

高性能毫米波雷达探测性能测试系统研制

吴义保

(中国电子科技集团公司第三十八研究所,安徽合肥 230088)

摘要:高性能毫米波雷达性能优越,作为重要的探测感知部件,广泛应用于智能驾驶及智能汽车领域。该雷达专业集成度高,测试难度较大。从探测指标及射频基础条件两方面设计需求出发,围绕探测指标的理论计算、测试系统设计方案、测试指标验证,分析了基于雷达目标模拟的探测指标实现及验证方法。从暗室屏蔽效能、暗室尺寸计算到暗室静区性能仿真设计,研究了该测试系统射频基础条件的形成过程。探测性能测试系统为完善高性能毫米波雷达测试评价技术,构建协同开发的智能汽车技术创新体系提供了有效手段。

关键词:高性能毫米波雷达;探测性能测试系统;雷达模拟器;微波暗室;屏蔽效能;静区反射电平;多普勒频移

中图分类号:TN958;TH213.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2021)02-0163-05

Development of Detection Performance Test System of High-Performance Millimeter Wave Radar

WU Yibao

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: High-performance millimeter wave radar is widely used in the field of intelligent driving and intelligent automobile as an important detection and sensing component. The radar has high professional integration and is difficult to test. Starting from the design requirements of detection index and RF basic conditions, the realization and verification method of detection index based on radar target simulation is analyzed around theoretical calculation, design scheme and index verification. From the shielding performance of darkroom, the size calculation of darkroom and the simulation design of darkroom static zone performance, the formation process of RF basic conditions of test system is studied. The test system provides an effective means for improving the test and evaluation technology of high-performance millimeter wave radar and building a collaborative development of intelligent vehicle technology innovation system.

Key words: high-performance millimeter wave radar; detection performance test system; radar simulator; microwave darkroom; shielding effectiveness; static reflection level; Doppler shift

0 引言

高性能毫米波雷达由于具备探测距离远、探测精度高、环境适应性强、成本不断下降等综合优势,已成为高级驾驶辅助系统(ADAS)的重要组成部分^[1]。2020年2月,国家发改委等11部委联合出台《智能汽车创新发展战略》,毫米波雷达作为复杂环境感知的车载高精度传感器,是必须要突

破的关键基础技术,也是必须要增强的产业核心竞争力。同时,该战略要求通过完善测试评价技术,构建协同开发的智能汽车技术创新体系。

毫米波雷达产品研制涉及天线设计、射频收发、信号处理、软件算法及性能测试等众多专业,技术难度大,专业集成度高^[2]。由于其高频段、大带宽及低时延等射频特性,毫米波雷达对产品研发测试要求较高。雷达功能仿真测试、整机性能台架测试以及样机道路测试是毫米波雷达测试的

收稿日期:2020-08-04;修回日期:2020-09-07

基金项目:国家发改委“互联网+”和数字经济专项(发改投资2019-928);安徽省新能源汽车暨智能网联汽车产业技术创新工程项目(皖政2017-110)

最为重要的“三驾马车”，其中，整机性能台架测试作为仿真模拟与实际路测的中间测试环节，具有承上启下的作用。因此如何进行有效精准的功能与性能测试，成为毫米波雷达研制水平的衡量标准之一。在所有整机性能测试项中，探测性能和雷达本身关系最为密切，探测性能的好坏，直接决定了雷达设计指标的实现与否。

1 测试需求分析

探测性能指标是台架测试的重要内容。台架测试是指在实验室或生产线上，通过软硬件深度结合的方式，将雷达的天线性能、射频性能、探测性能、天线罩透波性能、抗干扰性能等主要性能指标进行准确呈现与合理判定。简单来说，探测性能测试系统可通过空馈方式接收被测雷达的发射信号，分析发射信号的特征参数，并据此模拟道路目标的雷达回波。测试系统需通过模拟目标的距离、速度、方位角等参数来模拟雷达实际应用环境，从而实现对雷达整机的探测性能测试^[3]。另外，由于测试方式主要是空馈测试，应能模拟无回波和电磁屏蔽的工作环境，因此要求为暗室测试环境。具体要求如下：

1) 探测指标要求

模拟距离是最大距离不小于 300 m，距离精度不超过 0.2 m；模拟速度范围不小于 400 km/h，速度精度不超过 0.1 km/h；角度覆盖范围为±90°，角度步进为 0.1°。

