

doi:10.3788/gzxb20184704.0429001

锥柱复合目标量子雷达散射截面分析

徐泽华, 李伟, 许强, 郑家毅

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘 要:针对导弹目标量子雷达散射截面的计算问题,用锥柱复合模型模拟导弹目标几何结构,引入单光子波动方程,推导和改进量子雷达散射截面表达式.通过干涉分析镜面上原子与光子的相互作用,在检测点测量光子被目标原子散射后的强度,得到锥柱复合目标量子雷达散射截面公式.仿真结果表明:在不同入射角条件下,单光子量子雷达散射截面主瓣峰值高于经典雷达散射截面,而量子雷达散射截面旁瓣峰值低于经典雷达散射截面;随着波长减小,量子雷达散射截面逐渐降低,入射角对量子雷达散射截面无影响.表明量子雷达对小目标具有很高的探测识别能力,分辨率能够达到纳米级,为导弹目标识别提供了依据.

关键词:量子光学;量子雷达;量子干涉;量子雷达散射截面;分辨率

中图分类号:O431.2; TN985.98 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2018)04-0429001-7

Analysis of Quantum Radar Cross Section of Conical Composite Target

XU Ze-hua, LI Wei, XU Qiang, ZHENG Jia-yi

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the quantum radar cross section computational problems of missiles, a cone-pillared composite model is used to simulate the missile target geometry. The single-photon wave equation is introduced to derive and improve quantum radar cross section expressions. By interfering with the interaction of atoms and photons on the mirror surface, the intensity of the photons scattered by the target atoms is measured at the detection point to obtain the quantum radar cross section formula of the cone column compound target. The simulation results show that the mainlobe peak of single-photon quantum radar cross section is higher than that of classical radar cross section and the quantum radar cross section sidelobes peak is lower than that of classical radar cross section under different incident angles. The quantum radar cross section decreases with decreasing wavelength, and the incident angles have no influences on quantum radar cross section. It shows that the quantum radar has a high detection and identification ability for small targets and the resolution can reach nanometer level, which provides a basis for missile target identification.

Key words: Quantum optics; Quantum radar; Quantum interference; Quantum radar cross section; Resolution

OCIS Codes: 290.5838; 290.5825; 270.0270; 270.5570; 270.5580

0 引言

近年来,量子雷达探测技术成为国内外研究热点^[1-3].量子雷达基于量子态作为信息载体,利用量子态特性对目标进行识别探测,可解决传统雷达难以检测隐身目标和复杂电磁环境下生存等方面的问题,从而提高雷达各项性能指标^[4-6].

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61302153, 61571456)和陕西省自然科学基金(No.2016JM6042)资助

第一作者(通讯作者):徐泽华(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为认知量子雷达. Email:13259462375@163.com

导 师:李伟(1978—),男,副教授,博士,主要研究方向为新体制雷达和雷达波形设计. Email:Liweichang@163.com

收稿日期:2017-09-28; **录用日期:**2017-01-15

<http://www.photon.ac.cn>

因此,需要针对量子雷达散射截面(Quantum Radar Cross Section, QRCS)展开研究.在经典雷达理论中,雷达散射截面用来描述一个特定目标的“雷达能见度”.在经典雷达散射截面基础上,LANZAGORTA M 通过量子电动力学,定义了 QRCS,并推导出量子雷达方程.林云等基于 QRCS,提出一种可以用于平板形目标 QRCS 的计算方法并进行了实验验证,该数值方法计算效率高而且可以适用于任意形状的理想导体平板 QRCS 计算^[7].刘康等通过建立量子雷达方程,研究单光子入射下角反射体 QRCS^[7].徐世龙等分别计算了面心立方、体心立方以及密排六方三种金属原子晶格所构成目标的 QRCS^[9].陈坤等基于圆柱模型,研究了单曲面的单光子和双光子 QRCS^[10].BRANDSEMA M J 等优化了 QRCS 表达式,研究了平面目标 QRCS^[11],并对光子在不同模式极化条件下的平面目标 QRCS 进行仿真分析^[12].但是目前针对各种隐身特性较好的目标如导弹等的 QRCS 研究鲜有报道.

