

# 激光与光电子学进展

## 对流层水云对量子干涉雷达探测性能的影响及仿真

聂敏<sup>1</sup>, 王瑾<sup>1\*</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 张美玲<sup>1</sup>, 孙爱晶<sup>1</sup>, 裴昌幸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

<sup>2</sup>西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071

**摘要** 采用修正的伽马分布, 结合米氏散射理论, 分析了水云粒子的光散射特性, 建立了 4 种常见水云粒子含水量与消光系数的关系。对于光量子的偏振态, 研究了水云粒子背景下量子干涉雷达(QIR)探测光子的偏振变化规律, 建立了水云粒子影响 QIR 探测光子的传输距离、分辨率、误码率以及生存性能的数学模型。理论分析和实验仿真结果表明: 随着水云中含水量的增加, 消光系数呈线性增加, 导致衰减系数增加, 从而使得探测光子的能量耗散量增大, 探测光子的传输距离下降; 当发射光子数目一定时, QIR 的分辨率随水云粒子光学厚度的增加而降低; 当水云粒子浓度一定时, 随着退偏比的增大, 系统的误码率呈减小趋势; 当目标的可探测点数一定时, 水云对 QIR 系统的干扰强度越大, 雷达的生存性能越低。由此可见, 在 QIR 的设计、调试和使用过程中, 需根据水云的相关参数, 自适应地调整 QIR 系统的各个指标参数, 从而提升系统的探测性能。

**关键词** 大气光学; 对流层水云; 量子干涉雷达; 分辨率; 传输距离; 雷达生存性能

中图分类号 TN510.70

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0501001

### Effect of Tropospheric Water Cloud on Detection Performance of Quantum Interferometric Radar and Its Simulation

Nie Min<sup>1</sup>, Wang Jin<sup>1\*</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Zhang Meiling<sup>1</sup>, Sun Aijing<sup>1</sup>, Pei Changxing<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an, Shannxi 710121, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shannxi 710071, China

**Abstract** The modified Gamma distribution and Mie scattering theory were used to examine the light scattering attributes of water cloud particles to investigate the effect of water cloud on quantum interferometric radar (QIR) performance parameters, and a relationship was developed between water content and extinction coefficient of four common water cloud particles. For the polarization state of light quantum, the polarization change law of QIR detected photon under the background of water cloud particles is researched, and the mathematical model of the effect of water cloud particles on the transmission distance, resolution, bit error rate, and the survival performance of QIR detected photon is established. The theoretical analysis and experimental simulation results show that the extinction coefficient linearly increases with the increase of water content in the water cloud, causing the increase of attenuation coefficient, thus increasing the energy dissipation of the detected photon and decreasing the transmission

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-05-07; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(61971348, 61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划(2015KW-013)、陕西省教育厅科研计划(16JK1711)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JM-464)

通信作者: \*942461474@qq.com

distance of the detected photon. When the number of emitted photons remains constant, the resolution of QIR decreases with the increase in the optical thickness of water cloud particles. When the concentration of water cloud particles remains constant, the bit error rate of the system decreases with the increase of the depolarization ratio. When the number of detectable points of the target is constant, the greater the interference intensity of the water cloud to the QIR system is, the lower the survival performance of the radar is. To improve the detection performance of the system, each index parameter of the QIR system should be adjusted adaptively according to the relevant parameters of the water cloud in the design, debugging, and use of QIR.

**Key words** atmospheric optics; tropospheric water cloud; quantum interferometric radar; resolution; transmission distance; radar survivability

## 1 引言

近三十年来,量子信息技术在理论方面和技术方面均取得了突飞猛进的发展。其利用量子纠缠和量子态的不可克隆原理进行通信<sup>[1]</sup>,故量子信息是量子雷达探测的起源。量子雷达是近年来国内外的一个研究热点,其将量子信息技术和传统的雷达技术相结合,通过对电磁场的微观量子态和量子态的操作和控制来实现目标探测、成像以及测量等,旨在解决经典雷达在目标探测性能等方面的不足,提升雷达的综合性能。相对于传统雷达,量子雷达提高了雷达系统的灵敏度及分辨率,增强了系统的抗干扰和反隐身能力<sup>[2]</sup>。量子雷达目前主要包括接收端量子增强激光雷达、量子干涉雷达(QIR)、量子照射等3种量子雷达探测体制<sup>[3-4]</sup>。其中:接收端量子增强激光雷达的量子传感器发射的光是经典态光,接收端使用量子光探测来提升其性能;QIR属于纠缠光子雷达系统,基于传统雷达的测距原理可知,可以用量子干涉仪来分析QIR的目标探测性能<sup>[5]</sup>;量子照射发射纠缠光子,其灵敏度可以达到海森堡极限,但是不具备超分辨率的特点。初步研究结果表明,利用纠缠光子的量子雷达与不采用纠缠光子的雷达相比,前者分辨率呈二次方增长<sup>[6]</sup>。大气环境对量子雷达的影响是提升雷达探测性能的障碍之一,其原因有二:1) 对流层中水云位于温度相对较高的大气底层,2) 水云通常被认为是由粒子半径介于1~150  $\mu\text{m}$ 的球形液态水滴组成<sup>[7]</sup>。水云粒子的含水量、散射系数、吸收系数、不对称因子、相函数等散射特性<sup>[8]</sup>都会影响QIR的探测性能,从而降低QIR系统的探测距离、分辨率等。

