



车载毫米波雷达遮挡物性能标准化 需求研究报告



全国汽车标准化技术委员会电子与电磁兼容分技术委员会
汽车电子标准研究工作组

2025年7月

前　　言

近年来，车载毫米波雷达作为机动车驾驶自动化、环境感知提供辅助手段的无线电定位业务移动电台，随着自动驾驶及高级辅助驾驶的商业化落地，被广泛应用在汽车智能感知领域中。考虑到车辆外观特征和对毫米波雷达的保护，毫米波雷达一般安装在车辆保险杠、车标、格栅或外饰板的后方，这种与毫米波雷达 FOV 相交，影响毫米波雷达收发电磁波的车身结构被称为毫米波雷达遮挡物。毫米波雷达遮挡物的实际物理遮挡必然造成毫米波雷达能量衰减，影响毫米波雷达的探测范围及探测精准度，进而影响自动驾驶汽车的行车安全，因此研究遮挡物对毫米波雷达相关性能影响十分有意义。

在此，衷心感谢参与研究报告编写的各单位、组织及个人。

组织领导：全国汽车标准化技术委员会电子与电磁兼容分会。

参与单位：中国汽车技术研究中心有限公司、南京楚航科技有限公司、深圳引望智能技术有限公司、惠州市德赛西威汽车电子有限公司、中国计量科学研究院、宁波信泰机械有限公司、广州汽车集团股份有限公司平台技术研究院、博世汽车部件(苏州)有限公司、吉利汽车研究院(宁波)有限公司、博莱瑞汽车部件(南通)有限公司深圳市豪恩汽车电子装备股份有限公司、北汽福田汽车股份有限公司、浙江极氪智能科技有限公司、小米汽车科技有限公司、长城汽车股份有限公

司、罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司、是德科技(中国)有限公司、上海保隆汽车科技股份有限公司、武汉理工大学、中国汽车工程研究院股份有限公司、上海机动车检测认证技术研究中心有限公司、深圳市蓉声科技有限公司、立邦涂料(中国)有限公司

主要起草人:武丹丹、楚永彦、张慧、胡月、叶嘉宾、王维龙、路凌云、文清浩、刘攀越、张彬、樊金娜、万丹丹、李瑛鑫、胡永亮、袁海平、谷静、毕永清、侯一卓、宁铁龙、徐天、赵小飞、于飞、王创业、杨晓明、浦实、徐浩、石桦宇、陈欢磊、蒋乾、肖传富、张玉龙。



目录

前 言	I
1 毫米波雷达遮挡物标准化需求研究背景	5
1.1 车载毫米波雷达应用现状	5
1.1.1 自动驾驶政策支撑	5
1.1.2 毫米波雷达应用现状	6
1.1.3 雷达遮挡物应用现状	8
1.2 国内外研究成果	9
1.2.1 毫米波雷达遮挡物系统安装特性研究	9
1.2.2 遮挡物材料电特性分析	10
1.3 遮挡物材料标准应用基础	12
1.4 产业链情况	15
1.5 研究项目的意义	16
2 毫米波雷达遮挡物影响原理	18
2.1 毫米波雷达在车辆上的分布	18
注: 表中信息仅为雷达常见安装信息, 不作为安装位置限制要求。	19
2.2 毫米波雷达遮挡物产品分析	19
2.2.1 ACC 车标	19
2.2.2 格栅	21
2.2.3 保险杠	21
2.3 毫米波雷达发射的电磁波经过遮挡物时的现象	22
2.4 遮挡物基于电磁波入射、反射原理对雷达的影响分析	23
2.4.1 衰减信号降低测试极限距离	23
2.4.2 反射信号对角精度的影响	25
2.5 毫米波雷达遮挡物与雷达间的影响因素	26
3 设计建议及要求	27
4 雷达遮挡物电物理特性要求	30
4.1 单双向传输损耗、反射损耗	31
4.1.1 概念	31
4.1.2 要求	31
4.1.3 测试	31
4.2 介电常数	35
4.2.1 概念	35
4.2.2 要求	36
4.2.3 测试	37
4.3 均匀性	38
4.3.1 概念	38
4.3.2 测试方法	39
4.4 偏转角	39
4.4.1 概念	39
4.4.2 要求	41
4.4.2 测试	42

5 雷达遮挡物结构特性要求	43
5.1 曲率半径	43
5.1.1 概念	43
5.1.2 要求	44
5.1.3 曲率半径的获取方式	45
5.2 最佳厚度	45
5.2.1 概念	45
5.2.2 要求	45
5.2.3 最佳厚度输出方法	46
5.2.4 遮挡物厚度与雷达波衰减的关系	49
5.3 厚度允许公差	50
5.3.1 概念	50
5.3.2 要求	50
5.3.3 最佳厚度允许公差的输出方法:	51
6 雷达系统装配要求	51
6.1 夹角	51
6.1.1 概念	51
6.1.2 要求	51
6.1.3 测试	52
6.2 距离	52
6.2.1 概念	52
6.2.2 要求	52
6.2.3 试验方法	52
7 雷达及遮挡物系统目标识别能力	52
7.1 雷达及遮挡物匹配前后目标识别能力	52
7.2 实车测试	54
8 总结与展望	55
8.1 标准化研究将推动毫米波雷达遮挡物的规范化应用	55
8.2 本报告的研究内容总结	55
8.3 后续工作展望	56
附 录 A (资料性附录) 引用标准文件	57
附 录 B (资料性附录) 术语和定义	59

1 毫米波雷达遮挡物标准化需求研究背景

1.1 车载毫米波雷达应用现状

1.1.1 自动驾驶政策支撑

自动驾驶已成为国家交通战略的重要组成部分，智慧交通的发展为交通强国建设提供了关键支撑。近年来，我国从中央到地方层面陆续出台多项政策，推动自动驾驶技术研发和商业化落地，为车载毫米波雷达的应用提供了强有力的政策保障。

国家层面按节奏推动政策落地，主要包括：《智能汽车创新发展战略》（2020年）：明确提出加速发展高级别自动驾驶，推动智能汽车产业生态建设。《数字交通“十四五”发展规划》（2021年）：强调完善公路感知网络，推进基础设施数字化，并促进车路协同和自动驾驶技术应用。《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》（2023年）：由工信部、公安部等四部委联合发布，明确L3/L4级智能网联汽车的准入和上路试点要求，推动高阶自动驾驶技术验证。《自动驾驶汽车运输安全服务指南（试行）》（2023年）：交通运输部发布，鼓励自动驾驶商用化，规范运输安全服务，加速自动驾驶在物流、客运等领域的落地。《关于进一步加强智能网联汽车产品准入、召回及软件在线升级管理的通知》（2025年）：统筹发展与安全，规范智能网联汽车生产一致性、OTA升级及缺陷召回，防范技术滥用风险。

地方政策加速落地，例如：北京、武汉等地L3级自动驾驶法规（2025年）：两地同步实施自动驾驶条例，允许L3级自动驾驶汽车在特定场景下上路，并明确事故责任划分，为毫米波雷达等传感器的大规模应用提供法律依据。多地智能网联汽车试点（2024年）：上海、深圳、重庆等城市开展智能网联汽车准入试点，推动自动驾驶技术从测试验证向规模化应用过渡。

政策趋势分析：（1）从封闭测试到全域商用化提速，Robotaxi、无人配送等商用化场景渗透率快速提升；（2）责任界定从模糊到法制化，OTA升级监控技术手段升级，武汉、北京等地明确L3级自动驾驶事故责任归属，增强行业信心；（3）车路协同与单车智能并重，政策鼓励“车路云一体化”建设，提升毫米波雷达等传感器的协同感知能力。这些政策不仅加速了自动驾驶技术的商业化进程，也为毫米波雷达的市场需求增长提供了重要驱动力。截止当前，车载毫米波雷达全球市场规模超百亿美元，且逐步从距离、速度参数输出方向全维参量、极限环境的高精度参数输出转变，4D毫米波雷达渗透率快速提升，对毫米波雷达的探测精准度提出更高要求。

1.1.2 毫米波雷达应用现状

毫米波雷达凭借其全天候适应性和精准探测能力，已成为自动驾驶系统的核心传感器之一。相较于其他感知设备（如摄像头、激光雷达），毫米波雷达在恶劣天气（雨雪雾）下仍能保持稳定性能，并可精确测量目标物体的距离、速度和方位角，为自动驾驶决策提供关键数据支撑。

毫米波雷达的技术优势：（1）全天候稳定探测，不受光照、雨雪雾等环境影响，适应复杂气候条件。（2）高精度测速测距，基于多普勒和时延效应，可精确测量目标物体的相对速度及距离。（3）强穿透能力，可探测被部分遮挡的物体（如雾中车辆、低矮障碍物）。（4）成本与可靠性优势：相比激光雷达，成本更低，且更易于车规级量产。

毫米波雷达已广泛应用于L2-L4级自动驾驶系统，典型功能包括：

（1）自适应巡航控制（ACC）：实时监测前车距离与速度，自动调整车速。（2）前向碰撞预警（FCW）与自动紧急制动（AEB）：识别潜在碰撞风险并触发制动。（3）盲点监测（BSD）与变道辅助（LCA）：检测侧后方车辆，避免变道碰撞。（4）交叉路口预警（CTA）与后向横穿预警系统（RTCA）：提升低速场景下的安全性。（5）自动泊车辅助（APA）：结合超声波雷达，实现精准车位识别与泊车控制。（6）行人/自行车检测：通过高分辨率雷达识别弱势道路使用者，降低事故风险。

随着自动驾驶对感知精度的需求提升，传统24GHz雷达逐步被76-79GHz高频段雷达取代，其核心优势包括：（1）更高分辨率，带宽可达4GHz（79GHz雷达），实现厘米级测距精度。（2）更小天线尺寸，适用于紧凑型车载集成（如角雷达、前向雷达）。（3）抗干扰能力更强，减少多车雷达间的同频干扰问题。目前，全球主流车企（如特斯拉、宝马、蔚来）及Tier1供应商（博世、大陆、安波福）均采用76-81GHz方案，推动毫米波雷达向4D成像雷达（增加高程信息）演

进，并与摄像头、激光雷达进行多传感器融合，实现数据互补，进一步满足高阶自动驾驶需求。毫米波雷达凭借其可靠性、成本优势及持续技术升级，仍是自动驾驶感知层不可或缺的组成部分，未来将在L3+级系统中发挥更关键作用。

1.1.3 雷达遮挡物应用现状

毫米波雷达的电磁波传输特性要求其安装在非金属且构造均匀的部件后方，因此保险杠、徽标、格栅、外饰板等位置是毫米波雷达的最佳藏身之处。随着毫米波雷达在辅助驾驶及自动驾驶系统中的广泛应用，传统车身部件被赋予了新的功能使命。保险杠、格栅、徽标等原本仅承担机械防护、散热通风和品牌标识功能的部件，如今需要额外具备射频透波特性，成为毫米波雷达的关键“窗口”。

从固体材料的电物理特性分析，雷达遮挡物的造型、厚度、曲率、漆膜等等参数均会影响毫米波雷达的探测性能。随着毫米波雷达的上车普及，雷达遮挡物材料的电物理特性及影响电物理特性的结构特性越加的受到关注。但是，融合材料、电磁、机械、驾驶自动化等多领域学科的雷达遮挡物，还没有一个能适用多方协调的测试方案，导致毫米波雷达的上车搭载需要车身部件供应商、雷达供应商和整车生产厂商之间进行多轮的设计、仿真、试错，且容易造成在车辆生产后期出现雷达与雷达遮挡物间匹配不达标的问题，该问题极易造成生产模具的报废以及项目延期，进而造成较大的人力物力浪费。总之，随着自动驾驶等级提升，雷达遮挡物正从单纯的机械部件转变为机电一体

