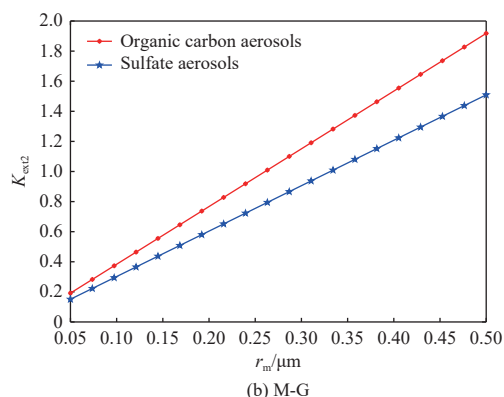
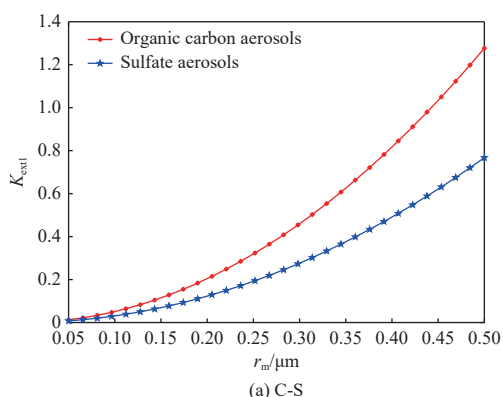


图 3 黑碳、硫酸盐及有机碳混合气溶胶粒子有效半径与消光系数的关系

Fig. 3 Relationship between effective radius and extinction coefficient of aerosol particles mixed with black carbon, sulfate and organic carbon

2 黑碳与硫酸盐粒子的不同混合方式对链路衰减的影响

QIR 探测时发射的光量子信号在传输过程中, 遇到混合气溶胶粒子发生碰撞, 导致光子的偏振状态发生改变, 产生退偏振效应, 使得探测光信号衰减, 同时限制光量子的传输距离。衰减系数表示为^[19]

$$L_{\text{att}} = 10 \cdot d \cdot k_{\text{ext}1,2} \cdot \log_{10} e \quad (9)$$

式中: e 是常数, 为 2.718 ; $k_{\text{ext}1,2}$ 是粒子在 C-S 和 M-G 状态下的消光系数。

针对两种内混合方式的消光特性, 通过式 (9) 数值模拟探究黑碳体积比与链路衰减间的关系, 仿真结果如图 4 和图 5 所示, 其中, x 轴为探测光信号在大气中的传输距离, y 轴为混合气溶胶粒子中的黑碳体积比, z 轴为光量子信号在混合粒子影响下的链路衰减 L_{att} 。由图 4 和图 5 可知, 在 C-S 和 M-G 混合方式下, 链路衰减随着黑碳体积比和光量子信号传输距离的增大而逐渐增大。当传输距离一定时, 黑碳体积比 f_c 越大, 光量子信号受到的散射效应越强, 进而产生较大衰减。当光量子信号传输距离为 4.21 km 时, 黑碳体积比 f_c 为 $0.11 \sim 0.42$, 在 C-S 混合方式下, 链路衰减从 1.20 dB 增大至 3.20 dB , 在 M-G 方式下链路衰减从 1.35 dB 增大至 3.60 dB 。从整体趋势看, 光量子信号在 M-G 模型下产生的衰减更大。在内混合模型中, 由于透镜效应强化黑碳对光学特性的影响, 链路衰减随着黑碳体积比的增大而上升。在 M-G 模型下黑碳对其光学性质的影响更大, 故在此模型下产生

的衰减更大。因此,在 QIR 进行探测时,充分考虑黑碳与硫酸盐粒子在不同混合方式下的变化,对于确保探测的可靠性和稳定性至关重要。

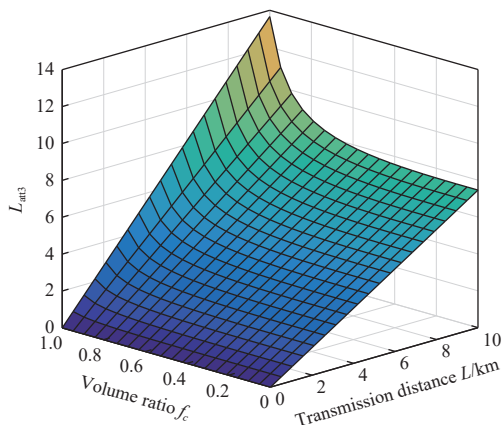


图 4 C-S 混合方式下黑碳体积比、传输距离与链路衰减的关系

Fig. 4 Relationship between black carbon volume ratio, transmission distance and link attenuation in C-S hybrid mode

