

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003727

基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达 目标运动参数模拟校准装置*

徐天琪 杜 磊 张殿龙
(中国计量科学研究院 北京 100029)

摘 要:77 GHz 毫米波雷达技术已臻成熟且被广泛应用于智能汽车环境感知、机动车安全车距检测等领域。为了评价和确保其在实际使用中的工作性能,77 GHz 毫米波雷达的目标运动参数在使用前必须进行校准。提出了基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数模拟校准方法,并搭建了一套基于虚拟仪器技术的模拟校准装置。分析了模拟校准方法的基本原理以及模拟校准装置的主要设计思路与技术参数,选取了一款 77 GHz 毫米波雷达样品进行速度与距离模拟校准试验,从测量重复性、雷达分辨率及模拟校准装置精度等方面对试验结果进行了不确定度评定。速度与距离模拟校准试验结果的扩展不确定度分别为 0.7 km/h 和 0.12 m ($k=2$),初步验证了模拟校准方法的可行性及模拟校准装置的模拟性能。

关键词: 计量学;77 GHz 毫米波雷达;虚拟仪器;模拟校准;运动参数

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 41055

Simulated calibration instrument for target kinematics parameters of 77 GHz millimeter-wave radar based on virtual instrument technology

Xu Tianqi Du Lei Zhang Dianlong
(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract:77 GHz millimeter-wave (MMW) radar technology is mature and widely used in intelligent vehicle environment perception, vehicle spacing measurement for driving safety, etc. In order to evaluate and ensure its working performances in practical use, the target kinematics parameters of 77 GHz MMW radar must be calibrated before being used. A simulated calibration method for the target kinematics parameters of 77 GHz MMW radar based on virtual instrument technology is proposed and a simulated calibration instrument based on virtual instrument is developed. The basic principle of the simulated calibration method and the main design ideas and technical parameters of the simulated calibration instrument are analyzed. A 77 GHz MMW radar sample is chosen for speed and range simulated calibration, and the uncertainty of the calibration results is analyzed and evaluated from the aspects of measurement repeatability, radar resolution and accuracy of the simulated calibration instrument. The expand uncertainty of the simulated speed and range are 0.7 km/h and 0.12 m respectively ($k=2$), which preliminarily verifies the feasibility of the simulated calibration method and the performance of the simulated calibration instrument.

Keywords: metrology; 77 GHz millimeter-wave radar; virtual instrument; simulated calibration; kinematics parameters

0 引 言

近年来,随着雷达技术的进步以及国内相关产业的发展,77 GHz 毫米波雷达广泛应用于智能汽车环境感知、机动车安全车距检测、机动车超速违章取证、智能交

通流量监测等领域。以智能汽车环境感知领域为例,77 GHz 毫米波雷达可以感知和测量驾驶环境中目标的速度、距离和方位等运动参数,从而实现各种辅助驾驶功能,如碰撞预警、自动紧急制动、盲点监测和变道辅助^[1-6]等等。

77 GHz 毫米波雷达通常指工作频段在 76~77 GHz

范围内的毫米波雷达。与工作在 24 ~ 24.25 GHz 的 24 GHz 微波雷达相比,77 GHz 毫米波雷达的主要优势在于工作频率更高,可以提高速度分辨率和测速精度;工作频段带宽更宽,可以提高距离分辨率和测距精度;此外,更小的传感器尺寸,有利于与视觉传感器进行融合等等^[7-9]。因此,随着工艺和技术的提升,体积更小、功耗更低、性能更好、价格更低、技术成熟的 77 GHz 毫米波雷达正在逐步替代 24 GHz 微波雷达,成为未来智能汽车无人驾驶系统、智能交通车速车距车流量监测系统等领域主流的环境感知传感器。

为了评价并确保其在实际使用中的工作性能,实现 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数的校准工作也日益重要。目前国内外对 77 GHz 毫米波雷达主要采用封闭试验场和实际道路的实车整车测试方法^[10-11]。此类测试方法成本高昂、测量范围受限、安全风险大,难以开展长时间和长距离的测试,无法充分地检测 77 GHz 毫米波雷达的实际工作性能。并且在实车整车测试时因缺少参考值,77 GHz 毫米波雷达的测量值无法进行有效溯源。除了实车测试外,国外开始采用实验室模拟仿真方法对毫米波雷达进行测试,通常基于仿真软件如 Agilent-ADS、MATLAB 等对雷达的各部件包括射频前端、模数转换电路和信号处理器等进行仿真环境搭建^[12-14],采用雷达实际使用中的测量数据对仿真模型进行测试^[15]。基于仿真软件的模拟仿真方法实时运算量大,耗时长,适用范围窄,可扩展性能差。并且由于仿真数据量的限制,难以满足毫米波雷达的大样本测试需求。