化功能件，亟需建立跨行业的协同开发体系和标准化的测试规范，以提升开发效率，降低研发成本。

1.2 国内外研究成果

1.2.1 毫米波雷达遮挡物系统安装特性研究

雷达上车后的探测精准度取决于多种因素，包括硬件方案选型、波形配置及信号处理算法、环境因素等。毫米波雷达根据所需实现的参数目标及功能目标调整硬件方案选型及算法策略，而收发波过程的损耗主要受空气介质传播及各类雷达障碍物损耗。（1）雷达信号在到达目标和反射途中除自由空间衰减外，还会发生由于透射雷达遮挡物材料而导致的两次功率衰减，在雷达检测信噪比门限不变的状态下，功率的衰减大小影响雷达的极限探测距离。（2）环境中底噪的高低同样影响雷达探测性能，信噪比(SNR)低的回波信号，其参数的测量精准度肯定不及 SNR 较高的回波信号。基于信号处理原理，当雷达信号即将被底噪淹没时，就会造成有用信号和无用信号的误区分，易出现误警和漏警。（3）雷达信号在穿透雷达遮挡物时出现的多径传播和失真等效应也会对测量精度产生巨大影响。例如方位角的测量如果不准确，会导致目标出现偏离实际位置的情况：当雷达传感器的角度测量误差仅有 1° 时，会导致 100m 远的目标出现 1.75m 的横向偏移，这一偏移量可能会导致目标被解读为处于另一条车道上。

毫米波雷达遮挡物的影响，多表现为装车匹配后的雷达性能的偏差，其中对于探测距离的影响因素主要是雷达遮挡物的传输损耗，而

传输损耗借鉴固体材料电特性 (D_k 、 D_f) 的成熟研究，当前有一些研究成果输出，但遮挡物对雷达探测精度的影响尚未有可供参考的标准或规程。

1. 2. 2 遮挡物材料电特性分析

微波毫米波频段固体材料介电常数测量方面的研究已经比较成熟，国内外一些高校、科研院所以及公司都研制了一些材料宽频介电常数测量装置，并根据介电常数测量结果推算雷达遮挡物材料及最佳厚度，实现雷达遮挡物样品的规划仿真设计。然而不同机构测量结果的一致性较差，需要建立相应的国家或行业标准以及计量规程规范，以保证测量值的准确可靠和有效溯源。近年来国内外计量机构开展了相关标准测量装置的研制工作。比如，英国国家物理实验室基于波导耦合谐振腔法建立了覆盖至 140GHz 的材料介电常数计量标准；日本计量院近两年研制了平衡式圆盘谐振腔装置实现 (10–170) GHz 的材料毫米波介电常数精密测量。中国计量院基于电容法、自由空间法和准光谐振腔法建立了 100MHz–220GHz 材料介电常数计量标准装置，形成了国际互认的校准与测量能力。基于上述不同的测量原理和测量方法，国内外先后制定了很多项国际、国内标准和规范。如表 1、表 2 所示，分别列举了材料介电特性测量方面的国内标准规范、美国 ASTM 试验标准以及 IPC 国际电子行业标准。

表 1 国内材料介电常数测量标准、规范

序号	标准号	标准名称
1	GB/T 7265.1-1987	固体电介质微波复介电常数的测试方法 微扰法
2	GB 7265.2-1987	固体电介质微波复介电常数的测试方法 “开式腔”法
3	GB/T 12636-1990	微波介质基片复介电常数带状线测试方法
4	GB/T 5597-1999	固体电介质微波复介电常数的测试方法
5	SJ/T 10142-1991	电介质材料微波复介电常数测试方法 同轴线终端开路法
6	SJ/T 11043-1996	电子玻璃高频介质损耗和介电常数的测试方法
7	SJ20512-1995	微波大损耗固体材料复介电常数和复磁导率测试方法
8	JJJF(军工)170-2018	微波频段介质复介电常数和复磁导率校准规范
9	GB/T 42741-2023	固体材料使用自由空间法的电磁参数测量方法
10	JJJF 2020-2020	固体电介质材料复介电常数测量方法

表2 美国ASTM材料介电常数试验标准

序号	标准号	标准名称
1	D150-11	AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation
2	A893-03	Complex Dielectric Constant of Nonmetallic Magnetic Materials at Microwave Frequencies
3	D924-15	Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical insulating Liquids
4	D1082-00	Dissipation Factor and Permittivity (Dielectric Constant) of Mica
5	D1531-01	Relative Permitivity (Dielectric Constant) and Dissipation Factor by Fluid Displacement Procedures
6	D2149-13	Permittivity (Dielectric Constant) and Dissipation Factor of Solid Ceramic Dielectrics at Frequencies to

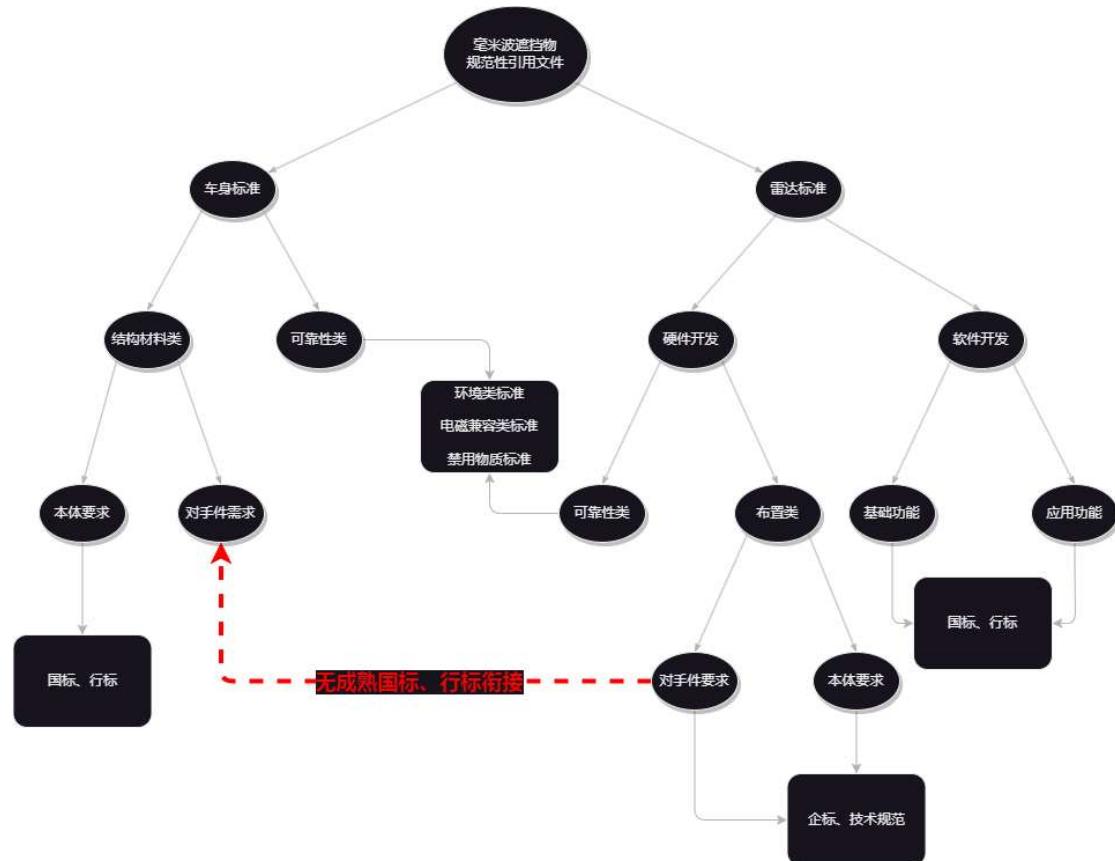
		10 MHz and Temperatures to 500°C
7	D2520-13	Complex Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials at Microwave Frequencies and Temperatures to 1650°C
8	D3380-14	Relative Permittivity (Dielectric Constant) and Dissipation Factor of Polymer-Based Microwave Circuit Substrates
9	D4935	Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials
10	D5568-14	Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies Using Waveguide
11	D6343-14	Thin Thermally Conductive Solid Materials for Electrical Insulation and Dielectric Applications
12	D7449-14	Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies Using Coaxial Air Line
13	D7698-11a	In-Place Estimation of Density and Water Content of Soil and Aggregate by Correlation with Complex Impedance Method

1.3 遮挡物材料标准应用基础

毫米波雷达遮挡物的材料主要是由纤维增强复合材料及夹层材料组成。由于制造雷达罩所用材料的介电性能对后续的电气性能设计及其生产工艺将产生根本的影响，并直接决定雷达罩体的介电性能，材料的选择显得异常重要。通常来说，用于制造地面雷达罩所用的理想材料应具备以下性能：①可在多波段下使用；②优良的电气性能，

具有高透波率和低的反射率及吸收率、介电常数小、损耗角正切值小；③足够的强度与韧性；④优良的耐候性能；⑤具有良好的工艺性、可生产性和经济性。然而，正如雷达设计的众多指标一样，目前还不能找到一种材料能同时满足以上要求，只能根据实际情况选取适当的材料以满足最主要的性能，同时尽量兼顾其他性能。

毫米波遮挡物的规范性引用文件标准，需综合考虑雷达遮挡物与雷达间的匹配安装过程（见图1），这就涉及到毫米波雷达开发、及车身设计标准的方方面面。



毫米波雷达在开发及导入生产过程中，基于国标、行标等现存发布标准和雷达选型的技术规范，会总结形成一套适用于本企业开发的

标准要求，通常分为硬件开发和软件开发。软件开发包含基础功能和应用功能，硬件开发标准引用情况见表3。

表3 毫米波雷达遮挡物硬件管理标准列表

项目分类			应用标准
硬件 开发	布置类	本体要求	企标、技术规范 保险成技术要求及试验方法、 汽车外部主标字牌技术要求及试验方法、 外饰真空镀膜零件技术要求及试验方法、 外饰烫印零件技术要求及试验方法、 外饰塑料喷涂零件技术要求及试验方法、 外饰塑料镀铬零件技术要求及试验方法、 外饰无表面处理塑料零件技术要求及试验方法 GB/T 250 纺织品 色牢度试验、 GB/T 1733 漆膜耐水性测定法、 GB/T 1740 漆膜耐湿热测定法、 GB/T 漆膜厚度测定方法、 GB/T 9754 色漆和清漆的测定、 ISO 2409 色漆和清漆 交叉切割试验
			企标、技术规范（布置距离、安全间隙、倾角、曲率、材料电特性、厚度等因素）
	可靠性 类	环境类标准	ISO 16750 道路车辆-电子电气零部件环境条件和环境、 IEC 60068 环境试验、 ISO 20653 道路车辆-外壳防护等级
			GB/T 6113.104 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范、 GB/T 车辆电磁场对于人体暴露的测量方法、 ISO 7637 道路车辆 由传导和耦合引起的电骚扰、 GB/T 11452 道路车辆 电气/电子部件对窄带辐射电磁能的抗扰性试验方法、 ISO 10605 道路车辆 电气/电子部件对静电放电抗性的试验方法、 ECR R10 关于车辆电磁兼容性认证的统一规定、 CISPR 车辆、船和内燃机 无线电骚扰特性
		禁用物质类 标准	GB/T 1844 塑料、 ISO 1043 塑料、 GADSL 全球汽车申报物质清单、 CAMDS 填报指南、 GB/T 26989 汽车回收利用术语