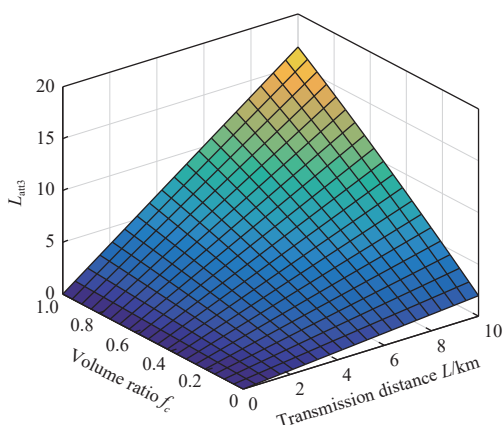


图 5 M-G 混合方式下黑碳体积比、传输距离与链路衰减的关系

Fig. 5 Relationship between black carbon volume ratio, transmission distance and link attenuation in M-G mixed mode

3 黑碳与硫酸盐粒子的不同混合方式对 QIR 系统分辨率的影响

在 QIR 系统中,分辨率是衡量雷达能够区分 2 个相邻目标的最小距离或最小角度的能力,分辨率的高低直接决定了雷达的目标识别能力和成像质量。受多个因素的综合影响,尤其是大气传输中的损耗会导致探测信号衰减,降低信号透过率,从而影响雷达的分辨率和灵敏度。QIR 系统的分

辨率可以通过脉冲信号的角度和半峰全宽来评估,能准确地反映出雷达的性能^[20]。

当光量子信号受到黑碳和硫酸盐粒子的影响时,QIR 的空间分辨率可表示为

$$\delta R_Q = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{NC_1C_2}} = \frac{\lambda[\exp(-\kappa_B)]^{-1/2}}{2\pi\sqrt{N\exp(-\kappa_A)}} \quad (10)$$

式中: $C_1 = \exp(-\kappa_A)$ 为本地参考光的透过率系数,其中 κ_A 为大气透过率系数; $C_2 = \exp(-2\kappa_B)$ 为探测光在黑碳和硫酸盐粒子不同混合方式下的透过率系数。在 C-S 混合方式下,有:

$$C_2 = \exp(-\kappa_B) = \exp\left[-\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{e2}(r)C(r)n_m(r)dr\right] / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} C(r)n_m(r)dr$$

在 M-G 混合方式下,有:

$$C_2 = \exp(-\kappa_B) = \exp\left[-\pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{el}(r,\lambda,m)n(r)r^2dr\right]$$

其中 $C_1, C_2 \in [0, 1]$, 当 κ_A, κ_B 均为 0 时,即探测信号在大气中并未产生衰减,空间分辨率 $\delta R_Q = \lambda/2\pi\sqrt{N}$,相较于传统雷达空间分辨率 $\delta R_c = \lambda/2$,分辨率提升了近 $\sqrt{N}$ 倍,超越了瑞利衍射极限。

根据式 (10),可得在 C-S 和 M-G 混合方式下,空间分辨率与不同黑碳体积比 f_c 、脉冲光子数的关系,仿真结果如图 6 和图 7 所示,其中, x 轴为发射的脉冲光子数, y 轴为空间分辨率。从图 6 和图 7 可以看出,当黑碳体积比一定时,在 C-S 和 M-G 不同混合方式下空间分辨率 δR_Q 的值随着脉冲光子数的增加而逐渐减小。当黑碳体积比为 0.2、0.4、0.8,且 $N=8$ 时,在 C-S 混合方式下 δR_Q 的值依次为 0.83、1.02、1.56。在 M-G 混合方式下 δR_Q 的值依次

