

具有抗表面波特性的宽带高效率 透明车载玻璃天线分析与设计

张柏豪¹, 陈志兴², 周文骏¹, 张 劭^{2,3}, 邓固颖¹, 区俊辉⁴, 苏华峰^{1,6*}, 章秀银^{5,6}

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 2. 福耀玻璃工业集团股份有限公司, 福建福州 350300;

3. 广州福耀玻璃有限公司, 广东广州 511340; 4. 华南理工大学未来技术学院, 广东广州 510641;

5. 华南理工大学微电子学院, 广东广州 511442; 6. 人工智能与数字经济广东省实验室(广州), 广东广州 510335)

摘 要: 面向智能网联汽车的4G/5G通信的新需求, 本文提出了一种具有抗表面波功能的宽带高效率透明玻璃天线设计方法。车载玻璃的大尺寸和高介电常数特性容易使天线激励起强烈表面波, 大量电磁波无法有效地辐射到自由空间中, 导致天线辐射效率下降和方向图畸变, 而鲜有研究工作对表面波问题进行深入探究。针对这一难题, 本文深入分析呈奇对称分布电流的辐射特性, 发现其激励的表面波会在垂直电流的方向上反相抵消, 由此推出, ϕ 方向连续且奇对称分布的电流在大尺寸车载玻璃上的表面波电磁场相互抵消, 从而抑制表面波传播。基于此, 分析阶梯式圆柱玻璃天线的电磁场特性, 揭示其 TM_{0n} 模式在大尺寸车载玻璃分界面上的电流呈现 ϕ 方向连续且奇对称分布的特性, 因此具有天然的抗表面波特性, 从而在高介电常数的大尺寸车载玻璃中实现高效率的天线辐射。此外, 阶梯式圆柱玻璃天线的 TM_{0n} 模式辐射特性等效于垂直水平面的单极子天线, 具有垂直极化特性和水平全向的辐射能力。在此基础上, 采用同轴探针馈电阶梯式玻璃谐振器以仅激励 TM_{0n} 模式, 并根据玻璃天线的电场分布特性, 从下到上逐层调控圆柱体玻璃尺寸, 能够同时优化天线的输入阻抗实部与虚部, 使得输入阻抗实部向 $50\ \Omega$ 靠近, 虚部趋近于零。一方面, 探针与玻璃天线的匹配性能得到改善, 天线的阻抗带宽由此得到提升; 另一方面, 通过减少被束缚在近场的能量并转换为远场辐射, 使得天线的平均辐射效率绝对值也得到增加。采用透明的蓝宝石玻璃谐振器、介质基板和导电薄膜组装车载玻璃天线, 完成天线的透光性设计。将透明的阶梯式玻璃天线应用于模拟的车顶天幕玻璃场景中进行仿真和实测, 天线工作频段覆盖 $1.56\text{ GHz}\sim 4.16\text{ GHz}$, 相对带宽达到 90.9% , 带内辐射效率高于 80% , 平均增益为 3.9 dBi 。同时, 天线实现了垂直极化和水平全向辐射的性能且交叉极化大于 15 dB , 辐射方向图没有受到表面波的干扰而出现波纹或凹坑, 且天线具有良好的透光性能。实验结果证明天线可以布设于车辆的大尺寸天幕玻璃上, 具有实际的应用价值。

关键词: 宽带; 玻璃天线; 垂直极化; 透明; 抗表面波; 车载天线

基金项目: 国家自然科学基金(No.62474072); 广州市增城区科技计划(No.2024ZCKJ02)

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2026)06-2692-14

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20260364

Analysis and Design of Wideband High-Efficiency Transparent Vehicular Glass Antenna with Surface Wave Self-Cancelling

ZHANG Baihao¹, CHEN Zhixing², ZHOU Wenjun¹, ZHANG Shao^{2,3},

DENG Guying¹, OU Junhui⁴, SU Huafeng^{1,6*}, ZHANG Xiuyin^{5,6}

(1. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. Fuyao Glass Industry Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350300, China;

3. Guangzhou Fuyao Glass Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511340, China;

4. School of Future Technology, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

5. School of Microelectronics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 511442, China;

6. The Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory of Guangdong Province (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 510335, China)

Abstract: In response to the new demands of 4G/5G communication for intelligent connected vehicles, this paper proposes a design for a wideband high-efficiency transparent glass antenna with surface wave self-cancelling function. The large size and high dielectric constant of the vehicular glass make it easy for the antenna to excite strong surface waves. A large number of electromagnetic waves cannot be effectively radiated into free space, resulting in a decrease in antenna radiation efficiency and distortion of the radiation pattern. However, few research works have conducted in-depth studies on the