本文通过锥柱复合目标,模拟研究导弹目标 QRCS,建立圆锥与圆柱复合曲面几何模型,分析单光子 QRCS,并与经典雷达散射截面(Classical Radar Cross Section, CRCS)进行比较.

1 经典雷达散射截面

物理光学通过一些近似假设,将 Stratton-Chu 积分方程进行简化,将散射问题的积分方程简化为散射体表面的近似积分问题.假设目标被遮蔽一侧的电流为零,被照射部分的电流非零,可以近似为 $\mathbf{J} \approx 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i$, 其中 \mathbf{H}_i 为入射磁场, \mathbf{n} 为锥柱模型外表面法线.利用 Stratton-Chu 辐射微积分可计算出辐射场^[13-14]为

$$E_\theta(x, y, z) = \frac{-j2kE_0}{4\pi r} e^{-jkr} \iiint \mathbf{s} \times [\mathbf{s} \times \mathbf{n} \times \mathbf{h}_i] e^{jkr(i-s)} ds \quad (1)$$

式中, k 为波数, E_0 为入射波电场强度, r 为检测点与目标之间距离, \mathbf{s} 为散射方向单位矢量, \mathbf{i} 为入射电磁波单位矢量, \mathbf{h}_i 为入射磁场极化方向单位矢量, ds 为目标被照亮部分面积微元.

图 1 为锥柱复合目标模型,方程为

$$x^2 + y^2 = r_0^2 \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (2)$$

$$x^2 + y^2 = (h - z)^2 \tan^2 \alpha \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 \quad (3)$$

式中, r_0 为锥柱复合目标底面半径, h_1 为圆柱高度, h_2 为圆锥高度, 2α 为圆锥锥角. \mathbf{n}_1 为圆柱表面外法线矢量, \mathbf{n}_2 为圆锥表面外法线矢量,位置矢量 $\mathbf{r} = r_0\mathbf{n} + z\mathbf{z}$, \mathbf{z} 为锥柱复合目标轴线方向单位矢量. CRCS 平方根公式为^[11]

$$\sqrt{\sigma} = -jk\pi^{-1/2} \int_s \mathbf{n} \cdot (\mathbf{e}_r \times \mathbf{h}_i) e^{jkr(i-s)} ds \quad (4)$$

式中, \mathbf{e}_r 为检测点接收电磁波极化方向单位矢量,入射方向与锥柱轴向构成平面夹角 $\varphi = 0$.

$$\mathbf{n}_1 = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (5)$$

$$\mathbf{n}_2 = xz \tan \alpha \cos \varphi + yz \tan \alpha \sin \varphi \quad (6)$$

式中, x, y 为单位矢量.对于单基地量子雷达, $\mathbf{i} = -\mathbf{s}$, 锥柱复合目标曲面 CRCS 表达式为

$$\sigma_1 = kr_0 h_1^2 \left| \cos \theta \frac{\sin(kh_1 \sin \theta)}{kh_1 \sin \theta} \right| \quad (7)$$

$$\sigma_2 = kr_0 h_2^2 \left| \tan \alpha \cos(\alpha + \theta) \frac{\sin[kh_2 \sin(\alpha + \theta)]}{kh_2 \sin(\alpha + \theta)} \right| \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (9)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为圆柱、圆锥、锥柱复合目标 CRCS, θ 为锥柱表面法线 \mathbf{n} 与入射波方向 \mathbf{i} 的夹角.

2 基于积分 QRCS 计算方法

量子雷达通过发射机在瞬间发射光子脉冲,作用在目标表面后,被目标表面原子散射到接收机,本质上

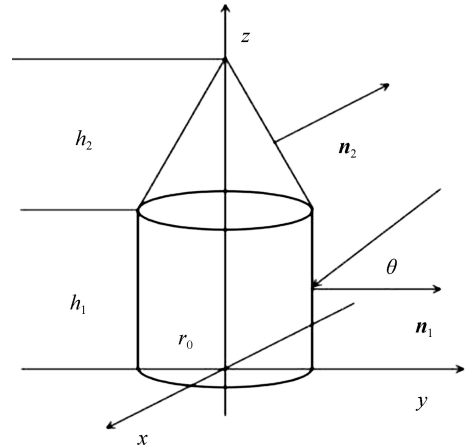


图 1 锥柱复合曲面几何结构示意图
Fig.1 Sketch map of geometric structure of conical column composite surface

