

用于交通监测的机动车轮毂散射特性*

顾月 官伯然

(杭州电子科技大学 天线与微波技术研究所,杭州 310018)

摘要: 提出了一种利用机动车轮毂正交极化散射实现交通流量监测方案,研究分析了机动车轮毂极化电磁散射特性,得出了优化参数。通过建立汽车和轮毂模型,仿真得到主模谐振频率为 255 MHz,比较了入射波激励为线极化平面波时,汽车和轮毂主极化、正交极化雷达散射截面(RCS)的大小,并得到了单个轮毂正交极化雷达散射截面达到最大值时的入射角。仿真比较了入射波极化角度改变时,RCS的空间分布特点。分析表明:轮毂目标 VH 极化散射最显著;将雷达天线放置于与机动车轮毂中心相对地面同等高度处,可有效减小机动车框架对轮毂散射场的影响,研究结果对于构建经济有效的机动车交通管制系统具有实际意义。

关键词: 雷达散射截面,主极化,正交极化,轮毂

The Scattering Characteristic of Vehicle Wheel Hub for the Traffic Monitoring

GU Yue, GUAN Bo-ran

(Institute of Antenna and Microwave Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A traffic flow monitoring method is proposed by using the orthogonal polarization scattering of motor vehicle hub. The electromagnetic scattering characteristics of motor vehicle hub which can be used for urban traffic flow monitoring are studied and analyzed. The optimized parameters are obtained by the practical application. By establishing the model of the automobile and the hub, the resonance frequency of the main mode is 255 MHz. The comparison of the radar polarization cross section (RCS) of the main and orthogonal polarizations of the automobile and the hub when the orthogonal polarization incident wave is excited as an ordinary plane wave and a single result is obtained. The angle of incidence at which the hub radar cross section reaches its maximum is obtained. The spatial distribution characteristics of RCS are simulated when the polarization angle changes. The analysis shows that the VH polarization scattering of the hub target is the most significant; positioning the radar antenna at the same height as the center of the hub of the motor vehicle wheel can effectively reduce the impact of the vehicle frame on the wheel's scattering field. The research results are useful for constructing an economically efficient machine. The train control system has practical significance.

Key words: radar cross section, main polarization, orthogonal polarization, vehicle wheel hub

引言

对城市道路及主要干道进行有效的机动车交通流量监测,是现代公共交通管制的重要命题。目前,国内外在这一领域采取的方案主要基于埋地线圈传感、视频监控、GPS 及 RFID 应答、雷达监测及红外监测等技术^[1]。埋地线圈监测方法利用高频感应将有车辆通过转化为电信号的变化量,该方法普及度高,但线圈铺设会对路面结构形成损伤,且因气

候变化和频繁碾压使其故障率较高;视频监控通过对拍摄到的交通画面进行图像处理来实现车辆的识别、分类、计数,具有实时性和灵活性的优点,但是容易受到雨雪云雾和照度的影响,无法实现全天候保障;红外线监测依靠红外线传感器来实现目标识别,该方法便于安装,但易受外界环境温度影响而失灵;基于 GPS 及 RFID 应答技术的机动车流量监测,是现代信息技术在交通监测中的综合应用,但它需要机动车的配合和保障,这在管理覆盖和特种车辆的

* 收稿日期:2017-07-20;修回日期:2017-10-25

交通监测等方面存在一定难度;基于车体电磁反射的雷达监测,是雷达技术在交通监测应用的自然延伸,但其对于多车道密集车流的处理存在先天不足;基于轮毂微动多普勒的雷达技术具有相对全面的优势^[2],但其对静止和缓速行驶车辆无效,因而难以大面积推广。

雷达经过几十年的发展,在各行业均得到广泛应用,不断提高雷达对各类目标识别能力,一直受到人们的关注。与此同时,出于各种应用目的,有效减小目标对雷达信号的散射亦有长足进展。例如,文献[3]提出在方舱车轮外侧安装挡板来缩减雷达散射截面或多普勒散射从而达到车体隐身的目的。据此亦可看出,微动多普勒技术对于这类机动车的监测将失效。

本文在综合分析的基础上认为,机动车轮毂的正交极化散射特性可用于实现机动车流量监测,并通过仿真分析获得验证。该方案的优势在于,它无需在机动车辆上加装设备或在路面及周边安装固定设施,同时具有部署灵活,可靠性高和适应全天候等特点,可成为机动车流量监测的有效补充手段。显而易见,轮毂是机动车辆的重要特征之一,机动车各部分均对特定雷达照射产生具有一定特征的散射,利用合理设计的雷达收发系统,能够从机动车雷达散射信号中提取到轮毂突出散射信号,并用之于车辆计数、定位、行驶参数提取,以实现道路对机动车辆的监测。