surface wave issue. To address this challenge, this paper conducts an analysis of the radiation characteristics of current with an odd symmetric distribution. It is discovered that the surface waves excited by this current will cancel each other out in the opposite direction of the current. Therefore, it can be concluded that the surface wave fields of the current that is continuous and odd-symmetric in the ϕ direction on the large-sized vehicle glass mutually cancel each other out, thereby suppressing the surface waves. Based on this, the electromagnetic field characteristics of the stepped cylindrical glass antenna are analyzed, revealing that the current of the TM_{0n} mode in the stepped cylindrical glass antenna at the interface of the large-sized vehicular glass presents a continuous and odd-symmetric distribution in the ϕ direction. Therefore, it has surface wave self-cancelling characteristics, and thus realizes high radiation efficiency in the high dielectric constant large-sized vehicular glass. In addition, the radiation characteristics of the TM_{0n} mode of the stepped cylindrical glass antenna are equivalent to that of a monopole antenna in the vertical horizontal plane, having vertical polarization and horizontal omnidirectional radiation capability. On this basis, a probe-fed stepped glass resonator is adopted to excite only the TM_{0n} mode. According to the electric field distribution characteristics of the glass antenna, by adjusting the size of the cylindrical glass from bottom to top, the real part and the imaginary part of the antenna's input impedance can be simultaneously optimized. The real part of the input impedance approaches 50 ohms, and the imaginary part approaches zero. On the one hand, the matching performance between the probe and the glass antenna has been improved, and as a result, the impedance bandwidth of the antenna has increased. On the other hand, by reducing the energy trapped in the near field and converting it into far-field radiation, the absolute value of the average radiation efficiency increases. Using transparent sapphire glass resonators, dielectric substrates and conductive films, a vehicular glass antenna is assembled to complete the light-transmitting design of the antenna. The transparent stepped glass antenna is applied to the simulated roof glass scenario for simulation and measurement. The antenna's frequency band covers 1.56 GHz~4.16 GHz, with a relative bandwidth of 90.9%. The in-band radiation efficiency is higher than 80%, and the average gain is 3.9 dBi. Meanwhile, the antenna achieves vertical polarization and horizontal omnidirectional radiation performance, with cross-polarization greater than 15 dB. The radiation pattern, which shows no ripples or pits, is not disturbed by surface waves, and the antenna has good translucent performance. The experimental results demonstrate that the antenna can be installed on the large-sized glass of vehicles and has practical application value.

Keywords: wideband; glass antenna; vertical polarization; transparent; surface wave self-cancelling; vehicular antenna

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62474072); Guangzhou Zengcheng District Science and Technology Project (No.2024ZCKJ02)

0 引言

随着智能网联汽车及相关产业的发展,车辆的通信需求也不断增加。天线作为智能网联汽车无线信号传输的唯一部件,决定了车载无线信道质量的优劣,是车载无线通信的关键性部件之一。现有主流车载天线包括鲨鱼鳍天线和内置多频天线^[1]等,但因其受制于空间尺寸,导致天线间的同、异频互耦严重^[2],恶化了车载无线通信质量,无法满足智能网联汽车日益增长的通信需求。

汽车玻璃作为车辆表面的一部分,如果天线本身具有透光能力,并将其与玻璃相结合,可以有效解决传统天线空间受限等问题,还能够保证驾乘人员的视线不受影响,提升驾驶体验和安全性。目前,氧化铟锡(ITO)薄膜^[3-4]、金属网格^[5]、纳米银线薄膜^[6]等光学透明导体已经广泛应用于透光天线领域。通过磁控溅射、喷涂等工艺,将金属或金属氧化物附着于膜片上,使其能够导电的同时兼具透光效果。但是,透明导体不仅电导率低,导致天线辐射效率不高,而且车载玻璃介电常数较高($\epsilon_r \approx 7.1$),透明导体加载其上

会产生严重的高频表面波辐射,致使天线辐射性能畸变^[7]。上述文献对如何消除车载玻璃表面波的传播并提升辐射效率缺少相关研究,因此难以应用于汽车玻璃天线设计中。

除了上述的金属透明导体外,透明的介质谐振器天线也是一种同时兼顾透光和辐射的有效方案。介质谐振器天线因其具有低损耗、低色散和小型化^[8]等优点而得到广泛应用。但是,传统的介质谐振器天线具有很高的Q值^[9],导致天线的阻抗带宽较窄。虽然通过堆叠介质^[10-11]、引入空气槽^[12]和调整馈电结构^[13]等方法,这些方法是通过降低Q值或者引入额外的介质、馈电模式来拓展天线的带宽,但是这类介质谐振器天线的透光性较差,无法在透明的车载玻璃上应用。文献[14]提出了一种基于玻璃基材的透明天线设计方案,但是该天线的带宽相对较窄,难以覆盖主流的移动通信频段 1.7 GHz~3.8 GHz。此外,上述介质谐振器天线均没有考虑大尺寸车载玻璃表面波辐射造成的天线性能恶化难题。因此,如何设计出能够抗表面波并具有宽带特性的透明天线是当前车载天线设计中一个需要解决的问题。

针对上述问题,本文提出了一种以蓝宝石玻璃(主要成分为三氧化二铝)为基材的阶梯式玻璃天线。通过分析圆柱体玻璃内部 TM_{0n} 模式的电磁场分布情况,证明了处于该模式下的阶梯式玻璃天线具有抗表面波和垂直极化特性,而且具有水平全向辐射能力。天线由同轴探针激励 TM_{0n} 模式,并根据不同模式下的场分布,从下到上逐层调控圆柱体玻璃,能够同时改善天线的输入阻抗实部和虚部,分别使得天线的带宽和辐射效率得到提升。通过采用有机玻璃作为基板、纳米银线薄膜为电气地,使天线具有透光性能。天线的测试结果表明,其中心频率为 2.86 GHz,相对带宽为 90.9%,H 面方向图表现为全向辐射,且交叉极化大于 15 dB。在大尺寸车载玻璃环境下,天线的辐射方向图和增益依然保持稳定,具有一定工程应用价值,可以设置于车辆的天幕玻璃等场景。

