

锥柱复合目标激光距离多普勒像分析模型*

于文英^{1)2)†} 安里千¹⁾

1) (中国矿业大学(北京)力建学院, 北京 100083)

2) (烟台大学光电信息科学技术学院, 烟台 264005)

(2012年3月9日收到; 2012年5月18日收到修改稿)

激光距离多普勒成像技术在航天和国防应用领域受到极大的关注. 文章建立了锥柱复合目标的激光距离多普勒像分析模型, 包括底面的贡献. 该模型能分析锥柱复合目标的几何参量、表面粗糙度、姿态、角速度和脉冲宽度等因素对激光距离多普勒像的影响, 并能退化到圆柱和圆锥的激光距离多普勒像分析模型, 也能退化到平面波下的多普勒谱分析模型. 分析了几何参量和姿态对距离多普勒像的影响. 计算结果表明, 锥柱复合目标距离多普勒像能体现出目标的几何形状和姿态信息. 理论和测量相结合, 该分析模型能用来进行圆柱、圆锥及锥柱复合目标物理和几何参量的识别, 其解析表达式对于多普勒速度计和激光雷达应用有着重要的意义.

关键词: 多普勒, 激光成像, 粗糙界面散射, 激光应用

PACS: 87.63.dk, 87.63.lt, 43.30.Hw, 42.62.-b

1 引言

激光距离多普勒成像技术倍受航天和军用领域的关注, 也是限制扩散的军事技术之一. 目前, 利用激光距离多普勒成像雷达系统得到的激光距离分辨多普勒成像 (RRDI) 能用于目标测距、定向和识别目标. 美国空军部队和导弹防御司令部采用距离分辨多普勒成像为激光雷达导引头, 用以增强外空间目标的识别能力^[1-4]. 激光距离分辨多普勒成像能识别飞机上的转动部件、检测转动的圆盘和球、检测空间飞行平台的运行姿态、进行目标微运动检测和局部流体速度的测量^[5-8]. 速度调制光谱技术通过多普勒频移能进行高分辨的光谱测量^[9]. 多普勒技术能测量血液的绝对速度、粒子速度、转动粗糙面的角速度、固体目标转动速度及扭转振动速度和表面振动速度^[10-13]. 利用多普勒频移能够对旋转目标的形状和震动进行测量^[14]. 多普勒在其他领域也有广泛的应用, 例如文献^[15]给出一维动态分形海面后向散射信号的多普勒谱

分形特征, 对海背景遥感及海面上复合目标散射多普勒谱分析及目标检测也有重要意义. 文献^[16]研究了海面回波各阶多普勒谱的频移特性, 得到了多普勒谱频移所对应的理论公式, 理论公式可较好地预测海面散射场的多普勒谱频移及大入射角度时一阶多普勒峰频移及谱宽. 利用多普勒谱研究掺硼和掺硫金刚石薄膜的缺陷状态^[17], 可以通过多普勒频移能研究锆离子注入锆-4合金缺陷及其退火回复行为^[18], 关于原子中的多普勒展宽及其特性也有很多研究^[19-26]. 目标的运动导致的多普勒效应对 SAR 成像和目标一维距离成像会产生干扰, 这是在不能够准确估计和抵消目标运动产生的多普勒效应条件下才出现, 同时, ISAR 成像还要利用目标的运动^[27].

目标激光距离多普勒像是转动目标的脉冲激光散射特性, 能反映目标的形状、姿态和表面材料信息^[28]. 利用脉冲激光可以获得目标激光一维距离像, 能反映目标的形状、姿态和表面材料信息, 不包含转动信息^[29-31]. 平面波照射下可以获得绕轴转动回转体的激光后向多普勒谱^[32,33]. 文

* 国家自然科学基金 (批准号: 10974168)、湖南省科技计划 (批准号: 2012FJ3052) 和湖南教育厅科研项目 (批准号: 12A054) 资助的课题.

† E-mail: yuwenyingt@sohu.com

献 [28] 给出转动的圆柱和圆锥的激光距离多普勒像分析模型, 该模型改进了 Bankman^[34] 的存在奇异值且公式复杂的模型. 在本文中, 提出一个适用于锥柱复合目标的激光距离多普勒像分析模型. 本文数值计算了目标几何参量、姿态对激光距离多普勒像的影响. 本文提出的分析模型能分析锥柱复合目标激光距离多普勒成像特性, 并能退化到圆柱和圆锥. 文献 [28] 给出的模型是本文的特例, 文献 [28, 34] 只是研究了侧面, 本文研究的是整体目标, 包含目标的底面. 文献 [28, 34] 中的分析模型是本文在不考虑底面情况下的特例, 同时改进了激光散射功率计算公式.

2 锥柱复合目标的距离多普勒像分析模型

有一种雷达系统可以提供转动目标的多普勒功率谱的变化^[34]. 本文研究的目标指的是圆柱、圆锥或者是锥柱复合目标. 目标绕自己的中心轴以角速度 ω 转动, 波长为 λ 的脉冲激光束被扩展, 目标全部被激光照射. 建立如下笛卡儿坐标系, 激光的入射方向为 z 轴正向, 锥柱复合目标的底面圆心为坐标原点, 目标的中心轴线和 z 轴所在的平面为 $y-z$ 平面, 转动方向如图 1 所示, 转动轴在 $y-z$ 平面内 (见图 1). 目标的轴与激光入射方向的夹角 γ 称为视线角, γ 定义如下: 从 z 轴正向按照与 x 轴正向成左手螺旋旋转到目标的轴所转过的角度. 在后向观测目标, 目标表面为各向同性的粗糙面, 目标上任意一个面元的后向散射强度依赖于表面材料、入射光线入射方向的反方向与在此面元法线 (指向物体的外面) 的夹角 β (见图 1) 和面元面积 ΔA , β 是光线在入射点处的本地入射角.

一个雷达接收系统, 在忽略各种损耗的情况下, 对于一个点目标的接收功率表达式如下:

$$P = KP_t \frac{\sigma}{4\pi}, \quad (1)$$

P_t 为发射机功率, K 是一个与观测系统、发射系统及目标和这两个系统之间的距离有关的量, 观测系统、发射系统及目标三者位置关系确定的情况下为常量^[28]. σ 为目标的激光雷达散射截面. 当发射机功率 P_t 以脉冲形式 $S(t)$ 的入射功率从光源发出, 目标上对于不可照射面元 ($\cos \beta \leq 0$), 后向散射功率为 0, 目标上每一可照射面元 ($\cos \beta > 0$) (见

图 1) 的后向散射功率如下:

$$\Delta P(\beta, t) = KS(t)f_r(\beta)\Delta A \cos^2 \beta, \quad (2)$$

$t' = t - (R + R')/c - 2z/c$; R' , R 分别为坐标系的原点到发射天线、接收天线的距离; $f_r(\beta)$ 为目标表面材料的后向双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, 简称 BRDF), 是 β 的函数, 依赖于目标的表面材料. 当表面材料为朗伯面时, $f_r(\beta)$ 是一个常数, $f_r(\beta) = \rho/\pi$; ρ 是表面材料的半球反射率, 与朗伯表面的材料有关; ΔA 为面元的面积. h_1, h_2 分别为圆柱部分和圆锥部分的高度, $h = h_1 + h_2$ 为复合目标的高度, r 为圆柱的半径, α 为圆锥的半锥角, $\tan \alpha = r/h_2$.

