

新型镀膜玻璃对车载蓝牙天线性能的影响

陈晓宏，吴倩，刘卓华，梁杰，阳欢
比亚迪汽车工业有限公司 EMC 技术研究部

【摘要】 镀膜玻璃，是指在玻璃表面涂一层或多层金属、金属氧化物或合金等薄膜，以改变玻璃的光学性能，达到特定的光学效能的技术。随着汽车工业的发展，汽车镀膜玻璃以其传热系数低、反射红外线、低辐射、寿命长等优点，迅速在汽车市场中普及开来，以实现阳光投射舒适平衡与汽车内部的环保节能。然而，从整车电磁兼容设计层面考虑，镀膜玻璃的装载对车辆内部所有作用于高精度无线通信的天线模块的屏蔽却是致命的，会大幅度地降低天线的收发效能。本文以各车型通用的蓝牙天线为例，通过仿真技术及测试验证，对车载蓝牙天线在恶劣的整车镀膜玻璃环境下的信号衰减进行深度剖析，并分析了镀膜玻璃镀层主要参数对天线性能的影响程度，为后续汽车玻璃的镀膜参数选择提出建设性的参考建议，并为镀膜玻璃带来的电磁兼容问题的解决提供有效思路。

【关键词】 镀膜玻璃，蓝牙天线，仿真技术，信号衰减

Research on the Automotive Bluetooth Antenna Caused by the Installation of Low-E Glass

Chen Xiaohong, Wu Qian, Liu Zhuohua, Liang Jie, Yang Huan

EMC Technology Research Department, Byd Auto Industry Co., LTD.

Abstract: Coated glass, also known as reflective glass, is coated with one or more layers of metal, alloy, or metallic oxide films on the surface of glass to modify the optical properties of glass to meet specific requirements. With the development of automotive industry, automobile reflective glass has been popularized rapidly in the market due to its low heat transmittance, infrared reflection, low emissivity and radiation, and long life, etc. However, from the aspect of electromagnetic compatibility design of the vehicle, the glass could be fatal to all antenna modules responsible for high precision wireless signal transmission, as it blocks the transmission of useful signals and degrades the performance of the antennas. In this paper, simulation and measurement verification were carried out on Bluetooth antenna as an example to research on the signal attenuation under the unfavorable reflective glass environment. The simulation of the influence of reflective glass metallic coating parameters on the antenna performance has been analysed, aiming to provide constructive reference suggestions for the selection of coating parameters for subsequent automotive reflective glass, and to offer effective solutions to the electromagnetic compatibility problems brought by the reflective glass mounting.

Key words: reflective glass, bluetooth antenna, electromagnetic simulation, antenna simulation, signal attenuation

引言

伴随着消费升级与技术进步，人们对汽车的配置要求越来越高，汽车玻璃的功能也逐渐丰富起来。在汽车整车制造下游需求变迁的拉动下，汽车玻璃行业逐渐呈现出单车玻璃用量的提升，汽车玻璃的发展也更加趋向智能化、集成化、模块化以及轻量化。汽车玻璃品种较多，按照加工工艺可分为夹层玻璃、钢化玻璃、区域钢化玻璃、中空安全玻璃、塑玻复合材料，各有优缺点。目前，我国汽车安全玻璃以夹层玻璃及钢化（含区域钢化）玻璃为主，在兼顾安全性的基础上，还增加了调光、抬头显示、隔热、电加热等功能，可以有效地改善车内舒适性。其中，镀膜玻璃以其耐高温、防划痕、易清洗等优点，迅速在汽车应用中普及开来。虽然镀膜玻璃在光学热学方面有着诸多优点，但它同时也会影响整车部件的无线传输性能。从整车电磁兼容设计方面来评估，一方面，镀膜玻璃对整车电气件抵抗外界干扰能力有增强作用，另一方面，对承载着车辆无线通信功能的天线来说，对有用信号的传输则起到阻隔效果。本文利用仿真及测试技术结合，对车载蓝牙天线在整车镀膜玻璃环境下的信号衰减进

行研究，并通过仿真分析镀膜玻璃镀层主要参数对天线性能的影响程度，为后续汽车玻璃的镀膜参数选择提出建设性的参考建议，并为镀膜玻璃带来的电磁兼容问题的解决提供有效思路，以达到光学、热学舒适环境与蓝牙传输性能兼容的结果。