注：车身开发及智驾开发中包含但不限于上述标准。

针对车身开发中的手板件需求部分，需要接收毫米波雷达的开发需求输入和设计参数需求输入，在本体开发要求的基础上，会额外接受关于布置距离、安全间隙、倾角、曲率、材料电特性、厚度等指标要求，以满足毫米波雷达开发和应用对于透波、反射和损耗的要求。

基于现有且广被接受的工作模式，车身部件厂商在设计及导入生产开发阶段，相关的参数指标接收主机厂的输入，而对应输入信息则需要主机厂基于雷达厂家在仿真、实物测试后的结果进行获取，此链路传递过程中，应没有被广泛接受和认可的国标、行标作为参考依据，常常出现需求与验证不一致、信息不畅、规范不对称的问题，导致设计输入不完整、样件提供时机晚、整车验证周期被拉长、设计状态遮挡物厚度设变调整、设计状态遮挡物喷漆调整等重复工作，造成极大的资源浪费、冗余的沟通成本和上涨的开发成本。

基于上述模式和问题，需要在行业内明确遮挡物要求和对应试验测试方法，形成统一的标准化要求，规范整条开发链路上各环节的设计、开发和生产依据，助于主机厂、雷达厂家、车身部件厂家的协作沟通，进一步优化遮挡物开发乃至整车开发流程。

1.4 产业链情况

随着汽车科技的飞速发展，车载毫米波雷达已成为驾驶自动化领域的重要组成部分，众多国内外企业纷纷布局该领域，包括传统汽车零部件供应商、新兴科技公司等。

车载毫米波雷达产业链上游主要包含毫米波雷达芯片、元器件、材料等制造商，产业链中游即车载毫米波雷达制造商，产业链下游主要包括汽车厂商与系统集成商。

对于雷达遮挡物来说，产业链上游即材料供货商，产业链中游为车身透波部件生产厂商，例如保险杠、徽标、栅格、侧饰板等生产厂家，产业链下游即主机厂。

毫米波雷达制造商负责雷达的设计、生产与销售，其中芯片的选择、天线的排列和软件算法等是毫米波雷达产品的重要影响因素；汽车是车载毫米波雷达的应用端，根据汽车环境对雷达进行合理的安装和遮挡，良好的集成到汽车系统中，提升车辆的驾驶自动化能力。

毫米波雷达与雷达遮挡物之间的匹配：毫米波雷达厂商与车身部件厂商同为产业链中游，为主机厂供货，不存在上下游关系，故参数匹配无法直接沟通，需经主机厂转达，存在信息差。

1.5 研究项目的意义

随着驾驶自动化技术的普及，毫米波雷达在汽车上的应用越来越广泛。为了保护毫米波雷达并改善车辆外观，通常会将其安装在车辆内部，这使得终端用户无法从外观上察觉到毫米波雷达的存在。然而，由于毫米波雷达需要发射和接收电磁波才能正常工作，车身结构会对其造成一定的影响。

毫米波雷达前方遮挡物越来越多样化，如前雷达前端遮挡物为带油漆前保或发光LOGO，而非常规的非喷涂格栅，对于众多主机厂、雷达制造商以及车身部件制造商都缺乏对应的经验。为尽可能降低该遮

挡物对毫米波雷达性能的影响，毫米波雷达厂商会提出对该遮挡物的要求，这些要求包含：约束毫米波雷达遮挡物与毫米波雷达之间的位置关系，约束毫米波雷达遮挡物的几何特性，约束毫米波雷达遮挡物的电物理特性。

当前主要的痛点在于：

- a. 不同毫米波雷达厂商对于毫米波雷达遮挡物的要求不同，车身部件制造商在生产产品时无法获知匹配雷达型号、位置及FOV等参数；
- b. 毫米波雷达遮挡物测试由主机厂统筹，要求来自雷达制造商，生产参数由车身部件制造商调整，两方均为测试执行方，测试方案及结果存在偏差，参数匹配流程各家不同，匹配参数与车身部件生产参数间存在信息差；
- c. 毫米波雷达遮挡物属于汽车外观件，在基于外观优先的前提下难以满足部分毫米波雷达厂商对于遮挡物的要求；
- d. 毫米波雷达遮挡物一般在整车开发后期才接近量产状态，若此时才发现毫米波雷达遮挡物对毫米波雷达性能的影响过大，将难以更改。

上述这些痛点会造成下述连锁反应：

- 1) 因各家毫米波雷达厂商对于毫米波雷达遮挡物的要求、测试方法或通过标准不同，当毫米波雷达遮挡物某些指标无法满足供货毫米波雷达厂商的要求时，毫米波雷达遮挡物相关负责人总会挑战为何其他某些毫米波雷达厂商没这类要求或者要求没这么高，导致最终在设计层面，无法按照毫米波雷达厂商的要求约束毫米波雷达遮挡物。

2) 当毫米波雷达遮挡物接近量产状态，搭载实车测试发现一些性能缺陷，而这些性能缺陷是由毫米波雷达遮挡物引起的，往往已经无法轻易调整毫米波雷达遮挡物，最终整车厂不得不在时间、成本、性能上做出权衡和取舍。

本项目旨在从毫米波雷达底层工作原理出发，研究毫米波雷达遮挡物如何对毫米波雷达性能产生影响。继而制定一套统一的标准，用以规范为确保毫米波雷达性能，对于毫米波雷达遮挡物的基本要求，同时该标准应包含对这些基本要求的测试方法以及通过条件。

统一对毫米波雷达遮挡物的要求及测试方法：

- 1) 将有助于从设计层面正确约束毫米波雷达遮挡物，避免毫米波雷达厂商提出过高的约束条件，或者毫米波雷达遮挡物负责人实施过低的约束条件；
- 2) 将有助于在整车开发的前中期识别毫米波雷达遮挡物对毫米波雷达性能的影响，避免后期识别难以调整。

2 毫米波雷达遮挡物影响原理

2.1 毫米波雷达在车辆上的分布

目前基于整车外部感知搭载实际需求，毫米波雷达按照布置区域划分，可分为前向、后向雷达、侧前角雷达、侧后角雷达、脚踢雷达、顶部雷达（敞篷车车顶避撞、开门）、侧向雷达（用于避撞场景），以覆盖各场景下的感知信息，具体信息见表 4。

表 4 雷达与雷达遮挡物的布置关系

布置位置	遮挡物形态	雷达	
格栅后方布置	遮挡物主要以注塑件为主，常规材料包含 PP、PP+EPDM、PMMA、ASA 等，通过表面工艺处理，可在不增加金属粉末的基础上，实现高亮喷涂，以达到与车身色的外观统一	前向雷达/ 后向雷达	
车标后方布置	遮挡物主要以可穿透毫米波的注塑车标为主，可通过多次印刷实现显色，部分车标选型可内嵌 PCB 板以支持发光，表面处理以电镀和涂装为主	前向雷达/ 后向雷达	
保杠本体布置	遮挡物主要以带喷涂的保杠为主，基材以 PP 材料为主，根据造型色彩定义和喷涂工艺实绩，对应的金属粉含量略有差异，对于毫米波雷达的探测性能有所影响	前向雷达/ 后向雷达/ 侧前角雷达 /侧后角雷 达/脚踢雷 达	
外饰板	下护板布置	遮挡物主要以注塑件为主，常规材料包含 PP、PP+EPDM、PMMA、ASA 等，通过表面工艺处理，可在不增加金属粉末的基础上，实现高亮喷涂，以达到与车身色的外观统一	前向雷达/ 后向雷达/ 侧前角雷达 /侧后角雷 达
	饰板布置	遮挡物主要以注塑件为主，常规材料包含 PP、PP+EPDM、PMMA、ASA 等，常布置于车顶饰板处	顶部雷达
	门板布置	遮挡物主要以带喷涂的车门为主，基材以钣金材料为主，根据造型色彩定义和喷涂工艺实绩，对应的金属粉含量略有差异，对于毫米波雷达的探测性能有所影响	侧向雷达

注：表中信息仅为雷达常见安装信息，不作为安装位置限制要求。

2.2 毫米波雷达遮挡物产品分析

2.2.1 ACC 车标

前向雷达主要是检测车辆正前方的物体，因此需要安装在车辆正中间位置，车标是常见的集成毫米波雷达的车上部件，这种集成毫米波雷达的车标也就是我们常说的ACC车标。一般主机厂对ACC车标性能要求：（1）良好的金属质感；（2）优选PC、PP等介电常数小的材料，利于透波；（3）表面平滑，厚度均匀，最好为半波长的整数倍，减少雷达衰减；（4）具有较好的防水以及耐候性；（5）具有一定的强度，利于防撞保护。

当前ACC车标通常包含常规ACC车标、发光ACC车标和带加热功能的ACC车标，这些车标需兼顾品牌辨识与雷达透波，通常通过选取低介电材料（PP、PC）以及改用非金属真空镀膜或透明导电涂层（ITO）替代金属涂层，同时通过渐变壁厚设计（半波长整数倍）以及多层复合涂层进行结构优化，减少不同入射角的信号衰减，通过雷达可调支架设计，精准调节雷达安装位置及角度，确保长期透波稳定性。

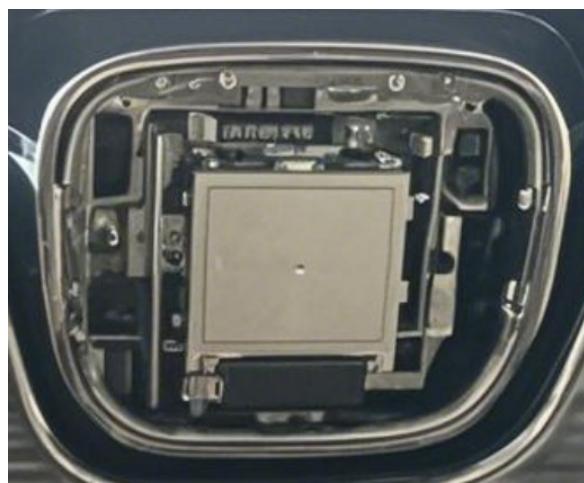


图2 ACC车标与雷达匹配图

2.2.2 格栅

格栅主要用于发动机散热，但毫米波雷达安装位置（中网）要求其不影响雷达透波性能。装配有毫米波雷达的格栅通常选取低介电塑料（PP/PE 改性材料），兼顾机械强度与透波性；或者发泡树脂，兼具低介电和隔热性，适用于带融雪加热器的格栅。兼顾透波性能的格栅通常采用非对称蜂窝结构，优化开孔率，减少信号反射，避免形成电磁波谐振腔；部分格栅集成有加热器以融化格栅表面积雪，确保雷达探测稳定性能。



图 3 格栅与雷达匹配图

2.2.3 保险杠

保险杠是毫米波雷达的主要安装位置，在辅助驾驶及自动驾驶时代，汽车保险杠已从单纯的安全防护部件，升级为兼顾碰撞保护与雷达信号传输的复合型载体，需满足碰撞安全+透波性能双重需求。这种保险杠材料上主要由改性PP主导，且严格控制碳纤维、玻璃纤维含量，使得保险杠的韧性及透波性能达到平衡。且该类保险杠一般采取半波长整数倍壁厚设计，局部减薄，雷达可内嵌在保险杠内，或保险杠内增加吸波泡沫，减少雷达杂波。