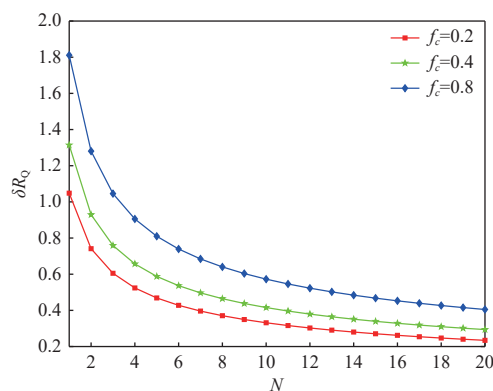


图 6 C-S 混合方式下空间分辨率与不同黑碳体积比 f_c 、脉冲光子数的关系

Fig. 6 Relationship between spatial resolution and different black carbon volume ratio and pulse photon number in C-S hybrid mode

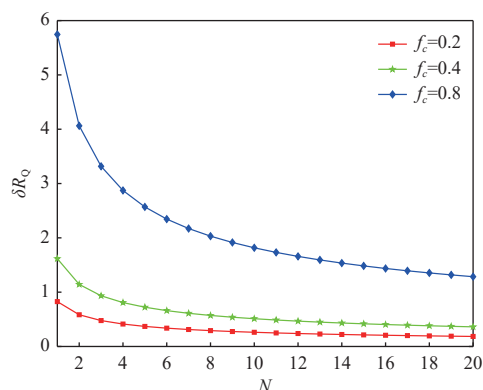


图7 M-G混合方式下空间分辨率与不同黑碳体积比 f_c 、脉冲光子数的关系

Fig. 7 Relationship between spatial resolution and different black carbon volume ratio and pulse photon number in M-G mixed mode

为0.24、0.36、0.93,即在黑碳体积比一定时,粒子不论为何种模型,QIR分辨率都随着光子数的增大而增加。当发射端光子数不变时,随着黑碳体积比的增加, δR_Q 的值呈上升趋势,即QIR分辨率随黑碳体积比的增加而降低。相同条件下M-G混合方式的 δR_Q 值的减少趋势更为明显。由此可知,在粒子的不同混合方式下,增加发射光子数有利于改善QIR分辨率随黑碳体积比的增加而下降的问题。在实际探测过程中可以考虑增加发射光子数,增强在各种气象条件下的探测性能,从而更好地符合实际应用需求。

4 黑碳与硫酸盐粒子的不同混合方式对QIR灵敏度的影响

QIR的灵敏度是衡量其探测能力的重要指标,反映了系统对微弱信号的检测能力以及对目标特征的识别精度^[21-22]。但探测光在传输过程中会受到黑碳与硫酸盐混合粒子的影响,导致纠缠光子的相干态遭到破坏,从而引起探测光信号衰减,进而削弱QIR系统的探测性能。

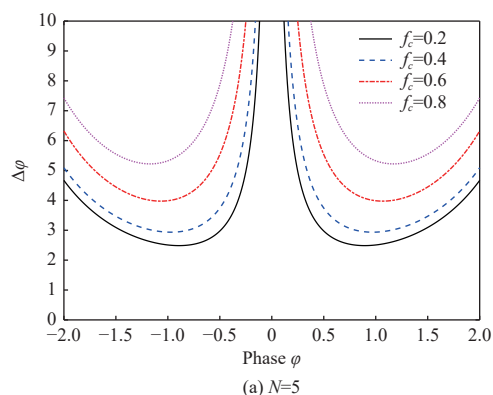
在黑碳与硫酸盐混合粒子环境下,QIR系统灵敏度可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{\sqrt{1 - \langle \Pi \rangle^2}}{|d\langle \Pi \rangle / d\varphi|} = \frac{\left[\exp(N(C_1 - C_2)^2) \exp\left(4NC_1C_2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}\right) - 1 \right]^{1/2}}{|NC_1C_2 \sin \varphi|} \quad (11)$$

