

## 多极化前向散射 RCS 分析及其对目标分类识别的影响

李晓良 胡程 曾涛

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

**摘要:** 在前向散射情况下, 基于阴影逆合成孔径雷达(SISAR)成像原理可以获得运动目标的轮廓像, 从而对运动目标进行分类与识别。为了研究多极化对前向散射雷达运动目标识别的影响, 该文根据前向散射阴影逆合成孔径原理, 建立了目标前向散射雷达截面积(RCS)与目标轮廓像谱信息之间的联系, 首次将多极化引入到前向散射目标的分类识别中; 并借助电磁仿真软件 CST, 仿真得到了多极化条件下目标的前向散射 RCS 曲线。通过分析仿真结果发现同一个目标在不同极化情况下具有不同的前向散射 RCS 旁瓣曲线, 此种差异对应于目标轮廓像的差异; 联合多极化产生的前向散射 RCS 旁瓣差异可以获得更多关于目标轮廓的特征信息。仿真结果验证了多极化能够提高前向散射目标分类识别的能力。

**关键词:** 阴影逆合成孔径雷达(SISAR); 目标识别; 多极化; 前向散射雷达截面积

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2191-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01233

## The Analysis of Multi-polarization Forward Scattering RCS and the Effect on Target Classification and Identification

Li Xiao-liang Hu Cheng Zeng Tao

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Forward Scattering Radar (FSR) can obtain moving target profile image with the technology of Shadow Inverse Synthetic Aperture Radar (SISAR), which can be used as target classification and identification. In order to research the effect of multi-polarization on moving target identification in FSR, the following work is carried out. Firstly, based on the theory of SISAR, the connection between forward scattering Radar Cross Section (RCS) and spectral information of profile image is established. Secondly, multi-polarization is firstly introduced to FSR target identification, and the target forward scattering RCS under multi-polarization conditions is obtained using the software of CST. Finally, by analyzing the simulation results, it is found that the same target has a different forward scattering RCS side-lobe under different polarization conditions. This difference corresponds to the difference of target profile image. The more information of target profile can be obtained using joint multi-polarization. The simulation results verify that multi-polarization can improve the ability of target classification and identification in FSR.

**Key words:** Shadow Inverse Synthetic Aperture Radar (SISAR); Target identification; Multi-polarization; Forward scattering radar cross section

### 1 引言

2000 年俄罗斯的 Chapurskiy 首次提出了阴影逆合成孔径理论(SISAR)<sup>[1]</sup>, 使得前向散射雷达的研究进入了一个新的阶段。SISAR 理论表明运动目标回波信号的频谱函数与目标近似轮廓函数的 1 维傅里叶变换存在一定的映射关系。目标的边缘轮廓函数不一样, 可以通过回波信号频谱函数的微小差异反映出来, 从而实现目标的识别。文献[1]给出了小

观测角度下 MiG-21, MiG-26 及 An-26 3 种不同形状飞机的前向散射雷达实验回波信号的频谱密度函数, 其频谱密度函数的形状各异, 与飞机的轮廓函数一一对应, 第 1 次实验验证了 SISAR 理论用于目标成像的正确性及目标识别的潜力。2003 年文献[2]提出利用 SISAR 理论对地面运动目标进行分类识别, 并以常规公路上的车辆作为实验目标, 通过大量的实验数据处理首次验证了非均匀环境中地面车辆检测与分类识别的可行性; 并获得了较好的分类识别概率, 表明了前向散射雷达在地面交通监视方面的应用潜力<sup>[3-6]</sup>。随后, 文献[7-11]针对地面运动目标模型考虑球面波、多径效应、观测角度非线性

2009-09-18 收到, 2009-12-29 改回

国家自然科学基金重大项目(60890073, 60890071-17)资助课题

通信作者: 胡程 cchchb@gmail.com

变化及高阶相位等因素的影响,建立了精确的地面运动目标信号表示方法;并在最大似然理论框架下提出了稳健的多参数联合提取算法,获得了高精度的目标速度估计和穿越基线位置估计,为高精度的地面运动目标识别奠定了基础。