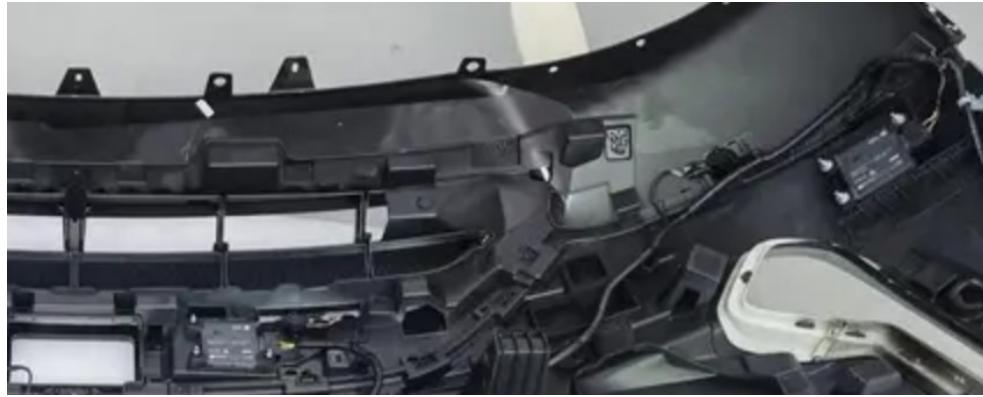
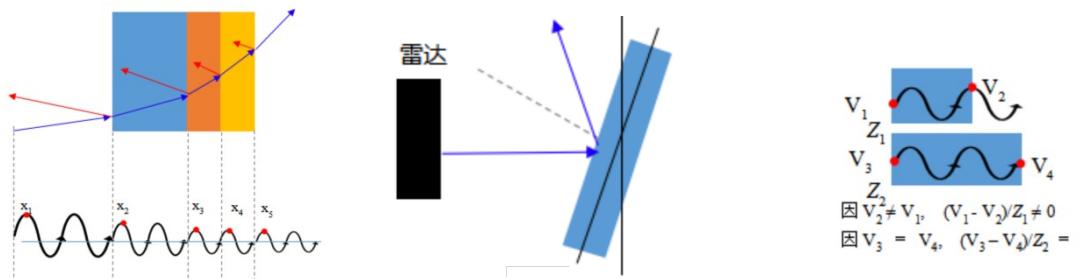


图4 保险杠与雷达匹配图

2.3 毫米波雷达发射的电磁波经过遮挡物时的现象

遮挡物的材质通常一般不会采用纯导体结构，电磁波在经过遮挡物后，不仅会产生反射，电磁波还会透过遮挡物，在遮挡物中传播时存在折射、损耗等现象，如图 5(a) 所示。为简便分析，此处电磁波的反射路径和折射路径忽略二次反射或多次反射，并假设所有材料的成分分布均匀、平整。



(a) 电磁波的传播路径 (b) 遮挡物带倾角的反射图 (c) 遮挡物厚度与交界面压差关系

图5 电磁波在遮挡物中的传播图

(1) 当电磁波从天线发射后，会在空气中进行扩散传播。当电磁波遇到遮挡物后，由于传播介质的改变，在空气和遮挡物相连的边界处会产生反射现象，材料平整光滑时，电磁波的入射角等于反射角。

为避免反射波反射至原发射天线，导致产生虚警，通常遮挡物表面与天线阵面会存在一定的倾角如图5(b)所示。

(2) 因为遮挡物材料本身产生的感应电场不足以抵消折射进来的电场，同时由于不同介质导致的电磁波传播速度的改变，部分电磁波会以最短耗时路径的折射角度方向在遮挡物内部以一定的能量衰减趋势继续传播，传播时 $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_5$ 的振动幅度会逐步降低，如图5(a)所示。根据电磁波的传播特性，折射的角度和材料的介电常数DK强相关，产生的能量衰减和电介质的损耗DF强相关。为减小折射导致的方向变化，通常要求材料的介电常数DK越小越好。为减小传播时的损耗，通常要求传输损耗DF越小越好，此外由于损耗还和感应电流相关，若遮挡物的厚度为半波长时，遮挡物两个表面产生的感应电动势相同，则遮挡物内部产生的感应电流最小，所以通常要求遮挡物的厚度为对应介质波长的二分之一的整数倍，如图5(c)所示。

(3) 若电磁波继续传播至底漆和喷漆涂层时，电磁波也会再次出现反射和折射，然后传播至空气介质中，最终到达待测目标。在实际的喷漆涂层和底漆中，通常含有非均匀分布的金属粒子，电磁波会产生复杂的多次反射，对电磁波的传输影响较大，因此还需要严格限制喷漆的材质、层数、厚度。

2.4 遮挡物基于电磁波入射、反射原理对雷达的影响分析

2.4.1 衰减信号降低测试极限距离

根据雷达方程原理可得到，雷达参数与目标距离之间存在如下的

数学关系式。

$$R_{max} = \left(\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B F_n (SNR)_0} \right)^{1/4}$$

P_t: 雷达的发射功率 (W) ;

G_t: 发射天线增益 (dB) ;

G_r: 接收天线增益 (dB) ;

(SNR)₀: 雷达最小可检测目标的信噪比;

σ: 雷达散射截面积 (RCS, m²) ;

R_{max}: 最大可探测距离 (m) ;

k: 玻尔兹曼常数 (1.38×10⁻¹³J/K) ;

T₀: 系统噪声温度 (K) ;

B: 雷达接收机带宽 (Hz) ;

F_n: 噪声系数。



其中雷达的发射功率为雷达用于探测的有效发射功率，由于雷达遮挡物的遮挡，导致雷达回波功率降低，即雷达的有效发射功率降低，以 L 代表传输损耗，则功率损耗因子为 10^{-L/10} (dB 转线性比例)，将上述公式迭代为：

$$R_{max,new} = \left(\frac{P_t \cdot 10^{-L/10} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B F_n (SNR)_0} \right)^{1/4}$$

即

$$\frac{R_{max,new}}{R_{max}} = (10^{-L/10})^{1/4} = 10^{-L/40}$$

例如雷达遮挡物传输损耗为 6dB (双路损耗)，则雷达的有效发射功率降低至原来的 10^{-6/10} ≈ 0.25 倍，距离降至原来的

$10^{-6/40} \approx 0.71$ 倍。若雷达可探测距离为 200m，前方安装有 6dB 传输损耗的遮挡物后，雷达探测距离减少至 142m。

表 5 最大作用距离与雷达遮挡物损耗的关系参考表

雷达遮挡物损耗（双路）	雷达最大探测距离
L (dB)	Rmax
0.5	97.2%
1	94.4%
2	89.1%
3	84.1%
4	79.4%
5	75.0%
6	70.8%
7	66.8%
8	63.1%
9	59.6%
10	56.2%
15	42.2%
20	31.6%

2.4.2 反射信号对角精度的影响

毫米波雷达位于遮挡物后方，遮挡物对雷达信号的反射会通过多种机制影响角度测量精度。

(1) 多径反射导致的相位畸变：毫米波雷达通过接收天线间的相位差 $\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda}$ 计算目标角度（ Δd 为目标到不同天线的距离差）；当保险杠反射信号与目标回波叠加时，会引入额外的相位差，导致雷达误判目标方位角。

(2) 信号衰减与信噪比（SNR）下降：保险杠的透射衰减（典型总损耗 60%）会降低有效信号功率，导致信噪比下降，根据雷达方程：

$$SNR = \frac{P_t G_t \sigma 10^{-L/10}}{(4 \pi R^2)(4 \pi R^2)} \left(\frac{\lambda^2}{4 \pi} \right) \frac{1}{(kT_0)(BF_n)}$$

当雷达前存在遮挡物时损耗增加，导致信噪比降低。通过实测可知角度误差随着 SNR 的降低而增大。

(3) 由于遮挡物的存在，电磁波在遮挡物上发射反射、多次反射的现象，从而在近距离会出现较多的虚警点，导致雷达产生误报，影响近距离目标测角精度。

2.5 毫米波雷达遮挡物与雷达间的影响因素

由于毫米波雷达通常安装于遮挡物内侧，且遮挡物表面需附着多层涂层，雷达在内部以特定角度和距离布设时，电磁波会发生复杂的反射、折射现象。综合其安装特性、电物理特性及结构特性，现将遮挡物影响因素系统归纳如表6所示。

表6 影响毫米波雷达电磁波在遮挡物中传播的因素

影响电磁波特性的因素

雷达安装 特性	安装精度	雷达安装在车体上的水平角精度
		雷达安装在车体上的俯仰角精度
		雷达安装在车体上的滚转角精度
	安装的空间	雷达安装在车体上相对地面的高度
		雷达与车体的安装角度
	FOV避让角	雷达的水平避让角度
		雷达的垂直避让角度
	安装距离	雷达与遮挡物间的距离
	安装夹角	雷达与遮挡物间的水平夹角
		雷达与遮挡物间的垂直夹角
遮挡物电 物理特性	基材	遮挡物基材介电常数
		遮挡物基材传输损耗
		遮挡物基材反射损耗
		遮挡物基材厚度
	漆材	遮挡物漆层介电常数
		遮挡物漆层层数
		遮挡物漆层厚度
		重复喷漆厚度
遮挡物结 构特性	曲率	遮挡物的曲率半径
	光滑度	遮挡物的光滑度

3 设计建议及要求

毫米波雷达在汽车辅助驾驶及自动驾驶系统中承担关键感知任务，但其性能易受遮挡物（如保险杠、雷达罩等）的材料、结构及安装方式影响。结合行业标准、工程实践及技术研究，从遮挡物常见选材、整车造型设计以及遮挡物性能匹配角度，总结毫米波雷达遮挡物的设计建议及要求。

雷达遮挡物基材需具备良好的电磁波透过性和机械性能。常用的基材材料包括聚碳酸酯（PC）、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（ABS）及其合金材料。聚碳酸酯具有较高的抗冲击强度和良好的耐热性，其介电常数在 2.8-3.1 (76GHz-77GHz) 之间，能有效减少对电磁波的吸收与反射；ABS 材料则具有优异的成型加工性能，介电常数约为 2.4-3.0 (76GHz-77GHz)。在实际应用中，常采用 PC/ABS 合金材料，一般 PC 与 ABS 的比例在 6:4 至 7:3 之间，该比例下的合金材料既能保证良好的电磁波透过性，又具备出色的机械强度和耐候性，满足汽车使用环境要求。

雷达及雷达遮挡物的匹配贯穿整个车辆制造过程。在整车造型设计阶段，需充分考虑毫米波雷达的安装需求与遮挡物特性。为减少电磁波传播干扰，应避免在雷达 FOV 照射范围区域内避免过于复杂尖锐的造型，防止因遮挡物几何形状引发电磁波非均匀反射与衍射效应。例如，将雷达 FOV 照射范围区域的车身线条设计得相对平滑，减少锐角与凸起。同时，需预留合理的安装空间，保证雷达能以最佳角度和距离安装，一般安装角度偏差应控制在 $\pm 2^\circ$ 以内，安装距离需根据雷达探测范围与性能要求进行精准规划，避免因距离过近或过远导致

信号传输损耗过大或反射强度异常。此外，还应结合遮挡物的多层次需求，在造型设计时考虑涂层厚度对整体外观的影响，确保美观与功能的平衡。

除上述在整车设计层面考虑、仿真、推算遮挡物造型结构及电物理特性外，还需在部件选取及整车组装过程中进行实物的匹配测试。在零部件采购环节，需先对雷达遮挡物生产过程中的板材特性进行测试配比，再对雷达和遮挡物进行单独的性能检测与质量把控，确保雷达的探测精度和遮挡物的电物理及结构性能符合设计要求。在组装阶段，要按照既定的安装角度和距离将雷达准确安装在遮挡物内侧，可采用高精度的定位工装辅助安装，安装完成后进行初步的信号检测，检查电磁波在遮挡物内部的传播情况是否正常。然后，将安装好雷达的遮挡物集成到整车相应位置，进行整车环境下的联合调试，通过实际道路测试和模拟场景测试，验证雷达在不同工况下的性能表现，根据测试结果对遮挡物的安装或参数进行微调，直至雷达性能达到最优状态。雷达遮挡物在整车制造过程中的匹配流程图如图 6 所示。