基于上述分析,本文利用三维电磁仿真平台FEKO建立机动车和轮毂模型,研究了机动车轮毂的主极化和正交极化散射特性的频率分布和空间分布。仿真表明,机动车轮毂的正交极化散射特性显著,能够用于对机动车辆进行有效监测。将该技术与其它技术和设施集成,对于实现有效完整的城市交通监测和管制系统具有重要的实际意义。

1 雷达目标散射特性和频率特性

1.1 雷达目标的极化散射特性

物体在电磁波照射下的散射性能,以雷达散射截面 σ 来表示。

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (1)$$

雷达散射截面的大小与目标的大小、形状、材料、表面结构以及入射场的波长、角度和极化方向等参数相关。

一般情况下,目标在入射波任意方位角的情况

下,对不同的极化波散射是不相同的,且对于大部分目标,散射场会出现不同于入射场的极化分量,这种现象被称为退极化或者正交极化。所以,当目标受特定极化状态的入射波照射时,其散射场不仅依赖于入射波的强度、极化状态,还和目标的极化特性相关。作为对入射波和目标之间相互作用的一般性描述,通常采用极化散射矩阵表示

$$\begin{pmatrix} E_1^s \\ E_2^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^i \\ E_2^i \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:下标“1”和“2”表示一组正交的极化分量,根据选择坐标系不同,散射矩阵可以由不同的形式,如“H”和“V”(水平极化和垂直极化)来替代。上标“i”和“s”分别表示入射场和散射场。

公式表明,如果极化散射矩阵中正交项 S_{12} 或 S_{21} 不为零,即使入射波仅为单一极化,散射波亦可包含与入射波正交的极化分量。

如考虑一个沿天线辐射方向传播的线极化平面波照射到目标上,由于任意方向的线极化都可以分解成为两个正交的分量,如垂直极化和水平极化分量,则目标的散射场将由两部分组成。而在极化散射正交项不为零的情况下,即使在只有垂直照射场的作用下,目标的散射场也会包含垂直和水平极化两部分。显然,这4种散射分量中水平散射场可被水平极化天线接收,垂直极化可被垂直极化天线接收。所以可以根据散射矩阵中各系数的意义定义 σ_{HV} 为垂直极化照射时正交极化(水平极化)的雷达截面,即正交项雷达截面^[4-5]

$$\begin{cases} \sigma_{HH} = 4\pi R^2 \frac{|E_H^s|^2}{|E_H^i|^2} = 4\pi R^2 \alpha_{HH}^2 \\ \sigma_{HV} = 4\pi R^2 \frac{|E_V^s|^2}{|E_H^i|^2} = 4\pi R^2 \alpha_{HV}^2 \\ \sigma_{VH} = 4\pi R^2 \frac{|E_H^s|^2}{|E_V^i|^2} = 4\pi R^2 \alpha_{VH}^2 \\ \sigma_{VV} = 4\pi R^2 \frac{|E_V^s|^2}{|E_V^i|^2} = 4\pi R^2 \alpha_{VV}^2 \end{cases} \quad (3)$$

1.2 雷达目标本征频率分析

由经典雷达理论可知,圆环形结构轮毂在雷达发射波波长在轮毂物理尺寸附近时处于谐振状态,轮毂上的感应电流将达到最大,该电流产生的再辐射场也同时最大。根据式(1)振子的雷达散射截面也将在谐振峰点附近达到最大值。因此在轮毂尺寸固定的情况下,确定其本征频率对利用雷达散射特性实现的车流量监测系统而言至关重要。为此,搜

集了不同类型的非机动车和机动车的轮毂尺寸,并从理论上分析了对应的本征频率范围如表1所示。

表1 不同类型车辆轮毂尺寸及其本征频率范围

车型	轮毂尺寸/in	本征频率范围 /MHz
自行车	12,14,16,18,20,22,24,26,28	134 ~ 313
电动车	14,15,16,17,18,19,20,21,22,24	156 ~ 268
摩托车	14,15,16,17,18,19,20,21,22,23	163 ~ 268
汽车	12,13,14,15,16,17,18,19,20, 21,22,23,24	156 ~ 313
大货车	12,13,14,15,16,17,19,20,22,24	156 ~ 313