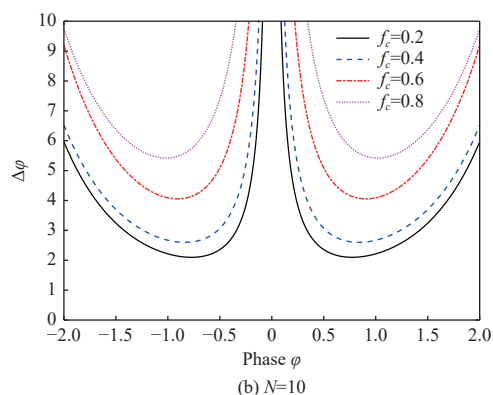
式中: φ 表示探测光与参考光之间的相位差。当无

衰减和损耗时,即 $C_1 = C_2 = 1$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 在 $\varphi = 0$ 时取最小值且 $\Delta\varphi_{\min} \propto 1/\sqrt{N}$,灵敏度达到 $O(1/\sqrt{N})$ 海森伯极限。当探测光与参考光在大气中传输时均产生衰减或受到光学器件的影响,两衰减系数不相等,即 $C_1 \neq C_2 \neq 1$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 不在 $\varphi = 0$ 处。

根据式(11)对不同黑碳体积比 f_c 和光子数影响下 $\Delta\varphi$ 的关系进行仿真,仿真结果如图8和图9所示,其中,x轴为相位,y轴为相位差。从图8和图9可以看出,当光子数一定时,在两种不同混合方式下, $\Delta\varphi_{\min}$ 随着黑碳体积比 f_c 的增大而增大。当光子数 N 从5变化到10时,在C-S混合方式下, $f_c=0.2$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从2.49降低至2.09; $f_c=0.4$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从2.94降低至2.59; $f_c=0.6$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从3.98提升至4.05; $f_c=0.8$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从5.22提升至5.42。在M-G混合方式下, $f_c=0.2$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从2.30降低至2.35; $f_c=0.4$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从4.78提升至5.14; $f_c=0.6$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从9.02提升至9.11; $f_c=0.8$ 时, $\Delta\varphi_{\min}$ 的值从18.13提升至18.67。此结果表明,不论为何种混合方式,QIR灵敏度均受黑碳体积比的影响,并随着 f_c 的增大而降低。相



(a) $N=5$



(b) $N=10$

图8 C-S混合方式和不同黑碳体积比下灵敏度与相位的关系

Fig. 8 Relationship between sensitivity and phase under C-S mixing mode and different black carbon volume ratios

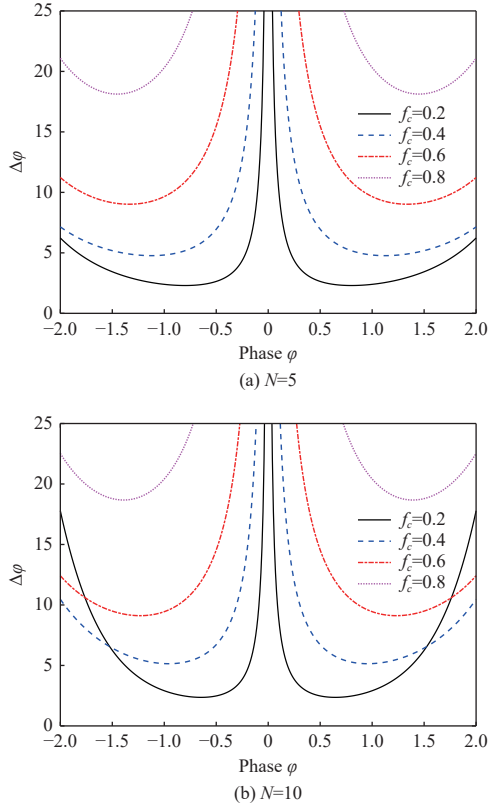


图9 M-G混合方式和不同黑碳体积比下灵敏度与相位的关系
Fig. 9 Relationship between sensitivity and phase under M-G mixing mode and different black carbon volume ratios

较于C-S混合方式,M-G混合方式的 $\Delta\varphi_{\min}$ 受 f_c 的影响更大。当黑碳体积比 f_c 较大时,增加脉冲光子数 N 反而会导致QIR的灵敏度下降,这是由于探测光受混合粒子影响,与参考光相差过大,导致灵敏度下降。