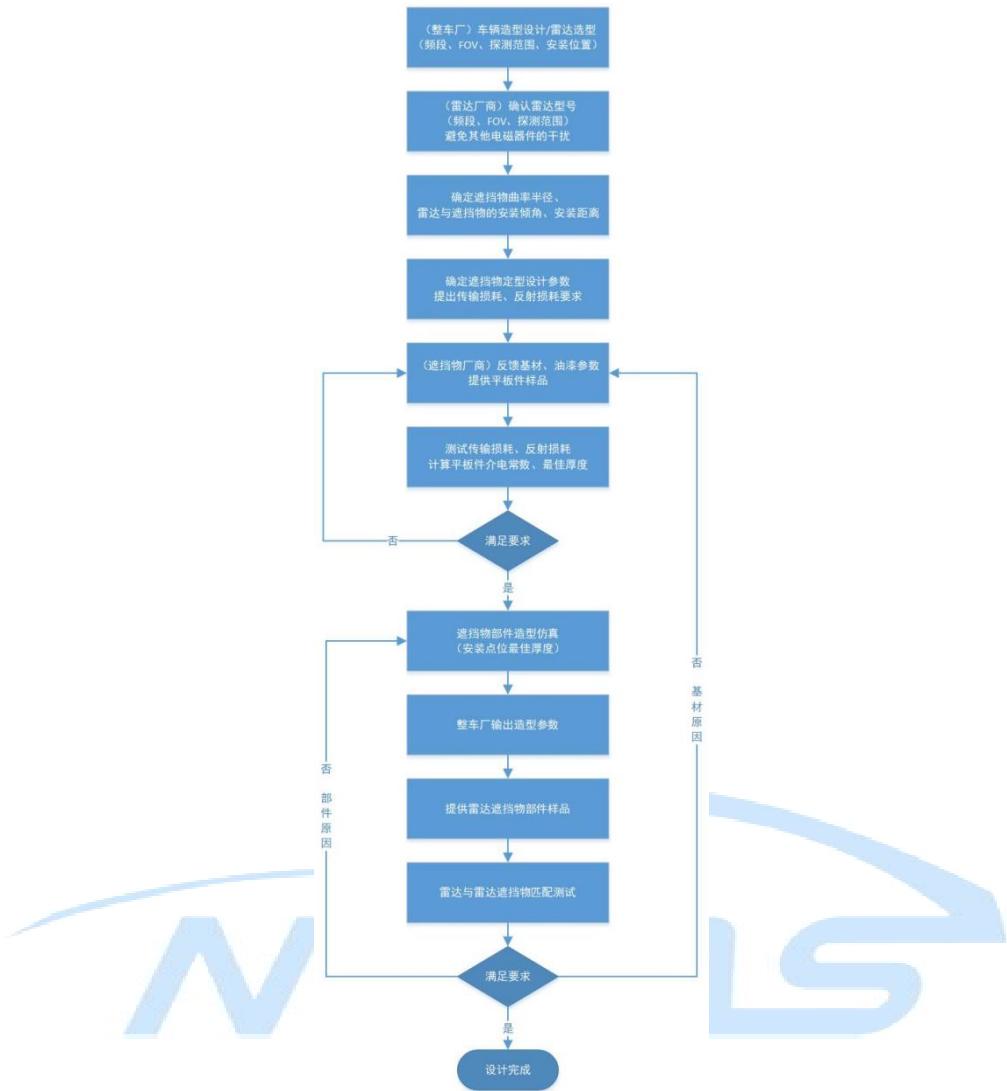


图 6 雷达遮挡物性能匹配流程图

4 雷达遮挡物电物理特性要求

基于汽车外观造型设计考虑，车载毫米波雷达大多配置安装在雷达遮挡物（格栅、保险杠及车标）的背后。汽车零配件厂商生产的保险杠和车标产品通常包括多层涂层和金属漆面，会对毫米波信号产生不可忽略的衰减。在车标和保险杠的设计阶段，需要提前对每一层材料的介电常数和损耗角正切进行准确测量，以便于电磁仿真对材料类型和厚度进行优化。此外，车标和保险杠几何形状的局部厚度变化，

也会对毫米波雷达射频性能造成严重影响。因此为了确保毫米波雷达的可靠性，必须对雷达遮挡物的综合电物理特性（如材料单向和双向传输损耗、反射损耗、介电参数、电厚度均匀性以及偏转角）进行测试，以评估其对毫米波雷达性能的影响。

4.1 单双向传输损耗、反射损耗

4.1.1 概念

单向传输损耗是由毫米波雷达发射的电磁波从遮挡物一侧穿透至另外一侧的功率损耗（对数差值）。

反射损耗是指毫米波雷达发射的电磁波经由遮挡物阻挡，反射波与入射波之间的功率差值（对数差值）。

4.1.2 要求

单向传输衰减在雷达视场角范围内小于 1.5dB，反射损耗小于 -10dB。

4.1.3 测试

测试样品（雷达遮挡物或样板）尺寸越大越好，如果受测试环境大小限制，如图 7 所示，至少保证 d1 和 d2 尺寸均不小于 5 倍雷达工作中心频率波长距离（推荐样品尺寸不小于 100mm*100mm），且不小于雷达最大探测角度覆盖范围。

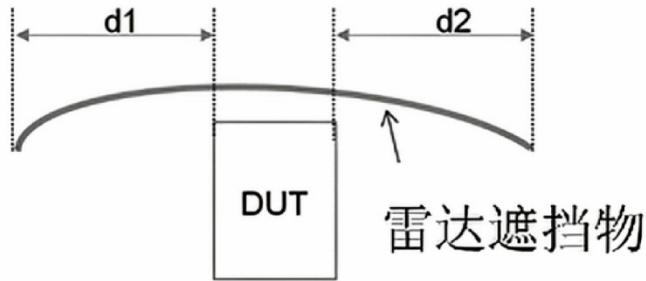


图 7 雷达带保险杠装配俯视图

测试方法：采用自由空间法对雷达遮挡物的传输和反射损耗，测试布置如图 8 所示，采用一对收发天线或配合反射面和介质透镜，经过空口的 GRL 或 TRL 双端口校准后，测量得到样片的单向传输损耗和反射损耗。。

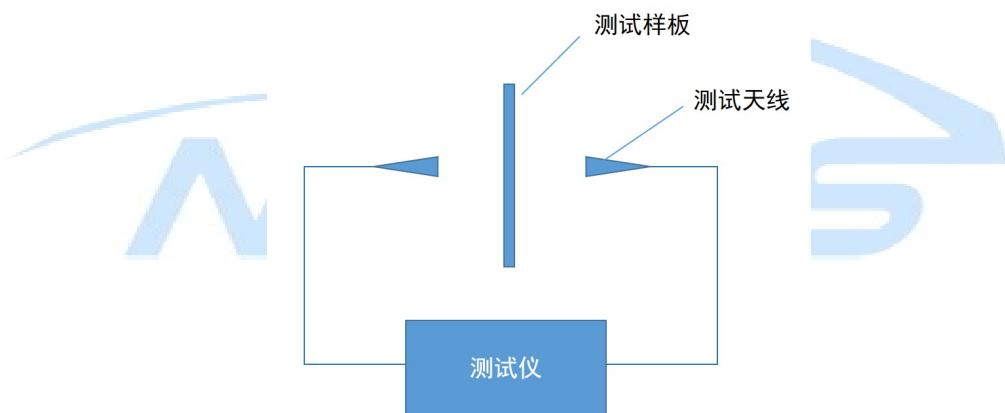


图 8 自由空间法测量系统

(1) 单路传输损耗

利用网分或功率测试设备进行收发天线间不同角度且天线口径相对的链路校准；安装雷达遮挡物，测试带雷达遮挡物时的 S21；对网分测试天线进行转动，即可测得雷达遮挡物在不同角度的单路损耗

(2) 双路传输损耗

利用单向传输损耗的正向及反向测试，结果之和即为双路传输损耗。或者收发天线设置在遮挡物同侧，利用远端反射面（角反射器）或 RTS（雷达目标模拟器）反射信号，测量有无遮挡物的 S21，移动反射面或 RTS 扩频前端在不同的角度，且辐射口径面对准接收天线，即可测得雷达遮挡物在不同角度的双向传输损耗。

（3）反射损耗

收发天线设置在遮挡物同侧，利用近端遮挡物表面反射信号，测量有无遮挡物下雷达主瓣探测角度范围内的 S21，即可测得雷达遮挡物的反射损耗。

单双向传输损耗通常指雷达波穿透材料后的衰减关系，这里包括了材料层的反射损耗和吸收损耗之和。定义入射波、反射波、透射波功率分别为 P_{inc} 、 P_{ref} 、 P_{tra} 。单向传输损耗是由雷达模块一侧到车标灯外侧的功率损耗，计算公式为

$$TL(\text{dB}) = 10 * \lg\left(\frac{P_{inc}}{P_{tra}}\right)$$

双向传输损耗为

$$TL_{(BiD)} = TL_{12}(\text{dB}) + TL_{21}(\text{dB})$$

反射损耗通常指经由材料阻挡，反射波与入射波之差，计算公式为

$$RC(\text{dB}) = 10 * \lg\left(\frac{P_{ref}}{P_{inc}}\right)$$

毫米波雷达的反射损耗的平均值包括 76–77GHz 频段范围内采样点、以及所有方位角测得值的算数平均值。此外雷达遮挡物的反射损耗及

失配，会在靠近传感器位置产生干扰信号，从而降低雷达探测灵敏度。

雷达遮挡物的传统测试方法主要包括使用反射损耗测量仪进行实测和基于计算机仿真的方法。反射损耗测量仪通过将雷达信号传输到遮挡物上并测量其反射回来的信号强度，可以计算出反射损耗。传统的反射损耗测量仪通常使用定向天线，以特定角度和频率发射雷达信号，并通过接收反射的信号来测量材料的反射损耗。测量得到的反射损耗可以用于评估材料对雷达信号的衰减程度。计算机仿真方法是通过数学模型和计算机算法模拟雷达信号在遮挡物上的传播和衰减过程。可采用全波电磁仿真工具 ANSYS HFSS 对车标透射和反射性能进行验证。HFSS 是基于麦克斯韦方程组和有限元算法求解 3D 电磁场问题的通用商业工具，因其求解精确、易于建模等优点，被广泛应用于众多行业^[8]。这种方法可以用于评估遮挡物的反射特性，包括反射损耗和散射参数等。在仿真过程中，需考虑遮挡物的几何形状、材料特性、雷达信号的波特性等因素。仿真结果可以定量评估不同遮挡物对雷达信号的影响，如衰减程度和散射方向等。

对于雷达遮挡物，需要测量其实际衰减是否达到要求，我们可以在专业的微波暗室对其各个角度进行测量。测试采用控制变量法在相同的测试环境下测试信号穿过雷达遮挡物样片损耗的能量，可以提供非常准确的衰减性能评估。以雷达作为信号源，射频前端作为接收天线，测试过程中以 1° 为一个步进，分别在水平和垂直方向上测量雷达视场角范围内的方向图，可以全方位地评估雷达信号在经过遮挡物后的衰减程度，了解衰减的能量分布情况。将不加雷达遮挡物和加雷

达遮挡物在水平和垂直方向上分别将各对应点的方向图数值做差值，得出衰减的能量分布图，从而判断所测雷达遮挡物是否满足设计需求。此外，所用的测试雷达在测试实验室需测试验证，性能稳定，满足测试要求，需依照雷达遮挡物实车安装位置搭建测试环境。