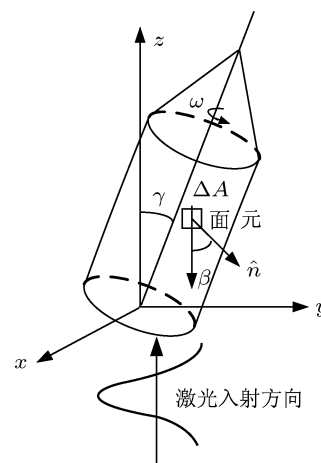


图 1 多普勒分析模型中的坐标系框架

对于图 1 所示的锥柱复合目标的表面方程写成如下的形式:

$$x^2 + (y \cos \gamma - z \sin \gamma)^2 = r^2 \quad (0 \leq y \sin \gamma + z \cos \gamma \leq h_1), \quad (3a)$$

$$x^2 + (y \cos \gamma - z \sin \gamma)^2 = (h - y \sin \gamma - z \cos \gamma)^2 \tan^2 \alpha \quad (h_1 < y \sin \gamma + z \cos \gamma \leq h), \quad (3b)$$

$$y \sin \gamma + z \cos \gamma = 0 \quad (x^2 + (y \cos \gamma - z \sin \gamma)^2 \leq r^2). \quad (3c)$$

目标可照射点的位置矢量 (x, y, z) 在后向方向上的多普勒频移 Δf 和 x 的关系^[28]

$$x = \frac{\lambda \Delta f}{2\omega \sin \gamma}, \quad (4)$$

用 (2) 式计算功率, 可照射面元处的功率如下 [28]:

$$\Delta P(\beta, t) = KS(t')\Delta x\Delta y f_r(\beta) \cos \beta, \quad (5)$$

(5) 式中 Δx 和 Δy 为面元处坐标的增量.

(5) 式是在 $\cos \beta > 0$ 时成立, 否则为 0. 我们把 (5) 式修改如下:

$$\Delta P(\beta, t) = KS(t')\Delta x\Delta y f_r(\beta) \frac{\cos \beta + |\cos \beta|}{2}, \quad (6)$$

(6) 式对于任意 β 都是成立的.

根据 (3) 式可以计算目标表面任意一点的单位法矢量 \hat{n} , $\cos \beta$ 等于 \hat{n} 的 z 分量的相反数.

(a) 圆柱部分

$$\cos \beta = -\hat{n}_z = \frac{\sin \gamma(y \cos \gamma - z \sin \gamma)}{r} \quad (0 \leq y \sin \gamma + z \cos \gamma \leq h_1), \quad (7)$$

根据 (3) 式, (7) 式中的 z 可表达为如下 x 和 y 的函数.

$$z = \frac{y \cos \gamma \pm \sqrt{r^2 - x^2}}{\sin \gamma}. \quad (8)$$

把 (7) 式中的 z 用 (8) 式的右边代替, $\cos \beta$ 可以表达成 x 和 y 的函数, 则照射点的功率也可以表达成 x 和 y 的函数.

(b) 圆锥部分

设

$$X = x, \quad (9a)$$

$$z = \frac{2 \cos \gamma (y \sec^2 \alpha \sin \gamma - h \tan^2 \alpha)}{2(1 - \cos^2 \gamma \sec^2 \alpha)} \pm \frac{\sqrt{2[(h^2 + 2y^2) \sin^2 \alpha - x^2 \cos 2\alpha + (x^2 - h^2 \sin^2 \alpha) \cos 2\gamma] \sec^2 \alpha - 8hy \sin \gamma \tan^2 \alpha}}{2(1 - \cos^2 \gamma \sec^2 \alpha)}. \quad (14)$$

对于 $\cos^2 \gamma \sec^2 \alpha = 1$, z 不能用 (14) 式计算, 这时 z 用下面的式子计算

$$z = \frac{\sec \gamma [x^2 + y^2 \cos^2 \gamma - (h - y \sin \gamma)^2 \tan^2 \alpha]}{2 \sec^2 \alpha (2y \sin \gamma - h \tan^2 \alpha)}, \quad (15)$$

把 (13) 式中的 z 用 (14) 或 (15) 式右边代替, $\cos \beta$ 表达成 x 和 y 的函数, 可照射面元的功率也可以表达成 x 和 y 的函数.

(c) 底面

$$\cos \beta = \cos \gamma. \quad (16)$$

从 (4) 式可以看出, 对于目标表面上 x 分量相

$$Y = y \cos \gamma - z \sin \gamma, \quad (9b)$$

$$Z = y \sin \gamma + z \cos \gamma, \quad (9c)$$

由 (3) 式得

$$F(x, y, z) = X^2 + Y^2 - (h - Z)^2 (\tan \alpha)^2 = 0 \quad (h_1 < Z \leq h_1 + h_2), \quad (10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 2X,$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = 2Y \cos \gamma + 2(h - Z)(\tan \alpha)^2 \sin \gamma,$$

$$\frac{\partial F}{\partial z} = -2Y \sin \gamma + 2(h - Z)(\tan \alpha)^2 \cos \gamma, \quad (11)$$

由 (10) 和 (11) 式得

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 = 4[X^2 + Y^2 + (h - Z)^2 (\tan \alpha)^4] = 4(h - Z)^2 \tan^2 \alpha \sec^2 \alpha, \quad (12)$$

$$\cos \beta = -\hat{n}_z$$

$$= -\frac{\partial F}{\partial z} / \left(\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \right) = \frac{(y \cos \gamma - z \sin \gamma) \sin \gamma \cos \alpha}{(h - y \sin \gamma - z \cos \gamma) \tan \alpha} - \sin \alpha \cos \gamma \quad (13)$$

$$h_1 < y \sin \gamma + z \cos \gamma < h,$$

由 (3) 式得

同的点其多普勒频移相同. 为了获得给定多普勒频移的功率, 对任意一个 x , 把 (5) 式对 y 在目标表面上进行积分, 得到后向散射功率 $P(x, t)$. 积分如下:

$$P(x, t) = K \Delta x \int_{y \in C} S(t') f_r(\beta) \times \frac{\cos \beta + |\cos \beta|}{2} dy, \quad (17)$$

这里的 C 为积分区域, 满足 (3) 式.

选坐标 $t = (R + R')/c$ 为时间原点, 由于 $t' = t - (R + R')/c - 2z/c$, t 时刻脉冲传播到 z_t 位置, 则

$$P(x, z_t) = K \Delta x \int_{y \in C} S(2z_t/c - 2z/c) f_r(\beta)$$

$$\times \frac{\cos \beta + |\cos \beta|}{2} dy. \quad (18)$$

把(4)式代入(18)式,在 $\omega, \lambda, \gamma, h_1, h_2, r$ 及 $f_r(\beta)$ 给定的情况下,得到对于任意给定距离 $z_t, P(x, z_t)$ 作为 Δf 的函数,脉冲传播到 z_t 位置时多普勒频移 Δf 的功率.由(18), (3), (7), (8), (13)—(16)式和(4)式给出任意各向同性粗糙表面的锥柱复合目标的距离多普勒像分析模型,是脉冲激光传播到 z_t 位置时目标的多普勒谱,这就是目标的距离多普勒像^[28],适用于具有任意各向同性粗糙表面的柱锥复合目标.对于不同材料构成的锥柱复合目标,其后向双向反射分布函数 $f_r(\beta)$ 不同,是面元处本地入射角 β 的函数.