Dowling小组<sup>[9]</sup>在2009年研究了存在损耗时,量子干涉测量传感的最优化问题。王书等<sup>[10]</sup>分析了由大气闪烁引起的光强起伏和大气损耗对QIR性能的影响,结果表明大气闪烁引起的透过率起伏

能提高QIR的灵敏度。李旭等<sup>[11]</sup>研究了不同干扰背景下量子雷达的生存性能,并根据不同干扰等级的损伤模型建立了量子雷达生存策略。聂敏等<sup>[12]</sup>分析了冰晶粒子对QIR探测性能的影响并进行了仿真实验,结果表明冰晶粒子对雷达信号的误码率、分辨率等都存在一定程度的影响。

关于对流层水云对QIR的探测性能的影响目前还尚未展开。本文根据水云内粒子的谱分布函数,通过米氏散射理论分析了水云的光散射特性,并研究了水云散射对光量子偏振态的影响,分析了偏振态演化对QIR的探测距离、分辨率以及生存性能等探测性能的影响。通过仿真进行实验,定量研究了水云对QIR性能的影响,这为改善量子雷达系统受环境的影响提供了理论依据。

## 2 水云背景下的QIR系统

在实际大气环境中,用量子雷达系统对目标进行探测时,探测光子在传输时经过对流层水云,并受水云粒子散射特性的影响,导致量子信号的能量衰减。QIR属于纠缠光子雷达,其系统如图1所示,其中CRS是纠缠态光源,QHD是探测信号处理系统。通过CRS产生一个纠缠的光子对,通过分束器将纠缠光子对分成对照光子和探测光子,其中探测光子通过发射端射向目标,对照光子则作为本地光子保留在量子雷达系统中。

探测光子由发射端发射出去后,对目标区域进行探测,随后经目标反射回本地雷达系统中,其与对照光子由于路径不同存在光程差,进而产生一定的相位差 $\Delta\varphi$ 。因此将两路互相纠缠的光子在返回时重新进行干涉,并采用衰减量子干涉测量法测量该相位差,从而得到探测目标的距离信息,故QIR的性能可以通过Mach-Zehnder干涉仪进行分析<sup>[2]</sup>。

当光量子信号在大气传输中穿过水云时,传输示意图如图2所示。在图2中,光信号在水云中的

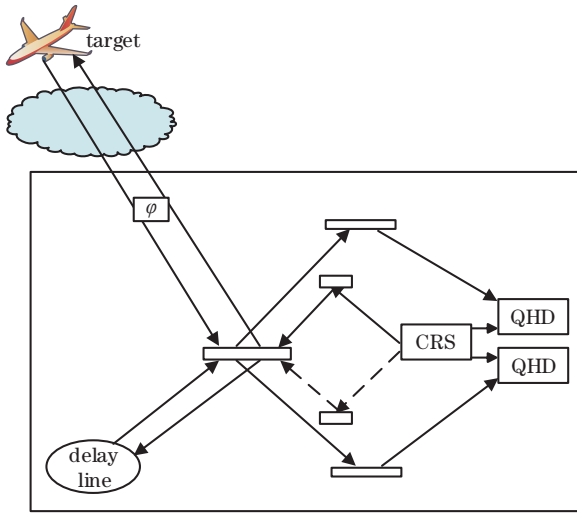


图 1 量子干涉雷达系统

Fig. 1 Quantum interferometric radar system

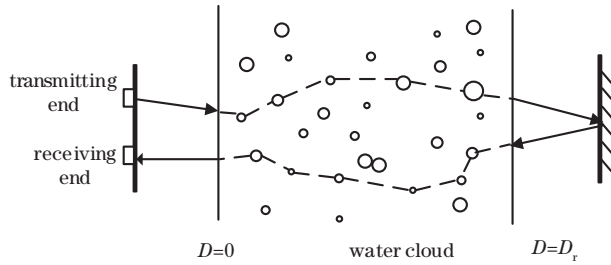


图 2 偏振光在水云中的传输示意图

Fig. 2 Transmission model of polarized light in water cloud  
 传输距离为  $D_r$ 。光子经过水云时会被水云粒子多次散射,故探测光子会偏离原来的发射角度,从而产生偏振态退偏振效应,对光信号造成衰减。因此分析水云粒子的光散射特性对雷达系统探测性能的影响十分重要。

### 3 水云粒子的光散射特性

在实际大气环境的云层中,水云粒子的大小是不等的,且服从一定的尺寸分布,当研究水云粒子的散射和吸收特性时,采用修正的伽马函数对云滴谱进行拟合,用解析的粒径分布函数  $n(r)$  来表征单位体积内粒子的尺度分布特征<sup>[13]</sup>,即

$$n(r) = ar^\alpha \exp(-br^\gamma), \quad (1)$$

式中:  $r$  为水云粒子半径;  $a, b, \alpha, \gamma$  为正常数。对于水云来说,计算中一般为简化参数,设定  $\gamma=1$ 。

粒子分布的液态水含量(质量浓度, LWC)可表示为

$$c_{LW} = \frac{4\pi}{3} \rho \int_0^\infty r^3 n(r) dr, \quad (2)$$

式中:  $c_{LW}$  的取值通常在 0.01 到 1 之间,单位为  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;

$\rho$  为水的密度。

水云的性质参数中,有效半径一般定义为云滴谱的三阶矩阵与二阶矩阵之比,即

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 n(r) dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 n(r) dr}. \quad (3)$$

根据卫星观测数据<sup>[14]</sup>,水云粒子的有效半径主要在  $5 \mu\text{m} \leq r_{\text{eff}} \leq 15 \mu\text{m}$  范围内。