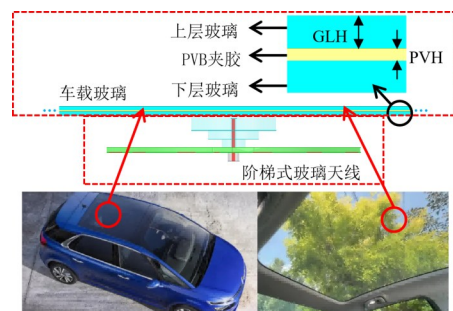
1 天线结构设计

本文设计的阶梯式玻璃天线主要应用场景为汽车车顶的天幕玻璃上,如图 1(a)所示。其中,车载天幕玻璃为福耀集团生产的标准化工业产品,其组成结构为上下两层玻璃和中间用来黏接的聚乙烯醇缩丁醛(PolyVinyl Butyral, PVB)夹胶,上下两层玻璃的介电常数为 7.1,损耗正切角为 0.009,厚度为 2.1 mm, PVB 夹胶的介电常数为 2.96,损耗正切角为 0.062,厚度为 0.76 mm。阶梯式玻璃天线的结构如图 1(b)和图 1(c)所示,由多层圆柱体玻璃、探针馈电结构和圆形基板组成。多层圆柱体玻璃为蓝宝石材料(介电常数为 9.2,损耗角正切为 0.004),由三层不同半径和高度的圆柱体玻璃堆叠组成,三层圆柱体的半径从上到下依次递减,且玻璃从底部中心被钻入一盲孔,同轴探针插入其中。圆形基板是无色有机玻璃(亚克力),介电常数为 3.4,损耗角正切为 0.001,其上表面与圆柱体玻璃的下表面相贴合。天线的电气地采用纳米银线薄膜,厚度为 0.125 mm,方阻为 $15 \Omega/\text{cm}^2$,被粘合于圆形基板的下表面,并与同轴线的外导体相连接。本文提出的阶梯式玻璃天线通过黏合的方式固定于正方形车载玻璃的下表面上,且具体参数如表 1 所示。

2 玻璃天线分析与设计

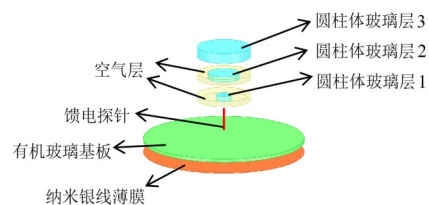
2.1 天线受表面波影响分析

对于具有大表面积和高介电常数的车载玻璃,其层叠结构可视为介质波导。如果将常规天线如偶极子天线平放在车载玻璃上,会激励表面波,即天线产生的电磁波沿着玻璃与空气的交界面传播,而无法辐射到自由空间中,这会影响天线的辐射效果并导致方



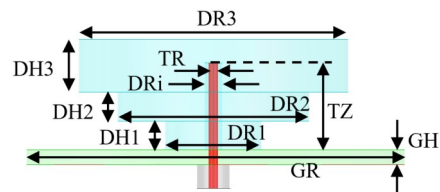
(a) 加载车载天幕玻璃的阶梯式玻璃天线结构示意图

(a) Schematic diagram of the stepped glass antenna structure for installing the vehicle-mounted sunroof glass



(b) 阶梯式玻璃天线结构爆炸图

(b) Eruption diagram of the stepped glass antenna structure



(c) 阶梯式玻璃天线尺寸示意图

(c) Diagram of the size of the stepped glass antenna

图 1 天线示意图

Figure 1 Antenna schematic diagram

表 1 天线尺寸参数

单位:mm

Table 1 Antenna size parameters

unit:mm

参数	尺寸	参数	尺寸
DR1	14	DRi	3.6
DR2	30	TZ	17
DR3	50	GR	150
DH1	5	GH	3
DH2	5	GLH	2.1
DH3	9	PVH	0.76
TR	2		

向图畸变。为了描述这种现象,本文采用半波长偶极子天线和长宽均为 300 mm 的正方形车载玻璃来模拟表面波所带来的影响。如图 2 所示,将半波长偶极子天线设置于正方形车载玻璃的中央,并对半波长偶极子天线的臂长度 L_m 分别取 25 mm、14 mm、10 mm

和 8 mm,通过仿真得到四个不同 L_m 对应的谐振频率分别为 1.6 GHz、2.5 GHz、3.3 GHz 和 4.2 GHz。

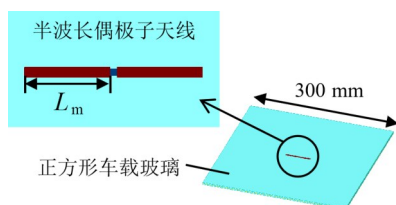


图2 加载大尺寸车载玻璃的偶极子天线示意图

Figure 2 Schematic diagram of dipole antenna for loading large-sized vehicle glass

从图3所示的四个谐振频率处电场分布图可以看出,随着频率升高,车载玻璃表面的电场分布变得更加密集,有大量的电磁波沿着玻璃表面向四周传播,即天线激发出的表面波也随着频率升高而增加。

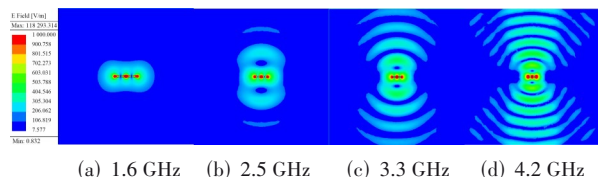


图3 偶极子天线在玻璃表面的电场分布图

Figure 3 The electric field distribution map of the dipole antenna on the glass surface