上述方法都是在单极化条件下开展的,对一些形状类似的目标存在一定的误分类和识别概率;而极化对目标的形状信息较为敏感,充分利用不同极化对目标的散射信息的影响应该可以较好地改善目标分类识别概率;但是目前对多极化条件下前向散射雷达目标分类识别的研究尚属空白。随着雷达极化理论体系不断完善及极化测量技术的成熟,极化用于雷达目标识别已成为新一代智能雷达系统研究领域中的一个热点。本文首先介绍了 SISAR 基本原理和运动目标的分类识别方法;然后建立了目标前向散射 RCS 与目标轮廓像谱信息之间的联系,借助电磁仿真软件 CST,在多种极化条件下仿真目标 RCS,仿真结果验证了多极化对前向散射雷达目标分类识别的可行性,并且发现对于交通监视感兴趣的地面运动目标,垂直极化比水平极化更有利于前向散射情况下的目标分类识别,若结合垂直极化和水平极化的前向散射 RCS 信息,可以进一步提高对运动目标的分类识别概率。

本文结构安排如下:第 2 节分析了前向散射 SISAR 的基本原理;第 3 节介绍了基于 SISAR 的运动目标分类识别方法;第 4 节给出了小衍射角情况下运动目标全息信号的功率谱和目标 RCS 之间的关系,并利用 CST 软件对多极化前向散射 RCS 进行了计算,给出了相应的计算结果;最后给出了全文的结论。

## 2 阴影逆合成孔径雷达(SISAR)成像原理

图 1 是运动目标的几何结构图。发射机置于坐标系  $(x, y, z)$  的原点  $O$ ,接收机在  $y$  轴  $B(0, L, 0)$  处。坐标系  $(x', y', z')$  与坐标系  $(x, y, z)$  各轴相互平行,原点  $(x_p, y_p, z_p)$  为目标中心。目标以速度  $v$ , 平行于  $xy$  平面和  $y$  轴成  $\phi$  角运动。发射机到目标穿越基线位置的距离记为  $d_T$ ,接收机到目标穿越基线位置的距离记为  $d_R$ 。前向散射雷达基线长度  $L = d_T + d_R$ 。 $R_t$  和  $R_r$  分别为目标中心到发射机和接收机对应的斜距。

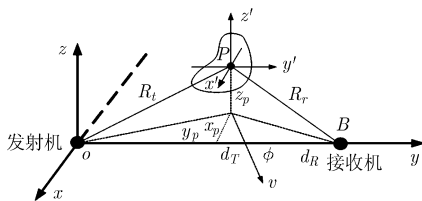


图 1 运动目标几何结构图

假设在观测时间内  $y_p \approx d_T$ , 运动目标的全息信号可以表示为<sup>[1,11,12]</sup>

$$S_o(t) = \dot{Q} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{H}(x') \exp \left[ j \frac{\gamma}{2} \left( \frac{x'}{v} + t \right)^2 \right] dx' \quad (1)$$

其中

$$\dot{Q} = \frac{\sin(\phi)}{j\lambda R_t R_r} \exp \left( j 2\pi \frac{L}{\lambda} + j\Omega^2 z_p^2 \right) \quad (2)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{y_p} + \frac{1}{L - y_p} \right)} = \frac{\sqrt{\pi}}{r_F} \quad (3)$$

$$\gamma = 2\Omega^2 v^2 \sin^2(\phi) \quad (4)$$

式(2)表示了目标与雷达相对几何关系对全息信号的影响。式(3)中  $\lambda$  为发射信号波长,  $\Omega$  反比于菲涅尔区的半径  $r_F$ 。 $\gamma$  为目标几何中心  $(x_p, y_p, z_p)$  的多普勒频率变化率。 $\dot{H}(x')$  为目标复剖面函数,可表示如下:

$$\dot{H}(x') = \int_{m(x')-h(x')/2}^{m(x')+h(x')/2} \exp(j\Omega^2 z'^2) \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_v z' \right) dz' \quad (5)$$

$$\alpha_v = \frac{z_p L}{y_p (L - y_p)} \quad (6)$$

其中  $h(x')$  为目标上边界与下边界的高度差函数,  $m(x')$  为目标的中线函数。当  $\Omega h \ll 1$  时,可以忽略式(5)中的二次相位。对于地面运动目标可近似认为  $\alpha_v = 0$ , 此时  $|\dot{H}(x')| = h(x')$ 。对运动目标的全息信号式(1)进行傅里叶变换可得<sup>[1]</sup>

$$|\dot{G}_S(\omega)|^2 = \frac{2\pi}{\gamma} |\dot{Q}|^2 \left| \dot{G}_H \left( -\frac{\omega}{v} \right) \right|^2 \quad (7)$$