根据米氏散射理论,可以得到水云粒子的消光系数<sup>[15]</sup>为

$$k_{\text{ext}} = \pi \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) n(r) dr, \quad (4)$$

平均消光系数为

$$\langle k_{\text{ext}} \rangle = \frac{k_{\text{ext}}}{c_{LW}}, \quad (5)$$

其中  $Q_{\text{ext}}$  为水云的消光效率因子,可以表示为

$$Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (6)$$

式中:  $m$  是水云在入射光波长  $\lambda$  下的复折射率<sup>[16]</sup>,  $m = 1.33 - 1.96 \times 10^{-9}i$ ;  $x = 2\pi r/\lambda$  为尺度参数,  $r$  为水云粒子半径;系数  $a_n$  和  $b_n$  是复折射率  $m$  和尺寸参数  $x$  的函数,即米氏散射系数;  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部。由于水云粒子半径  $r \gg \lambda$ , 因此消光效率因子  $Q_{\text{ext}} \approx 2$ 。

联立(2)~(5)式可以得到水云的消光系数和含水量之间的关系为

$$k_{\text{ext}} = \frac{3c_{LW}}{2\rho r_{\text{eff}}}. \quad (7)$$

水云可分为晴空积云(Cu)、积雨云(Cb)、层积云(Sc)、层云(St)、雨层云(Ns)和高层云(As)这几类,其中:层云又可分为层云 I 和层云 II;层积云也分为层积云 I 和层积云 II (I 代表陆地上空, II 代表海洋上空)。本文主要分析层云 I (St I) 和层云 II (St II)、层积云 I (Sc I) 和层积云 II (Sc II) 这 4 种类型的水云,相关参数如表 1 所示<sup>[15,17]</sup>。

实验仿真了层云 I (St I)、层云 II (St II)、层

表 1 4 种水云的微物理特性

Table 1 Microphysical properties of four kinds of water clouds

Types of water cloud	$r_{\text{max}} / \mu\text{m}$	$a$	$\alpha$	$b$	$r_{\text{eff}} / \mu\text{m}$
St I	23	32.12	4.8	1.37	5.69
St II	29	38.38	1.8	0.8	6.0
Sc I	19	19.74	6.41	1.83	5.14
Sc II	32	0.0018	9.37	1.25	9.9

积云 I (Sc I) 和层积云 II (Sc II) 这 4 种类型水云的消光系数  $k_{\text{ext}}$  和含水量  $c_{L,W}$  的关系, 结果如图 3 所示。

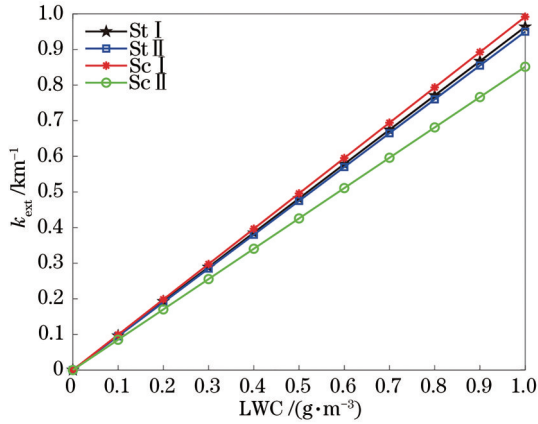


图 3 水云粒子的含水量和消光系数之间的关系

Fig. 3 Relationship between water content of water cloud and extinction coefficient

从图 3 的仿真结果可以看出, 随着水云的含水量增加, 粒子的消光系数也随之线性增加。当含水量  $c_{L,W} = 0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 层云 I (St I) 的消光系数  $k_{\text{ext}} = 0.48 \text{ km}^{-1}$ , 层积云 II (Sc II) 的消光系数  $k_{\text{ext}} = 0.42 \text{ km}^{-1}$ 。对于不同类型的水云来说, 在粒子的含水量一定时, 其消光系数是不同的。

## 4 水云粒子的散射对 QIR 探测性能的影响

### 4.1 水云粒子对 QIR 信号误码率的影响

对于 QIR 系统, 发射端发射的探测光子在大气空间中传输时, 大气中水云粒子的散射特性会对光子造成影响, 使散射光偏离入射光的传播方向, 且使目标散射光的偏振特性不再与入射光的偏振特性相同, 这导致 QIR 探测光子的光偏振特性出现退偏振效应。与冰云中冰晶粒子的几何光学折射引起的退偏振机制不同, 水云的退偏振机制主要是受水云粒子多次散射等因素的影响。

光的偏振特性通常可由 Stokes 矢量法<sup>[18]</sup>描述为

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x^2 + a_y^2 \\ a_x^2 - a_y^2 \\ 2a_x a_y \cos \delta \\ 2a_x a_y \sin \delta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中,  $a_x$  和  $a_y$  分别表示电场  $E$  在  $x$  和  $y$  两个方向的振幅,  $\delta$  为  $x$  和  $y$  两个方向电场分量相位差。

水云的散射特性引起的相位延迟会造成光信号的偏振椭圆极化, 降低信号的偏振对比度  $R_{\text{PC}}$ 。

用 BB84 协议中光子 4 个偏振状态中的两个基态  $H$ 、 $V$  作为线性非正交基态, 如图 4 所示, 其中,  $P$  和  $Q$  分别为水平和垂直初始偏振态,  $P'$  和  $Q'$  分别为水平和垂直椭圆偏振态。