同样的,图4的四个谐振频率处的三维方向图也证明了,当天线的工作频率升高时,受到表面波的影响,方向图也随之产生畸变。特别是当频率大于 3 GHz 时,方向图出现了明显的凹坑和毛刺。这种状态下的天线辐射性能会导致无线通信质量降低,无法满足现实车载通信的需求。

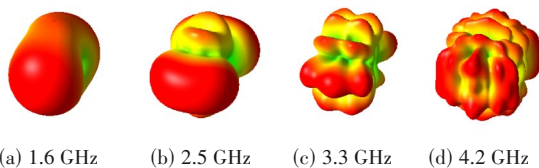


图4 偶极子天线在大尺寸车载玻璃上的三维方向图

Figure 4 The three-dimensional radiation pattern of the dipole antenna on large-sized vehicle glass

2.2 表面波自抑制机理分析

基于上述现象,为了通过天线本身的电学特性解决表面波问题,对车载玻璃表面呈特殊分布的电流辐射特性进行分析。

如图5所示,在大尺寸车载玻璃上,存在两个沿 y 方向呈奇对称分布的电流,电流幅值相等、方向相反。对于单个电流,其在车载玻璃中激励的表面波传

播特性与偶极子辐射类似,沿 x 轴方向为场强最大的传播方向。当两个电流被同时激励时,电流在车载玻璃上激励的表面波在 x 方向上的幅值相等且相位差为 180° ,因此表面波会在 x 方向相互抵消,如图5的阴影部分为电磁场抵消的区域。进一步地,存在四个分别沿 x 方向和 y 方向呈奇对称分布的电流时,在 x 方向、 y 方向和两侧 45° 的方向上,均会使表面波反相抵消,表面波抵消区域如图5的阴影部分。由此,可以总结表面波自消除的电流分布规律:当存在 n 个环绕车载大玻璃中心呈放射状分布(奇对称分布)的电流($n=2^p, p=1, 2, \dots, t$),且 p 趋于无穷大时,奇对称分布的电流在 ϕ 方向上连续分布,使得电流在车载玻璃上激励的表面波在所有方向上都会相互抵消并被显著抑制,从而实现具有该类型电流分布特性的天线在车载玻璃中的表面波自消除特性。

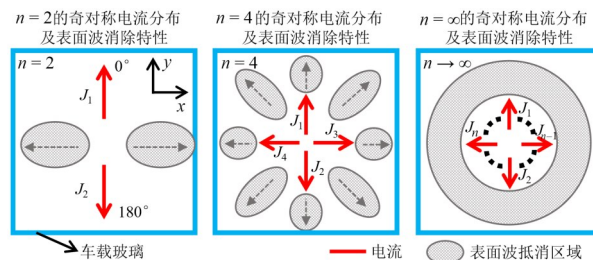


图5 表面波抑制原理示意图

Figure 5 Schematic diagram of the surface wave suppression principle

为了验证上述原理,构建如图6所示的天线模型,在边长为 300 mm 的正方形车载玻璃表面设置 8 个环绕中心呈放射状分布的单极子天线,并通过 HFSS 仿真验证。通过图7中 4 GHz 处的电场分布图可以观察到,当只激励天线 1 时,最强电磁场的传播方向为 x 方向;然后,同时激励天线 1 和天线 5 时,表面波在 x 方向上相互抵消,出现明显的表面波消除区域;进一步激励天线 1、天线 3、天线 5 和天线 7 时,更多方向上的表面波会被抑制;最后,当所有的 8 个天线被同时激励时,在天线之外的玻璃表面上,不再有明显的电场分布,即整个玻璃表面的表面波得到了有效的抑制;由此可见,随着奇对称电流的节数越来越多,表面波抑制效果会更加显著。因此,上述仿真结果验证了理论分析结论,即通过在车载玻璃上设计具有 ϕ 方向连续且奇对称电流分布的天线结构,可以实现车载玻璃中的表面波相互抵消,从而具有天线的抗表面波性能。

2.3 玻璃天线的电磁特性分析与设计

基于上述的表面波自抑制理论分析,本文提出了如图8(a)所示的圆柱玻璃天线,该天线采用中心加载同轴探针的馈电方式。根据 R.E.Collin 的波导模式

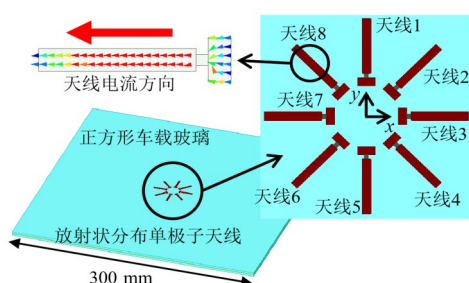
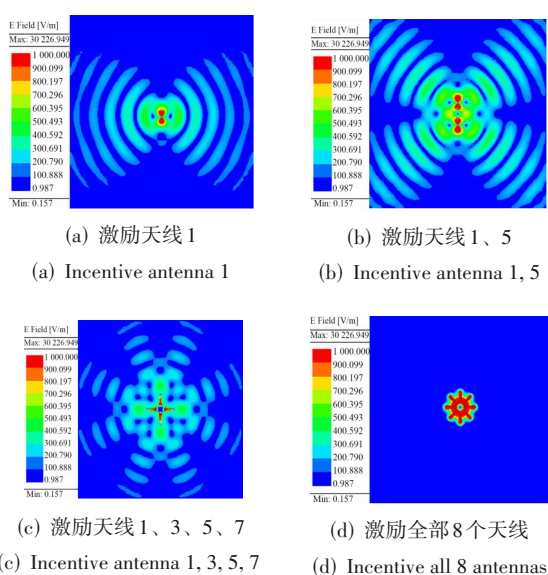