其中  $|\dot{G}_S(\omega)|^2$  是全息信号的功率谱函数,  $\dot{G}_H(x)$  是复剖面函数  $\dot{H}(x')$  的傅里叶变换。由式(7)可知,运动目标全息信号的功率谱函数与目标近似轮廓函数的 1 维傅里叶变换存在一一对应的映射关系。不同的目标边缘轮廓函数,对应着不同的全息信号功率谱。

为验证这一结论,文献[13]分别对 4 种不同的车辆进行了室外实验。实验结果表明不同形状的运动目标具有不同的功率谱曲线,特定轮廓的运动目标具有特定的功率谱曲线,通过运动目标的功率谱曲线可以进行目标的分类识别。另外,在文献[2]中通过大量实验证明,仅利用功率谱曲线的旁瓣特征进行目标识别的正确性比包含主瓣时高。通过分析运动目标前向散射功率谱曲线旁瓣的差异,提取特征矢量进行运动目标的识别是一种更为有效的运动目标识别方法。

## 3 基于 SISAR 的运动目标识别方法

雷达目标识别的方法主要分为两大类:第 1 类是基于特征矢量的目标识别方法。第 2 类是基于成像的目标识别方法。本文介绍方法属于第 1 类,其

基本原理是:利用雷达回波功率谱函数作为目标特征矢量,提取各类目标特征矢量之间的差异性进行目标分类。系统框图如图 2 所示,主要分为训练和测试两部分。训练部分主要任务是由已知目标的特征矢量建立类模型数据库,可采用如下方法实现:

(1)首先将已知目标的前向散射波信号经 FFT 变换到频域。(2)然后将频域信号输入预处理器,在预处理器部分完成目标运动速度归一化和谱线长度自动截取等处理。(3)将预处理器输出的信号进行主分量分析(PCA),在保留原有特征信息的前提下,降低特征矢量维数,将高维空间的问题转化到低维空间去处理。(4)最后用所提取的已知目标的特征矢量建立类模型数据库。测试部分的主要任务是提取未知目标的特征矢量与数据库中的类模型进行比较,依据各种决策规则判决未知目标的类型。决策规则可使用:基于距离的最邻近和  $K$  最邻近法分类器、基于概率密度函数的 Bayes 分类器或神经网络分类器等。

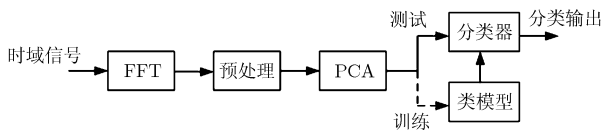


图 2 运动目标识别系统框图

文献[13]利用 917 个汽车接收信号按照上述目标识别方法,采用  $K$  最邻近法分类器( $K=4$ )进行分类实验。其中 300 个信号用作训练数据,617 个用于实验测试,目的是将汽车分为小型、中型和大型 3 类。分类结果显示,小型、中型和大型 3 类汽车分类的正确率分别为 61.8%, 76.5%和 63.3%;小型车和大型车之间的误判率小于 7%;小型车误判为中型车的概率为 35.3%;大型车误判为中型车得概率为 30%。实验结果表明,采用上述方法可以获得较好的分类结果,但对于相邻类型目标的分类、识别误差较大。为了进一步提高目标分类和识别的可靠性,本文进行了多极化条件下前向散射雷达运动目标识别的研究。

#### 4 多极化前向散射雷达运动目标 RCS

在前向散射区域,目标全息信号的功率谱函数与目标的 RCS 有一一对应的映射关系,通过目标的 RCS 可以求得全息信号的功率谱。因此,通过对比分析目标在不同极化情况下的 RCS 曲线,可以了解不同极化条件下目标全息信号功率谱的差异,进而可以得到多极化对前向散射雷达运动目标识别的影响。