2) 射频基础条件要求

微波暗室：静区反射电平要求优于−50 dB；工作频段：24 GHz 及 76~81 GHz。其中，方位角覆盖范围及角度步进由多轴转台的电机控制并实现，采用高精度伺服电机闭环控制完全可以确保转台精度和稳定性，因此该角度指标不在该探测系统研究范围之内。因此，探测指标主要集中在距离、速度及其精度上。

当然，要完成该测试系统并使其真正应用于产品研发与生产活动，同样少不了其他方面的设计要求，如测试结构总体设计、多轴转台实现、软件界面设计、防呆设计、测试机柜选型、硬件接线、测试夹具设计、软件校准、系统自检、测试可靠性以及人机工程等，本文不一一赘述^[4]。

2 方案设计

2.1 探测性能指标实现方案

2.1.1 理论计算

对目标的距离模拟可通过数字射频存储器(Digital Radio-Frequency Memory, DRFM)方式实现^[5]，固定毫米波汽车雷达天线和模拟器天线，通过对采集的雷达信号进行数字信号延迟处理模拟工作距离变化。由于模拟器存在约 300 ns 的系统延时，为实现近距离目标的模拟，根据测量信号的周期性，通过将测量信号延迟一个固定的延时 T，在此基础上调整相对时延模拟距离的变化范围及精度。

距离范围通过调整模拟器回波延时实现，当目标与雷达距离为 d 时，回波信号延时 $\delta t = 2d/c$ ，其中 c 为光速。根据要求，距离模拟范围为 300 m，距离模拟精度为 0.2 m，则对应的时延模拟范围为 $T \sim (T + 2000 \text{ ns})$ 。回波特性调制单元的延迟分粗延迟和精延迟两部分实现。粗延迟的延迟量和步进则由存储器的时钟频率及存储器的容量来决定。采用 FPGA 内部存储结合外部存储器扩展的方案，共同完成数据存储任务，可满足延时 300 μs 的要求，此时对应障碍物模拟距离为 45 km，远远满足最大距离不小于 300 m 的要求。

通过数据延迟及频率调整相结合的方式，可实现模拟不同距离及模拟精度。数据延迟实现障碍物距离的粗调，频率调整实现障碍物距离模拟的精调。根据频率变化与 FMCW 信号参数之间的关系，若 FMCW 信号调频斜率为 k，障碍物距离对应信号延迟量为 δt ，则障碍物距离对应的频率变化量 $\delta f = k \times \delta t$ 。模拟器可实现数据延迟步进 0.65 ns，频率补偿精度 0.18 Hz。频率调整可实现距离模拟精度为 $(0.18/k) \times c$ ，其中 c 为光速。当 FMCW 信号重复周期为 500 μs ，即调频斜率为 $5 \times 10^{11} \text{ Hz/s}$ 时，求得距离模拟精度为 10^{-4} m ，满足障碍物距离模拟精度 0.2 m 的要求。

同时，通过多普勒频移原理可实现对目标的速度参数模拟。DRFM 可实现多普勒频移的 1 Hz 的频率变化精度和 DC~±5 MHz 的频率变化范围，根据多普勒频率与相对速度公式 $f_d = 2f_0 \times \frac{v}{c}$ ，其中 f_d 为多普勒频率， f_0 为载频 77 GHz，v 为相对速

度, c 为光速。目标模拟器可实现优于 0.007 km/h 的速度模拟精度, 以及不小于 $3.5 \times 10^4 \text{ km/h}$ 的速度模拟范围, 满足速度模拟精度 0.1 km/h 以及速度模拟范围不小于 400 km/h 的要求。

2.1.2 方案设计

本方案系统框图如图 1 所示, 主要由方位模

拟单元、射频收发单元、信号处理单元、数据处理单元等部分构成, 被测高性能毫米波雷达安装于多轴转台上, 接收单元将信号下变频, 经 AD 采集, 根据障碍物参数在数字域进行信号处理, 处理后的信号经 DAC、上变频处理后恢复至 77 GHz 。