图6 加载大尺寸车载玻璃的放射状单极子天线示意图

Figure 6 Schematic diagram of a radial monopole antenna for loading large-sized vehicle glass

图7 激励不同单极子天线在4 GHz处的玻璃表面电场分布对比图
Figure 7 Comparison diagram of glass surface electric field distribution of different monopole antennas at 4 GHz

激励理论^[15], 电流(J_z)为轴向分布的探针在玻璃谐振器内部激励的电磁场强度正比于 $E \cdot J_z$ (E :玻璃谐振器的电场分布)的体积分, 因此图8(a)的馈电探针只能在玻璃谐振器天线上激励具有 E_z 方向电场分布的TM模式, 并显著抑制其他电磁场模式。

在此基础上, 根据式(1)对圆柱体玻璃的低阶TM模式^[16-17], 即 $TM_{0np+\delta}$ 模式的谐振频率进行分析, 如式(1):

$$f_{0np+\delta} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r+2}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{0n}}{D/2}\right)^2 + \left[\frac{\pi}{2H}(2p+1)\right]^2} \quad (1)$$

其中, χ_{0n} 为 $J_0'(\chi_{0n})=0$ 的第 n 个解, p 为整数, δ 为小数, $p+\delta$ 代表沿轴向进行的不完整半周期正弦旋转。通过式(1)可知圆柱体玻璃 $TM_{0np+\delta}$ 模式的谐振频率与其直径和高度均成反比。因此, 根据上述公式特性, 将圆柱玻璃天线的直径 D 和高度 H 分别设计为

50 mm和19 mm。可以发现在该尺寸下, 接近工作频率的电磁场模式有 $TM_{01\delta}$ 、 $TM_{02\delta}$ 和 $TM_{011+\delta}$ 三种模式, 谐振频率分别为2.4 GHz、4.0 GHz和4.2 GHz。因此本文以 $TM_{01\delta}$ 、 $TM_{02\delta}$ 和 $TM_{011+\delta}$ 模式为基础, 分析并实现天线的抗表面波和宽带性能。

为验证上述理论公式, 通过HFSS仿真得到图8(a)中天线的 S_{11} 曲线, 如图8(b)所示, 此时天线共有三个谐振点, 对应的谐振频率分别为2.1 GHz、3.5 GHz和4 GHz, 与上述公式计算得出的谐振频率相近。通过观察图9所示的圆柱体玻璃的磁场分布, 可以确定所需频带内仅有的三个谐振点分别对应 $TM_{01\delta}$ 、 $TM_{02\delta}$ 和 $TM_{011+\delta}$ 模式, 并不存在其他的介质模式。

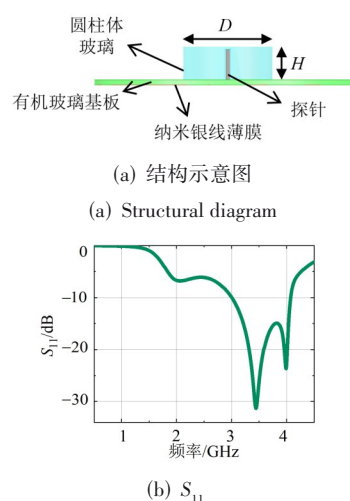


图8 圆柱玻璃天线

Figure 8 Cylindrical glass antenna

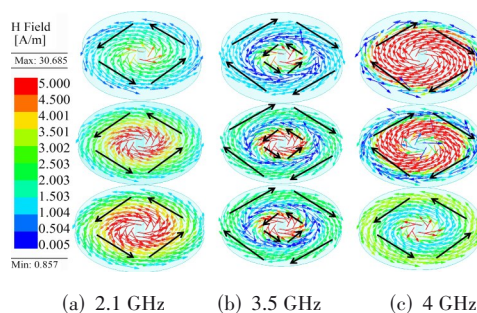


图9 圆柱体玻璃磁场分布

Figure 9 The magnetic field distribution of the cylindrical glass

进一步地, 如图10(a)所示, 在圆柱玻璃天线的顶部加载正方形车载玻璃, 并模拟实际车顶天幕场景。在加载车载玻璃后, 由于两者的高度与介电常数处于相同量级, 此时圆柱玻璃天线的等效直径与高度会随之增加, 导致各个模式的谐振频率降低约10%~20%。图10(b)为圆柱玻璃天线未加载车载玻璃与加载不同尺寸车载玻璃的 S_{11} 仿真结果对比。从图中可见,

加载车载玻璃后各模式的谐振点均向低频小幅移动,而且当正方形车载玻璃的边长 GL 大于 300 mm 后,各谐振点便不再有明显的变化。因此,在实际玻璃天线设计中,可以通过本文分析结论预判车载玻璃对天线谐振频率的影响程度,提前规划指标余量。同时,使用 GL 为 300 mm 的正方形车载玻璃模拟实际应用场景,完成玻璃谐振器天线设计。