当把脉冲激光换成平面波激光,即(18)式中的 $S(2z_t/c - 2z/c) = S_0$,得到(19)式给出的目标激光后向多普勒谱分析模型:

$$P(x) = K S_0 \Delta x \int_{y \in C} f_r(\beta) \times \frac{\cos \beta + |\cos \beta|}{2} dy. \quad (19)$$

把(4)式代入(19)式,在 $\omega, \lambda, \gamma, h_1, h_2, r$ 及 $f_r(\beta)$ 给定的情况下, $P(x)$ 作为 Δf 的函数.由(19), (3), (7), (8), (13)—(16)式和(4)式给出任意各向同性粗糙表面的锥柱复合目标的激光距离多普勒像分析模型.下面我们通过(18)和(19)式分析目标几何参量、姿态对目标激光距离多普勒像和目标激光后向多普勒谱的影响.

3 数值结果

为了讨论方便,这里的脉冲输入功率为高斯形式

$$S(t) = S_0 \exp(-2t^2/T_0^2), \quad (20)$$

T_0 为脉冲宽度.

对于漫反射的朗伯表面

$$f_r(\beta) = k_L = \frac{\rho}{\pi}, \quad (21)$$

这里的 ρ 为朗伯表面的半球反射率.

本文选 $\lambda = 1 \mu\text{m}, \Delta x = 5 \text{mm}, \Delta y = 10 \mu\text{m}, \omega = 1 \text{rad/s}$,把 $K_L = K S_0 k_L$ 归一化为1来模拟结果.

图2(a)—(f)分别给出 h_1 从0 m到1 m的变化,间隔0.2 m的激光距离多普勒像,半径 $r = 0.1 \text{m}, h = h_1 + h_2 = 1 \text{m}$,视线角 $\gamma = 10^\circ$,图2只考虑侧

面而不包含底面.

图2中的 h_1 从0 m到1 m,目标高度不变,锥柱复合目标由圆锥变化到圆柱.从图2可以看出,距离多普勒像确实是从圆锥的变化到圆柱的,图2(f)的距离多普勒像与文献[28]中 $\gamma = 10^\circ$ 时圆柱距离多普勒像一致.图2(a)中是圆锥的情况,这里的 $\gamma = 10^\circ$ 应与文献[28]中 $\gamma = 190^\circ$ 时一致.但是文献[28]中没有给出圆锥在 $\gamma = 190^\circ$ 时的结果,本文的分析模型能够退化到圆柱,也能退化到圆锥,验证了分析模型是正确的.

图2(b)—(e)为锥柱复合目标,从图2(b)可以明显看出距离多普勒像明显为两者复合的结果,图2(c)—(e)只能看到圆柱的距离多普勒像,图2(d)和(e)中锥柱复合目标的圆锥部分被圆柱遮挡,激光照射不到,而图2(c)中圆锥被照射部分的本地入射角相对于圆柱的很大,所以相对于圆柱部分,圆锥部分的功率很小.把圆锥部分的多普勒像放大(见图2(g)),从图2(g)中可以看出圆锥的距离多普勒像.从图3可以看出,在锥柱复合目标高度一定的情况,随着圆锥部分的减小,圆柱高度增加,在距离轴上圆锥部分像的宽度减小,而圆柱部分像的宽度增加,激光距离多普勒像能反映出目标的几何特征.

图3(a)—(e)分别给出 h_2 从1 m到0.2 m的变化,间隔0.2 m的锥柱复合目标距离多普勒像, $h = h_1 + h_2 = 1 \text{m}$,视线角 $\gamma = 190^\circ$.图3(f)给出的是 $h_2 = 0.001 \text{m}, h_1 = 0.999 \text{m}$,半径 $r = 0.1 \text{m}$,视线角 $\gamma = 190^\circ$ 的锥柱复合目标距离多普勒像.因为 $h_2 = 0 \text{m}$ 时圆锥不存在了,图3(f)的 h_2 为0.001 m,接近圆柱.图3(a)的目标为圆锥,距离多普勒像同文献[28]中 $\gamma = 10^\circ$ 时是一致的,因为对于两者,圆锥轴与激光入射方向的夹角都是 10° ,而入射都是从圆锥尖端部分入射,即两者的目标相对于激光的入射方向的姿态是一致的.从图3可以看出随着圆柱高度增加、圆锥高度的减小,多普勒像在距离轴上的宽度在圆柱部分增加,而在圆锥部分减小.图3(f)的圆锥高度很小,这时的锥柱复合目标很接近圆柱,此时应该与图2(f)一致.但并不一致,其原因是图2(f)没有考虑圆柱的底面,而在圆锥半锥角很大时,圆锥很接近一个圆面.半锥角很大的圆锥,其距离多普勒像接近圆面的距离多普勒像,即如果考虑底面,图3(f)和图2(f)就会很接近.

图 3 中的 h_2 从 1.0 m 到 0.001 m 变化, 视线角为 190° , 锥柱复合目标由圆锥变化到很接近圆柱, 从图 3 可以看出距离多普勒像的确从圆锥的变化到圆柱的, 图 3(a) 的距离多普勒像与文献 [28] 中朗伯圆锥视线角为 10° 时是一

致的。

图 4(a)—(i) 给出视线角 γ 从 10° 到 170° 变化, 变化间隔为 20° , $T_0 = 1$ ns, 底半径为 0.1 m, $h_1 = 1$ m, $h_2 = 1$ m 的朗伯锥柱复合目标侧面 (不包含底面) 不同视线角的距离多普勒像。