1 镀膜玻璃和仿真技术

1.1 镀膜玻璃

1.1.1 镀膜玻璃简介

镀膜玻璃是在玻璃表面涂镀一层或多层金属、合金或金属化合物薄膜，或将金属离子迁移到玻璃表面层，以改变玻璃的光学性能，满足某种特定要求的一种玻璃深加工产品。镀膜玻璃按产品的不同特性，可分为以下几类：热反射玻璃、低辐射玻璃（Low-E）、导电膜玻璃等^[2]。由于汽车镀膜玻璃使用较多的为低辐射玻璃，下面对低辐射玻璃作重点介绍。

Low-E 玻璃又称为低辐射玻璃，是在玻璃表面镀上多层金属或其他化合物组成的膜系玻璃。其镀膜层具有对可见光高透射及对远红外线高反射的特性，使其与普通玻璃及传统

的建筑用镀膜玻璃相比，具有优异的隔热效果和良好的透光性。根据使用镀层数量不同可进行如下分类。以镀层材料为银举例来说，可分为单银层 Low-E 玻璃、双银层 Low-E 玻璃和多银层 Low-E 玻璃。单银层 Low-E 镀膜玻璃通常只含有 1 层功能层（银层），加上其他的金属及化合物层，膜层总数达到 5 层。双银层 Low-E 镀膜玻璃具有 2 层功能层（银层），加上其他的金属及化合物层，膜层总数达到 9 层。然而，双银层 Low-E 玻璃的技术工艺难度比单银层大的多。双银层 Low-E 玻璃比单银层 Low-E 玻璃能够阻挡更多的太阳热辐射热能，换句话说，在透光率相同的情况下，双银层 Low-E 玻璃具有更低的遮阳系数（Shading Coefficient, SC），能更大限度地将太阳光过滤成冷光源。双银层 Low-E 玻璃传热系数较单银层 Low-E 玻璃更低，能进一步提高外窗的保温性能。三银层 Low-E 玻璃这种特性更加明显，即隔热、通透性更好。



图 1 镀层结构剖面

1.1.2 Low-E 玻璃主要性能参数介绍

Low-E 玻璃产品热工及光学性能性能参数主要有太阳得热系数（SHGC）、遮阳系数（SC）、可见光透射率、可见光反射率（内侧/外侧）、太阳光投射率、太阳光反射率等。

而对于 Low-E 玻璃镀层来说，主要的设计参数有镀层材料、镀层厚度、镀层层数、方阻等。镀层材料多为银，镀层层数可分为单层、双层或多层。面电阻可以理解为试样的表面两电极间所加电压和流过的电流之比。材料的电阻大小是由材料中自由电子的平均自由程的长短来决定，自由电子的平均自由程越短，材料的电阻率越大。反之，自由电子的平均自由程越长，材料的电阻率越小。由于尺寸效应（薄膜几何结构的限值引起导电特性的变化）的存在，薄膜的厚度会对其方阻产生影响，具体表现为玻璃的方阻随着薄膜厚度减少而增大。因此对于某一材料来说，有着这样的数学关系： $S = 1/Rt$ ，其中， S 为电导率， R 为面电阻， t 为薄膜厚度。

1.2 镀膜玻璃衰减研究

十几年前，随着低辐射玻璃大规模应用在建筑等领域，前人就开始了对镀膜玻璃对无线射频信号的影响的研究。研究结果基本可以确定，在 1~18GHz 频率内，低辐射玻璃造成 10~45dB 的屏蔽有效值^[4]。同时，业内给出的改善方案大多是在镀层上添加 FSS——频率选择层^[5]。通过激光在镀膜玻璃上蚀刻各种特殊图案，可以增加低辐射玻璃对某些频率的投射系数。