#### 4.1 前向散射区域目标 RCS 与全息信号功率谱函数的关系

在远场小衍射角区域,目标的 RCS 可以表示为<sup>[14]</sup>

$$\sigma(\alpha_v, \alpha_h) = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \iint_{A_{SH}} \exp[j(2\pi/\lambda)(\alpha_v z' + \alpha_h x')] dz' dx' \right|^2 \quad (8)$$

其中  $\alpha_v, \alpha_h$  分别代表衍射角垂直和水平分量。根据式(5),式(7)和式(8),可以推导得到运动目标全息信号  $S_o(t)$  的功率谱函数  $|\dot{G}_S(\omega)|^2$  与目标前向散射 RCS 存在如下对应关系(详细推导过程略):

$$|\dot{G}_S(\omega)|^2 \approx \lambda^2 |\dot{Q}|^2 \sigma\left(\alpha_v, \frac{\omega}{kv}\right) / (2\gamma) \quad (9)$$

由式(9)可知,当利用 SISAR 方法计算功率谱时,可以用计算目标 RCS 的方法计算,然后按照  $\alpha_h \rightarrow \omega/(kv)$  的映射关系变换得到运动目标全息信号的功率谱,因此全息信号功率谱的差异就体现在目标 RCS 信息的差异上。利用目标处于前向散射区域信号的功率谱对目标进行分类识别可以等效于用目标处于前向散射区域的 RCS 信息差异来进行目标分类识别。

#### 4.2 多极化与全息信号功率谱函数的关系

由于目标 RCS 是受入射场和接收天线极化形式影响的。因此,根据全息信号功率谱函数和目标前向散射 RCS 之间的对应关系可知,全息信号也受入射场和接收天线极化形式的影响。

RCS 与 Sinclair 散射矩阵元素之间的关系为

$$\sigma_{ij}\left(\alpha_v, \frac{\omega}{kv}\right) = \left| S_{ij}\left(\alpha_v, \frac{\omega}{kv}\right) \right|^2 \quad (10)$$

其中下标  $i, j$  表示一组任意正交极化基。因此,不同极化条件下全息信号的功率谱函数可以表示为

$$|\dot{G}_S(\omega)|^2 \approx \lambda^2 |\dot{Q}|^2 \left| S_{ij}\left(\alpha_v, \frac{\omega}{kv}\right) \right|^2 / (2\gamma) \quad (11)$$

根据式(11),我们认为在不同极化条件下,全息信号的功率谱将会有差异。因此,在基于特征矢量的分类识别方法中,不同极化的引入和融合能够增强对目标的分类识别能力。

#### 4.3 多极化条件下典型地面目标的 RCS 仿真

本文将借助 3D 电磁仿真软件 CST,仿真多极化条件下目标的 RCS 曲线,研究多极化对前向散射雷达运动目标识别的影响。CST 仿真目标 RCS 的基本步骤如下:(1)把目标建模为具有给定形状、尺寸和材料的实心物体,入射功率源建模为具有特定频率和极化的平面波或球面波。(2)利用理想边界拟

合技术和薄片技术对模型进行网格划分,采用时域有限积分法计算模型 RCS。(3)产生 RCS 散射图。

鉴于地面运动目标识别和车辆交通监视的应用需求,下面将对货车、3 厢小车和卡车 3 种典型地面目标的 RCS 进行仿真。根据上述仿真步骤,首先对 3 种车型进行建模,建模结果如图 3 所示。“车 1”,“车 2”,“车 3”分别代表货车、3 厢小车、卡车 3 种不同类型的汽车,3 个模型长、宽、高的最大尺寸分别为 4 m, 2 m 和 1.6 m;图中箭头代表沿  $z$  轴方向传播的频率为 869 MHz 的平面波。

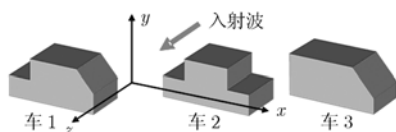


图 3 3 种不同的汽车模型

由于任意极化形式的电磁波均可由水平极化波和垂直极化波表示,因此,本文仅对水平极化波和垂直极化波主极化场的 RCS 进行仿真分析。车 1 模型在水平极化和垂直极化时 RCS 的 3D 仿真结果分别如图 4(a)和 4(b)所示,其中  $\theta$  是直角坐标系中的方位角,当  $\theta = 0^\circ$  时,双基地角  $\beta = 180^\circ$ ;  $\varphi$  为俯仰角。