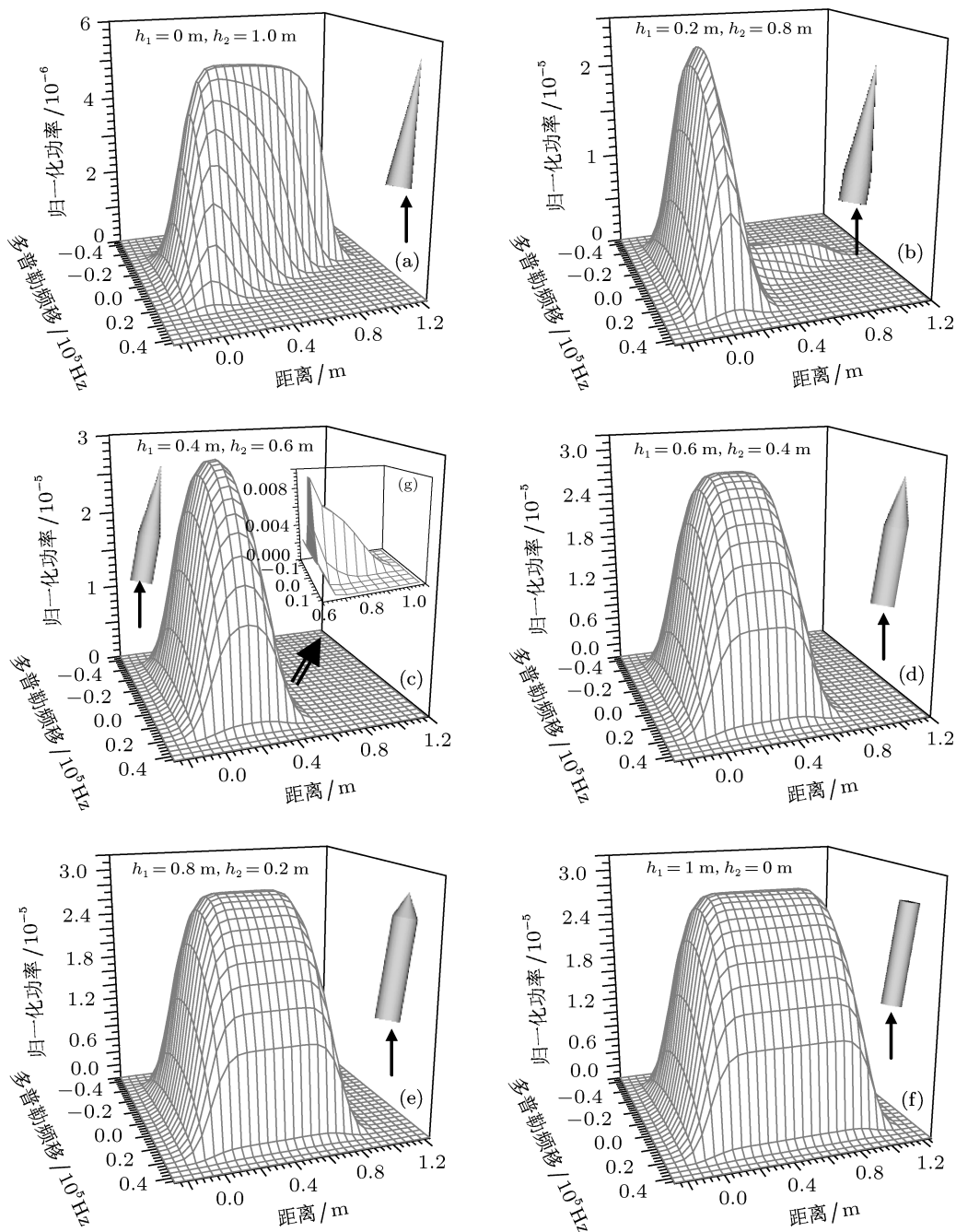


图 2 脉冲宽度 T_0 为 1 ns, 视线角 $\gamma = 10^\circ$, 半径 $r = 0.1$ m 时不同高度朗伯锥柱复合目标的距离多普勒像 (a) $h_1 = 0$ m, $h_2 = 1$ m; (b) $h_1 = 0.2$ m, $h_2 = 0.8$ m; (c) $h_1 = 0.4$ m, $h_2 = 0.6$ m; (d) $h_1 = 0.6$ m, $h_2 = 0.4$ m; (e) $h_1 = 0.8$ m, $h_2 = 0.2$ m; (f) $h_1 = 1$ m, $h_2 = 0$ m; (g) 为 (c) 部分图像的放大

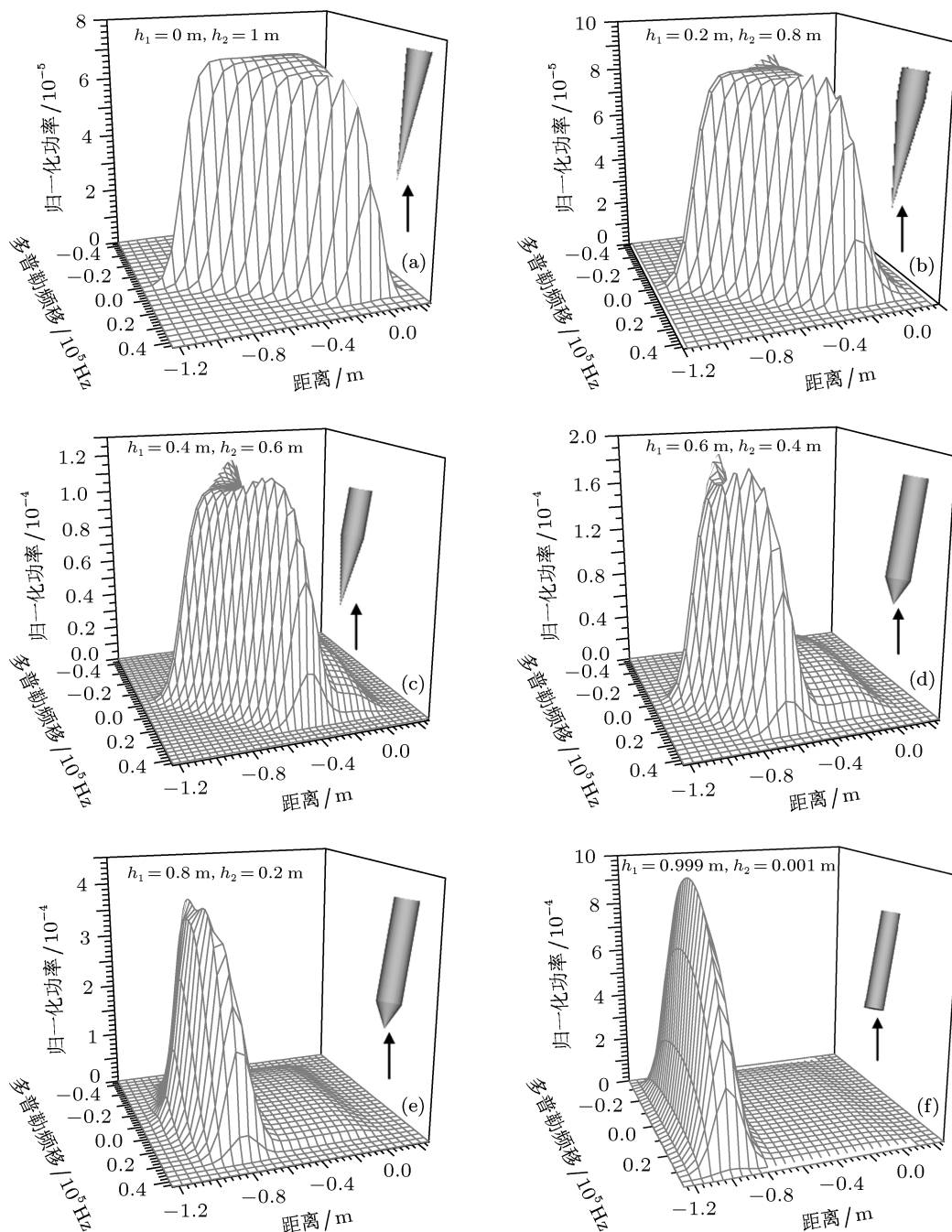


图3 脉冲宽度 T_0 为 1 ns, 视线角 $\gamma = 190^\circ$, 半径 $r = 0.1 \text{ m}$ 时不同高度朗伯锥柱复合目标的距离多普勒像 (a) $h_1 = 0 \text{ m}, h_2 = 1 \text{ m}$; (b) $h_1 = 0.2 \text{ m}, h_2 = 0.8 \text{ m}$; (c) $h_1 = 0.4 \text{ m}, h_2 = 0.6 \text{ m}$; (d) $h_1 = 0.6 \text{ m}, h_2 = 0.4 \text{ m}$; (e) $h_1 = 0.8 \text{ m}, h_2 = 0.2 \text{ m}$; (f) $h_1 = 0.999 \text{ m}, h_2 = 0.001 \text{ m}$

从图 4(a)—(e) 可以看出, 当视线角 γ 从 10° 到 90° 变化时, 锥柱复合目标距离多普勒像在距离轴的宽度逐渐减小, 这是因为目标在激光入射方向的投影高度在减小; 多普勒频移轴变宽, 因为根据 (4) 式可以直接得出 γ 从 10° 到 90° 时, 多普勒频移增加; 像的高度增加, 是因为本地入射角减小。

从图 4(f)—(i) 可以看出当视线角 γ 从 110° 到 170° 变化时, 锥柱复合目标距离多普勒像在距离轴的宽度逐渐增加, 这里因为目标在激光入射方向的投影高度在增加; 多普勒频移轴变窄是因为根据 (4) 式可以直接得出 γ 从 110° 到 170° 时多普勒频移减小; 像高度减小是因为本地入射角增大。