本文提出了基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数模拟校准方法(模拟校准方法),并搭建了一套基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数模拟校准装置(模拟校准装置),分析了模拟校准方法的基本原理以及模拟校准装置的主要设计思路与工作原理,并通过一款 77 GHz 毫米波雷达样品的目标运动参数模拟校准结果,初步验证了该模拟校准方法的可行性以及模拟校准装置的目标运动参数模拟性能。

1 模拟校准方法的基本原理

1.1 距离与速度模拟校准原理

毫米波雷达距离测量与速度测量分别基于时间飞行法^[16](Time Of Flight, TOF)和多普勒效应^[17]。当雷达发射调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)信号对目标进行探测时,由于雷达接收到的目标回波信号与雷达发射信号存在一定的时间延迟 t_d ,根据时间延迟可以测出目标与雷达的相对距离。当目标运动时,回波信号的频率与发射信号的频率出现差值—多普勒频移 f_d ,根据多普勒频移可以测出目标相对雷达的径

向运动速度。

毫米波雷达测距与测速工作原理如图 1 所示。当雷达发射采用三角波调制的探测信号 $s(t)$ 至静态目标,雷达与目标之间的距离 d 使回波信号 $s(t - t_d)$ 相对于发射信号在时域上有一个延迟 t_d 。此时,发射信号与回波信号在上升沿与下降沿的拍频分别为 f_{bu} 和 f_{bd} ,并且满足 $f_{bu} = f_{bd}$ 。由于时延并未造成回波信号频率幅值的变化,只是在相位上有一个延迟,因此回波信号与发射信号的拍频 f_b 可以表示为:

$$f_b = \frac{f_{bu} + f_{bd}}{2} \quad (1)$$

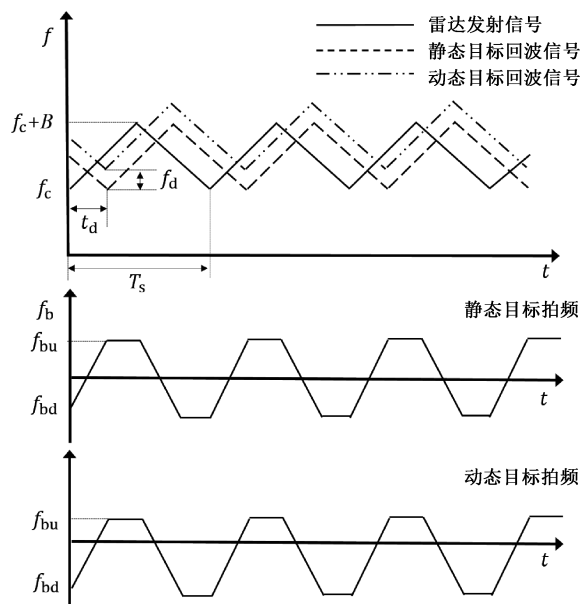


图 1 毫米波雷达测距与测速原理

Fig. 1 Millimeter wave radar range and speed measuring principle

由图 1 几何关系可知,静态目标与雷达之间的距离 d 与拍频 f_b 满足:

$$f_b = \frac{2B}{T_s} \cdot t_d = \frac{4B \cdot d}{T_s \cdot c} \quad (2)$$

式中: B 、 T_s 分别为 FMCW 信号的扫频带宽与扫频周期; c 为电磁波在真空中的传播速度。

当雷达与目标之间有相对运动时,由于多普勒效应的存在,回波信号与发射信号在时间延迟的基础上还存在多普勒频移 f_d ,并且满足式(3)。

$$f_d = \frac{f_{bd} - f_{bu}}{2} \quad (3)$$

通过测量回波信号的多普勒频移 f_d 就能计算得到目标相对于雷达的径向速度为:

$$v = \frac{f_d \cdot \lambda}{2} \quad (4)$$

式中: λ 为探测信号的波长。

因此,模拟校准装置通过改变对雷达发射信号处理时的时延量 t_d 与频偏量 f_d , 可以实现待校毫米波雷达的距离与速度测量模拟校准试验。

对雷达进行距离模拟校准时,模拟校准装置将雷达发射的 FMCW 信号进行时延处理,而后将处理过的信号经发射装置再重新发射至雷达接收,此时雷达接收到的回波信号即为经模拟目标反射回来的回波信号,通过测量回波信号与发射信号之间的拍频可以计算得到模拟目标的距离。