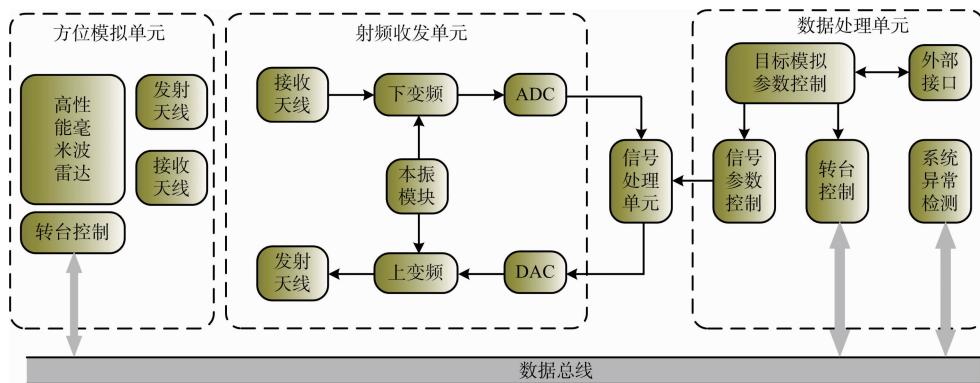


图 1 探测性能测试系统工作框图

其中, 射频接收单元主要完成接收来自毫米波雷达的调频连续波信号, 并实现对射频信号的下变频、滤波。信号处理单元主要完成对数字信号的处理, 通过数据处理单元的信息, 实现延迟、变频、多普勒补偿等功能。射频发射单元主要完成调制后的障碍物模拟回波的发射, 将处理后的数字信号进行数模转换, 并进行上变频、滤波、输出功率精确控制等。数字处理单元主要完成对信号处理单元、方位模拟单元等的控制和调整, 根据上位机单元输入的目标障碍物参数, 分配模拟相应障碍物的控制数据。方位模拟单元主要完成毫米波雷达天线波束宽度的测试, 根据障碍物信息调整毫米波雷达天线波束朝向, 从而模拟障碍物的不同方位。上位机主要完成系统状态显示以及测试过程中的人机交互, 可供用户输入单一测试状态或者连续测试状态。

2.1.3 测试验证

由于雷达测量信号无法直接测量延迟, 因此需在中频范围进行测量。通过信号源输出脉冲调制点频信号, 脉冲周期与雷达测量信号周期一致, 将调制脉冲接至示波器作为触发信号, 将信号输出至中频输入接口, 将中频输出接至示波器另一通道, 通过调成模拟距离, 根据示波器比较触发脉冲与中频输出的延时关系即可验证延时范围及精度。可通过以下方法测试验证: 由信号源产生单

频脉冲信号直接输入模拟器的 DRFM 板, 并将调制脉冲输出接入至示波器, 同时将模拟器 DRFM 板的输出信号接入示波器。

由于模拟器的其他射频部分延时固定, 因此 DRFM 板的延时精度及范围即可认为是模拟器的延时精度和范围。通过调整模拟器模拟距离, 测量输出信号延时最小变化量; 根据信号传输距离和时间关系, 转化为模拟距离的精度和范围。

表 1 距离模拟精度、范围的测试结果

测试项目	时间测量值/ns	转化距离值/m	设计目标/m
精度	0.4	0.06	不大于 0.2
范围	4 000	600	不小于 300

由表 1 可以看出, 距离模拟精度为 0.06 m , 模拟范围为 600 m , 满足探测性能测试系统要求的精度不大于 0.2 m , 最大距离不小于 300 m 的指标要求。

由信号源产生频率范围在 $76\sim81 \text{ GHz}$ 范围内的点频信号, 输出接至频谱仪, 调整目标模拟速度, 即可通过频谱仪验证对应频率变化范围。由信号源产生 77 GHz 的单频脉冲信号输入模拟器, 并将模拟器输出信号接入频谱仪; 调整模拟器模拟速度, 测量输出信号频率变化最小变化量; 调整模拟器模拟速度至最大, 测量输出信号频率变化量; 根据速度与多普勒频率之间的关系, 转化为模拟速度的精度和范围。

表 2 速度模拟精度、范围的测试结果

测试项目	频率测量值/ Hz	转化速度值/ (km·h ⁻¹)	设计目标/ (km·h ⁻¹)
精度	1	0.007	不大于 0.1
范围	100 000	700	不小于 400