注:1 in=25.4 mm

2 仿真分析

本文以汽车为例,首先在100~500 MHz范围内对轮毂的散射特性进行频率扫描,确定最佳入射频率即为本征频率,再在本征频率入射场下通过对比汽车模型和轮毂模型主极化散射分量和正交极化散射分量得出其极化散射特性,通过比较确定轮毂正交极化最显著时的入射场角度和极化角度。

2.1 模型建立

为定量分析轮毂与汽车的雷达散射截面的关系,把汽车模型导入电磁仿真软件FEKO与轮毂进行对比分析。汽车模型如图1所示,其具体尺寸为4223 mm×1873 mm×1865 mm,与普通小型机动车大小接近。轮毂模型如图2所示,轮毂直径取16 in。

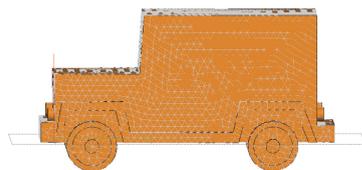


图1 汽车网格剖分模型

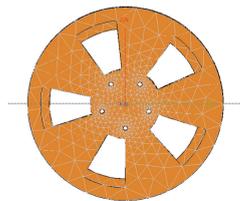


图2 轮毂网格剖分模型

在电磁计算方法上,综合考虑时间和精度两个因素,对汽车和轮毂模型一致采用矩量法(MOM)进行计算。入射场方位角如图3所示。其中: k 为入射场的波矢量; φ 为波束入射角; θ 为波束俯仰角; η 为波束极化角度^[6]。需要依据轮毂的结构确定电磁波的入射角度和极化角度,以获得最大的感应电流从而捕捉到目标的雷达散射特性。这是由于,在

正面照射轮毂情况下,轮毂左右两侧激励出感应电流所产生的正交极化散射场会因大小相同,相位相反而抵消;与此同时,由于车体和地面的存在,不同极化方式和入射角度的电磁波在轮毂上下两侧激励出感应电流所产生的正交极化散射场亦不相同。

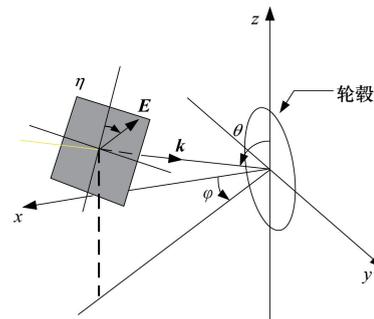


图3 仿真方位角示意图

2.2 轮毂散射特性和本征频率分析

由图4的感应电流矢量分布图可得,当环形振子的一侧受入射场电磁波照射产生感应电流时,由于导体上电流分布具有连续性,轮毂将激励起环形电流,并将在与该方向存在夹角的地方产生与来波极化方向互异的再生辐射场,又因为任意方向的线极化电磁波均可分解成为两个正交的分量,因此再生辐射场存在与入射场正交的极化散射分量。

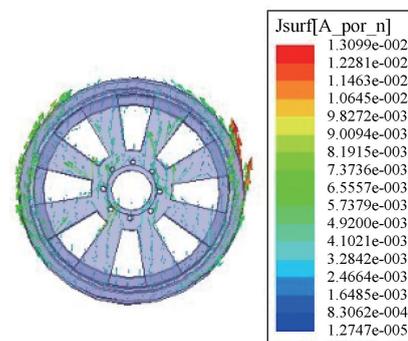


图4 轮毂的表面感应电流分布

当对轮毂的散射特性在100~500 MHz范围内进行频率扫描时,得到轮毂的主极化和正交极化RCS,由图5可知,在255 MHz频点处主极化和正交

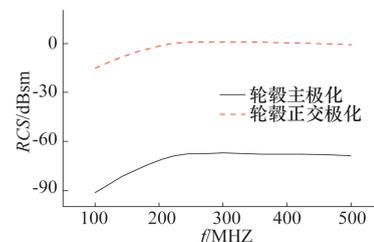


图5 轮毂的RCS极化分量对比

极化分量均达到最大值,这是由于在该频点附近轮毂发生了谐振,此时轮毂物理尺寸约为 1.08λ ,该结果与经典雷达理论一致,同时验证了表1中关于轮毂本征频率分析的正确性。

2.3 汽车和轮毂雷达散射特性分析

雷达目标的回波极化信息与其自身存在本质上的联系,极化散射矩阵表征4种极化排列(即HH、HV、VH、VV)的一维纵向像。仅仅考虑某一种排列方式,只是利用了目标的一个通道中的极化散射特征。因此,可以同时使用主极化和正交极化分量作为特征,实现不同目标的识别^[7]。