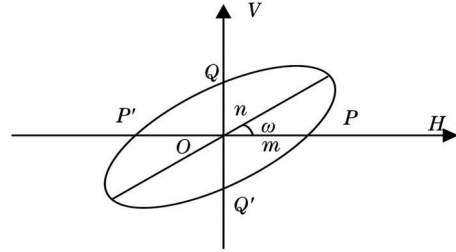


图 4 基态  $H$ 、 $V$  下椭圆率角为  $\omega$  的椭圆极化

Fig. 4 Elliptical polarization with ellipticity angle of  $\omega$  in the ground states  $H$  and  $V$

偏振对比度  $R_{\text{PC}}$  的表达式为

$$R_{\text{PC}} = (m/n)^2 = 1/(\tan^2 \omega), \quad (9)$$

式中:  $m/n$  是椭圆的长短轴比;  $\omega$  为椭圆率角, 表示相位延迟导致的椭圆极化光。从 (9) 式可以看出,  $R_{\text{PC}}$  是随着相位延迟的增大而减小的。在 QIR 接收端使用基态  $H$ 、 $V$  对圆极化光进行检测, 若存在相位延迟, 则可以检测到探测比率为  $R_{\text{PC}}:1$  的水平偏振光子和垂直偏振光子。由此可得由相位延迟引起的量子误码率为<sup>[19]</sup>

$$P_1 = 1/(R_{\text{PC}} + 1). \quad (10)$$

由 (9) 式和 (10) 式可以得出椭圆率角  $\omega$  和因相位延迟引起的量子误码率  $P_1$  的关系, 对其进行仿真, 如图 5 所示。

由图 5 的仿真结果可以看出: 当椭圆率角为  $90^\circ$  时, 因相位延迟引起的量子误码率达到最大, 这是

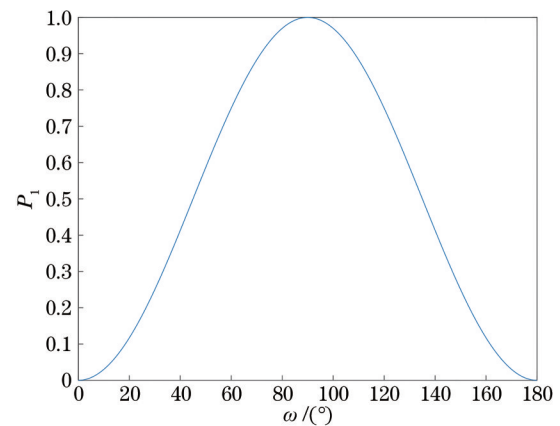


图 5 椭圆率角和因相位延迟引起的量子误码率的关系

Fig. 5 Relationship between the ellipticity angle and the quantum bit error rate due to phase delay

因为其偏振对比度在此时最小;当椭圆率角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时,几乎不存在相位延迟,故对量子误码率没有影响,此时偏振对比度最大,水云粒子对光量子没有造成退偏振效应。

探测光子在水云中传输时,其偏振方向在每一次散射时都有可能发生改变。我们可用 Monte Carlo 方法<sup>[18]</sup>模拟光子在云层模型中的传输过程,实现光子偏振状态的跟踪;可将大气层对光子偏振态的影响进行分层步长处理,然后将多层大气散射进行叠加,从而确定多次散射之后的退偏振以及损耗特性。

光子与水云粒子每次发生碰撞时的散射角可以通过相位函数来确定,可采用 Henyey-Greenstein (H-G) 相函数来表示,其表达式为<sup>[20]</sup>

$$P_{\text{HG}}(\cos \theta) = \frac{1 - \mu^2}{(1 - 2\mu \cos \theta + \mu^2)^{3/2}}, \quad (11)$$

式中,  $\mu$  为不对称因子,  $\mu \in [0, 1]$  表示前后向散射不对称的程度。

对散射角余弦  $\cos \theta$  进行抽样,可以得到

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{1}{2\mu} \left[ 1 + \mu^2 - \left( \frac{1 - \mu^2}{1 + \mu - 2\mu y} \right)^2 \right], \mu \neq 0, \\ \cos \theta = 2y - 1, \mu = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

式中,  $y$  为  $[0, 1]$  之间的均匀随机数。

假设 QIR 发射端探测得到的光子偏振角是  $\theta_0$ , 则其量子态为  $|\phi\rangle = \cos \theta_0 |0\rangle + \sin \theta_0 |1\rangle$ , 其中,  $\cos \theta_0 |0\rangle$  表示水平分量的偏振相位态,  $\sin \theta_0 |1\rangle$  表示垂直分量的偏振相位态。此时传输后的量子态  $|\tilde{\phi}\rangle$  为

$$|\tilde{\phi}\rangle = \cos(\theta_0 + \Delta\theta_0) |0\rangle + \sin(\theta_0 + \Delta\theta_0) |1\rangle, \quad (13)$$

式中,  $\Delta\theta_0$  表示偏振角的随机变化量。如若只考虑基态相同,假设  $\Delta\theta_0$  表示服从  $[0, \pi]$  的均匀分布,则量子态  $|0\rangle$  被误判为  $|1\rangle$  的概率为

$$P_2 = \int_0^\pi \frac{\sin \Delta\theta_0}{\pi} d\Delta\theta_0, \quad (14)$$

将  $|0\rangle$  误判为  $|1\rangle$  的概率即为偏振态偏移造成的量子误码率,可表示为

$$P_e = \sin^2 \Delta\theta_0. \quad (15)$$

假设 QIR 系统接收端接收到的水平偏振光偏离原坐标系的角度为  $\epsilon = \Omega_r + \sigma + \theta$ , 其中  $\sigma$  是雷达探测光子与目标因多普勒效应而产生的偏振误差