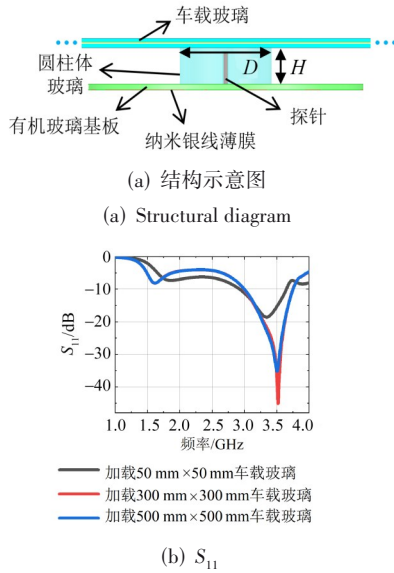


图 10 加载车载玻璃的圆柱玻璃天线

Figure 10 Cylindrical glass antenna for loading vehicle glass

基于上述的模式分析,天线在工作频段内只存在 $TM_{01\delta}$ 、 $TM_{02\delta}$ 和 $TM_{011+\delta}$ 模式,在此基础上,对这些模式展开抗表面波及辐射特性分析。

在圆柱坐标系内,只有 z 向单位矢量为常矢量,故通常只选择 z 向为纵向场方向。对于 TM_{0n} 模式,其场分布公式可以通过纵向场法求出,其中 E_z 可以表示为

$$E_z = E_0 J_0(k_\rho \rho) \cos(k_z z) \quad (2)$$

其中: J_0 为第一类零阶贝塞尔函数; E_0 为常数项; k_ρ 为径向波束,而横向场可根据下列公式通过 E_z 求出:

$$E_\rho = \frac{1}{k_\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r \partial z} - \frac{j\omega\mu}{k_\rho^2 \rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \quad (3)$$

$$E_z = \frac{1}{k_\rho^2 \rho} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi \partial z} + \frac{j\omega\mu}{k_\rho^2} \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \quad (4)$$

$$H_\rho = \frac{j\omega\varepsilon}{k_\rho^2 \rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} + \frac{1}{k_\rho^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \rho \partial z} \quad (5)$$

$$H_\phi = -\frac{j\omega\varepsilon}{k_\rho^2} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{k_\rho^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi \partial z} \quad (6)$$

由于 TM_{0n} 模式中不存在 z 向的磁场,因此上述公式的第二项为 0,并且 E_z 在 ϕ 方向上呈均匀分布,所

以横向场中只存在 E_ρ 和 H_ϕ ,可以由式(7)和式(8)表达:

$$E_\rho = \frac{jk_z}{k_\rho} E_0 J_1(k_\rho \rho) \sin(k_z z) \quad (7)$$

$$H_\phi = -\frac{j\omega\varepsilon}{k_\rho} E_0 J_1(k_\rho \rho) \cos(k_z z) \quad (8)$$

其中, J_1 为第一类一阶贝塞尔函数。并且由径向边界条件(H_ϕ 在 $\rho = D/2$ 时为零)决定, n 为径向波束 $k_\rho \rho$ 使 $J_1(k_\rho \rho)$ 为零的第 n 个解,在场分布上即表现为径向的半周期数。

此时,电场只存在 ρ 和 z 方向的分量,磁场只存在 ϕ 方向的分量。圆柱体玻璃内部的平面场分布情况如图 11(a) 所示,这里的磁场线是在水平面内围绕圆柱轴线旋转的一个个同心圆,如图 11(b) 所示。因此,根据电磁场的边界条件公式,圆柱体玻璃与车载玻璃接触面上的电流分布可由式(9)计算:

$$\vec{n} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (9)$$

其中, $\vec{n}$ 为 z 方向, $\vec{H}$ 为 ϕ 方向,由此得到玻璃柱面上的等效电流 $\vec{J}$ 为 ρ 方向。此时,如图 11(b) 所示,圆柱体玻璃与车载玻璃接触面上的等效电流呈连续且奇对称分布特性,其任意两个关于对称平面呈奇对称分布的等效电流矢量幅值相同且方向相反,这与上述图 5(c) 中的电流分布相同。因此,在本文工作频段内,圆柱体玻璃谐振器天线只存在 $TM_{01\delta}$ 、 $TM_{02\delta}$ 和 $TM_{011+\delta}$ 三个 TM_{0n} 模式,所以可以稳定地激励出连续且奇对称电流,实现车载玻璃内部的表面波相互抵消,在圆柱体玻璃与车载玻璃接触面之外的区域抑制表面波的传播和辐射,使得上述天线具有天然的抗表面波性能。因此圆柱玻璃天线 TM_{0n} 模式辐射场不受大尺寸玻璃的表面波影响,辐射方向图不会发生畸变。

另一方面,在圆柱体玻璃的柱面上的等效电流也可由式(9)计算得到。不同的是,如图 12 所示,此时 $\vec{n}$ 为 ρ 方向, $\vec{H}$ 为 ϕ 方向,由此得到圆柱体玻璃柱面上的等效电流 $\vec{J}$ 为 z 方向,而该等效电流分布与一个垂直水平面放置的电单极子的电流分布高度相似。此时,圆柱玻璃天线具有水平全向辐射和垂直极化特性,其辐射特性与垂直水平面放置的电单极子完全一致。

根据上述分析,本文对图 10(a) 的天线进行仿真,得到图 13 和图 14 的电场图和三维方向图,可以发现,在 1.6 GHz、2.5 GHz、3.3 GHz 和 4.2 GHz 处,玻璃中绝大多数的电场仅存在于圆柱玻璃天线与车载玻璃贴合的区域内,几乎没有电磁波外泄到周围的玻璃中,很好地抑制了表面波的激励。同时,方向图显示天线拥有良好的水平全向辐射能力,具有垂直极化特性,适合应用在大尺寸的车载玻璃上。