当模拟目标相对雷达开始运动时,模拟校准装置模拟实际中的运动目标将接收到的雷达 FMCW 信号在频域上进行频移处理。雷达接收到经过频移处理后的回波信号,对模拟目标的速度值进行测量。

1.2 角度模拟校准原理

毫米波雷达通常通过多接收天线干涉原理来实现角度测量^[18]。阵列天线是雷达中最常用的天线形式之一,一维 N 元直线阵列天线示意图如图 2 所示, N 为天线阵元的个数, D 为相邻天线阵元之间的距离, θ 为目标回波方向与天线法线方向的夹角。

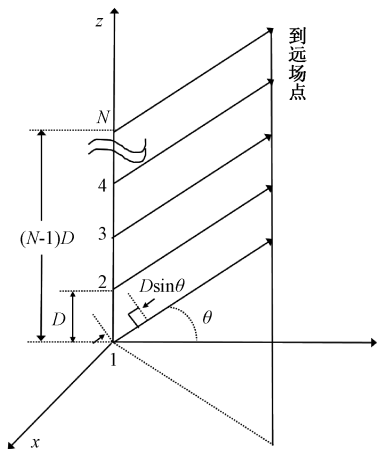


图 2 一维直线阵列天线

Fig. 2 1-D linear antenna array

天线阵列相邻阵元之间的相位差 $\Delta\varphi$ 可表示为:

$$\Delta\varphi = k \cdot D \sin\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot D \sin\theta \quad (5)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为传播常数。

显然,雷达可以通过测量天线阵元之间的相位差 $\Delta\varphi$ 来计算得到目标回波与雷达天线阵列法向之间的夹角 θ 。

模拟校准装置中将发射模拟目标的回波信号的发射装置角度固定,通过高精度转台带动雷达进行转动,此时相当于回波与雷达接收天线法向形成一个夹角 θ ,雷达通过测量接收天线阵元间的相位差可以计算得出模拟目

标的方位角度。因此,设置高精度转台的转动角度,可以实现待校毫米波雷达角度测量性能的模拟校准以及测量待校毫米波雷达向不同方向发射功率的大小。

2 模拟校准装置的设计与实现

模拟校准装置总体结构如图 3 所示,主要由微波屏蔽暗箱、高精度转台、目标距离与速度模拟器、收发天线及上下变频器、控制计算机及控制软件等五个部分组成。将待校毫米波雷达放置在微波屏蔽暗箱内,待校毫米波雷达的测量数据可通过无线网络或者暗箱底部信号线将数据传送至计算机,计算机也可以通过雷达调试软件实现雷达测量范围等参数的调整控制,并且实现测量数据的导出处理。

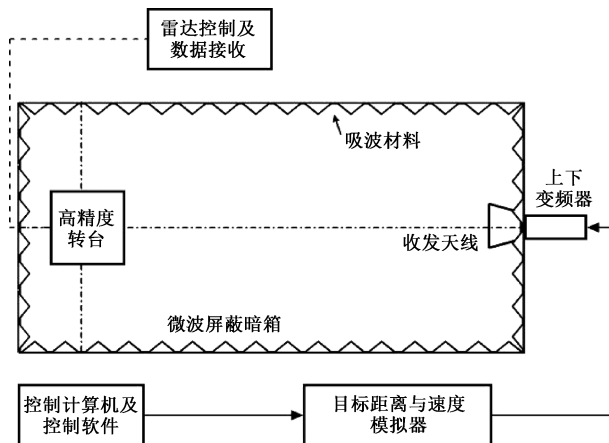


图 3 模拟校准装置总体结构

Fig. 3 Structure of simulated calibration instrument

2.1 微波屏蔽暗箱

微波屏蔽暗箱的外观如图 4 所示,暗箱的一端设计为外向全开门结构,便于将 77 GHz 毫米波雷达传感器或测量系统放入到暗箱内。暗箱的另一端装有夹具用于固定上下变频器,中间开有小窗口便于将收发天线放置于暗箱内。暗箱内部四周均贴有吸波材料,用于降低暗箱内部信号对外辐射的强度,同时也防止外部电磁干扰信号对暗箱内部校准环境的影响。