是镜面原子对光子的发射和吸收作用.这种作用可通过量子电动力学^[15-16]来描述.通过干涉测量分析,光子被 N 个目标表面原子散射后,在检测点测量,得到 t 时刻光子强度为^[15]

$$\langle \hat{I}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_d, t) \rangle = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \psi_{\gamma}^{(i)}(\Delta R_i, t) \right|^2 \quad (10)$$

式中, \mathbf{r}_s 为量子雷达发射机位置, \mathbf{r}_d 为检测点位置,光子波动方程为

$$\psi_{\gamma}^i(\Delta R_i, t) = \frac{\epsilon_0}{\Delta r_{id}} \Theta(t - \Delta R_i/c) e^{-(j\omega + \Gamma/2)(t - \Delta R_i/c)} \quad (11)$$

式中, $\epsilon_0 = -\frac{\omega^2}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{|\hat{\boldsymbol{\mu}}|_{ab} \sin \eta}{\Delta r_{id}}$, ω 为发射机入射波频率, $|\hat{\boldsymbol{\mu}}|_{ab}$ 的值为原子态 a 和 b 之间原子电偶极矩的跃迁幅度, η 为原子 μ 电偶极矩角度, Δr_{id} 为目标表面第 i 个原子的位置 \mathbf{r}_i 到检测点 \mathbf{r}_d 的距离,即 $\Delta r_{id} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_d|$; Γ 表示激发态原子衰减速率, $\Gamma = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4\omega^3}{3\hbar c^3} |\hat{\boldsymbol{\mu}}|_{ab}^2$, \hbar 为归一化普朗克常量;阶跃函数 $\Theta(t - \Delta R_i/c)$ 表示在 $t - \Delta R_i/c$ 时刻后,方程成立, ΔR_i 表示第 i 个原子从量子雷达发射机到目标表面,经目标散射后到量子雷达接收机的干涉距离.对于单基地量子雷达来说,发射机和接收机具有相同空间位置,即 $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_d$,因此

$$\Delta R_i = \Delta r_{si} + \Delta r_{id} = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_d| = 2|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_d| \quad (12)$$

$$\langle \hat{I}_i(\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_d) \rangle \approx \left(\frac{\epsilon_0}{R} \right)^2 e^{-\Gamma(t - R/c)} \quad (13)$$

当忽略衍射和吸收效应时,所有入射能量都在某些方向上反射,则被目标散射的入射光束会在空间中形成一个半径为 R_d 的球型封闭区域,单基地站 QRCS 可近似为^[17]

$$\sigma_Q \approx 4\pi A_{\perp}(\theta, \varphi) \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\langle \hat{I}_s(\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_d) \rangle}{\int 2\pi \int_0^{\pi} \langle \hat{I}_s(\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_d) \rangle \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (14)$$

式中, $A_{\perp}(\theta, \varphi)$ 为目标垂直电磁波入射方向上投影区域面积,在振幅方面,假设 $\Gamma \approx 0$.因此,根据强度期望表达式,QRCS 表达式为

$$\sigma_Q \approx 4\pi A_{\perp}(\theta, \varphi) \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\left| \sum_{i=1}^N e^{j\omega \Delta R_i/c} \right|^2}{\int 2\pi \int_0^{\pi} \left| \sum_{i=1}^N e^{j\omega \Delta R_i'/c} \right|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (15)$$

将式(15)改写成另一种形式,以便更好分析计算^[12].目标表面原子之间排列非常紧密,可以将式中求和公式转化为一个积分公式.求和公式表示目标共有 N 个原子与发射光束中的光子相互作用.假设目标表面原子对这种相互作用的贡献最大,因此求和变成了物体表面积分,即

$$\sum_{i=1}^N e^{j\omega \Delta R_i/c} = \iint_s e^{j\omega \Delta R_i/c} ds = \iint_s e^{jk \Delta R_i} ds \quad (16)$$

被积函数中指数项代表单基地量子雷达情况,即发射机和接收机位于相同的空间位置.这与发射器和接收器位于不同空间位置的双基站情况形成对比. QRCS 表达式中指数项为 $jk \Delta R_i = 2jk |\mathbf{x}|$, 自变量 \mathbf{x} 表示从接收器到目标表面上特定原子的位置矢量,将其改写为 $\mathbf{x} = \mathbf{d} + \mathbf{x}'$, 其中 \mathbf{d} 表示接收机到目标表面中心原子位置的向量, \mathbf{x}' 表示目标表面中心原子位置到某一个原子位置的向量,如图 2.