4.2 介电常数

4.2.1 概念

介电常数：反映压电材料电介质在静电场作用下介电性质或极化性质的主要参数。

介电常数通常用 ϵ 来表示，它的实部用 ϵ' 表示，虚部用 ϵ'' 表示，即 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 。其中 $\epsilon' = \epsilon_0 \epsilon_r$ ， $\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F/M$ 是自由空间介电常数， ϵ_r 为相对介电常数。

如果用简单的矢量图（图 9）表示复数介电常数，实部和虚部的相位将会相差 90° 。其矢量和与实轴 ϵ' 形成夹角 δ 。材料的相对损耗等于损耗电量与储存电量的比值。

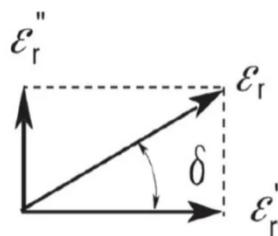


图 9 介电常数矢量图

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{每个周期损耗的能量}}{\text{每个周期储存的能量}}$$

δ 为损耗角，损耗角正切（损耗因子）或 $\tan \delta$ 定义为介电常数的

虚部与实部之比, D 表示耗散因子, Q 表示品质因数。

4.2.2 要求

一般要求透波材料的适宜相对介电常数值为 1~4, 损耗角正切值 <0.1 , 一般为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 数量级, 表 7 是一些常用材料 76GHz~77GHz 频段下的相对介电常数。

表 7 一些常用材料 76GHz~77GHz 频段下的介电常数

名称	介电常数	损耗角正切
聚丙烯 (PP)	2.2~2.5	0.005~0.01
改性 PP (PP/PE-T20)	2.45	0.007
交联聚苯乙烯 (XCP)	2.5	0.0005
石英纤维/环氧树脂	3.2~3.5	0.005~0.01
石英纤维/氰酸酯树脂	3.07	0.006
玻璃纤维/环氧树脂	4.0~4.5	0.025~0.040
改性聚苯醚 (PPO)	2.6~2.8	0.0015~0.003

雷达遮挡物的相对介电常数越小, 电磁波在遮挡物壁与空气的界面上的反射就越小, 反射损耗就越小; 损耗角正切值越小, 电磁波在透过遮挡物过程中转化为热能而损耗的能量就越小, 吸收损耗就越小。因此, 要求雷达遮挡物材料的相对介电常数和损耗角正切值尽可能小, 以达到最大传输和最小反射的目的。

4.2.3 测试

E 波段的材料测试主要分为自由空间法测试、平行圆盘谐振腔和准光开放式谐振腔的三种方法。三种材料测试方法都可以满足雷达遮挡物材料介电常数的测试，自由空间法可以实现宽带的测试，如图 8 所示，频率可以实现 60–90GHz 的宽带扫描，缺点就是材料损耗测试精度差。平衡圆盘谐振腔和准光开放式谐振腔测试材料的损耗角正切 $\tan \delta$ 精度更高。准光开放式谐振腔法测量雷达遮挡物介电特性比自由空间法更准确。准光开放式谐振腔装置通常有两种结构形式，双凹谐振腔和平凹谐振腔，前者具有更高的谐振品质因数，但是不能测量电厚度较大的样品；后者能测量厚板材料，但是在测量薄膜材料时测量误差较大。

对于低损耗材料亦可采用传输线相位法测算，利用网分等设备测试信号相位变化，具体公式如下：

自由空间中距离d的相位：

$$\phi = \frac{d}{\lambda_0} * 360^\circ = \frac{d}{\frac{c_0}{f}} * 360^\circ$$

穿过厚度为d' 的材料的相位：

$$\phi' = \frac{d'}{\lambda} * 360^\circ = \frac{d'}{\frac{c_0}{f\sqrt{\epsilon_r}}} * 360^\circ$$

相位变化为

$$\delta \phi = \frac{\frac{d'}{c_0} * 360^\circ}{f(\sqrt{\epsilon_r - 1})}$$

反算介电常数为

$$\epsilon_r = \left(\frac{(\delta \phi + n * 360^\circ) * c_0}{360^\circ * d' * f} + 1 \right)^2$$

注：样板厚度可利用千分尺等设备测量，设备精度不低于0.01mm。

若需进行样板各层介电常数的测算，可逐层测算，漆膜厚度可用金相法测量，设备精度不低于10μm。

4.3 均匀性

4.3.1 概念



电长度均匀性：雷达遮挡物在一定区域内的各个点位的电长度/透波相位差异。

透射功率均匀性：雷达遮挡物在一定区域内的各个点位的传输损耗的差异。

相位均匀性：雷达遮挡物在一定区域内的各个点位的透波相位差异。例如 $\max(\phi) - \min(\phi)$, 或 $\text{std}(\phi_i)$

相位变化率：遮挡物透波相位，随水平轴或垂直轴而变化的比率。例如 $\Delta \phi / \Delta w$

反射功率均匀性：雷达遮挡物在一定区域内的各个点位的反射损耗的差异。

4.3.2 测试方法

使用天线阵列（机械或电子扫描），每一点的测量方法参考自由空间法，测量遮挡物上多个点位的 S 参数。以电长度均匀性测试为例，步骤如下：

(1) 测试场景如图 8 所示；

(2) 在雷达锥形波束与遮挡物交叠区域，通过 XY 方向分别移动雷达遮挡物，测试遮挡物与雷达锥形波束交叠区域的 S11, S21 数据组合；

(3) 计算该区域内的雷达遮挡物的电厚度均匀性

对于均匀性，应统计数值差异（例如标准差、方差）。相位均匀性会影响各天线的回波相位，进而影响目标点的点扩散函数，最终影响目标的角度稳定性和 RCS 精度计算。透射功率均匀性，会影响目标的 RCS、稳定出现程度，例如 FOV 视野边缘的目标 RCS 不稳定，目标闪烁或丢失。

4.4 偏转角

4.4.1 概念

单天线偏转角：雷达遮挡物对毫米波雷达波束指向的偏转差值。

目标偏转角：毫米波雷达的识别角度经过雷达遮挡物后的偏转差值。

对于线性极化天线，通常用 E 平面和 H 平面来表示天线的辐射方向。由于雷达遮挡物的存在，雷达探测角度范围和方向会偏移，所

以定义雷达在探测角度范围内，有无雷达遮挡物时最大探测距离角度的变化即为雷达的偏转角。由于毫米波雷达通常有发射天线和接收天线，所以雷达的偏转角还分为发射天线偏转角和接收天线偏转角。通常定义雷达的探测范围 FOV 的变化即为雷达的偏转角。

以线极化雷达发射天线为例。基于安装平面和转台，如图 10 所示，天线在 E 面最大辐射方向会有一定的角度，假如定义为 θ_1 。当发射波束经过雷达遮挡物时，天线基于安装平面或转台的最大辐射方向会有一定的偏转，定义为 θ_2 。两者之差即为雷达发射天线经过雷达遮挡物的偏转角。定义如下：

$$\theta = \theta_1 - \theta_2$$

雷达探测范围不仅与发射通道有关，还与接收通道有关。所以，雷达探测范围 FOV 的偏转角需要用雷达目标模拟器或角反配合进行测试。

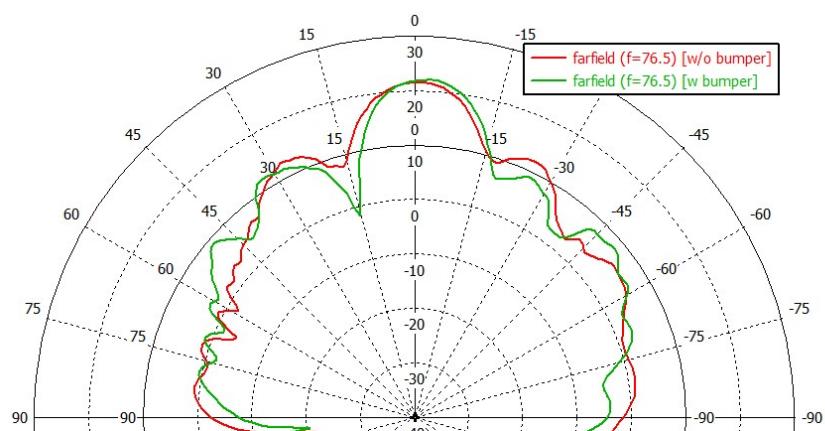


图 10 雷达天线主瓣偏转示意图

在估计雷达前面一个物体的角度时，由于雷达遮挡物的存在，会

产生一个角度误差 θ , $\theta = \theta_1 - \theta_2$, 其中 θ_1 为有雷达遮挡物时的估算角度, θ_2 为没有雷达遮挡物时的估算角度。当一个信号经过物体的反射后, 由两根天线接收, 且由于物体与天线的距离远大于两根天线之间距离, 两根天线接收的信号可以近似看为平行的信号。

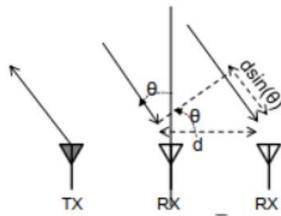


图 11 两根天线角度估算原理图

如图 11 所示, 则物体角度估算公式为

$$\omega = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \rightarrow \theta = \arcsin \frac{\omega\lambda}{2\pi d}$$

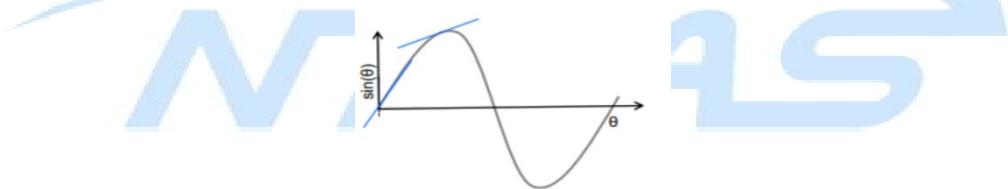


图 11 角度估算精度分析图

由图 11 可以看出, 当 θ 接近 0° 时, $\sin \theta$ 对于 θ 的变化非常敏感, 随着 θ 的增大, $\sin \theta$ 的敏感性逐渐减小, 当 θ 接近 90° 时, $\sin \theta$ 对于 θ 的敏感性非常低。因此, 随着 θ 角度的增加, 角度的估算容易产生误差。

4.4.2 要求

一般雷达可接受的遮挡物偏转角误差如表 8、表 9 所示

表 8 方位角可接受偏转角误差

范围	$\pm(0^\circ - 9^\circ)$	$\pm(9^\circ - 12^\circ)$	$\pm(12^\circ - 16^\circ)$	$\pm(16^\circ - 20^\circ)$	$\pm(20^\circ - 30^\circ)$	$\pm(30^\circ - 45^\circ)$	$\pm(45^\circ - 55^\circ)$
误差	0.2°	0.3°	0.4°	1.0°	1.4°	2.0°	2.5°

表 9 俯仰角可接受偏转角误差

范围	$\pm(0^\circ - 3^\circ)$	$\pm(3^\circ - 5^\circ)$	$\pm(5^\circ - 9^\circ)$	$\pm(9^\circ - 12^\circ)$
误差	0.8°	1.0°	1.2°	2.0°

4.4.2 测试

雷达在有无覆盖件条件下，雷达探测范围的变化，包括探测范围法线方向的变化、探测范围内的失真、探测范围的缩小。雷达偏转角的变化主要是指探测范围内法线方向的变化。如果测试环境不满足测试远场环境，雷达的波束宽度或者说探测范围在法线方向并没有明显的峰值变化，所以在测试雷达偏转角时需要考虑配合雷达遮挡物材料测试时的远场条件。目前主流的测试方法有两种，一种是利用阵列天线接收和边角目标模拟法；另一种是利用转台偏转覆盖件峰值搜索法。