微波屏蔽暗箱的尺寸设计应满足 77 GHz 毫米波雷达天线工作频段的远场区条件^[19],即待校 77 GHz 毫米波雷达到收发天线的最小距离 L 应满足:

$$L \geq \frac{2R^2}{\lambda} \quad (6)$$

式中: R 为天线口径尺寸; λ 为天线的工作波长。根据模拟校准装置收发天线的口径,最小距离 L 为 0.7 m。

为满足最佳电性能的要求,达到暗箱内部吸波材料较好的吸波效果,暗箱的宽度 W 需满足式(7)。

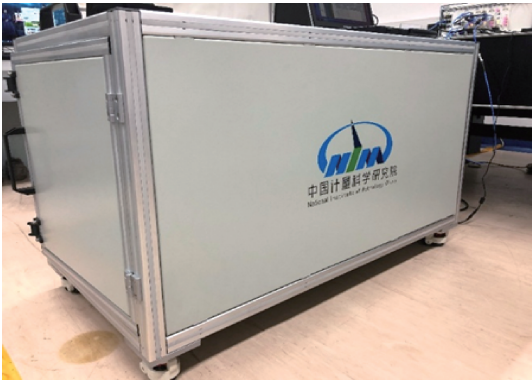


图 4 微波屏蔽暗箱
Fig. 4 Microwave camera obscura

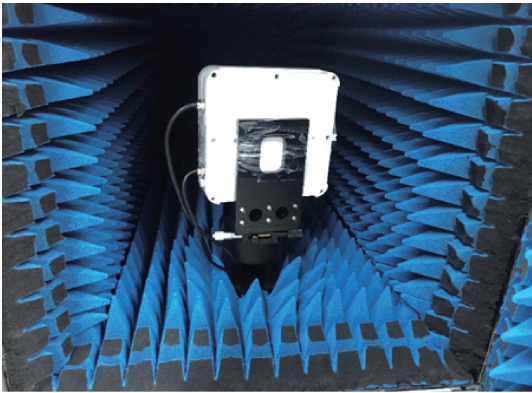


图 5 转台及待校雷达传感器
Fig. 5 Turntable and radar sensor to be calibrated

$W = L / \tan \alpha$ (7)

其中, α 为电磁波对吸波材料的入射角, $\alpha < 60^\circ$, 因此, 暗箱宽度 W 的最小距离为 0.4 m。

同时, 为减少较差极化分量的产生, 降低通路损耗的不均匀性, 暗箱高度 H 一般与宽度相同或近似。综合考虑上述因素, 暗箱的尺寸设计为 1.28 m $\times$ 0.68 m $\times$ 0.68 m。

在实际工作时毫米波雷达接收到的来自不同距离目标的回波功率 $P_r^{[20]}$ 为:

$$P_r = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (8)$$

式中: P_t 、 G 、 A_e 分别为雷达的发射功率、天线增益和天线有效接收面积; σ 、 R 分别为目标的雷达反射截面和距离。

由于微波暗箱尺寸有限且收发天线到毫米波雷达之间的空间物理距离为固定不变的, 因而模拟校准装置通过按照式 (8) 生成在模拟距离处相应的目标回波功率, 来模拟毫米波雷达在实际工作中相应距离处的真实回波信号功率, 以评价毫米波雷达的实际工作性能。

2.2 高精度转台

高精度转台如图 5 所示, 转台上有一支撑固定平台, 用于放置待校毫米波雷达。高精度转台安装在微波屏蔽暗箱的一端, 通过控制其转动角度, 带动放置在支撑平台上的待校毫米波雷达转动至相同的角度位置处, 从而实现对待校毫米波雷达在不同角度位置处的测量性能的模拟校准, 同时还可以测量待校毫米波雷达向不同方向发射功率的大小。为减少校准试验中的电磁干扰, 支撑平台和高精度转台都由非金属材料制成。

根据高精度转台的技术指标, 模拟校准装置中的角度模拟主要技术参数如表 1 所示。

2.3 目标距离与速度模拟器

目标距离与速度模拟器 (模拟器) 如图 6 所示, 是

表 1 角度模拟主要技术参数	
Table 1 Main technical parameters of angle simulation(°)	
参数名称	参数值
角度模拟范围	-180~180
角度模拟最大允许误差	±0.3