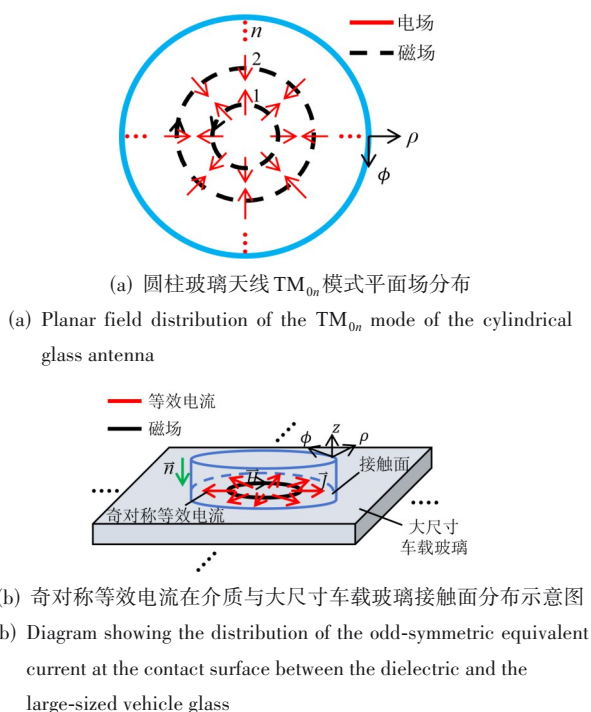


图 11 圆柱玻璃天线场分布图

Figure 11 The field distribution diagram of the cylindrical glass antenna

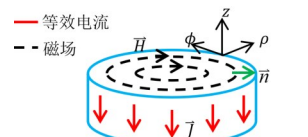


图 12 圆柱玻璃天线等效电流分布

Figure 12 Equivalent current distribution of cylindrical glass antenna

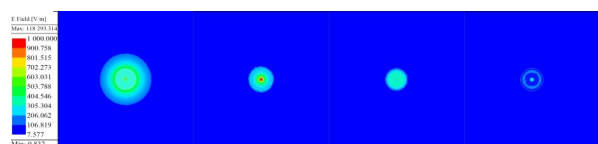


图 13 圆柱玻璃天线在大尺寸车载玻璃上的接触面电场分布图

Figure 13 The electric field distribution map of the cylindrical glass antenna on the large-sized vehicle glass

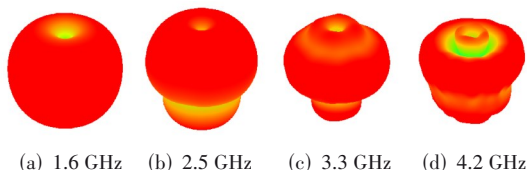
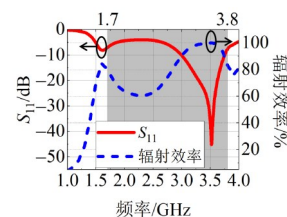
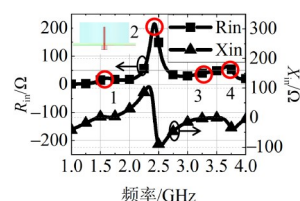


图 14 圆柱玻璃天线在大尺寸车载玻璃上的三维方向图

Figure 14 The three-dimensional radiation pattern of the cylindrical glass antenna on large-sized vehicle glass

然而,通过图 15 中的 S_{11} 曲线、辐射效率曲线和输入阻抗曲线可以发现,天线在 1.5 GHz-4 GHz 内共有四个谐振点,但第二个谐振点对应的输入阻抗实部远大于 50Ω ,虚部变化剧烈。导致天线在第二谐振点附近匹配较差,天线的相对带宽只有 22.2%,并且辐射效率下降严重,带内辐射效率最低只有 60%,无法满足我们对所需频段的覆盖需求。

同时,图 16 分别给出了四个谐振点处的电场密度分布情况。通过图 16 的电场密度分布可以发现,第一谐振点和第三谐振点处的电场更多集中在圆柱体玻璃的中上层,下层的电场密度相对较小。而第二谐振点和第四谐振点处的电场则偏向于集中在中下层,上层的电场密度相对较小。这里的电场分布情况会对后续的带宽匹配设计提供研究基础。

(a) S_{11} 和辐射效率曲线(a) S_{11} and radiation efficiency curve

(b) 输入阻抗曲线

(b) Input impedance curve

图 15 圆柱玻璃天线仿真结果

Figure 15 Simulation results of cylindrical glass antenna

2.4 宽带匹配设计

针对上文所述的圆柱玻璃天线中的匹配较差的问题,本节将对图 10(a)的圆柱玻璃天线进行优化并演化为如图 1 所示的阶梯式玻璃天线。

通过对图 15(b)中的输入阻抗曲线进行分析,其第一谐振点与第三谐振点的输入阻抗实部小于 50Ω ,而第二谐振点和第四谐振点的输入阻抗实部大于 50Ω 。为了改善天线各谐振点处的输入阻抗,将圆柱体玻璃从上到下分为上中下三层,首先保持上、中层圆柱体玻璃直径不变,减小下层圆柱体玻璃的直径 DR1。

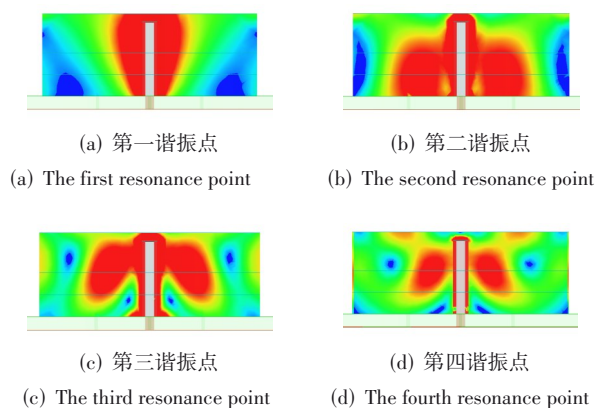


图 16 圆柱体玻璃内部电场密度分布

Figure 16 The density distribution of the electric field inside the cylindrical glass