入射波在照射轮毂时具备3个物理特征,即波束入射角 φ ,波束俯仰角 θ 和波束极化角度 η 。

图6所示为当入射波方位角取某一固定值时,目标对俯仰角扫描产生的雷达散射截面空间分布。当 $\varphi=90^\circ$ 时,入射波沿轮毂一侧入射,此时轮毂环形特性失去作用只在一侧激励出再生电磁场,正交极化散射分量微弱。随着 φ 减小,入射波和轮毂正面形成一定夹角,此时由于波程差的存在轮毂两侧激励出的再生辐射场中的交叉极化分量相互叠加,散射特性逐渐凸显。当 $\varphi=0^\circ$,正交极化散射分量值达到最大。

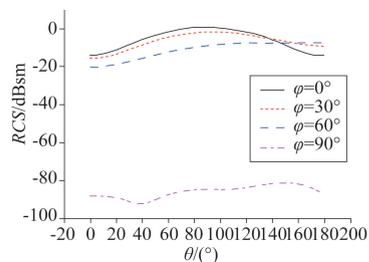


图6 不同方位角入射波正交极化散射 RCS 空间分布

图7所示为当入射波俯仰角取某一固定值时,目标对方位角扫描产生的雷达散射截面空间分布。当 $\theta=0^\circ$ 时,入射场和地平面之间的夹角为 90° ,此时可以将地面视为镜像平面,轮毂受人射波激励产生的电磁场等效于原来的电场加上由它的镜像产生的电场。这导致正交极化散射分量被抵消,同理 $\theta=30^\circ$ 和 60° 时,正交极化散射分量均有一部分与镜像电场抵消,而削弱轮毂的正交极化散射特性。 $\theta=90^\circ$,入射场和地平面夹角为 0° ,原生电场和镜像电场叠加使得正交极化散射加强。

由图8(a)和(b)可以看出,受255 MHz入射电磁波照射时,汽车4种极化排列产生的雷达散射截面数值小,波动性强。而此时轮毂的正交极化散射特性显著,数值上较汽车增强了30 dB,且轮毂的

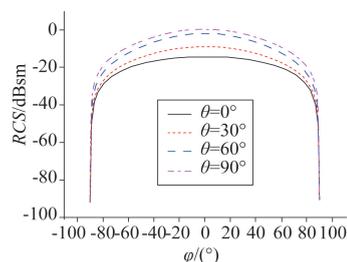
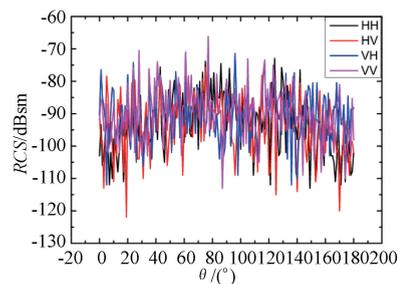
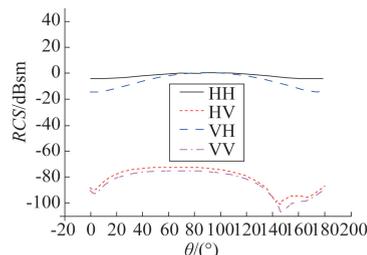


图7 不同俯仰角入射波正交极化散射 RCS 空间分布

VH 散射特性随着入射角的变化呈先增大后减少趋势,在 $\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$ 方向 RCS 值最大,具有良好的角度选择特性。



(a) 汽车全极化 RCS 空间分布



(b) 轮毂全极化 RCS 空间分布

图8 255 MHz 时汽车和轮毂全极化 RCS 空间分布对比

为了进一步验证轮毂的极化散射特性,分别对极化角度为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 的入射波下轮毂正交极化散射特性空间分布进行了仿真。由图9可知,极化角度为 0° 时,轮毂正交极化分量即VH排列下的一维纵向最强;极化角度为 90° 时即HV排列下的一维纵向最弱。试验结果表明入射波以垂直极化入射时,轮毂的雷达散射特性最显著,此时最有利于实现目标探测和识别的目的。

结合以上对于机动车轮毂电磁散射特性的分析结果,提出了实际应用方案。基于机动车轮毂正交极化散射特性构建的车辆监测系统如图10所示。当被测机动车驶入可探测的区域范围内,收发系统中的发射天线发射频率为255 MHz,极化方式为垂直极化的宽波束入射电磁波,该入射波在机动车轮毂上激励出再生正交辐射场,该信号反射回来,并被收发系统中的窄波束水平极化天线接收,经信号处