5 黑碳与硫酸盐粒子的不同混合方式对QIR生存性能的影响

QIR在实际目标探测过程中,探测光量子信号因为在黑碳和硫酸盐粒子环境中产生损耗而发生能量耗散或吸收,从而影响探测的精度和可靠性。通过引入量子态保真度与光子生存系数 η ,能够量化评估QIR在复杂环境下的生存能力与抗干扰性能。当信号经过探测区域后,其量子态与初始量子态越相似,说明探测信号的生存性越高,量子雷达的探测性能也越优越。

QIR在复杂环境下的生存函数可表示为

$$Y_c = \eta F_c \quad (12)$$

式中: η 为生存系数, $0 < \eta < 1$,与量子光信号所处环境有关; F_c 为保真度。

假设QIR探测区域的信道运算元为

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{bmatrix} Q_1 = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: p 为单个光子丢失概率,相当于 Q_1 将 $|1\rangle$ 变为 $|0\rangle$ 状态。

设QIR中一个量子比特的状态为

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix} \quad (14)$$

则在 $t_0 + \Delta t$ 时量子密度算符表示为

$$\rho_E(t_0 + \Delta t) = \sum_{p=0}^1 E_p \rho E_p^\dagger = \begin{pmatrix} \rho_{00} + p\rho_{11} & \sqrt{1-p}\rho_{01} \\ \sqrt{1-p}\rho_{10} & (1-p)\rho_{11} \end{pmatrix} \quad (15)$$

采用数学归纳法,得到在 $t_0 + n\Delta t$ 时的量子密度算符为

$$\rho_E(t_0 + n\Delta t) = \begin{pmatrix} \rho_{00} + [1 - (1-p)^n]\rho_{11} & (\sqrt{1-p})^n \rho_{01} \\ (\sqrt{1-p})^n \rho_{10} & (1-p)^n \rho_{11} \end{pmatrix} \quad (16)$$

如果QIR发射光量子初始态为

$$|\varphi\rangle_Q = g|0\rangle_E + s|1\rangle_E \quad (17)$$

则 Q 密度算符为

$$\rho_Q = \begin{pmatrix} |g|^2 & gs \\ gs & |s|^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

根据纯态和量子态的保真度,得到QIR发射量子态经过混合气溶胶粒子时,在 $t_0 + n\Delta t$ 时的保真度为

$$F_c = \sqrt{\langle \varphi | \rho_Q | \varphi \rangle_Q} = \sqrt{g^4 + g^2 s^2 - g^2 s^2 (1-p)^n + 2g^2 s^2 (\sqrt{1-p})^n + (1-p)^n s^4} \quad (19)$$

令 $g^2 = \mu$, $s^2 = \nu$, $(\sqrt{1-p})^n = r_t$, 由 $|g|^2 + |s|^2 = 1$, 将式(19)简化为

$$F_c = \sqrt{\mu \left[2r_t(1-\mu) \left(1 - r_t \left(1 - \frac{1}{2\mu} \right) \right) + 1 \right]} \quad (20)$$

将式(20)带入式(12),可得QIR的探测光子在黑碳和硫酸盐粒子环境下的生存函数,即:

$$Y_c = \eta F_c = \frac{5809}{5810} - \frac{9k_{\text{ext},2}}{2905} \sqrt{\mu [2r_t(1-\mu)(1-r_t(1-1/2\mu))+1]} \quad (21)$$

根据式(21)对黑碳和硫酸盐粒子在不同混合方式下的生存函数进行仿真分析,结果如图10和图11所示,其中, x 轴为探测光信号的传输距离, y 轴为黑碳体积比, z 轴为生存性能。从图10和图11可以看出,当黑碳体积比和光量子信号传输

距离增大时, QIR 生存性能呈下降趋势; 当传输距离一定, 即 $L=4$ km 时, 随着黑碳体积比从 0 增大到 0.5, 在 C-S 混合方式下, QIR 的生存性能从 0.75 下降至 0.64; 在 M-G 的混合方式下, QIR 的生存性能从 0.60 下降到 0.51。表明在不同混合方式下, 随着黑碳体积比的增大, 混合粒子在大气中的散射和吸收效应增强, 消光系数变大, 导致探测光子的生存性能降低。仿真分析结果表明, 黑碳和硫酸盐气溶胶的不同混合模式均会对 QIR 的光量子探测信号产生干扰, 其中 M-G 混合模式对信号衰减的影响程度更为明显。因此, QIR 在探测过程中, 需要根据实际环境中粒子的混合方式选择合适的方法, 优化探测结果。