指数项 $2k |\mathbf{x}|$ 可定义为 $(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \cdot \mathbf{x}$, 其中 \mathbf{k} 表示入射波矢量, \mathbf{k}' 表示反射波矢量,对于单基地 QRCS,入射波矢量与反射波矢量大小相等方向相反,即

$\mathbf{k} = -\mathbf{k}'$, 因此 $(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \cdot \mathbf{x} = 2\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} = 2k |\mathbf{x}| \cos \theta$, 在远区场,可近似表示 $\cos \theta \approx 1$, 指数项可以改写为 $jk \Delta R_i = j(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \cdot \mathbf{x} + j(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \cdot \mathbf{d} = j\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}'$, 其中 $\mathbf{K} = \mathbf{k} - \mathbf{k}'$, 因此,求和公式定义为

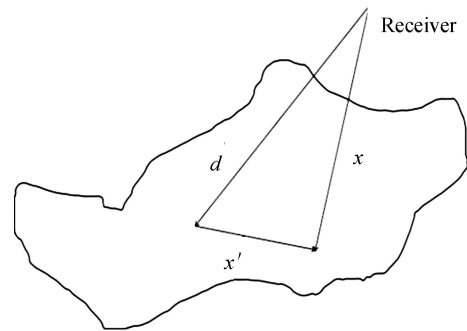


图 2 单基地量子雷达路径矢量图
Fig.2 Path vectors of single base quantum radar

$$\sum_{i=1}^N e^{jk\Delta R_i} = \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'} ds \quad (17)$$

则 QRCS 表达式为

$$\sigma_Q \approx 4\pi A_{\perp}(\theta, \varphi) \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\left| \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'} ds \right|^2}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left| \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'} ds \right|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (18)$$

3 单光子条件下锥柱复合目标曲面 QRCS

对于锥柱复合目标而言,以电磁波入射方向为 z 轴,投影区域中 x, y 轴如图 3 所示, x, y, z 满足右手螺旋法则,在投影区域中, θ 为锥柱表面法线 \mathbf{n} 与入射波方向 \mathbf{i} 的夹角,则锥柱复合目标正交投影面积.

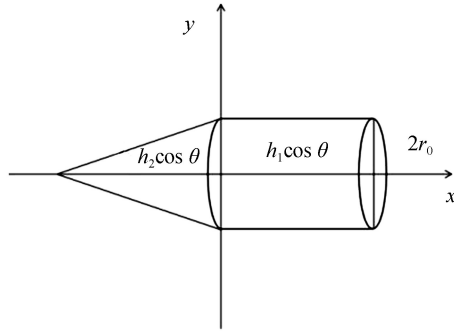


图 3 锥柱复合目标正交投影示意图

Fig.3 Sketch map of orthogonal projection of conical column composite target

$$A_{\perp}(\theta, \varphi)_1 = 2r_0 \cdot h_1 \cdot \cos \theta \quad (19)$$

$$A_{\perp}(\theta, \varphi)_2 = r_0 \cdot h_2 \cdot \cos \theta \quad (20)$$

圆柱、圆锥、锥柱复合目标曲面 QRCS 分别为

$$\sigma_{Q1} \approx 8\pi r_0 \cdot h_1 \cdot \cos \theta \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\left| \iint_{s'} e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_1} ds' \right|^2}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left| \iint_{s'} e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_1} ds' \right|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (21)$$

$$\sigma_{Q2} \approx 4\pi r_0 \cdot h_2 \cdot \cos \theta \cdot \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\left| \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_2} ds \right|^2}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left| \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_2} ds \right|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (22)$$

$$\sigma_{Q3} \approx (8\pi r_0 \cdot h_1 \cdot \cos \theta + 4\pi r_0 \cdot h_2 \cdot \cos \theta) \cdot \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\left| \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_1} ds + \iint_{s'} e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_2} ds' \right|^2}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left| \iint_s e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_1} ds + \iint_{s'} e^{2j\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}'_2} ds' \right|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (23)$$