(一) 利用阵列天线接收和边角目标模拟法：

该方法的发射源可以是雷达或者是网络分析仪。如果是雷达，远端的阵列可以分别测试雷达发射天线和接收天线在有无雷达遮挡物条件下波束，然后计算出雷达天线波束偏转角。同时，该测试阵列中间水平线上面可以放置目标模拟器，可以测试雷达在不同距离条件下的探测范围偏转角。

(二) 利用转台偏转雷达遮挡物峰值搜索法

用矢量网络分析仪搜索 S11 峰值的方法。在实际工程中在雷达 FOV 两边幅度的变化更大，搜索峰值的偏转更容易。

偏转角测试步骤如下：

- (1) 测试场景如图 8 所示；
- (2) 调整雷达遮挡物转台，使系统重新搜索到网分 S11 的最大值；此时转台旋转的角度即为偏转角；

实际安装角度偏转验证：

- (1) 原网分位置用实际雷达替换
- (2) 先在没有雷达遮挡物的场景下，通过旋转摆臂的方式，在相应角度测试 RTS/角反目标角度结果；
- (3) 根据实际场景安装雷达遮挡物，再次相应角度的目标的角度信息
- (4) 两次测试结果的角度差值即为雷达遮挡物的实际角度偏转。

5 雷达遮挡物结构特性要求

5.1 曲率半径

5.1.1 概念

雷达遮挡物曲率半径是毫米波雷达锥形波束与遮挡物相交曲面所有点位曲率半径的最小值。

5.1.2 要求

曲率半径根据雷达与遮挡物的匹配性能，各家多不相同。通常情况下曲率半径宜不小于350mm。对于部分中短距离（70m及以下）和超宽视场（ $\pm 90^\circ$ ）雷达，其波束较宽且能量分散，较小的曲率半径（250mm–300mm）在角雷达场景中可以接受；同样对于当前部分雷达也可通过技术补偿接受上述较小曲率半径，例如算法补偿、空气波导天线技术补偿、成像技术补偿。

雷达锥形波束与遮挡物相交曲面应平滑无突变，无凸起，无凹陷，无金属螺钉，无分缝。平坦表面（曲率半径越大）使雷达波的反射、折射路径更接近理想平面模型，减少因曲面引起的波形畸变，相位延迟均匀，利于雷达对目标距离和角度的精确解算。曲面越弯曲（曲率半径越小），电磁波在边缘区域的绕射效应越显著，导致能量向非预期方向散射或反射。弯曲表面会改变雷达波的波前形状，使主瓣方向发生偏移（如水平方向偏移 $\pm 5^\circ$ ），尤其对宽波束角雷达（ $\pm 90^\circ$ 视场），可能导致边缘视场的目标漏检。

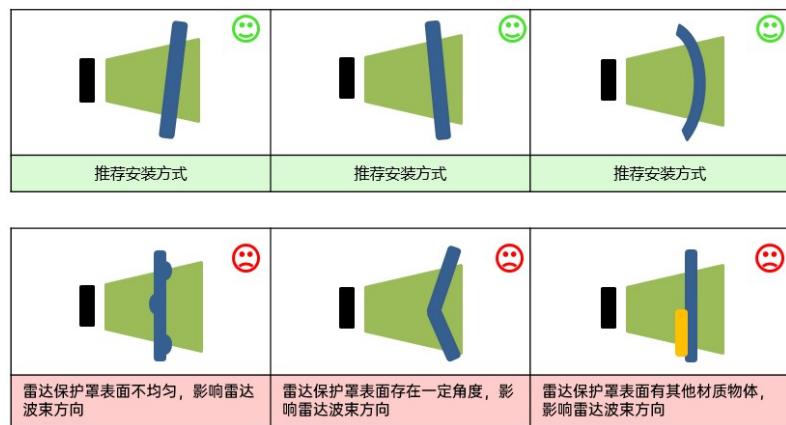


图 12 雷达遮挡物与雷达之间结构关系推荐图

5.1.3 曲率半径的获取方式

曲率半径一般由整车造型设计过程中从三维设计或仿真软件中导出，在雷达锥形波束与遮挡物相交面任意选取三个点，或九个点，即可从软件读取曲率半径。

5.2 最佳厚度

5.2.1 概念

遮挡物的最佳厚度是指雷达遮挡物匹配毫米波雷达时，透波损耗及反射损耗最小的厚度或该厚度的整数倍为最佳厚度。

注：遮挡物样板的最佳厚度考虑产品整体厚度，兼容油漆的预期厚度作为容差范围。

毫米波雷达遮挡物与雷达 FOV 相交，再偏置 5mm 的区域，遮挡物需材质均匀，厚度均匀，不允许有任何结构的突变例如拼接，凸起等。

注：当遮挡物具有多层基材结构（嵌件除外）时，每层结构均宜达到最佳厚度。

5.2.2 要求

雷达遮挡物的材料的厚度应为雷达波半个波长或半个波长的整数倍，遮挡物材料厚度越大，雷达波的传输损耗越大，如图 13 所示：

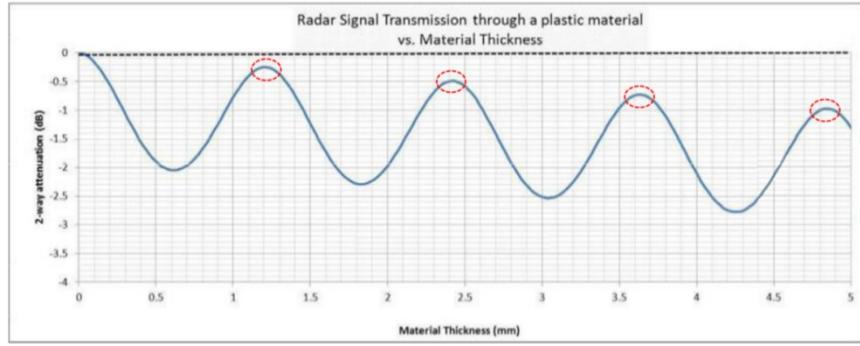


图 13 信号在介质中的传输状态图

5.2.3 最佳厚度输出方法

- (1) 确定毫米波雷达工作频率、波长、基材介电常数；
- (2) 计算该半波长整数倍，确定基材的最佳厚度数据集；
- (3) 根据产品造型及强度要求，选取初始最佳电厚度；
- (4) 根据油漆预期介电参数，确定整体厚度和偏差范围。

毫米波雷达遮挡物的最佳厚度计算需综合考虑电磁波传输特性、材料电参数及系统性能要求，其核心目标是在保证雷达信号有效穿透的同时，满足结构强度、造型设计等实际需求。以下是基于电磁波传输理论的厚度计算过程及关键影响因素分析：

- (1) 核心计算理论：电磁波传输损耗模型

毫米波雷达信号穿过遮挡物时，能量损耗主要来自介质吸收和界面反射。假设遮挡物为均匀平板介质，且雷达波垂直入射，其厚度计算需结合以下传输损耗公式（介质吸收损耗）：

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} (\sqrt{1 + (\tan\delta)^2} - 1)}$$

其中：

f 为雷达工作频率（如 77GHz、79GHz）；

c 为自由空间光速 (3×10^8 m/s)；

ϵ_r 为材料相对介电常数；

$\tan \delta$ 为材料损耗角正切。

总吸收损耗 L_{abs} (dB) 与厚度 d (mm) 的关系为: $L_{abs} = \alpha \cdot d$

(2) 反射损耗与阻抗匹配

当雷达波从空气 (介电常数 $\epsilon_{r0}=1$, $\epsilon_0=8.854187817 \times 10^{-12}$ F/m)

入射到介质 (介电常数 ϵ_r) 表面时, 界面反射损耗由阻抗匹配决定。

反射系数 R 为: $R = \frac{\sqrt{\epsilon_r}-1}{\sqrt{\epsilon_r}+1}$

为减少反射, 理想厚度需满足 四分之一波长匹配条件:

$$d = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}}$$

其中 λ_0 为自由空间波长 ($\lambda_0 = c/f$)。

(3) 最佳厚度的计算步骤

a. 确定系统性能指标

双向传输损耗 < 3 dB (即信号强度保留 $> 50\%$)。

雷达工作频率满足 76GHz–81GHz(车载主流频段, 波长约 3.9mm)。

b. 选择材料介电常数

以常用遮挡物材料为例 (如改性 ABS、PC/ASA、PP) :

$\epsilon_r = 2.5-3.5$ (低介电常数以减少色散)；

$\tan \delta \leq 0.03$ (低损耗角正切以降低吸收)。

c. 结合阻抗匹配优化厚度

按四分之一波长匹配条件，77GHz、 $\epsilon_r=3$ 时：

$$d = \frac{3 * 10^8}{4 * 77 * 10^9 * \sqrt{3}} \approx 0.73mm$$

d. 仅考虑传输损耗，最佳厚度数据集为半波长及半波长整数倍，即 1.46mm 及其整数倍。

e. 计算吸收损耗限制下的最大厚度

假设允许吸收损耗 $L_{abs} \leq 2\text{dB}$ （预留 1dB 用于反射损耗），则：

$$d \leq \frac{L_{abs}}{\alpha} = \frac{2}{\alpha}$$

其中： α 单位为 dB/mm。

以 77GHz、 $\epsilon_r = 3$ 、 $\tan \delta = 0.02$ 为例：

$$\alpha = \frac{2\pi * 77 * 10^9}{3 * 10^8} \sqrt{\frac{3}{2} (\sqrt{1 + 0.02^2} - 1)} \approx 0.12\text{dB/mm}$$

$$d \leq \frac{2}{0.12} \approx 16.7mm$$

满足传输损耗的前提下遮挡物最大厚度为 16.7mm，所以最佳厚度的数据集为小于 16.7mm 且为 1.46mm 的整数倍。

若仅考虑传输损耗的情况下，最佳厚度理论上如上述推导，是半波长的整数倍。实际操作中，最佳厚度是综合考量传输损耗、反射损耗、相位、结构强度、生产工艺、成本等多参数，性能相互妥协的结果。例如仅考量最低反射，上述四分之一波长匹配最佳厚度为 0.73mm，此时反射损耗 $R \approx -10\text{ dB}$ （反射能量仅 10%），满足低反射要求，且满足双向传输损耗小于 3dB，但 0.73mm 厚度材料过于单

薄，强度不足以抵挡车辆的意外冲击，且这种超薄材料生产工艺要求较高，导致成本较高，因此虽然该厚度满足传输损耗要求，仍不选取其为最佳厚度。

5.2.4 遮挡物厚度与雷达波衰减的关系

遮挡物涂层中所有的金属材料都会对雷达性能造成影响，应尽可能避免选用金属涂层材料。77GHz 频率下材料介电常数与雷达遮挡物的最佳厚度关系如表 10：

表 10 材料最佳厚度关系表

材料名称	最佳厚度 1 ±0.1mm	最佳厚度 2 ±0.1mm	最佳厚度 3 ±0.1mm	最佳厚度 4 ±0.1mm	合适性
Polypropylene	1.28	2.55	3.83	5.1	最佳
ABS	1.19	2.39	3.58	4.77	合适
Polymide	1.18	2.36	3.54	4.72	合适
Polycarbonate	1.16	2.33	3.49	4.66	合适
SMC	0.88	1.77	2.65	3.54	不合适

毫米波雷达通过收发电磁波工作，电磁波在毫米波雷达遮挡物中传播时，会出现传输衰减和反射损失。传输衰减或反射损失越大导致毫米波雷达性能降低越多，所以应尽量减小毫米波雷达遮挡物造成的传输衰减和反射损失。