角,  $\Omega_r$  是受大气漩涡影响的偏差角度  $\tau$  的波动标准差<sup>[21]</sup>。

当 QIR 接收端在基态  $H$ 、 $V$  下探测回波信号时,退偏比  $R_D$  可表示为水平与垂直方向的信号能量比<sup>[22]</sup>,表达式为

$$R_D = \frac{X_{PP'}^2}{X_{QQ'}^2} = \frac{R_{\text{PC}} \cos^2 \epsilon + \sin^2 \epsilon}{\cos^2 \epsilon + R_{\text{PC}} \sin^2 \epsilon}, \quad (16)$$

式中,  $X_{PP'}$ 、 $X_{QQ'}$  分别为椭圆偏振光投影在  $H$  轴和  $V$  轴方向的偏移轨迹。

由 (10) 式和 (16) 式可以得出 QIR 系统的量子误码率  $Q_{\text{BER}}$  为

$$Q_{\text{BER}} = \frac{1}{R_D + 1} = P_1 + \frac{(R_{\text{PC}} - 1) \sin^2 \epsilon}{R_{\text{PC}} + 1}. \quad (17)$$

由 (17) 式可知,系统误码率  $Q_{\text{BER}}$  是由相位延迟和对准误差两部分引起的。结合 (16) 式、(17) 式,对退偏比  $R_D$  与系统误码率  $Q_{\text{BER}}$  之间的关系进行仿真,结果如图 6 所示。

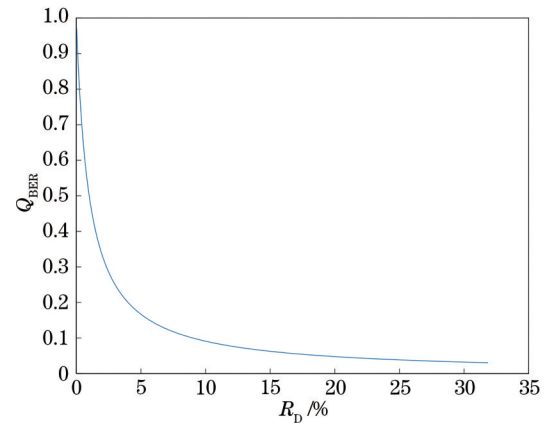


图 6 退偏比与系统误码率之间的关系

Fig. 6 Relationship between the deviation ratio and the bit error rate of the system

从图 6 的实验仿真结果可以看出,当探测光子在水云中传输时,随着退偏比  $R_D$  的增大,系统的误码率  $Q_{\text{BER}}$  呈减小趋势。因散射引起的偏振对比度越大,说明其对于信号误码率的影响越小,故散射造成的退偏振效应减弱。因此保持高的偏振对比度,可以减小光量子的误码率,从而提升 QIR 系统的探测性能。

#### 4.2 水云粒子对 QIR 传输距离的影响

QIR 探测光子的能量受水云粒子等大气环境的影响会产生衰减,这使得探测光子的传输距离减小,从而对 QIR 的探测性能产生影响。由 Bouguer-Lambert 定律可知,在水云背景下探测光子在传输距离为  $d$  时的能量为

$$E = E_0 \exp(-K \cdot d), \quad (18)$$

式中,  $E_0$  是探测光子的初始能量, 其可由光子能量的定义表示为  $E_0 = h \frac{c}{\lambda}$ , 其中  $\lambda$  是光子波长,  $c$  是光速, 普朗克常量  $h \approx 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

对于均匀球形粒子来说, 当尺度参数  $x = 2\pi r/\lambda$  在  $0.1 \leq x \leq 50$  范围内, 散射问题可用米氏散射理论解释<sup>[18]</sup>, 假设水云粒子的半径在  $0 \sim 5 \mu\text{m}$  范围内, 则  $x = 49.8$ , 水云衰减系数  $K$  为

$$K = \int_0^5 n(r) K_d dr, \quad (19)$$

式中,  $n(r)$  是水云粒子的分布函数,  $K_d$  为衰减截面<sup>[23]</sup>。

根据(18)式, 可以得到水云的衰减系数、传输距离和光子能量之间的关系。假设光子波长为  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ , 实验仿真了衰减系数、传输距离和光子能量的关系, 本仿真工作仅对半径在  $0 \sim 5 \mu\text{m}$  范围内的水云粒子有效, 仿真结果如图 7 所示。

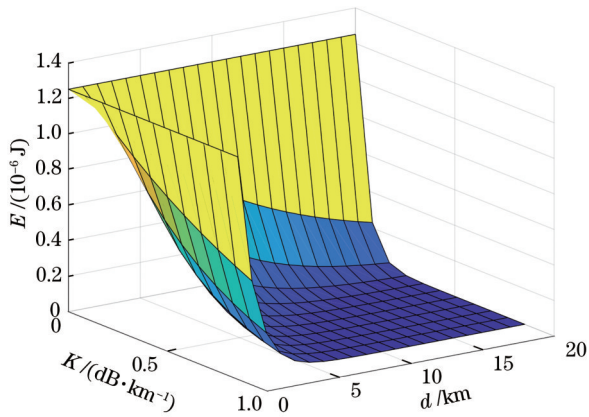


图 7 水云的衰减系数、传输距离和光子能量的关系  
Fig. 7 Relationship between water cloud attenuation coefficient, transmission distance and photon energy