由图 4(a)和 4(b)可知,在不同极化条件下,同一个目标的前向散射 RCS 最大值和主瓣宽度几乎相同,因此这两个参数不能直接用于目标的分类识别。但是,我们可以明显的看出不同极化条件下目标前向散射 RCS 的旁瓣是不同的,对目标的形状非常敏感,这种由多极化信息带来的目标 RCS 旁瓣差异可以用于对目标的分类识别。

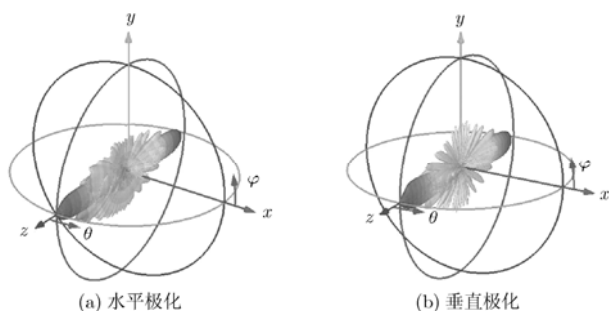


图 4 车 1 模型在极化时 RCS 的 3D 仿真结果

为了更清楚地显示不同极化条件下目标前向散射 RCS 旁瓣的差异,本文对 3 种模型的前向散射 RCS 截取水平切片图,如图 5 所示。

图 5(a), 5(b)和 5(c)分别是车 1, 车 2, 车 3 在水平极化(HH)和垂直极化(VV)条件下归一化

的 RCS 散射图的水平切片。从以上 3 幅图中清楚的看到:车 1 在水平极化和垂直极化条件下 RCS 曲线的旁瓣有明显的差异;同样车 2 和车 3 在两种不同极化条件下的 RCS 曲线的旁瓣也有明显的不同。由式(9)可知,目标全息信号功率谱函数的差异就体现在目标 RCS 信息的差异上,因此,由 3 种模型 RCS 曲线的旁瓣在两种极化条件下的差异,可以得到两种极化条件下模型全息信号功率谱曲线的旁瓣差异,利用这个差异依据第 3 节所述的目标分类识别方法就可以实现目标的分类与识别。

图 6(a)是水平极化条件下车 1, 车 2, 车 3 在  $xz$  平面上的归一化的 RCS 曲线,图 6(b)是水平极化条件下车 1, 车 2, 车 3 在  $xz$  平面上的归一化的全息信号功率谱曲线,图 6(c)是垂直极化条件下车 1, 车 2, 车 3 在  $xz$  平面上的归一化的 RCS 曲线,图 6(d)是垂直极化条件下车 1, 车 2, 车 3 在  $xz$  平面上的归一化的全息信号功率谱曲线。其中,图 6(b)和图 6(d)是由 CST 仿真得到的 RCS 数据,根据式(9),在入射波频率为 869 MHz,车速为 10 m/s 的情况下换算得到的。通过对比图 6(a), 6(c)和图 6(b), 6(d)可以发现,目标全息信号功率谱的差异就体现在目标 RCS 信息的差异上。利用目标处于前向散射区域信号的功率谱函数对目标进行分类识别可以等效于用目标处于前向散射区域的 RCS 信息差异来进行目标分类识别,实验结果与理论分析一致。

进一步分析仿真结果,可以看到:车 1, 车 2, 车 3 3 种模型在水平极化下 RCS 旁瓣的差异和在垂直极化下 RCS 旁瓣的差异是不同的。图 6(a)中在水平极化条件下车 1 和车 2 的 RCS 旁瓣信息非常接近,因此车 1 和车 2 进行分类识别时其发生误识别的概率就会明显增加;但是在图 6(c)中,垂直极化条件下车 1 和车 2 RCS 的旁瓣信息具有较大的差别,可以很好地对目标进行分类与识别;而车 3 无论是在水平极化还是在垂直极化下, RCS 旁瓣信息都与车 1 和车 2 有较大的差异,可以很好地与车 1 和车 2 进行分类识别。因此如果联合水平极化和垂直极化对车 1 和车 2 前向散射 RCS 旁瓣信息的差异,利用图 2 中的分类识别方法,则可以大大的提高对目标的分类识别概率。由图 3 也可知,对于地面运动的目标类型,大部分情况其水平方向的尺寸要比垂直方向的尺寸大一倍以上,因此水平方向目标形状的相对变化较垂直方向的相对变化要小,目标 RCS 信息在水平极化下的差异比在垂直极化条件下的差异要小;所以对于进行交通监视的地面运动目标类型,垂直极化条件更容易发现不同目标的差异,更有利于对这类目标进行分类识别。