基于 NI(national instruments) 虚拟仪器搭建而成。其中, 机箱选用 NI PXIe-1085, 有 18 个插槽, 最大系统带宽达到 24 GB/s, 不仅能够满足现有两目标距离与速度的模拟需求, 未来还可以拓展到四目标距离与速度的模拟能力。因在对多目标的距离与速度进行模拟时所需的计算量非常庞大且要求实时处理, 因此对控制器要求较高, 故选用 NI PXIe-8880 控制器, 最大控制器带宽达到 24 GB/s, 不仅可以满足现有两目标距离与速度的模拟需求, 也能满足未来四目标距离与速度模拟的扩展需求。由于不同厂商的 77 GHz 毫米波雷达产品工作原理不尽相同, 为保证通用性, 模拟器从毫米波雷达的工作原理上来模拟目标的距离和速度。通过将毫米波雷达所发射的射频信号经上下变频器下变频到中频信号后, 模拟器分别通过物理时延和频移来模拟目标的距离和速度。因此, 模拟器选用 2 块 NI-5692 可变时延发生器(variable delay generator, VDG) 板卡来对中频信号进行高精度可控延时, 能够模拟 2 个目标的距离值, 同时选用 1 块 NI PXIe-5840 矢量信号收发器(vector signal transceiver, VST) 板卡来对中频信号进行高准确度可控频移, 可模拟 2 个目标的速度值。通过增加 VDG 和 VST 的数量, 最多可实现 4 个目标的距离和速度的模拟。

根据模拟器的技术指标, 模拟校准装置中的目标距离与速度模拟主要技术参数如表 2 所示。

2.4 收发天线及上下变频器

收发天线及上下变频器如图 7 所示, 该模块用于接收待校 77 GHz 毫米波雷达所发射的射频信号, 并将其下变频到中频, 然后通过线缆传送给模拟器进行后续的时

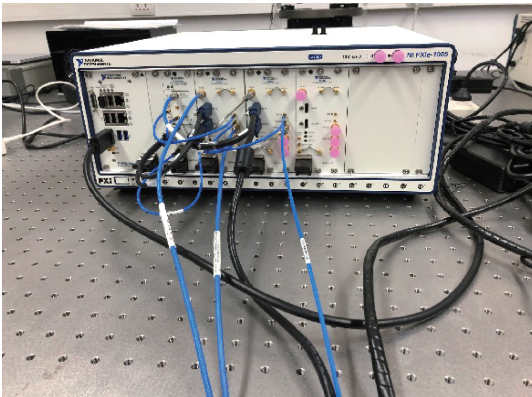


图 6 目标距离与速度模拟器
Fig. 6 Target range and speed simulator

表 2 距离与速度模拟主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of range and speed simulation

参数名称	参数值
目标模拟数量	2
距离模拟范围/m	5~300
距离模拟最大允许误差/m	±0.1
速度模拟范围/(km·h ⁻¹)	-500~500
速度模拟最大允许误差/(km·h ⁻¹)	±0.1

延和频移处理。另外,还将经过模拟器处理后的中频信号上变频到射频,并通过天线重新发射给待校毫米波雷达,以模拟真实目标的回波信号。待校的 77 GHz 毫米波雷达根据发射信号和模拟回波信号之间的时延值和频移值,测量出目标的距离值和速度值,并与设置的参考距离值和速度值进行对比,从而实现对待校毫米波雷达的距离和速度的模拟校准。收发天线及上下变频器前端配有激光瞄准器,用于实现其与待校毫米波雷达的精确对准。



图 7 收发天线及上下变频器
Fig. 7 Transceiver antenna and up/down converter

2.5 控制计算机及控制软件

控制计算机及控制软件主要用于实现模拟校准装置的控制、参数设置以及数据采集等。控制软件采用 LabVIEW 编写,使用图形化编辑 G 语言编写程序,以流程图或程序框图形式呈现,便于实现面向仪器的编程以及数据采集。模拟目标控制软件参数设置界面如图 8 所示。

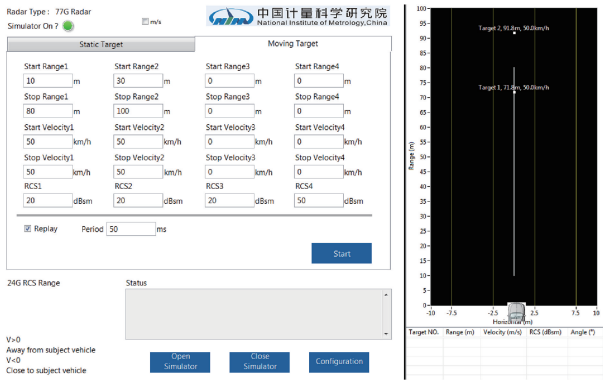


图 8 控制软件参数设置界面
Fig. 8 Parameters setting of control software

在进行静态目标模拟测量时,通过控制软件设置目标的速度,位置及雷达反射截面等参数,待校毫米波雷达测量数据通过无线网络或者信号线传送至计算机进行导出。进行动态目标模拟测量时,需要设置模拟目标的初位置和末位置、运动速度和雷达反射截面等,待校毫米波雷达将测量得到的模拟目标速度及位置等数据传送至计算机进行导出。