从图 7 的仿真结果可以看出, 随着水云衰减系数的增加, 信号的传输距离越远, 光子能量越小。当传输距离为 5 km, 衰减系数增加到  $0.26 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  时, 光子能量为  $E = 0.35 \times 10^{-6} \text{ J}$ 。这表示在水云环境下探测光子的能量产生了不小的衰减量, 因此在实际应用中, 应根据对流层水云的具体参数来适当地调整发射信号的功率或光子数, 从而确保 QIR 的探测效率。

### 4.3 水云粒子对 QIR 分辨率的影响

对于 QIR 系统, 假设雷达的空间分辨率为  $\delta R_Q = \lambda \delta R_\varphi / 2\pi$ <sup>[10]</sup>。其中,  $\delta R_\varphi$  是脉冲信号的角度分辨率, 与脉冲信号的半峰全宽有关, 信号的窄带宽

度随着脉冲信号的半峰全宽的减小而减小, 故得到的分辨率升高。采用衰减量子干涉测量法计算得到的  $\delta R_\varphi$  为

$$\delta R_\varphi = \frac{\left[ \frac{1}{2\beta_1^N} + \frac{1}{2\beta_2^N} - 1 + \sin^2 N(\phi - \phi_0) \right]^{1/2}}{N |\sin N(\phi - \phi_0)|}, \quad (20)$$

式中,  $\beta_i = \exp(-K_i L_i)$  是媒介透射率,  $K_1$  和  $K_2$  分别为大气衰减系数和水云粒子的衰减系数,  $L_1$  和  $L_2$  分别为探测光子在大气中的传输距离和水云的光学厚度,  $\phi_0 = \frac{f}{c}(n_2 L_2 - n_1 L_1)$  是色散相移, 其中  $f$  是光子穿过水云粒子的频率,  $N$  是发射光子波数,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为大气折射率和水云粒子的复折射率。

使用宇称算符方法可以进一步得到  $\delta R_\varphi$ <sup>[12]</sup>, 为

$$\delta R_\varphi = \frac{1}{\sqrt{N C_A C_B}} = \frac{\left[ \exp(-K_2) + \exp(-N_0 \pi r^2 Q_{\text{ext}} L_2) \right]^{-1/2}}{\sqrt{N \exp(-K_1)}}, \quad (21)$$

式中:  $C_A = \exp(-K_1)$  为本地参考光束的能量透过率系数,  $C_B = \exp(-K_2) + \exp(K_w)^{-1}$  为探测光束的能量透过率系数;  $K_w = -N_0 \pi r^2 Q_{\text{ext}} L_2$  为水云粒子的光透射率系数, 其可采用偏振蒙特卡罗模型得到。

水云的光学厚度  $L_2$ <sup>[24]</sup> 可表示为

$$L_2 = \Delta z \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi Q_{\text{ext}} r^2 n(r) dr = \Delta z \cdot \frac{3c_{1,w}}{2\rho r_{\text{eff}}}, \quad (22)$$

式中,  $\Delta z$  是水云几何厚度。

以层积云 I (Sc I) 为例, 选取 Sc I 的不同几何厚度  $\Delta z = 30, 100, 200 \text{ m}$ , 可得到其光学厚度分别为  $L_2 = 1, 4, 8$ 。假设取水云粒子的有效半径为  $10 \mu\text{m}$ ,  $N_0 = 6 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ , 将能见度为 300 m 时的大气衰减系数值  $0.0016 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  作为本地参考光束与探测光束的大气衰减系数<sup>[2]</sup>。由(21)式可以得出在水云的不同光学厚度  $L_2$  下, 发射脉冲光子数  $N$  和角度分辨率  $\delta R_\varphi$  的关系, 并进行实验仿真, 仿真结果如图 8 所示。

当水云的不同光学厚度分别为  $L_2 = 1, 4, 8$  时, 从图 8 可以看出: 在一定的发射脉冲光子数下, 随着水云光学厚度的增大, QIR 的角度分辨率随之减小; 当水云的光学厚度一定时, 角度分辨率随着发射光子波束数的增大而提高。如若信号波长保持不变时, 对  $\delta R_\varphi$  的一切研究结果都适用于  $\delta R_Q$ 。因此可

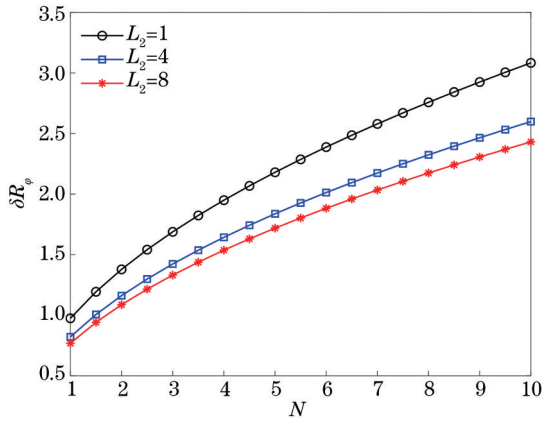


图 8 水云不同光学厚度下脉冲光子数与角度分辨率的关系  
Fig. 8 Relationship between the number of pulsed photons and the angular resolution under different optical thicknesses of water clouds