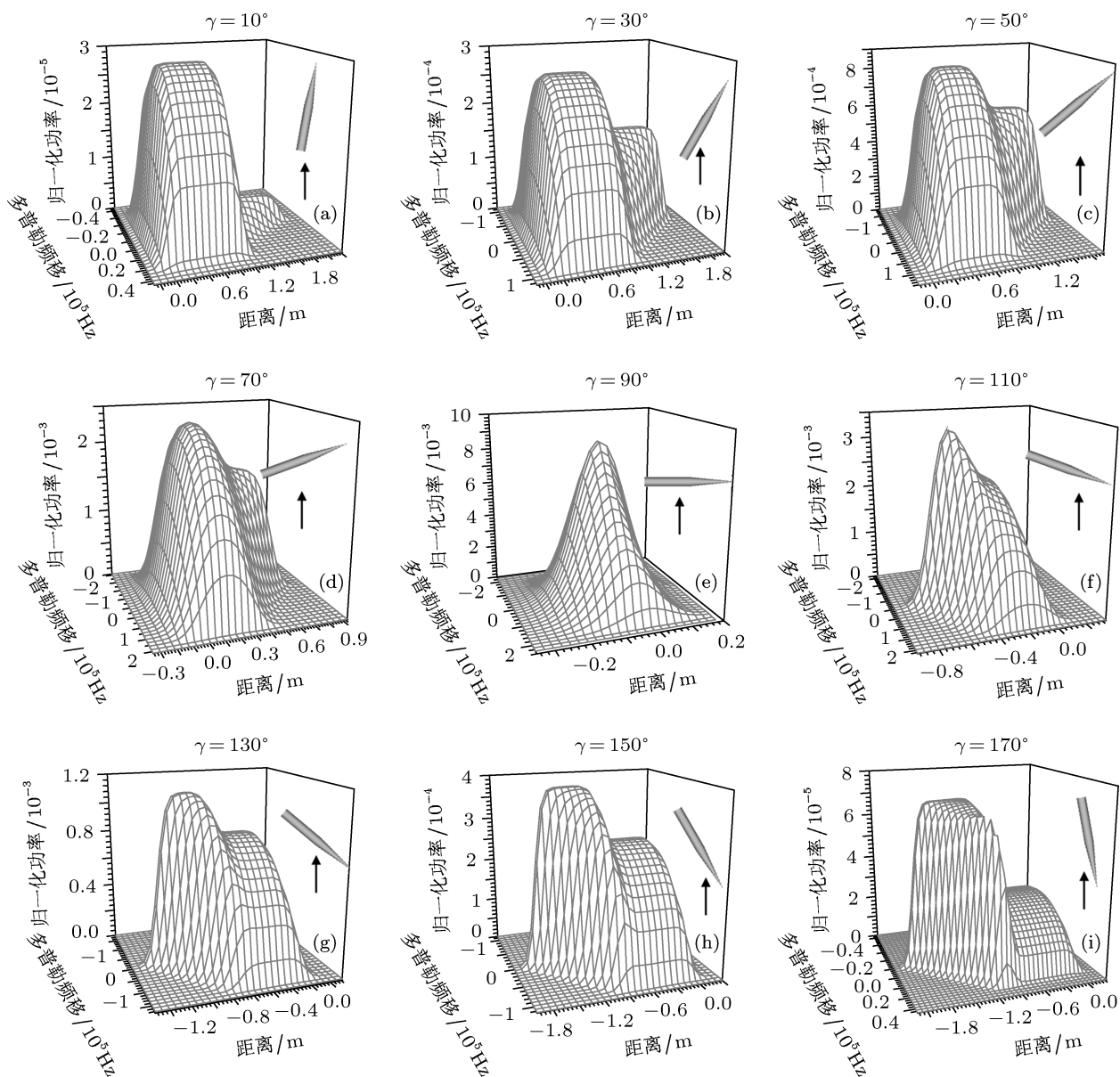


图4 $T_0 = 1 \text{ ns}$, $r = 0.1 \text{ m}$, $h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$ 的朗伯锥柱复合目标侧面不同视线角的距离多普勒像 (a) $\gamma = 10^\circ$; (b) $\gamma = 30^\circ$; (c) $\gamma = 50^\circ$; (d) $\gamma = 70^\circ$; (e) $\gamma = 90^\circ$; (f) $\gamma = 110^\circ$; (g) $\gamma = 130^\circ$; (h) $\gamma = 150^\circ$; (i) $\gamma = 170^\circ$

图4中除(e)以外,其他能明显看出激光距离多普勒像由圆柱和圆锥两部分组成,这是因为当 $\gamma = 90^\circ$ 时,图4(e)的脉冲中心同时经过圆柱和圆锥,而其他图则存在脉冲中心不同时经过圆柱和圆锥,这样就出现了锥柱两部分像。

图5给出了朗伯锥柱复合目标包含底面的不同视线角的距离多普勒像.图5(a)—(c)中 γ 分别为 10° , 40° 和 70° , $T_0 = 1 \text{ ns}$, $r = 0.1 \text{ m}$, $h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$.图5中距离轴从小到大依次为圆柱底部(包含部分圆柱侧面)、圆柱侧面和圆锥,因为脉冲激光从圆柱底部入射,依次经过圆柱底部(包

含部分圆柱侧面)、圆柱侧面和圆锥.图5(a)中距离坐标从 -0.2 m 到 0.2 m 之间为圆柱底面(包含部分圆柱侧面)距离多普勒像, 0.2 m 到 0.8 m 处为圆柱侧面, 0.8 m 到 2.2 m 为圆锥.因为 $\gamma = 10^\circ$ 时,圆柱侧面和圆锥的本地入射角远大于底面的,所以圆柱侧面和圆锥部分像的高度远低于圆柱底面,图5(a)中的插图为距离轴 0.3 m 到 1.8 m 范围的距离多普勒像的放大,可以看出圆柱和圆锥的距离多普勒像同图4(a)一致.当 $\gamma = 40^\circ$ 时,三者的本地入射角相差不是很大,所以三者像的高度也相差不大.对比图5(c)和图4(d),当 $\gamma = 70^\circ$ 时,

包含底面和不包含底面的像几乎一样,这是因为此时底面的本地入射角为 70° ,而侧面上最小的本地入射角在 $x = 0$ 的位置,为 20° ,两者相差比较大,所以底面对功率的贡献比较小,因此两者相差并不大,但还是存在细微的差别,在底面位置的像稍高一点.而对于 $270^\circ \geq \gamma \geq 90^\circ$ 时底面不可见,考虑圆柱底面和不考虑圆柱底面的距离多普勒像都是一样的.

图 6 给出 $T_0 = 1 \text{ ns}$, $h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$ 的朗伯锥柱复合目标包含底面的视线角分别为 30° , 40° 和 50° ,每个视线角下的 r 分别为 0.2 m , 0.3 m 和 0.4 m

从图 6 可以看出,在 $90^\circ > \gamma > 0^\circ$ 情况下,

在 γ 一定,圆柱和圆锥高度一定情况下,随着圆柱底部半径的增加,底面和圆柱侧面起作用的像在距离轴上的宽度增加(圆柱侧面单独起作用像的宽度减小)、底面和圆柱侧面起作用的像高度增加(圆柱侧面单独成像的高度不变,圆锥部分像高度减小)、多普勒轴宽度增加,这是因为底面和圆柱侧面同时起作用的距离增大(圆柱侧面单独起作用的距离减小), x 固定情况下底面的窄带宽度增加(圆柱在 $x = 0$ 窄带处本地入射角最小且不变), x 取值范围在增加.圆锥像的高度减小,是因为随着半径的增加,圆锥半锥角 α 增加, $x = 0$ 处的本地入射角为 $90 + \alpha - \gamma$,其他地方的本地入射角也增加.