式中

$$\mathbf{K} = k_x \cos \theta \cos \varphi + k_y \cos \theta \sin \varphi + k_z \sin \theta \quad (24)$$

$$\mathbf{K}' = k'_x \sin(\alpha + \theta) \cos \varphi + k'_y \sin(\alpha + \theta) \sin \varphi + k'_z \cos(\alpha + \theta) \quad (25)$$

$$\mathbf{x}'_1 = r_0 (x \cos \varphi + y \sin \varphi + z) \quad (26)$$

$$\mathbf{x}'_2 = r_0 (xz \tan \alpha \cos \varphi + yz \tan \alpha \sin \varphi + z) \quad (27)$$

s, s' 分别为圆锥、圆柱表面积.

4 锥柱复合目标曲面 QRCS 实验仿真分析

4.1 圆锥、圆柱曲面 QRCS 仿真

仿真条件为:波长 $\lambda = 0.03$ m, 锥柱底面半径 $r_0 = \lambda$, 圆柱高度 $h_1 = 6\lambda$, 圆锥高度 $h_2 = 6\lambda$, 圆锥半锥角

$\alpha = \pi/6$, 目标表面原子间隔 $\delta = 4 \times 10^{-2} \lambda$. 图 4 给出了单光子 QRCS 随入射角 θ ($\varphi = 0$) 变化的仿真图, 与运用经典物理光学计算 CRCS 的结果对比发现, 锥形曲面 QRCS 和 CRCS 结构相似, 都具有主瓣和旁瓣. 利用 MATLAB 软件对圆锥曲面进行 QRCS 数值计算仿真, 从图中可以明显看出, 当入射角 ($\theta = \pi/6$) 时, 锥形曲面 QRCS 达到最大值, 此外锥形曲面 QRCS 副瓣结构是由纯粹量子效应产生的结果, 在这里忽略了衍射和吸收效应. 当入射角 $\theta = \pi/6$, 锥形曲面 QRCS 主瓣峰值高于 CRCS, 说明锥形曲面 QRCS 在镜面方向附近能量更加集中, 但是由于 QRCS 与 CRCS 物理原理不同, 并不能说明 QRCS 探测性能比 CRCS 更加有优势. CRCS 通过物理光学方法近似计算目标表面电流 \mathbf{J} , 可以在各个方向上探测回波信号, 但是测量精度有限. QRCS 是通过探测在各个方向上发现光子的概率, 即当入射角为 $\theta = \pi/6$, 检测点探测到光子的概率可能为零. 图 5 为圆柱曲面 QRCS 和 CRCS 随入射角 θ 变化对比.