由表 2 可以看出,速度模拟精度为 0.007 km/h,速度模拟范围为 700 km/h,满足探测性能测试系统要求的精度不大于 0.1 km/h,最大距离不小于 400 km/h 的指标要求。

2.2 射频基础条件实现

2.2.1 暗室屏蔽效能

微波暗室的屏蔽效能是由屏蔽材料、屏蔽部件及安装工艺多重因素共同作用的结果,选择合适的材料,满足要求的屏蔽、滤波和接地措施,通过合理的安装工艺,可以充分保证暗室的屏蔽效能^[6]。微波暗室的核心指标是反射电平,反射电平大小与暗室设计技术、暗室布局、吸收材料性能及源天线的增益有关。远场天线测试的环境干扰主要是由暗室墙体、转台、源天线支架、受试产品支架等的散射和源天线泄漏引起的。源天线泄漏由铺设在后墙的吸波材料来解决。墙体是暗室的主体,通过铺设合适的吸波材料及合理的材料布局,可使墙体的散射降低到允许的范围。

2.2.2 暗室尺寸计算

对于远场测量,被测天线与测量探头的距离必须足够长,才能满足天线辐射在平面波区域^[7]。因此,被测天线与测量探头的距离是决定暗室尺寸的最为关键的尺寸。但距离越长,暗室的占地面积越大。需要通过周密计算,尽可能以最小的暗室尺寸,获得比较理想的测量效果。

该距离与天线的口径,以及毫米波波长有关,计算公式为 $L \geq \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2D^2 f}{c}$,其中 L 为远场测量距离, D 为测量天线的口径尺寸, λ 为测量频率对应的波长, f 为测量频率, c 为光速。从以上的计算公式中可得知,在远场测量技术中,天线口径尺寸越大,测试频段越高,需要的测量距离越长。最小测量距离的公式为 $L_{\min} = \frac{2D^2 f}{c}$,在满足测量距离 $L \geq L_{\min}$ 的条件下,天线测量误差可以接受。根据现有的汽车毫米波雷达产品,频率为 24 GHz 的

雷达天线口径不超过 8 cm,频段为 76~81 GHz 的雷达天线口径不超过 5 cm,暗室尺寸需覆盖现有的汽车毫米波频率范围及雷达天线口径,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同天线口径下的最小远场测量距离

项目	5 cm 天线口径			8 cm 天线口径			
	测量频率/GHz	24	76	81	24	76	81
测量距离/m		0.4	1.27	1.35	1.02	3.24	3.46

根据以上计算结果,天线暗室的被测件到测量天线探头间的距离应不小于 3.46 m,考虑到被测件安装转台占地空间及测量天线探头的前伸距离,暗室的长度方向尺寸需延长 1.4 m 以上;同时弧形滑轨的尺寸决定了暗室的宽度,雷达在垂直方向的波束宽度以及楼层的内部净高决定了暗室的高度,因此可将暗室尺寸定义为长度 5 m,宽度 4 m,高度 3 m,才能满足测试要求。

2.2.3 暗室静区性能仿真设计

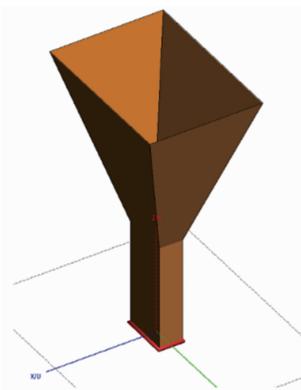
仿真分析计算条件如下:

暗室尺寸:暗室主体 5 m×4 m×3 m($L \times W \times H$);暗室布局:源天线位置距后墙 0.5 m,左右居中,距地面 1.5 m,测试距离 4 m;中心频点:77 GHz;静区尺寸:0.15 m×0.15 m×0.15 m。

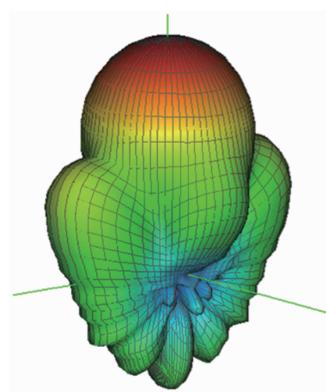
根据要求,制作了作为发射源天线馈源的标准喇叭天线模型,进行其辐射方向图的仿真,其外形、最大增益及半功率波束宽度如图 2 所示。