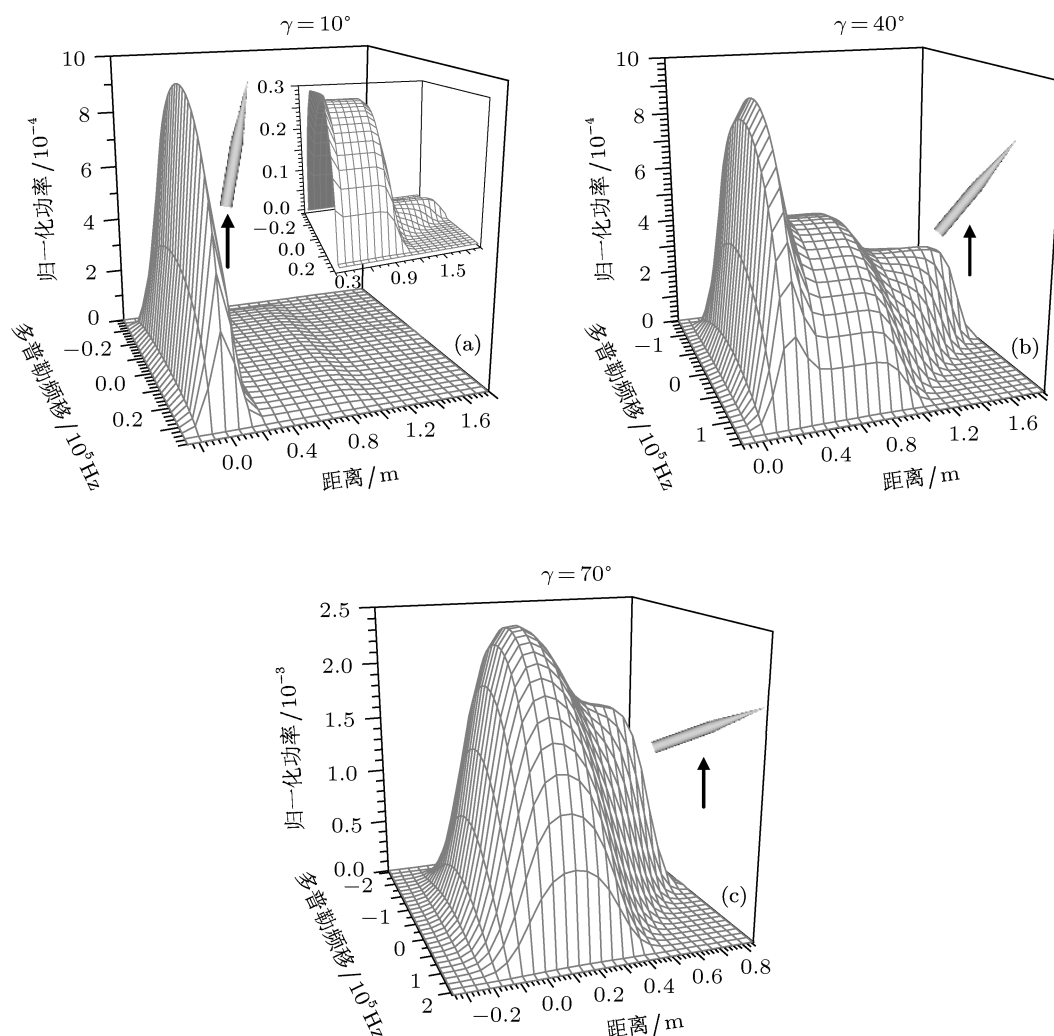


图 5 $T_0 = 1 \text{ ns}$, $r = 0.1 \text{ m}$, $h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$ 的朗伯锥柱复合目标包含底面不同视线角的距离多普勒像 (a) $\gamma = 10^\circ$ 插图为圆柱和圆锥部分像的放大; (b) $\gamma = 40^\circ$; (c) $\gamma = 70^\circ$