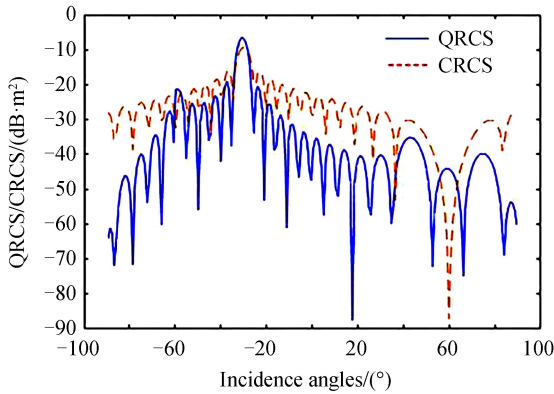


图 4 不同入射角的锥形曲面 QRCS 仿真

Fig.4 QRCS simulation of conical surface with different incidence angles

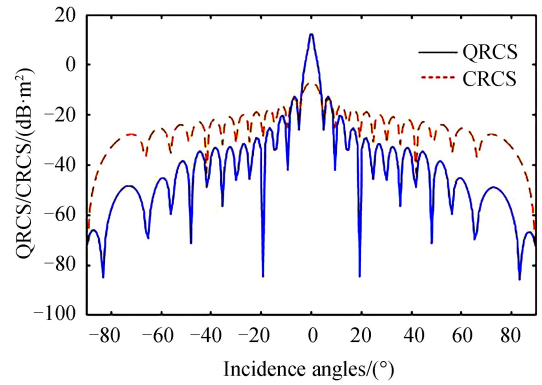


图 5 不同入射角的柱形曲面 QRCS 仿真

Fig.5 QRCS simulation of cylindrical surface with different incidence angles

4.2 锥柱复合目标曲面 QRCS 仿真

将圆锥、圆柱组合成锥柱复合目标, 模拟导弹目标几何结构. 通过 MATLAB 进行数值计算分析锥柱复合目标 QRCS, 模拟导弹目标 QRCS, 并与物理光学计算 CRCS 进行比较分析. 仿真结果如图 6.

由图 6 可知, 忽略了衍射和吸收效应, 当入射角 $\theta = \pi/6$, 锥柱复合目标 QRCS 的主瓣峰值高于 CRCS, 说明锥柱复合目标 QRCS 的能量在主瓣上更加集中, 旁瓣是由于量子干涉产生的结构, 而且锥柱复合目标 QRCS 的旁瓣低于 CRCS. 表明量子雷达比经典雷达辐射能量更加集中, 更加有利于对导弹目标的识别探测.

4.3 不同入射波长 QRCS 仿真

在 4.2 节仿真基础上, 从不同波长出发对锥柱复合目标进行仿真, 波长分别采用 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\lambda = 0.0003 \text{ m}$. 锥柱复合目标 QRCS 如图 7.

从图中可以发现, 锥柱复合目标曲面 QRCS 随着波长降低而逐渐降低, 而 QRCS 随 θ 的变化基本保持不变, 当入射波指向镜面方向时, QRCS 主瓣达到峰值. 从 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\lambda = 0.0003 \text{ m}$ 所对应 QRCS 波形可以发现, 随着波长降低, QRCS 副瓣干涉条纹明显加快. 结果表明量子雷达对小目标拥有较高辨识能力, 可以实现对纳米级目标的探测, 当量子雷达发射器选用微波光子, 利用具有量子干涉效应的测量技术, 能够对目标原子结构进行探测. 因此, 量子雷达能够更加有效地探测隐身目标.

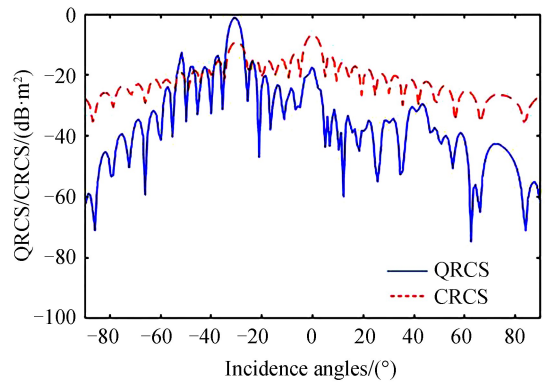


图 6 不同入射角的锥柱复合目标曲面 QRCS 仿真

Fig.6 QRCS simulation of conical column composite target surface with different incidence angles

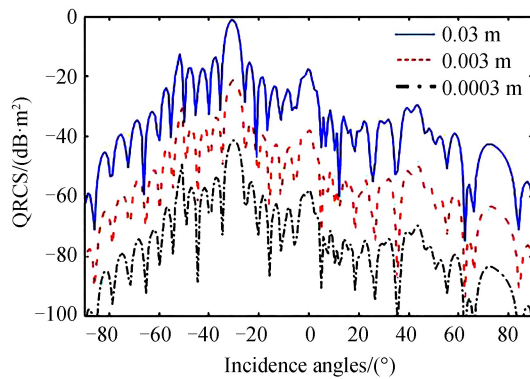


图7 不同入射波长锥柱复合目标曲面 QRCS 仿真

Fig.7 QRCS simulation diagram of conical cylindrical composite target surface with different incident wavelength

5 结论

在现有简单目标 QRCS 计算基础上,从圆锥、圆柱曲面角度分析计算锥柱复合目标 QRCS,建立导弹目标几何结构,推导锥柱复合目标曲面 QRCS 的表达式,分析计算锥柱复合目标 QRCS.通过与物理光学计算的 CRCS 进行比较,锥柱目标曲面 QRCS 的主瓣峰值高于 CRCS,在入射角 $\theta = \pi/6$ 附近,能量更加集中,表明 QRCS 值越大,散射光子能力越强,量子雷达具有更好的探测性能.通过对不同波长 QRCS 的仿真分析,发现量子雷达分辨率可以达到纳米级,远高于传统雷达,对于隐身目标,量子雷达更具有优势.下一步将对复杂环境中单光子量子雷达如何选用最佳的工作频率、处理噪声影响等展开研究.