设定收发天线互耦,暗室吸波材料二次以上反射,转台、导轨及模拟器等设备影响不计人,仿真计算结果如图 3 所示。

经仿真分析,77 GHz 频段下暗室静区反射电平为 -52.76 dB, 小于 -50 dB, 满足设计指标要求。



(a) 标准喇叭天线模型



(b) 3D 天线方向图

图2 增益标准矩形喇叭及其3D辐射方向图

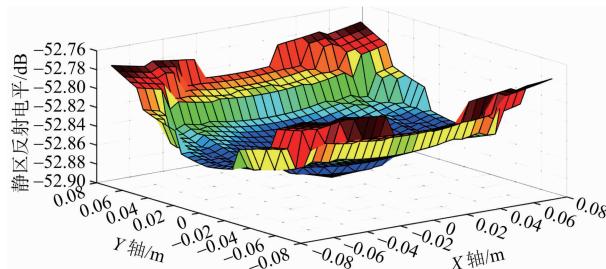


图3 77 GHz 频段下静区电场分布

3 测试系统扩展应用

高性能毫米波雷达探测性能测试系统既是毫米波雷达产品研发的重要保障,又是毫米波雷达批量生产不可缺少的核心设备,同时还是提升产品质量的利器。围绕探测性能测试系统研制过程中关键问题,从理论计算、方案设计到测试验证,分析了基于雷达目标模拟的探测指标实现及验证方法。从暗室屏蔽效能、暗室尺寸计算到暗室静区性能仿真设计,研究了该测试系统射频基础条件的形成过程。

1) 该测试系统具有较强的扩展性。增加频谱仪、信号源、示波器及相关射频组件,可实现对高性能毫米波雷达天线方向图、增益、波束宽度、副瓣电平等无源天线的指标测试,还可实现频率、带宽、调制线性度、相位噪声、射频功率等有源雷达的指标测试。若降低配置,将暗室调整为测试暗箱,暗箱尺寸可参照表3,此时该系统即可用于生产测试。

2) 该测试系统具有较高的兼容性和灵活性。配置不同的射频前端,可兼容当前市场较为流行的24 GHz与77 GHz毫米波雷达探测性能测试。

在多轴转台上加装独立控制的摆臂及射频前端,即可实现双目标测试。

4 结束语

高性能毫米波雷达性能优越,应用范围广,同时产品研制难度较高。无论是军用还是民用毫米波雷达领域,不管在研发还是批量生产环节,均需使用探测性能测试系统。根据《智能汽车创新发展战略》要求,探测性能测试系统为完善高性能毫米波雷达测试评价技术,构建协同开发的智能汽车技术创新体系提供了有效手段。来源于军工领域的毫米波雷达探测性能测试技术,结合智能驾驶、安防雷达、智能家居等民用市场需求,不断进行技术创新,必将为军工研究所的产业发展增加持久动力。

参考文献:

- [1] 李骏,王健安,赖凡. 毫米波片上雷达技术研究进展[J]. 微电子学,2019,49(4):545-550.
- [2] 刘华军,赖少发. 汽车毫米波雷达目标跟踪的快速平方根CKF算法[J]. 南京理工大学学报,2016,40(1):56-60.
- [3] 王然,闫抒升,贺照辉,等. 一种基于半实物仿真的雷达模拟器设计[J]. 空军预警学院学报,2018,32(4):276-279.
- [4] 吴义保. 车载雷达自动测试系统开发[J]. 雷达科学与技术,2018,16(2):221-225.
WU Yibao. Development of Automatic Test System for Vehicle Radar[J]. Radar Science and Technology, 2018,16(2):221-225. (in Chinese)
- [5] 郭剑鹰,丁德峰,陈晓,等. 基于DRFM与DDS的汽车雷达目标模拟器设计[J]. 上海汽车,2018(2):43-46.
- [6] 易鸣镝,王迪. 微波暗室设计研究[J]. 通用电源技术,2012,29(5):128-130.
- [7] 赵雷. 微波暗室静区反射率电平的设计仿真[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.

作者简介:



吴义保 男,1978年出生,安徽枞阳人,硕士,高级工程师,主要从事高性能毫米波雷达研制及产业化工作。