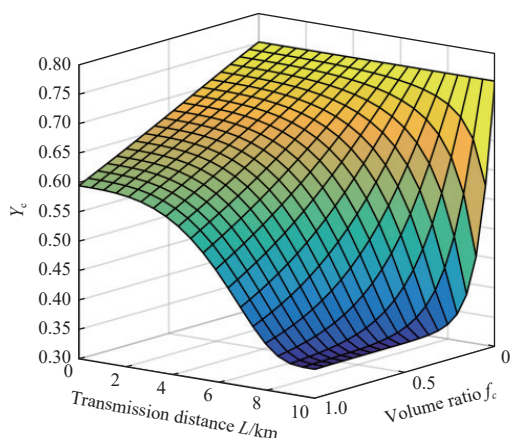


图 10 在 C-S 混合方式下黑碳体积比、传输距离与生存性能的关系

Fig. 10 Relationship between black carbon volume ratio, transport distance and survival performance in C-S mixing mode

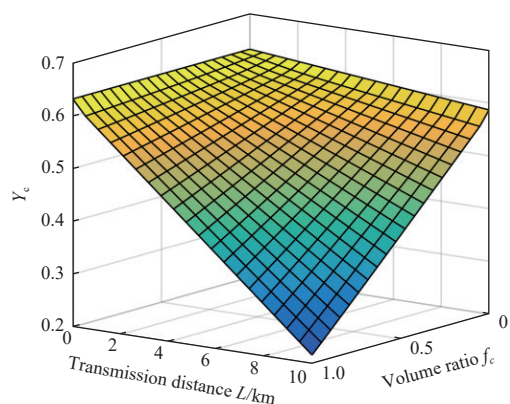


图 11 在 M-G 混合方式下黑碳体积比、传输距离与生存性能的关系

Fig. 11 Relationship between black carbon volume ratio, transport distance and survival performance in M-G mixed mode

6 结论

研究了黑碳与硫酸盐粒子的不同混合方式对 QIR 探测性能的影响。采用内混合的 C-S 和 M-G 模型分析了黑碳与硫酸盐粒子的消光系数, 根据粒子的混合模型, 研究了黑碳体积比与链路衰减的关系。针对不同的发射端脉冲光子数, 分析了不同混合模型下黑碳体积比与 QIR 分辨率、灵敏度的关系。依据量子损伤模型, 建立了不同混合模型下黑碳体积比与生存性能、传输距离之间的关系并进行数值仿真分析。仿真结果表明: 在 C-S 和 M-G 模型下, 对于不同的黑碳体积比, QIR 的分辨率和灵敏度均随着脉冲光子数的增加而增大, 生存性能则随着黑碳体积比和传输距离的增加而呈下降趋势。相较于 C-S 混合方式, 黑碳与硫酸盐粒子在 M-G 混合方式下对 QIR 探测性能影响更大。因此, 在进行探测时需要综合考虑黑碳与硫酸盐粒子的混合方式及其对探测性能的影响。此仿真结果为 QIR 在复杂大气环境中的优化设计与性能提升提供了理论依据。

参考文献:

- [1] SALMANOGLI A, GOKCEN D, GECIM H S. Entanglement sustainability in quantum radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(6): 1-11.
- [2] LANZAGORTA M, UHLMANN J. Opportunities and challenges of quantum radar[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020(11): 38-56.
- [3] BOUST F, GROSSHANS F, SORELLI G, et al. Detecting a target with quantum entanglement[J]. ONERA, 2020(10): 68-90.
- [4] KOK P, BOTO A N, ABRAMS D S, et al. Quantum-interferometric optical lithography: towards arbitrary two-dimensional patterns[J]. Physical Review A, 2001, 63(6): 21-22.
- [5] GILBERT G, WEINSTEIN Y S. Aspects of practical remote quantum sensing[J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(19): 3283-3291.
- [6] HUVER S D, WILDFEUER C F, DOWLING J P. Entangled fock states for robust quantum optical metrology, imaging, and sensing[J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 063828.
- [7] WANG S, WANG Y, ZHAI L, et al. Two-mode quantum