然而，前人对镀膜玻璃的研究大多集中在室内通信领域，关于镀膜对车内通信信号的影响研究较少，另外，添加

频率选择层的方法并不适合应用在复杂的整车电磁环境内。

本文结合仿真及测试技术，研究镀膜对车载蓝牙信号衰减的影响，并利用仿真技术探究镀膜参数对天线性能的影响，为后续汽车镀膜玻璃的参数选择提供建设性的意见。

1.3 仿真技术

汽车电磁兼容仿真是一种结合理论通过计算机模拟分析问题的方法。在电磁兼容测试之前进行仿真，可以在设计早期发现电磁兼容问题，减少或避免后期解决电磁兼容问题而引起的技术或成本障碍。电磁兼容仿真需要对电磁场环境进行大量的分析计算，运用不同的计算方法对相对应的电磁兼容问题进行仿真计算和分析，可以有效地预测和评估设备的电磁兼容性，针对车载天线电磁兼容性的研究本质上是对天线之间的耦合干扰以及天线的电磁辐射特性的研究。在车载天线的布局设计当中，既要考虑天线自身的辐射特性，又要尽量减少天线之间的耦合度，以保证天线工作时能够与其他天线兼容。

目前，市场上有很多计算电磁场和电磁兼容问题的软件，这些软件大多应用了一种或几种数值计算方法。由于算法的针对性，并没有一种软件能够解决所有电磁场问题。本文阐述的仿真结果是基于 Hypermesh+FEKO 软件实现的。其中，Hypermesh 的主要功能是整车模型前处理、电磁网格划分。FEKO 作为专业的三维精确电磁场仿真求解器，基于多种电磁算法/能够精确快速地处理各类天线电磁场分析任务。对于整车天线性能的表现，能够对天线位于整车环境中的电磁场分布进行仿真计算。汽车车体属于典型的电大尺寸求解模型，FEKO 特有的电磁仿真技术可以对电大尺寸，结合矩量法（MoM）和快速多级子算法（MLFMM），进行快速、准确的求解。

本文中，涉及车载天线性能的仿真主要有以下三个方面：①天线单元的仿真；②天线位于整车镀膜玻璃环境中的性能仿真；③Low-E 玻璃镀层参数对于天线性能的仿真分析。

2 蓝牙天线

为探究镀膜玻璃的影响，可以以测试镀膜玻璃的屏蔽效能作为研究方向，也可以通过仿真技术建立虚拟模型，从仿真和实测方向图对称建立一致性关系，以此来进行研究分析。目前对镀膜玻璃实物，难以加工出不同参数的镀膜玻璃进行测试，且测试花费的时间、周期、成本巨大，难以获得可用于分析的数据，因此，选取以仿真和实测方向图结合的方法进行研究。第一步，建立天线单体仿真模型，通过天线单体仿真和实测对称一致性，得到可用于整车仿真的天线模型。第二步，通过天线布置于整车的电磁模型，建立整车仿真和实测对称一致性。第三步，通过调整仿真模型中镀膜玻璃镀层的各参数，研究镀膜玻璃镀层参数对天线性能的影响。第 2 节主要介绍车载蓝牙天线的单体对称和整车蓝牙天线的仿真对称。第 3 节主要介绍镀膜的影响研究。第 4 节主要介绍镀膜参数的影响和改善方案。

2.1 车载蓝牙天线单体

2.1.1 车载蓝牙天线单体无源测试

蓝牙单体方向图测试选取在全电波暗室进行，测试布置如图 2 所示，该测试方法也称为无源测试，测试天线的辐射特性。无源测试侧重从天线的增益、效率、方向图等天线的辐射参数方面考查天线的辐射特性。图 4 中展示的是蓝牙天线分别在不同仰角下（ 75° 、 90° 、 105° 、 120° ）的二维方向图的仿真值和测试值，其中，蓝色线是仿真结果，红色线是测试结果，对比仿真和测试结果，不同仰角下的二维方向图的变化趋势基本一致，且在仰角为 90° 的二维方向图仿真和实测平均增益差值为 0.6dB 。基于以上结果分析，判定仿真和实测对称一致性较好。可以进行下一步仿真，即整车蓝牙天线的仿真和测试对称。