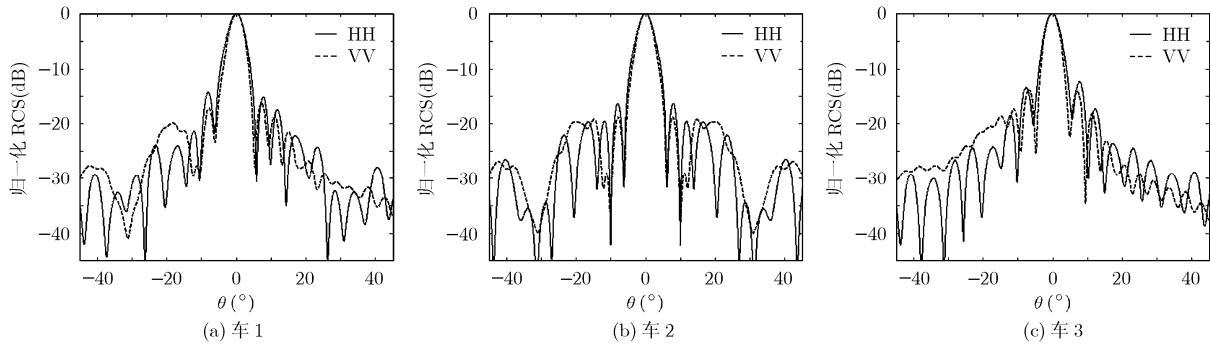


图5 RCS 水平面切片图

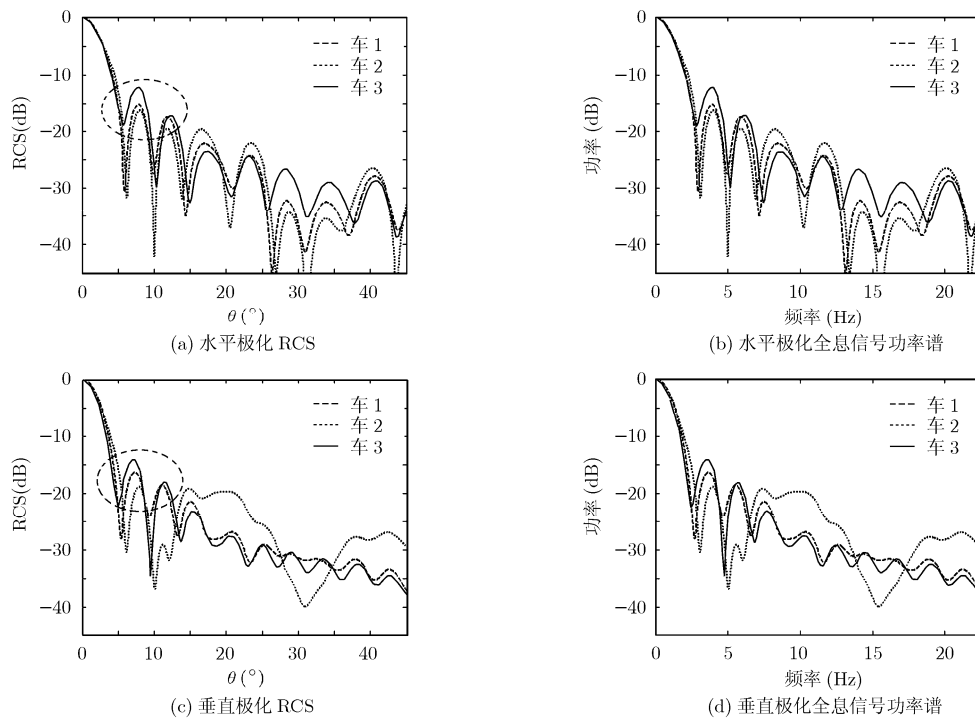


图6 极化条件下归一化的 RCS 曲线和全息信号功率谱曲线

## 5 结束语

本文借助电磁仿真软件 CST 首次仿真了 3 种不同的车辆模型在不同极化条件下的前向散射 RCS。通过对比不同极化条件下同一个目标的前向散射 RCS 曲线旁瓣,发现同一个目标在不同极化情况下具有不同的前向散射 RCS 曲线;并且在垂直极化和水平极化下 3 种模型前向散射 RCS 曲线的旁瓣差异较大。分析得到对于交通监视的地面运动目标,垂直极化较水平极化更容易进行目标的分类与识别;并且联合水平极化和垂直极化的前向散射 RCS 旁瓣差异信息可以进一步提高对目标的分类识别概率,仿真得到的 RCS 散射图也验证了上述结论的正确性。综合以上分析可以得出结论,在多极化条件下,利用目标的前向散射 RCS 曲线的旁瓣差异可以获得更多关于目标轮廓的特征信息,增加前向散射雷达运动目标识别的可靠性。

## 参考文献

- [1] Chapurskiy V V and Sablin V N. SISAR: Shadow Inverse Synthetic Aperture Radiolocation. The Record of the IEEE 2000 International Radar Conference, Alexandria, Virginia, 2000: 322-328.
- [2] Abdullah R S A R and Cherniakov M. Forward scattering radar for vehicles classification. Vehcom Int'l Conf., VehCom2003, Birmingham, UK, 2003: 73-78.
- [3] Cherniakov M, Abdullah R S A R, and Jancovic P, *et al.* Automatic ground target classification using forward scattering radar. *IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(5): 427-437.
- [4] Cherniakov M, Abdullah R S A R, and Jancovic P, *et al.* Forward scattering micro sensor for vehicle classification.

- IEEE International Radar Conference, Arlington, Virginia, 2005: 184-189.
- [5] Cherniakov M, Salous M, and Abdullah R S A R, *et al.* Forward scattering radar for ground targets detection and recognition. 2nd EMRS DTC Technical Conference, Edinburgh, 2005: A14-A19.
- [6] Sizov V, Hu Cheng, and Antoniou M, *et al.* Vegetation clutter spectral properties in vhf/uhf bistatic doppler radar. IEEE Radar Conf 2008. Rome Italy, 2008: 1466-1471.