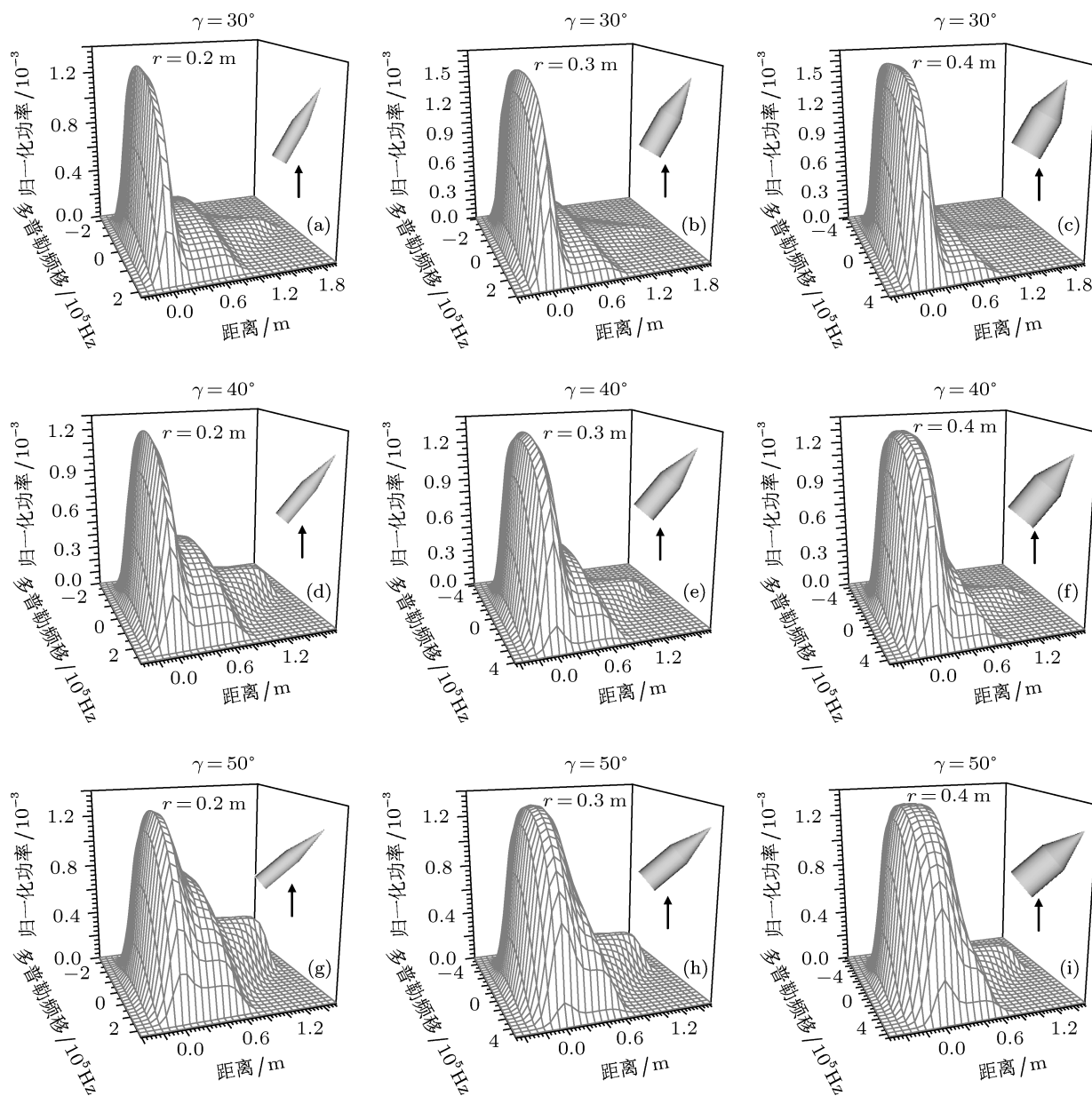


图6 $T_0 = 1 \text{ ns}$, $h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$ 的朗伯锥柱复合目标包含底面不同视线角不同半径的距离多普勒像 (a) $\gamma = 30^\circ$, $r = 0.2 \text{ m}$; (b) $\gamma = 30^\circ$, $r = 0.3 \text{ m}$; (c) $\gamma = 30^\circ$, $r = 0.4 \text{ m}$; (d) $\gamma = 40^\circ$, $r = 0.2 \text{ m}$; (e) $\gamma = 40^\circ$, $r = 0.3 \text{ m}$; (f) $\gamma = 40^\circ$, $r = 0.4 \text{ m}$; (g) $\gamma = 50^\circ$, $r = 0.2 \text{ m}$; (h) $\gamma = 50^\circ$, $r = 0.3 \text{ m}$; (i) $\gamma = 50^\circ$, $r = 0.4 \text{ m}$

从图6可以看出,在 $90^\circ > \gamma > 0^\circ$ 情况下,圆柱和圆锥高度、底部半径一定的情况下,随着 γ 的增加,底面和圆柱侧面共同成像在距离轴上的宽度增加(圆柱侧面单独起作用像的宽度减小)、多普勒轴宽度增加.这是因为底面和圆柱侧面同时起作用的距离增大(圆柱侧面单独起作用的距离减小),根据(4)式多普勒频移增加.圆锥像的高度增加,是因为随着 γ 的增加, $x = 0$ 处的本地入射角为 $90 + \alpha - \gamma$,本地入射角减小.底面和圆柱侧面共同成像的高度随着 γ 的增加不是一直增加或者减

小,这是因为随着 γ 的增加底面的本地入射角增加而圆柱侧面本地入射角在减小.

当 $T_0 = \infty$ 时

$$S(t) = S_0, \tag{22}$$

脉冲平面波退化成平面波.

$h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$, $r = 0.1 \text{ m}$ 锥柱复合目标的9个不同视线角 γ 的朗伯表面功率谱曲线如图7所示.把 $K_L = K S_0 k_L$ 归一化为1, $\lambda = 1 \mu\text{m}$, $\Delta x = 5 \text{ mm}$, $\Delta y = 10 \mu\text{m}$, $\omega = 1 \text{ rad/s}$ 被选择来计

算功率谱. 其中图 7(a) 和 (b) 分别为不包含底面和包含底面, 视线角 γ 的变化由 10° 到 90° , 角度间隔为 10° . 图 7(c) 视线角 γ 的变化由 90° 到 170° , 角度间隔为 10° .

从图 7 可以看出锥柱复合目标的多普勒谱能反映锥柱的复合特征, 从图 7 (a) 和 (b) 的对比可以看出, 当 $90^\circ \geq \gamma > 0^\circ$ 时, 随着视线角的增加, 包含底面和不包含底面的多普勒谱差别减小, 包含底面的高, $\gamma = 90^\circ$ 没有区别, 这是因为随着视线角的增加, 底面的本地入射角在增加, $\gamma = 90^\circ$ 时, 底面不能被激光照射到. 图 7(c) 中 $\gamma = 170^\circ$ 高于不包含底面 $\gamma = 10^\circ$, 而低于包含底面 $\gamma = 10^\circ$, 对于

这三种情况, 圆柱侧面贡献是一致的. 而图 7(b) 包含底面, 同时底面的本地入射角小. 对于 $x = 0$ 处, 图 7(c) 的圆锥的本地入射角小于图 7(a) 和 (b). 把图 7(c) 中同图 7(a) 和 (b) 中视线角相差 180° 的多普勒谱相比较, 图 7(c) 中随着 γ 的减小一直不低于图 7(a) 中的, 这是因为图 7(c) 中圆锥的 $x = 0$ 处的本地入射角小, 像的高度由 $x = 0$ 的位置确定, 而圆柱是一样的. 图 7(c) 中随着 γ 的减小, 谱的高度开始低于图 7(b) 中的, 到 $\gamma = 150^\circ$ 后, 不再低于图 7(b), 这是因为圆锥的 $x = 0$ 处本地入射角小, 而圆柱是一样的, 同时底面的本地入射角在增加.

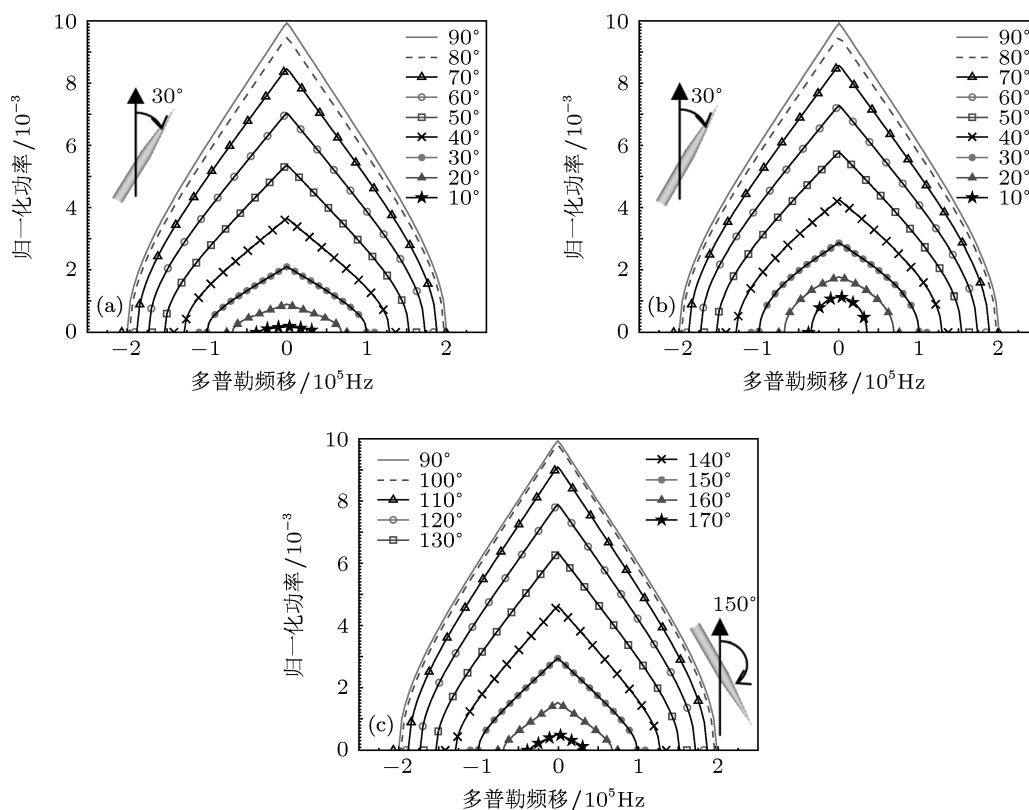


图 7 底半径 $r = 0.1$ m, $h_1 = 1$ m, $h_2 = 1$ m 时具有朗伯面的锥柱复合目标的功率谱, 视线角为 10° — 170° , 步长间隔为 10° (a) γ 为 10° — 90° ; (b) 考虑圆柱底面, γ 为 10° — 90° ; (c) γ 为 90° — 170°