3 试验结果及不确定度分析

为了验证模拟校准装置的工作性能,本文选择了 1 款有代表性的 77 GHz 测速测距毫米波雷达样品,进行距离与速度的模拟校准试验。待校毫米波雷达样品的中心频率为 76.5 GHz,扫频宽度为 1 GHz。

模拟校准装置具有静态多目标及动态多目标模拟两方面的功能。在进行模拟目标测量时,将待校毫米波雷达样品置于转台上方的支撑平台上,通过激光瞄准器调准转台位置及平台高度,使其相位中心与模拟校准装置收发天线在同一轴线上,然后将雷达通电预热,通过计算机接收雷达的测量数据进行记录。

3.1 模拟测速结果及不确定度分析

待校 77 GHz 毫米波雷达样品的速度模拟校准试验结果如表 3 所示,试验选择了 20、50、80、100、120、150、180 和 200 km/h 等 8 个典型的速度点进行模拟校准,每个速度点进行 10 次重复测量。由表 3 中速度模拟校准

数据结果可以看出,在 20~200 km/h 的速度测量范围内,待校毫米波雷达样品的模拟测速误差均在±1 km/h 的范围内,满足该款毫米波雷达样品测速性能要求,但在临界速度点 20 和 200 km/h 上,误差高于平均值,与待校雷达本身速度测量范围有关。

表 3 毫米波雷达样品的速度模拟校准结果

Table 3 Speed simulated calibration results of millimeter wave radar sample (km·h⁻¹)

参考速度值 v_0	速度测量平均值 $\bar{v}$	模拟测速误差 Δv
20.0	19.1	0.9
50.0	50.0	0.0
80.0	80.0	0.0
100.0	100.0	0.0
120.0	120.0	0.0
150.0	150.0	0.0
180.0	180.0	0.0
200.0	200.2	0.2

当模拟校准装置生成的参考速度值 $v_0 = 200$ km/h 时,测量结果的模拟测速误差^[21] Δv 可表示为:

$$\Delta v = v - v_0$$

(9)

式中: v 为待校毫米波雷达得到的速度测量值。

模拟校准装置速度模拟的最大允许误差为±0.1 km/h,并且以矩形分布估计,因此模拟校准装置参考速度值的标准不确定度分量 $u(v_0)$ 为:

$$u(v_0) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ km/h}$$

(10)

待校毫米波雷达速度测量值共包含 2 个不确定度分量,分别为测量重复性引入的不确定度分量 $u_1(v)$ 以及分辨力引入的不确定度分量 $u_2(v)$ 。

当 $v_0 = 200$ km/h 时,待校雷达的 10 次测量结果为 $v_1 = 200$ km/h, $v_2 = 200$ km/h, $v_3 = 200$ km/h, $v_4 = 200$ km/h, $v_5 = 201$ km/h, $v_6 = 201$ km/h, $v_7 = 200$ km/h, $v_8 = 200$ km/h, $v_9 = 200$ km/h, $v_{10} = 200$ km/h。

则单次测量的实验标准差 $s(v_i)$ 为:

$$s(v_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (v_i - \bar{v})^2}{9}} = 0.42 \text{ km/h}$$

(11)

式中: $\bar{v}$ 为 10 次测量平均值,则由测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(v)$ 为:

$$u_1(v) = s(\bar{v}) = s(v_i) / \sqrt{10} = 0.13 \text{ km/h}$$

(12)

则待校毫米波雷达速度测量值的不确定度分量:

$$u(v) = \sqrt{u_1^2(v) + u_2^2(v)} = \sqrt{0.13^2 + \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2} = 0.32 \text{ km/h}$$

(13)

其中,该 77 G 毫米波雷达传感器的测速分辨力

为 1 km/h。

取包含因子 $k = 2$,则 $v_0 = 200$ km/h 速度点的扩展不确定度为:

$$U(\Delta v) = k \cdot u_c(\Delta v) = k \cdot \sqrt{u^2(v_0) + u^2(v)} =$$

0.7 km/h

(14)

式中: $u_c(\Delta v)$ 为测量结果的标准不确定度。

3.2 模拟测距结果及不确定度分析

模拟校准装置目前最多可同时模拟两个目标。试验过程中模拟了两个速度相同但起始位置不同的运动目标,因此在试验过程中这两个运动目标之间的相对距离保持不变。待校毫米波雷达样品测量两个运动目标的相对距离以校准雷达传感器样品的测距性能,距离模拟校准试验结果如表 4 所示。