以通过提高发射信号的脉冲光子数来解决 QIR 系统分辨率下降的问题。

#### 4.4 水云粒子对 QIR 生存性能的影响

量子雷达的生存性能是雷达系统的一个重要指标,其指的是量子雷达在不同干扰条件下仍然能够探测到目标的概率。为了描述水云环境对 QIR 的干扰强度,这里引入 QIR 信息保真度  $F_\nu$ , 表达式为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} F_\nu = 0.99, \nu = 0 \\ F_\nu = \chi^\nu F_{\nu-1}, 1 \leq \nu \leq 10 \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $\nu$  为水云的干扰等级, 而水云的粒子数密度基本都在  $0 \sim 500 \text{ cm}^{-3}$  范围内<sup>[15]</sup>。以粒子数密度  $50 \text{ cm}^{-3}$  为一个等级, 将水云的干扰等级划分为  $1 \sim 10$ 。根据(23)式可知, 在理想环境下, 即  $\nu = 0$  时, 保真度  $F_\nu$  为 0.99。当  $\nu$  不为 0 时,  $F_\nu$  随着  $\nu$  的增大以低一级保真度的  $\chi^\nu$  指数衰减, 且衰减速度随着干扰等级的增大而加快。

由 QIR 发射端发射的探测光子经目标反射后, 穿过对流层水云并被雷达接收端接收, 在这一过程中, 定义  $F_\nu$  小于 0.9 即损伤的量子态, 平均损伤的量子比特数为  $\Gamma_j$ 。假设在探测过程中光子的传输距离为  $L$ , 则量子损伤传输概率为<sup>[25]</sup>

$$P_\zeta = 1 - 2 \left| \min(\xi, \zeta) \right|^2 (1 - S)(1 - p_\zeta), \quad (24)$$

式中  $\zeta, \xi$  为量子纠缠信道系数,  $p_\zeta$  是经典信道系统的误码率,  $S$  是阻塞率。传输距离  $L$  的平均损伤量子态个数为  $\Gamma_j = P_\zeta L$ 。

则 QIR 接收端接收到一次量子态的平均保真度为

$$F_0 = \frac{\sum_{i=1}^{\Gamma_j} F_i}{\Gamma_j}, \quad (25)$$

式中,  $F_i = \sqrt{\langle \phi | \rho | \phi \rangle}$  为第  $i$  个量子态的保真度,  $\langle \phi |$  表示量子态,  $\rho$  表示量子态密度算符。

在 QIR 系统中, 定义量子损伤上限个数  $\Gamma_k$ , 如若探测过程中  $\Gamma_j \geq \Gamma_k$ , 则雷达就无法对目标成功探测。假设在雷达探测过程中量子损伤个数  $j$  服从泊松分布, 即

$$P(j) = e^{-\nu} \frac{\nu^j}{j!}, \quad (26)$$

设探测目标表面被探测点数为  $s$ , 则 QIR 探测光子在水云环境下的生存性能可用生存函数表示, 即

$$I_r = 0.9 \sum_{i=0}^s C_s^i \left[ \sum_{j=\Gamma_k}^{\infty} P(j) \right]^i \left[ 1 - \sum_{j=\Gamma_k}^{\infty} P(j) \right]^{s-i}, \quad (27)$$

式中,  $C_s^i$  表示从  $s$  个点中选取  $i$  个点的组合数。

根据(26)式和(27)式可以得出在水云粒子的强度等级  $\nu$  下, 生存函数  $I_r$  与目标物可探测点数  $s$  之间的关系, 并进行仿真实验, 结果如图 9 所示。

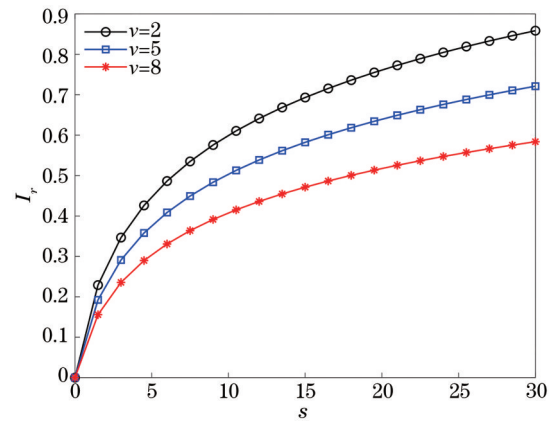


图 9 不同水云干扰强度下可探测点数和雷达生存函数的关系

Fig. 9 Relationship between the number of detectable points and the radar survival function under different water cloud interference intensities

图 9 中的三条曲线分别表示不同水云粒子的干扰强度  $\nu = 2, 5, 8$  时, 生存函数与目标表面可探测点数之间的关系。从仿真结果可以看出: 当干扰强度一定时, 目标的可探测点数越多, QIR 系统的生存性能越强; 当可探测点数一定时, 水云粒子干扰强度越大, QIR 系统的生存性能越低。取  $s = 30, \nu = 2$  时, 生存函数的值为 0.86; 当可探测点数不变,  $\nu = 8$  时, 生存函数降低至 0.58, 因此可以看出水云环境

对 QIR 的生存性能的影响显著。

此外,发射光子数量、探测器效率、门时间、系统暗计数、传输距离、接收端孔径面积等,以及雷达发射端的量子光源和单光子探测器的物理特性,也会对 QIR 的探测性能造成不同程度的影响。