4 结论

本文的主要目的是给出锥柱复合目标的激光距离多普勒像的分析模型, 表面材料选的是朗伯表面, 文献 [28] 研究了后向 BRDF 对入射角满足指数分布材料的圆柱和圆锥的距离多普勒像. 本文的锥柱复合目标激光距离多普勒像分析模型能够给出

锥柱复合目标的激光距离多普勒成像特征, 能够反映锥柱复合目标几何形状特征、姿态信息, 能分析表面材料、姿态、脉冲宽度和几何参量对激光距离多普勒像的影响. 从文中给出的数值计算结果, 可以看出本文给出的分析模型是正确的, 并能退化到圆柱和圆锥, 同时考虑了底面对距离多普勒像的影响. 当圆锥的半锥角很大, 接近 90° 时, 其距离多

普勒像就会很接近圆面的距离多普勒像. 这个分析模型对于多普勒速度计和激光雷达有着重要的意义. 锥柱复合目标很类似弹体的形状, 测量和理论相结合, 能探测例如弹道导弹等目标的特征, 对于

弹道导弹的防御也有一定的意义. 下一步将开展各种表面材料对距离多普勒像的影响, 分析表面材料的介电特性、粗糙程度等对像的影响以及分析圆柱部分和圆锥部分为不同材料对像的影响.

- [1] Gesell L H, Feinleib R E, Turpin T M 1990 *In Advances in Optical Information Processing IV* edited by Pape D R (SPIE) p189
- [2] Master L T, Duncan M B M B D 1995 *IEEE* 129
- [3] Youmans D G, Robertson R 1997 A640923
- [4] Jenjins R M, Food R, Devereux R W J, Blockley A F, Quarrel J 2000 *In Laser Weapons Technology*, edited by Steiner T D, Merritt P H (SPIE) p108
- [5] Minden M L, O'Meara T R 1990 *N00014-85-C-0534* (Hughes Research Laboratories, California)
- [6] Kachelmyer A L, Nordquist D P 1991 *In Laser Radar VI* (SPIE, Los Angeles, CA, USA) p184
- [7] Yura H T, Hanson S G, Lading L 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 2040
- [8] Bankman I N 1999 *In Targets and Backgrounds: Characterization and Representation V* (Orlando, FL, USA: SPIE) p133
- [9] Yang X H, Chen Y Q, Cai P P, Lu J J, Wang R J 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 834 (in Chinese) [杨晓华, 陈扬骏, 蔡佩佩, 卢晶晶, 王荣军 1999 物理学报 **48** 834]
- [10] Mendel M J, Vantoi V, Riva C E, Petrig B L 1993 *J. Opt. Soc. Am. A Optics Image Science and Vision* **10** 1663
- [11] Hanson S G, Lading L 1996 *In Optical Velocimetry*, edited by Pluta M, Jabczynsk J K, Szyjer M (SPIE) p81
- [12] Briers J D 1996 *J. Opt. Soc. Am. A Optics Image Science and Vision* **13** 345
- [13] Arik E G 1991 *SPIE* **1584** 202
- [14] Pfister T, Günther P, Büttner L, Czarske J 2007 *In Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V* (SPIE) p66163S
- [15] Guo L X, Wang Y H, Wu Z S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 96 (in Chinese) [郭立新, 王运华, 吴振森 2005 物理学报 **54** 96]
- [16] Guo L X, Wang R, Wang Y H, Wu Z S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3464 (in Chinese) [郭立新, 王蕊, 王运华, 吴振森 2008 物理学报 **57** 3464]
- [17] Hu X J, Li R B, Shen H S, He X C, Deng W, Luo L X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2014 (in Chinese) [胡晓君, 李荣斌, 沈荷生, 何贤昶, 邓文, 罗里熊 2004 物理学报 **53** 2014]
- [18] Hao X P, Wang B Y, Yu R S, Wei L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6543 (in Chinese) [郝小鹏, 王宝义, 于润升, 魏龙 2007 物理学报 **56** 6543]
- [19] Ma H, Bu F G, Qiao H X, Tong D M, Fan X J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 206 (in Chinese) [马慧, 卜凡阁, 乔红霞, 仝殿民, 樊锡君 2008 物理学报 **57** 206]
- [20] Shi Y, Gao J Y 2000 *Chin. Phys.* **9** 436
- [21] Shi Y, Wu J H, Gao J Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 300
- [22] Xu W H, Gao J Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 2496
- [23] Wang Y H, Yang H J, Du Z J, Zhang T C, Wang J M 2006 *Chin. Phys.* **15** 138
- [24] Ma H, Tian S F, Tan X, Tong D M, Fan X J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2973
- [25] Ma H, Tan X, Tian S F, Tong D M, Fan X J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2400
- [26] Lu R J, Qin Y P, Zhang F W 2007 *Chin. Phys.* **16** 1806
- [27] Zhang Q, Yeo T, Tan H, Luo Y 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 291
- [28] Gong Y J, Wu Z S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6227 (in Chinese) [宫彦军, 吴振森 2009 物理学报 **58** 6227]
- [29] Li Y H, Wu Z S, Gong Y J 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **637** S149
- [30] Li Y, Wu Z, Gong Y 2010 *SPIE* **7850** 78501J
- [31] Li Y H, Wu Z S 2010 *Opt. Express* **18** 16788
- [32] Gong Y J, Wu Z S, Wu J J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 024213
- [33] Gong Y J, Wu Z S, Wang M J, Cao Y H 2010 *Opt. Lasers Eng.* **48** 107
- [34] Bankman I 2000 *J. Opt. Soc. Am. A* **17** 465

Analytical model of range-doppler of cone-cylinder combination*

Yu Wen-Ying^{1)2)†} An Li-Qian¹⁾

1) (*School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

2) (*School of Opto-Electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai 264005, China*)

(Received 9 March 2012; revised manuscript received 18 May 2012)

Abstract

The technique of laser range-Doppler image has been intimately noticed by aerospace and national defense circles. A analytical model of laser range-Doppler image of cone-cylinder combination is proposed in this paper. The analytical model includes the contribution of disk base. The analytical model can provide the effects of geometry parameters, the roughness of the surface, attitude, and pulse duration on laser range-Doppler image. This analytical model can reduce into the analytical model of range-Doppler image of cone and cylinder. This analytical model can reduce into the analytical model of Doppler spectra for plane waves. The influences of geometry parameters, and attitude are analyzed numerically by using the analytical model. The results indicate that the laser range-Doppler image of cone-cylinder combination can show the information about geometrical shape and attitude of target. Combining the theory and measurements, the analytical model can be used for indentifying physical parameters and geometrical parameters of cylinders, cones and cone-cylinder combination. This analytical solution is of significance for the laser Doppler velocimetry and ladar applications.

Keywords: Doppler, laser imaging, rough interface scattering, laser applications

PACS: 87.63.dk, 87.63.lt, 43.30.Hw, 42.62.-b

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974168), the Science and Technology Program of Hunan Province of China (Grant No. 2012FJ3052), and the Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (Grant No. 12A054).

† E-mail: yuwenyingyt@sohu.com