表 4 毫米波雷达样品的距离模拟校准结果

Table 4 Range simulated calibration results of millimeter wave radar (m)

参考距离值	距离测量值			模拟测距误差 ΔR
	R_0	R_1	R_2 $R_1 - R_2$	
10.00	81.63	91.73	10.10	0.10
30.00	61.70	91.74	30.04	0.04
50.00	101.83	151.69	49.86	0.14
70.00	81.68	151.67	69.99	0.01
100.00	81.84	181.85	100.01	0.01
120.00	81.69	201.68	119.99	0.01
150.00	81.69	231.68	149.99	0.01
170.00	71.67	241.66	169.99	0.01

表 4 中, R_1 和 R_2 分别为 1 号模拟目标和 2 号模拟目标的起始距离, $|R_1 - R_2|$ 为运动过程中 2 个模拟目标之间的相对距离。模拟试验中,选择了 10、30、50、70、100、120、150 和 170 m 8 个典型距离点进行模拟校准,每个距离点进行多次重复测量。由表 4 中距离校准数据结果可以看出,待校毫米波雷达样品在 10~170 m 范围内的模拟测距误差均在±0.1 m 范围内,满足该款毫米波雷达样品测距性能要求。

当参考距离值 $R_0 = 50$ m 时,本次测量结果的模拟测距误差 ΔR 可表示为:

$$\Delta R = R - R_0$$

(15)

式中: R 为待校毫米波雷达得到的距离测量值。

模拟校准装置距离模拟的最大允许误差为±0.1 m,以矩形分布估计,则模拟校准装置参考距离值的标准不确定度分量为:

$$u(R_0) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ m}$$

(16)

当 $R_0 = 50$ m 时,待校雷达的 10 次测量结果为 $R_1 = 49.77$ m, $R_2 = 49.83$ m, $R_3 = 49.84$ m, $R_4 = 49.84$ m, $R_5 = 49.85$ m, $R_6 = 49.85$ m, $R_7 = 49.89$ m, $R_8 = 49.89$ m, $R_9 =$

49.90 m, $R_{10} = 49.92$ m。

则单次测量的实验标准差 $s(R_i)$ 为:

$$s(R_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (R_i - \bar{R})^2}{9}} = 0.043 \text{ m} \quad (17)$$

式中: $\bar{R}$ 为 10 次测量平均值。

由测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(R)$ 为:

$$u_1(R) = s(\bar{R}) = s(R_i) / \sqrt{10} = 0.014 \text{ m} \quad (18)$$

待校毫米波雷达距离测量值的标准不确定度分量为:

$$u(R) = \sqrt{u_1^2(R) + u_2^2(R)} = \sqrt{0.014^2 + \left(\frac{0.01}{2\sqrt{3}}\right)^2} = 0.015 \text{ m} \quad (19)$$

式中: 待校雷达的测距分辨力为 0.01 m, $u_2(R)$ 为待校雷达测距分辨力引入的不确定度分量。

取包含因子 $k = 2$, 则扩展不确定度 $U(\Delta R)$ 为:

$$U(\Delta R) = k \cdot u_c(\Delta R) = k \cdot \sqrt{u^2(R) + u^2(R_0)} = 0.12 \text{ m} \quad (20)$$

式中: $u_c(\Delta R)$ 为测量结果的标准不确定度。

4 结 论

为满足毫米波雷达实际使用中的校准需求, 本文从毫米波雷达工作的基本原理出发, 提出了基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数校准方法, 并搭建了用于毫米波雷达测速、测距和测角性能校准的模拟校准装置。该模拟校准装置的速度模拟范围为 $-500 \sim 500$ km/h, 速度模拟最大允许误差为 ± 0.1 km/h; 距离模拟范围为 $5 \sim 300$ m, 距离模拟最大允许误差为 ± 0.1 m。选取了一款 77 GHz 毫米波雷达进行速度与距离模拟校准试验, 试验结果的扩展不确定度分别为 0.7 km/h 和 0.12 m ($k=2$), 验证了模拟校准方法的可行性与模拟校准装置的距离和速度模拟性能。下一步计划采用转台实现毫米波雷达角度模拟校准, 以满足 77 GHz 毫米波雷达的全量程、大样本和高精度的校准需求。