## 5 结 论

本文研究了在对流层的水云环境下,水云粒子的散射特性对 QIR 探测性能的影响。根据水云粒子的谱分布函数,分析了不同水云的含水量与消光系数的关系。对于在水云背景下的 QIR 系统,分析了雷达系统的误码率、分辨率、传输距离以及生存性能受水云粒子的影响,并进行了仿真实验验证。结果表明,水云粒子的散射特性会影响光量子信号的偏振态,从而影响 QIR 系统的探测性能,其中对其传输距离及分辨率等都产生了不同程度的影响,尤其是对雷达生存性能的影响较为显著。因此,本文所提出的水云与 QIR 各参量之间的关系可以为提升 QIR 系统的探测性能提供参照依据,通过系统自适应调整雷达各参量,可以降低水云对 QIR 探测性能的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X Z, Zhai M S, Zhou L J. Influence of black carbon aerosol on performance of satellite-ground quantum link communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1127001.  
张秀再, 翟梦思, 周丽娟. 黑炭气溶胶对星地量子链路通信性能的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1127001.
- [2] Lanzagorta M. Quantum radar[M]. Zhou W X, Wu M Y, Hu M C, et al, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.  
马尔科·兰萨戈尔塔. 量子雷达[M]. 周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [3] Zhou C H, Qian W P. An overview of radar system based on quantum technology[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(5): 457-466.  
周城宏, 钱卫平. 量子雷达技术发展展望[J]. *雷达科学与技术*, 2015, 13(5): 457-466.
- [4] Lopaeva E D, Berchera I R, Degiovanni I P, et al. Experimental realization of quantum illumination[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(15): 153603.
- [5] Smith J F. Quantum entangled radar theory and a correction method for the effects of the atmosphere on entanglement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7342: 73420A.
- [6] Lloyd S. Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1463-1465.
- [7] Liu Q, Chen X H, He X X, et al. Mean spectral scattering properties of water clouds from wavelength of ultraviolet to far-infrared region[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 51-56.  
刘强, 陈秀红, 何晓雄, 等. 水云从紫外到远红外波段的平均单次散射特性[J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 51-56.
- [8] Shao J F, Hua D X, Wang L, et al. Development of ultraviolet dual-wavelength lidar and analysis of its signal-to-noise ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1201004.  
邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 紫外双波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1201004.
- [9] Motes K R, Olson J P, Rabeaux E J, et al. Linear optical quantum metrology with single photons: exploiting spontaneously generated entanglement to beat the shot-noise limit[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(17): 170802.
- [10] Wang S, Ren Y C, Rao R Z, et al. Influence of atmospheric scintillation on detection performance of coherent state quantum interferometric radar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0810002.  
王书, 任益充, 饶瑞中, 等. 大气闪烁对相干态量子干涉雷达探测性能的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0810002.
- [11] Li X, Nie M, Yang G, et al. The strategy and performance simulation of quantum entangled radar's survivability[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1127002.  
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): 1127002.
- [12] Nie M, Zhang Y X, Yang G, et al. Influences of ice crystal particles on the detection performance of quantum interference radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130101.  
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): 130101.
- [13] Deirmendjian D. Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visible and infrared [J]. *Applied Optics*, 1964, 3(2): 187-196.
- [14] Han Q Y, Rossow W B, Laciis A A. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds



- using ISCCP data[J]. *Journal of Climate*, 1994, 7(4): 465-497.
- [15] Wang X D. Parameterization of radiation characteristics of water clouds and cirrus clouds[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 15-17.  
王小东. 水云及卷云辐射特性参数化[D]. 成都: 电子科技大学, 2006: 15-17.
- [16] Pósfai M, Anderson J R, Buseck P R, et al. Soot and sulfate aerosol particles in the remote marine troposphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D17): 21685-21693.
- [17] Stephens G L. Radiation profiles in extended water clouds. I: theory[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(11): 2111-2122.
- [18] Hong W W. The research on the near-infrared light transmission characteristics and polarization distribution in the clouds[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 11-20.  
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: 11-20.
- [19] Li T F, Li W, Yang F, et al. Polarization error and compensation in quantum communication using satellites [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2015, 32 (6): 678-685.  
李铁飞, 李伟, 杨峰, 等. 卫星量子通信的光子偏振误差影响与补偿研究[J]. *量子电子学报*, 2015, 32 (6): 678-685.
- [20] Wei A H, Zhao W, Han B, et al. Simulative study of optical pulse propagation in water based on Fournier-Forand and Henyey-Greenstein volume scattering functions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601003.  
魏安海, 赵卫, 韩彪, 等. 基于 Fournier-Forand 和 Henyey-Greenstein 体积散射函数的水中光脉冲传输仿真分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601003.
- [21] Strohbehn J, Clifford S. Polarization and angle-of-arrival fluctuations for a plane wave propagated through a turbulent medium[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, 15(3): 416-421.
- [22] Jiang T. Quantum radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 23-70.  
江涛. 量子雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 23-70.
- [23] Tang S R, Nie M, Yang G, et al. Influence of space dusty plasmas on the performance of quantum satellite communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (12): 1206002.  
唐守荣, 聂敏, 杨光, 等. 空间尘埃等离子体对量子卫星通信性能的影响[J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 1206002.
- [24] Yu J H. Study on light scattering and radiative transfer properties of water clouds and ice clouds[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 50-52.  
于记华. 水云和冰云的光散射与辐射传输特性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 50-52.
- [25] Yi Y H, Nie M, Pei C X. Probability model of quantum signaling transmission damage and repair strategy[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39 (4): 29-32, 73.  
易运晖, 聂敏, 裴昌幸. 量子信令传输损伤概率模型及修复策略[J]. *西安电子科技大学学报*, 2012, 39 (4): 29-32, 73.