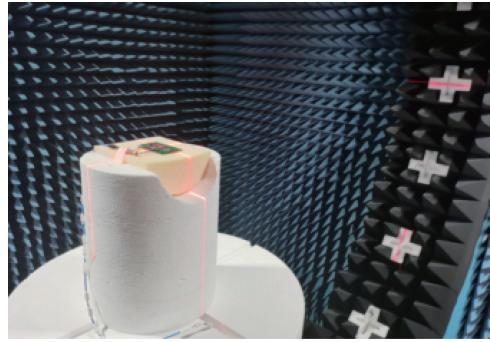


图 2 蓝牙天线测试环境

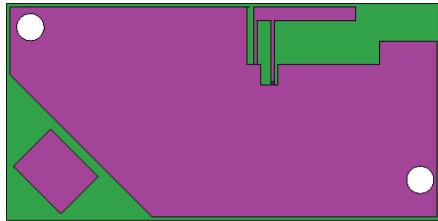


图 3 蓝牙天线正面视图

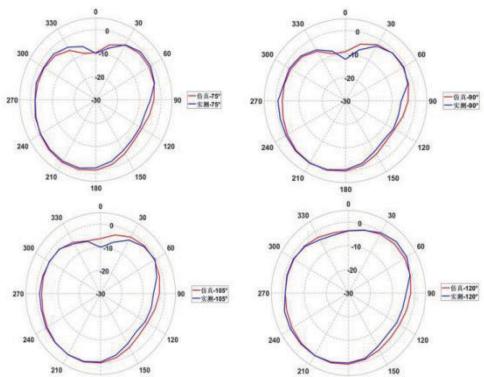


图 4 蓝牙单体天线二维仿真值和实测值

2.1.2 车载蓝牙天线单体仿真

天线单体仿真的准确性是整车天线仿真准确的前提。对天线单体建模，主要考虑因素有以下几点：材料属性参数、

天线尺寸、天线周边金属器件、电路板过孔、接地等。根据对各因素的分析，明确对于模型建立中需要保留和简化的部分。图 3 所示为利用 FEKO 软件对车载蓝牙天线单体的建立模型，蓝牙天线具体参数如下：①天线尺寸为 $64\text{mm} \times 32\text{mm} \times 2\text{mm}$ ；②玻纤基板（FR4）相对介电常数和损耗角正切为 4.4 和 0.017；③铜箔电导率为 5.813×10^7 。而后设置端口、电压源、求解频率，最后设置求解蓝牙天线远场方向图。

2.2 整车蓝牙天线

整车蓝牙天线仿真和整车蓝牙天线方向图对标的的意义在于，仿真和实测对应性好，仿真模型可用于代替实际测试，从仿真方面进一步分析镀膜参数的影响。上一节已经完成了单体蓝牙天线的对称，现在需要建立天线布置于整车上的电磁模型并进行仿真。

2.2.1 车载蓝牙天线整车方向图测试

以我司某款车型为例，该车型配置有蓝牙钥匙功能，车内蓝牙天线布置位置为顶篷靠近室内灯附近的区域。该车型风窗玻璃为单银层 Low-E 玻璃。为探究单银层 Low-E 玻璃对蓝牙天线性能的影响情况，进行整车蓝牙方向图测试。

图 5 中展示了整车空中下载（OTA）性能测试暗室，此套测试系统可将汽车整车作为被测对象，天线 OTA 测试采用单探头机械臂形式。该系统可进行整车级天线无源和有源测试，如天线方向图、总辐射功率（TRP）、总全向接收灵敏度（TIS）测试。整车天线 OTA 性能测试系统环境搭建示意图如图 5 所示，该系统可测量整车环境下的近场方向图，同时，该系统具备近远场转换功能和偏心修正功能。测试时，将被测车辆放置于转台中央，将车辆几何中心与测试系统中心对齐，通过偏心修正，可视为被测天线几何中心与近场测试系统中心对齐。通过远场计算公式 ($L = 2D^2/\lambda$) 计算整车蓝牙的远场距离，其中， D 为车辆最大尺寸长度（约等于 5m）， λ 为蓝牙波长（约等于 125mm），可得远场距离为 400m。结合蓝牙钥匙工作距离范围主要是 100m 内，属于近场。因而整车方向图测试可直接得到近场方向图，无需进行远近场转换。



图 5 整车 OTA 性能测试环境

图 6 展示了整车蓝牙天线方向图，通过 3D 方向图可以直观地分析出近远场方向图在三维空间中的分布情况，如图 6 所示。

为了更客观地分析整车天线增益，需要从实际应用场景出发，选取关注角度范围内的增益分布情况进行分析。考虑到实际使用蓝牙钥匙的场景主要为近距离、低仰角。选取以下角度范围的二维增益分布进行分析。