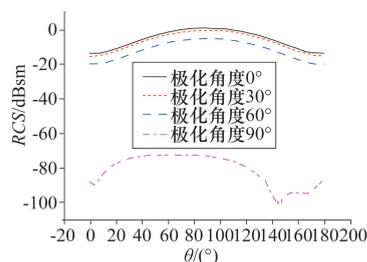


图9 不同极化角度时轮毂正交极化 RCS 空间分布对比

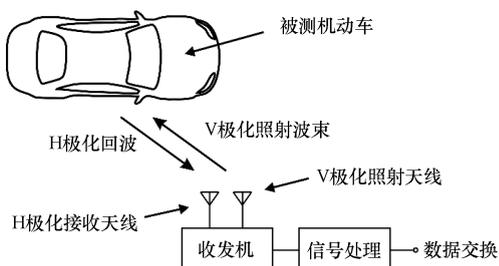


图10 车辆监测系统整体框图

理流程,可得到同一机动车包含的轮毂个数,由此可以确定机动车对应类型,并且根据时间差可以得到机动车车速。这种车辆监测方案无需在机动车加装额外的设备,在保护车主隐私的前提下亦能够实现交通流量监管,对于数字化城市发展具有重要的现实意义。

3 结论

本文利用 FEKO 软件建立了汽车和轮毂模型并进行了极化散射特性分析和本征频率分析。通过对比汽车模型和轮毂模型主极化分量和正交极化分量验证其极化散射特性,并确定出轮毂正交极化最显著时的入射场角度和极化角度。结果表明当入射波频率为 255 MHz,方位角 $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$,极化角度为 0° 时,轮毂的正交极化散射特性突出,其雷达散射截面在数值上高于汽车模型 30 dB,并且具备良好的空间角度选择特性。因而采用轮毂作为雷达目标对机动车和非机动车流量监测具有较高的实际意义。

除此之外,本文提出的方案对于反隐身机动车辆雷达探测亦有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] 官伯然,王东. 无源双极化标签式雷达目标及其应用[J]. 电波科学学报, 2010(02):307-312

Guan B R, Wang D. Passive dual-polarization L-shaped radar tag and its application[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2): 307-312

[2] 骆宇峰. SAR 轮式/履带式车辆微多普勒建模和特征分析[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2013

Luo Y F. SAR weeled/tracked vehical micro-Doppler modeling and characteristics analysis [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013

[3] 海效成,崔化刚,王峰,等. 一种雷达隐身轮式方舱车[P]. ZL201520923296.4. 2016-01-27

Hai X C, Cui H G, Wang F, et al. A radar stealth wheeled vehicle[P]. ZL201520923296.4. 2016-01-27

[4] 朱秀芹,耿友林,吴信宝,等. 三维介质目标电磁散射的一种计算方法[J]. 电波科学学报, 2000(4): 397-401

Zhu X Q, Geng Y L, Wu X B, et al. The application of a mixed technique to 3D dielectric objects[J]. Chinese Journal of Radio Science 2000(4): 397-401

[5] 刘密歌,赵军仓,张麟兮,等. 微波暗室中两种 RCS 测量系统的比较[J]. 计算机测量与控制, 2007(3): 300-301

Liu M G, Zhao J C, Zhang L X, et al. Comparison between two kinds of RCS measurement systems in microwave anechoic chamber[J]. Computer Measurement & Control, 2007(3):300-301

[6] 陈德喜,颜俐,王海婴. FEKO 软件的 RCS 仿真应用[J]. 舰船电子工程, 2008(9):125-128

Chen D X, Yan L, Wang H Y. Emulational application by the software FEKO in the radar cross section[J] Ship Electronic Engineering, 2008(9):125-128

[7] 李亭,刘宇. 雷达目标动态多极化回波仿真分析[J]. 现代防御技术, 2016(2):222-228

Li T, Liu Y. Analysis of dynamic and static multi-polarization echoes simulation of radar target[J]. Modern Defence Technology, 2016(2): 222-228

顾月女,1992年生,博士生。研究方向:电磁场与微波技术

E-mail:1551375981@qq.com

官伯然(通信作者)男,1955年生,教授,博士生导师,中国电子学会高级会员。主要从事天线与微波技术、超导电子技术等方面的研究。

E-mail: brguan@hdu.edu.cn