参考文献

- [1] CAI X Z, KAMAL S. A machine learning based 77 GHz radar target classification for autonomous vehicles [C]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019: 371-372.
- [2] TRISTAN V, ANDREJ S, JÜRGEN H, et al. Classification of objects in polarimetric radar images using CNNs at 77 GHz [C]. 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), 2017: 356-359.
- [3] SHOUJI M, SOICHI O, NAOKI M, et al. Near-field millimeter-wave imaging with 77-GHz-band monostatic-radar module [C]. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013: 808-809.
- [4] ZHANG K, LAN S C, ZHANG G Y. Mining spatio-temporal features from MMW radar echoes for hand gesture recognition. 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2019: 93-95.
- [5] DU C Y, WANG X H, YUAN Z X, et al. Design of gesture recognition system based on 77GHz millimeter wave radar [C]. 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2019: 1-3.
- [6] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265.
CHEN W M, LI C L. Displacement / range measurement technology based on microwave radar [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251-1265.
- [7] 卢剑奇, 赵拥军, 党同心. 虚拟仪器技术在雷达系统测试中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S2): 258-261.
LU J Q, ZHAO Y J, DANG T X. Application of virtual instrument technology in radar system test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S2): 258-261.
- [8] 杨航, 高源. 毫米波雷达识别问题分析及解决措施[J]. 汽车技术, 2018(8): 43-46.
YANG H, GAO Y. Problem analysis and solution of millimeter wave radar recognition [J]. Automobile Technology, 2018(08): 43-46.
- [9] Agilent FieldFox 脉冲测量能够简化雷达现场测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10): 930.
Agilent fieldfox pulse measurement can simplify radar field test [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(10): 930.
- [10] 徐涛. 毫米波汽车防撞雷达实用化研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所), 2003.
XU T. Practical research on millimeter wave automotive collision avoidance radar [D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Microsystem and information technology), 2003.
- [11] 郑建明, 张宇飞, 覃斌, 等. 整车坏路可靠性试验的无人化技术研究[J]. 汽车技术, 2020(10): 33-38.
ZHENG J M, ZHANG Y F, TAN B, et al. Research on unmanned technology of vehicle failure reliability test [J].

- Automobile Technology, 2020 (10): 33-38.
- [12] WANG Z B, LI Z J, KRASNOV O, et al. System-level simulation of the full-polarimetric radar system [C]. IEEE CIE International Conference on Radar, 2011: 841-844.
- [13] HUANG L B, CHEN H L, BAI J. Simulation of the effect of signal source's phase noise on millimeter wave automotive radar system based on SystemVue [C]. IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, 2016: 1-3.
- [14] LI X, DENG W W, ZHANG S, et al. Research on millimeter wave radar simulation model for intelligent vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(2): 275-284.
- [15] BANTLE M, SCHUMACHER G. PC based real-time radar environment simulation [C]. 17th International Radar Symposium (IRS), 2016: 1-3.
- [16] 樊昌元, 丁义元. 高精度测距雷达研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(2): 52-56.
Fan C Y, Ding Y Y. Research on high precision ranging radar [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2000, 14(2): 52-56.
- [17] 余成波, 万文略, 郑有根. 汽车激光雷达自动防撞微机控制系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 428-430.
YU CH B, WAN W L, ZHEN Y G. Development of microcomputer control system for automatic collision avoidance of automobile LIDAR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4): 428-430.
- [18] 张科遥, 林福江, 白雪飞. 77GHz FMCW 车载雷达系统设计[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(4): 53-57, 72.
ZHANG K Y, LIN F J, BAI X F. Design of 77GHz FMCW vehicle borne radar system [J]. Information Technology and Network Security, 2020, 39(4): 53-57, 72.
- [19] 史印良. 微波暗室设计评估与验证方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
SHI Y L. Research on design evaluation and validation method of microwave anechoic chambers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [20] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 第五版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
DING L F, GENG F L, CHEN J CH. Radar principles [M]. 5th edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [21] 褚进华, 唐修雄, 矫健, 等. 能见度仪校准系统的不确定度评定分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 180-187.
CHU J H, TANG X X, JIAO J. Uncertainty analysis of the calibration system of visibility meter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 180-187.

作者简介



徐天琪, 2018 年于苏州大学获得学士学位, 现为中国计量科学研究院硕士研究生, 主要研究方向为车载雷达目标运动参数校准。

E-mail: xutianqi18@mails.ucas.ac.cn

Xu Tianqi received her B. Sc. degree from Soochow University in 2018. Now she is a

M. Sc. candidate at National Institute of Metrology. Her main research interest includes target kinematics parameters calibration of vehicle-borne radar.



杜磊 (通信作者), 2010 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为运动学参数计量。

E-mail: dulei@nim.ac.cn

Du Lei (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2010. Now he is an associate researcher and M. Sc. supervisor at National Institute of Metrology, China. His main research interest includes kinematics parameter metrology.