蓝牙天线评价角度范围（图 7）。

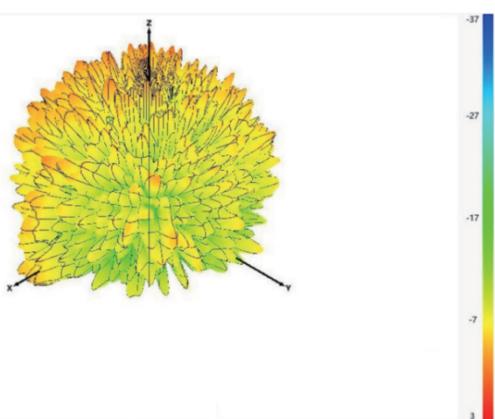


图 6 整车蓝牙天线方向图 3D 示意图

- 1) θ 角: $90^\circ \sim 96^\circ$, 步进 5°
- 2) ϕ 角: $0^\circ \sim 360^\circ$, 步进 0.5°

从图 8 可以看出, 在风窗玻璃所在的车头方向, 天线增益最小。通过数据运算, 车头方向的平均增益为 -12.4dB , 水平方向的实测线性平均增益为 -8.3dB , 车头方向的增益比水平方向的增益小 4dB 左右。

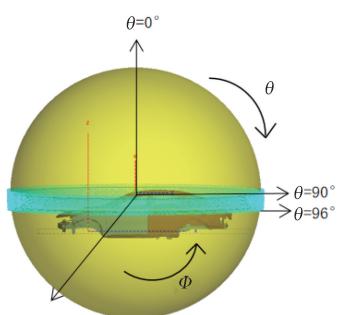
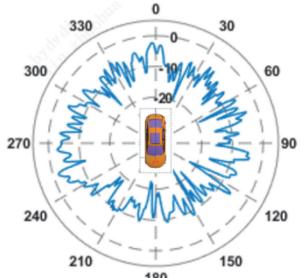


图 7 整车蓝牙天线仰角示意图

图 8 整车蓝牙天线 $\theta=90^\circ$ 的天线方向图

2.2.2 车载蓝牙天线整车仿真

整车采用未镀膜整车模型进行仿真, 因此, 在 FEKO 中只需要定义玻璃介质相对介电常数和损耗角正切, 分别为 6.13 和 0.0039。

参考蓝牙单体天线仿真步骤, 完成整车蓝牙天线仿真, 为追求结果的精确性, 这里将车内其他非镀膜玻璃、车内主要座椅骨架、管柱、仪表、方向盘等大面积金属部件模型一一导入, 作为整车环境, 最终求解整车蓝牙天线方向图。如图 9 所示, 实测方向图车头方向的平均增益为 -12.4dB , 水平方向的实测线性平均增益为 -8.3dB ; 无镀膜仿真车头方

向的平均增益 -6.54dB , 水平方向线性平均增益 -6.28dB 。可以得出实测车头方向蓝牙信号衰减较大, 而无镀膜仿真车头方向蓝牙信号与其他方向整体没有明显区别, 猜测实测车头方向蓝牙信号衰减较大是由于风窗玻璃的单银层镀膜导致的。