介电常数越小的材料产生的传输衰减和反射损失越小，而材料厚度的不同对电磁波的影响也不一样。通常材料厚度为电磁波 1/4 波长的偶数倍时，反射损失和传输衰减最小，而材料厚度为电磁波 1/4 波长的奇数倍时，反射损失和传输衰减最大。

电磁波在不同介质中传播的波长计算公式为：

$\lambda = c / (f * \sqrt{\epsilon_r})$ ，其中 λ 是波长， c 是光速， f 是频率， ϵ_r 是相

对介电常数。

通过材料测试得到材料的介电常数，然后通过介电常数计算出该材料的波长；然后根据 1/4 波长的偶数倍，选取几个推荐的厚度值，最后根据整车其它要求从中选定一个作为开模厚度，即为该材料针对毫米波雷达的最佳厚度值。

5.3 厚度允许公差

5.3.1 概念

遮挡物厚度允许公差：雷达遮挡物量产厚度与设计厚度之间的差值（该差值应综合考虑毫米波雷达锥形波束与雷达遮挡物的相交曲面范围）。

5.3.2 要求

为确保毫米波雷达性能，结合实际的生产能力，建议毫米波雷达遮挡物在透波区域范围内的最佳厚度允许公差值见表 11。

表 11 厚度允许公差建议表

材料	介电常数	产品壁厚范围	制造能力公差	建议公差
可塑性塑料 (PC/ASA/P C+ABS/PP)	介电常数 2~4	2~4mm	±0.1mm	±0.2mm
		4~8mm	±0.2mm	±0.3mm

等)		> 8mm	±0.3mm	±0.4mm
----	--	-------	--------	--------

5.3.3 最佳厚度允许公差的输出方法：

- 1) 最佳厚度允许公差为对产线一致性要求，出具产线评估参数即可；
- 2) 产线评估参数可根据量产产品抽样检测数据与设计数据比对。

6 雷达系统装配要求

6.1 夹角

6.1.1 概念

透波区域：毫米波雷达锥形波束与雷达遮挡物相交曲面区域
雷达遮挡物与雷达之间的夹角：雷达天线平面与透波区域内所有点位切平面的夹角。

垂直夹角：夹角的垂直分量。

水平夹角：夹角的水平分量（一般不做要求）。

6.1.2 要求

雷达辐射锥域内，保险杠在俯仰方向与雷达表面应有个夹角 θ ，以避免雷达波经过遮挡物反射后引起的多径效应， θ 大小与雷达俯仰面 FOV 及应用场景有关，雷达与保险杠之间的垂直角度宜为 $|\alpha| > 5^\circ$ 。

6.1.3 测试

夹角仅作为设计阶段的参数输出，雷达系统整体指标在整车下线时进行测试。

6.2 距离

6.2.1 概念

最近距离：毫米波雷达前罩壳与遮挡物之间的最近距离，通常为毫米波雷达四角位置中的一个与遮挡物之间的距离。

6.2.2 要求

雷达与遮挡物间距一般为 5mm-15mm。

为保证雷达遮挡物既可防撞保护，又设有易装配空间，在满足工艺尺寸链及散热需求基础上，此安全间隙可对应缩短。

6.2.3 试验方法

距离仅作为设计阶段的参数输出，雷达系统整体指标在整车下线时进行测试。雷达布置设计参数应满足该要求，并在雷达系统整体指标测试时按照距离参数模拟设置。

7 雷达及遮挡物系统目标识别能力

7.1 雷达及遮挡物匹配前后目标识别能力

因为测试的对象是研究毫米波雷达遮挡物对于毫米波雷达的影响，而不是测试毫米波雷达本身的性能；故应该使用同一个毫米波雷达分别测试不含遮挡物的性能和含遮挡物的性能，对比受遮挡物影响后毫米波雷达性能的衰减程度是否能接受。

毫米波雷达遮挡物对毫米波雷达的影响，大RCS目标以及小RCS目标的受影响程度可能不一致，应设计不同RCS目标的对比。

毫米波雷达遮挡物对毫米波雷达的影响，运动目标和静止目标受到的影响程度可能不一致，应设计不同运动特性的场景。

毫米波雷达遮挡物对毫米波雷达的影响，干净环境下和高反环境下受到的影响程度可能不一致，应设计暗室干净环境和金属墙壁或地面高反环境两种不同测试场地。

建议的探测指标罗列如下（干净环境及高反环境下不同 RCS 目标测试）：

1. 测距：探测距离、距离精度、雷达威力图/最大探测距离
2. 测速：速度范围，速度精度
3. 测角：水平向角精度、俯仰向角精度

测试方法通常会使用参考雷达（标准设备）来测试雷达遮挡物。在此类测试中，角反射器会安装在雷达前方预先规定的距离和方位角处。然后在有雷达遮挡物和无雷达遮挡物的情况下进行差分测量，从而进行比较。当由雷达信号和回波信号电平确定的距离和方位角都在规定的限值内时，雷达遮挡物就可通过测试。但这种方法仅适用于检查特定的方位角，很容易漏掉雷达遮挡物中的问题区域。

另一种测量方法的操作方式类似，但只需要一个反射器。这种方法将雷达传感器和雷达遮挡物安装在转台上，在不同的角度重复进行测量，然后将转台上（地面实况）读到的实际角度与雷达测得的角度进行比较。该方法的准确度与转台的定位精度相当。但这种测试占用的时间较长，不适用于生产线测试^[9]。还有推出了的一套适用于雷达遮挡物测试与验证的毫米波成像系统，测试仪能够以更高的分辨率（毫米级精度）测量距离、方位角和仰角，将测量结果（即反射率），运用微波技术，显示高分辨率反射图像以便快速检测异常^[10]。

7.2 实车测试

实车测试雷达遮挡物对雷达的影响，更多的是综合测量雷达装车环境整体对雷达性能的影响，包含上述结构特性、遮挡物电物理特性，还有雷达安装支架、车身其他结构、雷达安装精度等。实车测试包含但不限于雷达的整车感知性能测试、边界场景的鲁棒性测试以及车辆对目标的跟踪稳定性测试。

雷达的整车感知性能测试，更多的集中在封闭场地测试，利用多种类目标物与车辆之间的实时真值定位，测量车辆雷达感知信息的精准度，这种感知的精准可针对人、二轮车、车、锥桶等不同目标物动静状态下的识别，感知精准度、目标跟踪稳定性与雷达部件的感知识别性能进行比对，分析车辆安装环境对雷达性能的影响。

整车安装环境对雷达的影响在雷达的探测边界更易体现，因此在整车状态下测试雷达边界场景的鲁棒性，可以较为明显的比对出雷达性能的衰减特性。例如先测试雷达部件的最远探测距离，在测试装有

该型号雷达的整车最远探测距离，二者之差即安装环境对雷达性能的衰减。

8 总结与展望

8.1 标准化研究将推动毫米波雷达遮挡物的规范化应用

随着驾驶自动化技术的快速发展，毫米波雷达作为核心环境感知传感器，其性能可靠性直接影响车辆的安全性与智能化水平。然而，毫米波雷达在车辆上的安装常需穿透保险杠、雷达罩等遮挡物，这些遮挡物的材料特性、结构设计及安装方式对雷达信号的透射、反射及相位特性产生显著影响。当前，行业普遍面临遮挡物材料选型混乱、测试标准缺失、跨平台兼容性差等问题，亟需通过标准化研究实现规范化应用，从而推动毫米波雷达技术的高效落地与产业化升级。

解决当前材料参数混乱导致性能差异过大的问题；设计规范缺失引发的工程适配难题；解决测试方法不统一造成的无数据可比性；实现材料参数规范化、设计准则统一化、测试流程标准化。进而实现全产业链协同升级。

8.2 本报告的研究内容总结

本报告系统研究了遮挡物的应用现状、国内外研究成果以及产业链情况，重点分析了遮挡物对雷达的影响原理，并对整车造型设计及生产组装环节提出了遮挡物匹配设计要求，建立了结构特性-电物理特性-整车感知三级测试体系，并提出标准化设计框架。未来需深化

动态材料与智能补偿技术研究，推动遮挡物从“被动适配”向“主动优化”演进，为高阶自动驾驶提供高可靠感知保障。

8.3 后续工作展望

本报告首次提出毫米波雷达遮挡物性能影响原理及测试解决方案，建议以此为标准预研报告，进行国标立项规划及国际提案规划。毫米波雷达遮挡物的标准化研究是打通“技术-产业-应用”闭环的关键抓手。通过构建覆盖材料、设计、测试的全维度标准体系，不仅可解决当前行业痛点，更能为 L4+自动驾驶提供高可靠感知基础。未来，随着智能表面、动态可调材料等技术的融入，标准化将持续迭代，推动毫米波雷达从“功能可用”迈向“性能卓越”的新阶段。



附录 A

(资料性附录)

引用标准文件

参考文献:

- [1] N . Chen, R. Gourova, O.A Krasnov and A. Yarovoy. The Influence of the Water-covered Dielectric Vehicle logo cover on 77GHz Automotive Radar Signals. In: The 14th European Radar Conference, Nuremberg, Germany, 2017.
- [2] Wang J Y. Research on the Influence of ADAS Radar Performance by Vehicle Logo. Shanghai Auto, 2020, pp. 48–52 (in Chinese).
- [3] Daniel Bourreau, Alain Péden. Solid and Non-Solid Dielectric Material Characterization for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications. In: Microwave Conference (EuMC) 2020 50th European, 2021, pp. 909–912.
- [4] Li N N, Zhang W G, Xu X, Erich Kasper. 一种 77GHz 毫米波雷达天线罩设计. In: 2021 National Conference on Microwave and Millimeter Waves (NCMMW 2021) , 2021(in Chinese).
- [5] 张国勇. 塑料在 ADAS 感知硬件-毫米波雷达中的应用 [C]// 重庆汽车工程学会. 重庆汽车工程学会 2021 年论文汇编. [出版者不详], 2021:8. DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.050618.
- [6] 程健, 邓俊杰, 刘凯. 汽车 ACC 毫米波雷达罩盖材料研究 [J].

装备维修技术, 2022(06):34–38. DOI:10.16648/j.cnki.1005-2917.

2022.6.034.

[7] 李春江, 关玲, 吴莉等. 车辆车标灯罩工艺的研究[J]. 中国照明电器, 2023(07):26–37.

[8] 王俊毅. 车徽标对 ADAS 毫米波雷达的性能影响研究. 上海汽车, 2020, pp. 48–52.

[9] Heuel S ,K?ppel T ,Reil A , et al. 可靠的汽车雷达罩测试仪[J]. 汽车制造业, 2021(12):14–17.

[10] 罗德与施瓦茨增强汽车雷达罩测试仪功能, 为材料反射测量带来了新的精度水平[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(04):149.

[11] 钱国平, 武锡斌, 刘莲芳等. 汽车毫米波雷达覆盖件设计及验证方法[C]//中国汽车工程学会 (China Society of Automotive Engineers) . 2021 中国汽车工程学会年会论文集 (1) . 机械工业出版社 (CHINA MACHINE PRESS) , 2021:5.

[12] 程健, 邓俊杰, 刘凯. 汽车 ACC 毫米波雷达罩盖材料研究[J]. 装备维修技术, 2022(06):34–38.

[13] 汤玄, 谢宇, 赵航英等. 针对雷达信号损耗的保险杠厚度设计优化[C]//中国汽车工程学会 (China Society of Automotive Engineers) . 2020 中国汽车工程学会年会论文集 (4) . 机械工业出版社 (China Machine Press) , 2020:6.

[14] 付银玲. 长测距雷达在轿车上的布置应用 [J]. 上海汽车, 2012(07):15–18+34.

附录 B

(资料性附录)

术语和定义

1 雷达遮挡物：车载雷达前端额外的车身结构遮挡物。