- [7] Zeng Hai-bin, Hu Cheng, and Li Tao. The signal to noise ratio analysis of ground forward scattering radar. IET Radar Conf 2009, Guilin, 2009: 1-4.
- [8] Long Teng, Hu Cheng, and Cherniakov M. Ground moving target signal model and power calculation in forward scattering micro radar. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(9): doi: 10.1007/s11432-009-0154-1.
- [9] Hu Cheng, Antoniou M, and Cherniakov M, *et al.* Quasi-optimal signal processing in ground forward scattering radar. IEEE Radar Conf 2008. Rome Italy, 2008: 2044-2049.
- [10] Hu Cheng, Long Teng, and Cherniakov M, *et al.* Forward scattering micro radars for situation awareness. APSAR Conference, Xi'an China, Oct. 26-29, 2009.
- [11] 胡程. 短基线前向散射雷达系统理论与信号处理方法研究. [博士论文], 北京理工大学, 2009.
- Hu Cheng. Research on system theory and signal processing method in short baseline forward scattering radar. [Ph.D. dissertation], Beijing Institute of Technology, 2009.
- [12] 罗斌凤, 张冠杰, 张守宏. SISAR中运动目标全息信号的表示及仿真研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1316-1320.
- Luo Bin-feng, Zhang Guan-jie, and Zhang Shou-hong. The expression and simulation of radio holographic signal for the moving object in SISAR [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(10): 1316-1320.
- [13] Abdullah R S A R. Forward scattering radar for vehicle classification. [Ph.D. dissertation]. The University of Birmingham, 2005.
- [14] Glaser J I. Bistatic RCS of complex objects near forward scatter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, AES-21(1): 70-78.
- 李晓良: 女, 1979年生, 博士生, 从事雷达成像、目标识别等方面的研究工作.
- 胡程: 男, 1981年生, 讲师, 从事单/双基地SAR系统与信号处理、前向散射雷达系统等方面的研究.
- 曾涛: 男, 1971年生, 研究员, 从事雷达系统、雷达信号处理等方面的研究.