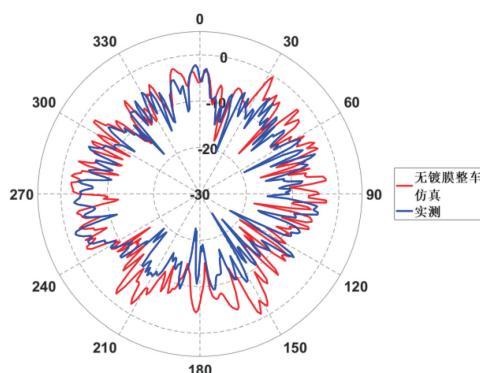


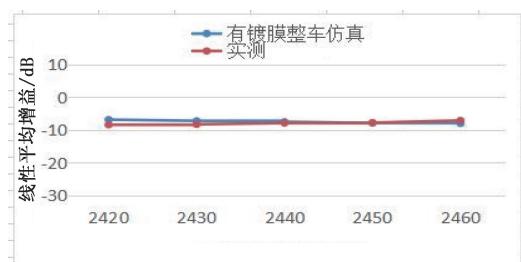
图 9 无镀膜整车仿真对比实测方向图

3 镀膜对车载蓝牙天线的影响

上节已经完成无镀膜整车仿真, 根据结论, 实测车头方向蓝牙信号衰减较大, 而无镀膜仿真车头方向蓝牙信号与其他方向整体没有明显区别, 猜测实测车头方向蓝牙信号衰减较大是由于风窗玻璃的单银层镀膜导致的。本节便验证镀膜能否造成整车蓝牙方向图车头缺陷。

为了比对镀膜的影响, 需要将第 2 节的无镀膜整车模型中加上镀层部分, 再仿真对比无镀膜整车仿真与实测结果。对于整车蓝牙天线仿真来说, 重点是对镀膜玻璃的模型建模。在 FEKO 中需要对单银层 LoW-E 玻璃赋予相应参数, 这里具体定义以下参数: ①镀层厚度为 40nm ; ②银的电导率为 61.73×10^{-6} 。单银层 LoW-E 玻璃设置好相应参数后, 设置单银层镀膜结构, 这里抽象为银层覆盖于玻璃表层。

图 10、图 11 分别展示了全方向和 $\theta=90^\circ$ 方向有镀膜整车蓝牙仿真和实测的平均增益随频率变化图。从结果上可以看出, 整车蓝牙天线平均增益 ($\theta=90^\circ$) 仿真值和实测值差值小于 1.5dB ; 图 12 则展示了 $\theta=90^\circ$ 方向整车蓝牙仿真和实测的缺陷角度对比, 仿真为 22° , 实测为 19.6° , 仿真和实测数值接近。图 13 展示了无镀膜整车仿真、实测以及有镀膜整车仿真方向图。有镀膜整车仿真车头方向平均增益为 -12.6dB , 水平方向线性平均增益为 -6.9dB 。可以看出, 加上镀膜之后, 整车仿真结果和实测结果基本一致, 在车头方向蓝牙信号均出现了明显衰减。所以, 镀膜对车头方向蓝牙信号的衰减有明显影响。