- interferometry with a single-mode Fock state and parity detection[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(5): 1046-1053.
- [8] 岳喜林. 云对毫米波雷达及量子雷达的影响[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- YUE Xilin. Influence of cloud on millimeter wave radar and quantum radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [9] 聂敏, 张政, 杨光, 等. 层积云背景下量子干涉雷达最优平均光子数自适应策略[J]. *激光杂志*, 2024, 45(1): 26-32.
- NIE Min, ZHANG Zheng, YANG Guang, et al. Adaptive strategy for optimal mean photon number of quantum interference radar in stratocumulus background[J]. *Laser Journal*, 2024, 45(1): 26-32.
- [10] 聂敏, 张怡心, 杨光, 等. 冰晶粒子对量子干涉雷达探测性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 90-98.
- NIE Min, ZHANG Yixin, YANG Guang, et al. Effect of ice crystal particles on detection performance of quantum interference radar[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 90-98.
- [11] 陶志炜, 王书, 任益充, 等. 大气湍流引起的相位起伏对相干态量子雷达相位估计的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(1): 31-37.
- TAO Zhiwei, WANG Shu, REN Yichong, et al. Effect of phase fluctuation caused by atmospheric turbulence on phase estimation of coherent state quantum radar[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(1): 31-37.
- [12] 李旭, 聂敏, 杨光, 等. 基于纠缠的量子雷达生存性策略及性能仿真[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 144-148.
- LI Xu, NIE Min, YANG Guang, et al. Entanglement based survivability strategy and simulation of quantum radar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 144-148.
- [13] ADACHI K, BUSECK P R. Internally mixed soot, sulfates, and organic matter in aerosol particles from Mexico city[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(21): 6469-6481.
- [14] 李本纲, 张宇, 崔司宇, 等. 中国硫酸盐气溶胶直接辐射效应数值模拟[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1524-1529.
- LI Bengang, ZHANG Yu, CUI S Y, et al. Numerical simulation of direct radiation effects of sulfate aerosols in China[J]. *Journal of Environmental Science*, 2016, 36(5): 1524-1529.
- [15] 刘伟涛, 聂镇武, 孙帅. 量子雷达技术的发展现状及趋势[J]. *国防科技*, 2023, 44(4): 5-22.
- LIU Weitao, NIE Zhenwu, SUN Shuai. Development status and trend of quantum radar technology[J]. *National Defense Science and Technology*, 2023, 44(4): 5-22.
- [16] WEN Y. Improved algorithm for electromagnetic scattering of plane waves and shaped beams by multilayered spheres[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(9): 1710-1720.
- [17] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. *气象学报*, 2002(2): 230-237.
- ZHANG Lisheng, SHI Guangyu. Effects of relative humidity on radiative properties and radiative forcing of aerosols[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002(2): 230-237.
- [18] 周晨, 张华, 王志立. 黑碳与非吸收性气溶胶的不同混合方式对其光学性质的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 278-289.
- ZHOU Chen, ZHANG Hua, WANG Zhili. Effect of different mixing modes of black carbon and non-absorbent aerosol on its optical properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 278-289.
- [19] 聂敏, 常乐, 杨光, 等. 灰霾粒子与水云粒子不同混合方式对量子卫星通信性能影响[J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 16-25.
- NIE Min, CHANG Le, YANG Guang, et al. Effect of different mixing modes of haze particles and water cloud particles on the performance of quantum satellite communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 16-25.
- [20] WANG Q, HAO L, ZHANG Y, et al. Optimal detection strategy for super-resolving quantum lidar[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(2): 023109.1-023109.8.
- [21] 王书, 任益充, 饶瑞中, 等. 大气损耗对量子干涉雷达的影响机理[J]. *物理学报*, 2017, 66(15): 52-62.
- WANG Shu, REN Yichong, RAO Ruizhong, et al. Effect of atmospheric loss on quantum interference radar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(15): 52-62.
- [22] 张琳, 聂敏, 刘晓慧. 有噪量子信道生存函数研究及其仿真[J]. *物理学报*, 2013, 62(15): 24-30.
- ZHANG Lin, NIE Min, LIU Xiaohui. Study and simulation of noisy quantum channel survival function[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(15): 24-30.