参考文献

- [1] JIANG K, LEE H, GREEY C C, *et al.* Super-resolving quantum radar: coherent-state sources with homodyne detection suffice to beat the diffraction limit[J]. *Journal of the Applied Physics*, 2013, **114**(19): 193102.
- [2] ZHANG Jian-dong, ZHANG Zi-jing, ZHAO Yuan, *et al.* Super-sensitivity interferometric quantum lidar with squeezed vacuum injection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 64-69
张建东,张子静,赵远,等. 压缩真空注入超灵敏干涉型量子激光雷达[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(7): 64-69.
- [3] WASILOUSKY P A, SMITH K H, GLASSER R, *et al.* Quantum enhancement of a coherent LADAR receiver using phase sensitive amplification[C]. SPIE, 2011, **8163**: 816305.
- [4] SANTIVANEZ C A, GUTA S, DUTTON Z, *et al.* Quantum enhanced lidar resolution with multi-spatial-mode phase sensitive amplification[C]. SPIE, 2011, **8163**: 81630Z.
- [5] DUTTON Z, SHAPIRO J H, GUHA S. LADAR resolution improvement using receivers enhanced with squeezed-vacuum injection and phase-sensitive amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, **8163**: 816305.
- [6] LI Xu, NIE Min, YANG Guang, *et al.* The strategy and performance simulation of quantum entangled radar's survivability[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 11270021.
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): 11270021.
- [7] LIN Yun. Calculation of quantum radar scattering cross section of flat structure[J]. *Guidance & Fuze*, 2014, **35**(4): 50-53.
林云. 平板形目标的量子雷达散射截面计算[J]. *制导与引信*, 2014, **35**(4): 50-53.
- [8] LIU Kang, XIAO Huai-tie, FAN Hong-qi, *et al.* Analysis of quantum radar cross section and its influence on target detection performance[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2014, **26**(11): 1146-1149.
- [9] XU Shi-Long, HU Yi-Hua, ZHAO Nan-xiang, *et al.* Impact of metal target's atom lattice structure on its quantum radar cross section[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(15): 154203.
徐世龙,胡以华,赵楠翔,等. 金属目标原子晶格结构对其量子散射截面的影响[J]. *物理学报*, 2015, **64**(15): 154203.
- [10] CHEN Kun, CHEN Shu-xin, WU De-wei, *et al.* Analysis of quantum radar cross section of curved surface target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(12): 1227002.
陈坤,陈树新,吴德伟,等. 曲面目标量子雷达散射截面分析[J]. *光学学报*, 2016, **36**(12): 1227002.
- [11] BRANDSEMS M J. The effect of polarization on the quantum radar cross section response[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2017, **53**(2): 1-9.
- [12] BRANDSEMA M J, NARAYANAN R M, LANZAGORTA M. Theoretical and computational analysis of the quantum radar cross section for simple geometrical targets [J]. *Quantum information Processing*, 2017, **36**(12): 32.

- [13] STRATTON J A.Theory of electromagnetism[M]. Beijing Science Press, 1992.
- [14] MAHAFZAB R. Radar systems analysis and design using MATLAB[M]. 2016: 435-437.
- [15] LANZAGORTA M. Algorithmic analysis of quantum radar cross sections[C]. SPIE, 2015, **9461**: 946112.
- [16] LANZAGORTAM. Quantum computation of the electromagnetic cross section of dielectric targets[C]. SPIE, 2016, **9829**: 9829911.
- [17] LIU Kang, XIAO Huai-tie, FAN Hong-qi, *et al.* Analysis and simulation of quantum radar cross section[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, **31**(3): 034202.