图 10 线性平均增益 ($\theta=90^\circ$) 有镀膜整车仿真对比实测

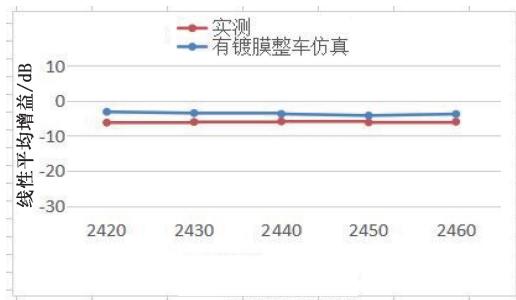


图 11 线性平均增益（全方向）有镀膜整车仿真对比实测

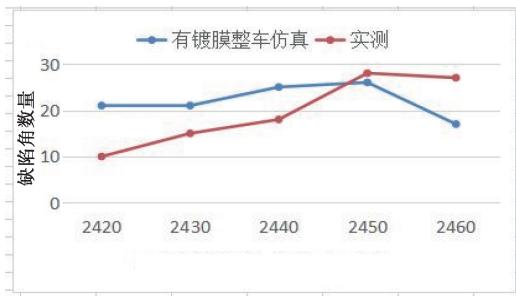


图 12 缺陷角数量有镀膜整车仿真对比实测

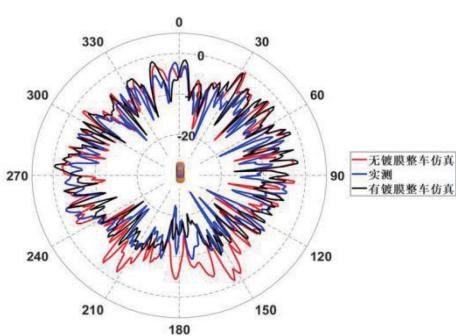


图 13 方向图无镀膜整车仿真对比实测对比有镀膜整车仿真

4 镀膜玻璃主要影响参数研究及改善方案

第3节得出过结论：镀膜对整车蓝牙信号有较为明显的衰减影响。本节期望对镀膜玻璃的主要影响参数进行研究。第1节中提到，Low-E玻璃镀层主要的设计参数有镀层材料、镀层厚度、镀层层数、面电阻等。镀层材料主要为银，这里不做更多赘述。经过资料查证，镀膜玻璃镀层的增减主要在玻璃介质之间变化，因此，镀膜层数的增减实际表现为镀膜厚度变化。下面主要对不同镀膜厚度的影响进行研究。为提升仿真效率，建立简化模型用于仿真。

1) 仿真模型：单独研究镀膜玻璃对天线的影响可能会受到镀膜玻璃的倾角、天线离镀膜玻璃的距离等因素的影响，因此使用整车模型（包含镀膜玻璃）作为仿真模型，如图14所示。

2) 仿真目标：线性平均增益（全方向和 $\theta=90^\circ$ ）、缺陷角度。以下具体介绍对于各参数的仿真及结果。

4.1 镀膜厚度影响研究

目前市场上产品的镀膜厚度主要区间为几十到几百纳

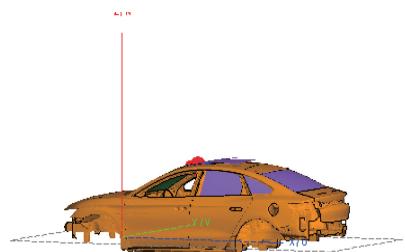


图 14 镀膜仿真模型

米。根据工艺技术允许的加工厚度范围，仿真设置镀膜厚度为6~320nm。图15、图16、图17为在2.43GHz频率下，不同镀膜厚度的线性平均增益和缺陷角。可以看出，无论是全方向的线性平均增益还是 $\theta=90^\circ$ 方向的线性平均增益，增益的大小随着镀膜厚度的增加而减小，并且镀膜厚度从6nm变化为20nm时增益减小得最多，之后增益的变化随着镀膜厚度变化趋于平缓。而缺陷角数量随着镀膜厚度的增加波动较小。

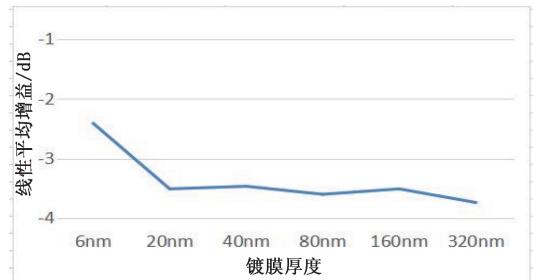


图 15 线性平均增益（全方向）

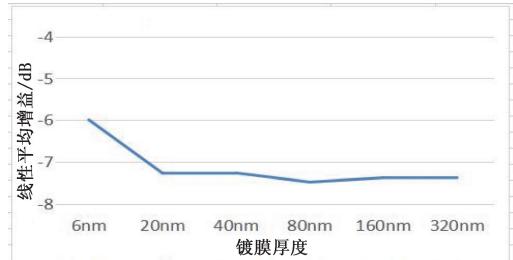
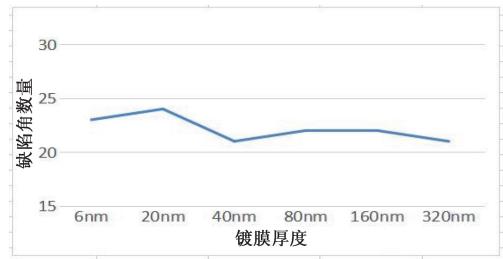
图 16 线性平均增益 ($\theta=90^\circ$)

图 17 缺陷角数量

4.2 改善方案

根据第2、3节的结论，汽车车头方向蓝牙线性平均增益为-7.3dB，水平线性平均增益为-12.6dB，汽车镀膜的存在会明显影响车头方向蓝牙天线的

性能。为了改善镀膜在车头方向的衰减影响,如图 18 所示,可以考虑将镀膜玻璃的车窗上方除去镀膜(325mm×250mm),从而减小对蓝牙的影响。下面仿真验证此工况。

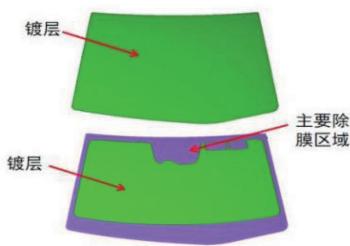


图 18 未除膜玻璃和部分除膜玻璃

图 19 展示部分除膜的整车仿真方向图和有镀膜的整车仿真方向图的对比,从图中可以看出,进行部分除膜后,车头方向的蓝牙信号强度相比未除膜的蓝牙信号强度有所改善。

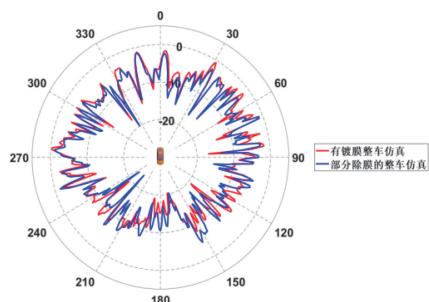


图 19 有镀膜的整车仿真方向图对比部分除膜的整车仿真方向图

经计算,部分除膜的整车仿真车头方向平均增益为-10.7dB,水平平均增益为-7.36dB;而未除膜的整车仿真车头方向平均增益为-12.6dB,水平平均增益为-6.9dB。部分除膜对改善车头方向蓝牙信号约有 2dB 影响。可以发现,在水平方向线性平均增益基本不变的情况下,通过除去部分镀膜的方法可以有效改善车头方向的蓝牙信号衰减。

5 结论

本文提出了整车镀膜玻璃下的车载蓝牙天线性能研究,通过 Feko 仿真和实际测试的对比,分析了镀膜玻璃对整车蓝牙性能的影响,并通过仿真分析镀膜玻璃镀层主要参数对天线性能的影响程度,为后续汽车镀膜玻璃设计提出一定参考建议。

从整车层面来看,镀膜玻璃对整车蓝牙性能具有一定的削弱作用。若镀膜玻璃阻碍了整车蓝牙性能,可以考虑将镀膜玻璃的某些区域除去镀膜,从而减小对蓝牙的影响。但同样需关注到,过度除膜对于整车造型以及玻璃隔热方面会有较大影响,该方案能达到的效果较为有限。

从镀膜玻璃的仿真分析来看,镀膜玻璃的镀层厚度会影响蓝牙性能,镀层越厚,影响越大,但影响蓝牙性能的镀层厚度的变化主要体现在几纳米至几十纳米之间,更大镀层厚度的影响则较为轻微。

目前条件受限,本文仅对蓝牙性能的影响进行了分析。但本文的分析方法同样可以适用于对 4G、5G 和 Wi-Fi 等的性能分析。后续会对更多射频信号进行分析对比。

参 考 文 献

- [1] RADU X, BRUSCAGLIA M, MICHELI D, et al. Shielding Effectiveness Controlling of Coated Glass Assembly in Mobile and Positioning GPS Frequency Bands [C]//2021 IEEE International Joint EMC/SL/PI and EMC Europe Symposium. New York: Curran Associates, Inc., 2021: 894-899.
- [2] 高伟. 镀膜玻璃的生产工艺和膜层性能的研究 [J]. 科技展望, 2016, 26 (30): 142.
- [3] NI Y, XIONG Q, ZHANG S W, et al. Transmission Characteristics of Double Glass in 5G Communication [C]//2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET). New York: Curran Associates, Inc., 2022: 975-979.
- [4] ÄNGSKOG P, BÄCKSTRÖM M M, VALLHAGEN B. Measurement of Radio Signal Propagation Through Window Panes and Energy Saving Windows [C]//2015 IEEE international symposium on electromagnetic compatibility (EMC). New York: Curran Associates, Inc., 2015: 74-79.
- [5] GAMPALA G, REDDY C J. Advanced Computational Methods for Transparency Control of Low Emissivity Windows [C]//2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). New York: Curran Associates, Inc., 2019: 1-2.
- [6] BOUVARD O, LANINI M, BURNIER L, et al. Mobile Communication through Insulating Windows: A New Type of Low Emissivity Coating [J]. Energy Procedia, 2017, 122: 781-786.