由于第一谐振点和第三谐振点的电场分布如图 16 所示,更多地集中在整个圆柱体玻璃的中上层,因此通过缩小下层圆柱体玻璃的直径,可以使整个圆柱体玻璃中的电场更加集中于中上层,会使探针上部附近的电场变得更加密集,增强了探针与模式间的耦合,从输入端口看即表现为阻抗实部增加,因此会使第一、第三谐振点处的阻抗实部向 $50\ \Omega$ 靠近。

而对于第二谐振点和第四谐振点,通过缩小下层圆柱体玻璃的直径,可以使得圆柱体玻璃的等效并联 RLC 回路中的 R、L、C 都会随之不同程度地减小^[18],相应地,整个等效电路的输入阻抗也会减小。因此,通过这种方式可以降低天线第二谐振点和第四谐振点处的输入阻抗,使其同样会向 $50\ \Omega$ 靠近,从而改善天线的匹配。

经过仿真得到图 17 的输入阻抗曲线,可以发现通过逐渐缩小 DR1 的尺寸,第一谐振点和第三谐振点的阻抗实部实现小幅提升,第二谐振点和第四谐振点处的输入阻抗实部实现下降,四个谐振点处的输入阻抗实部均向 $50\ \Omega$ 靠近,与上述分析过程相吻合,天线的匹配性能获得了改善。并且,四个谐振点的频率都有小幅增加,即谐振频率与圆柱体玻璃的直径成反比。

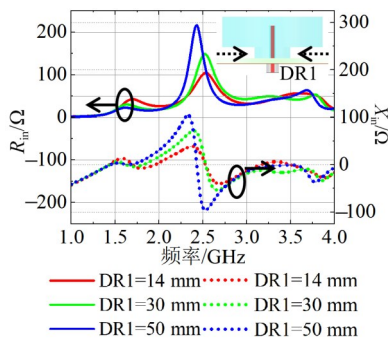


图 17 不同 DR1 时的输入阻抗曲线

Figure 17 Input impedance curves at different DR1 values

在保持上层圆柱体玻璃直径不变和在下层圆柱体玻璃直径已经减小的前提下,再减小中层圆柱体玻璃的直径 DR2。通过图 18 的输入阻抗曲线可以发现,第一谐振点和第三谐振点的阻抗实部小幅提升,第二谐振点和第四谐振点处的阻抗实部下降,阻抗实部的变化与前文调整 DR1 时一致。

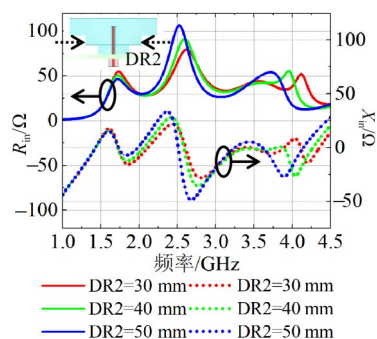


图 18 不同 DR2 时的输入阻抗曲线

Figure 18 Input impedance curves at different DR2 values

在此基础上,第二、第四谐振点的频率同样有小幅增加,但第一、第三谐振点的频率基本没有变化,这是因为当对 DR2 进行调整时,如图 16 所示,这里所调整的 DR2 范围恰巧处于第一、第三谐振点对应模式下介质场强较弱的部分,因此在此范围内调整 DR2 对这两个谐振点的频率影响较小,不会引起频率明显偏移。

除此之外,对图 17 和图 18 中的输入阻抗虚部变化进行分析可知,调控 DR1 和 DR2 均会使输入阻抗虚部趋近于零,曲线整体变得平滑。在玻璃天线中,输入阻抗的虚部代表着能量被束缚在玻璃附近的近场区域内,即电抗能量。虚部越大,能量被束缚得越多,向外辐射的电磁波越少,此时天线的辐射效率越低。而通过如此逐层向下缩减圆柱体玻璃的尺寸,输入阻抗虚部趋近于零,天线原来存储在近场的能量会转化为远场辐射,从而提升天线的辐射效率。如图 19 所示,通过对比不同尺寸的 DR1 和 DR2 可知,随着 DR1 和 DR2 的尺寸变小,天线的辐射效率得到显著提升,带内的平均辐射效率绝对值提升了 15%,充分验证了上述分析的结论。

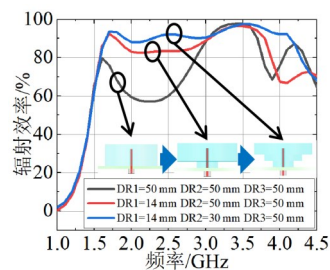


图 19 缩减圆柱体玻璃直径的辐射效率对比曲线

Figure 19 The comparison curve of radiation efficiency after reducing the diameter of the cylindrical glass

通过上述分析和向下逐层调控圆柱体玻璃尺寸后,天线的输入阻抗实部向 $50\ \Omega$ 靠近,特别是第二谐振点的输入阻抗实部得到大幅下降,并且输入阻抗的虚部均趋于平滑,这使得天线在不引入额外结构的前提下,有效地优化了四个谐振点处的输入阻抗,实现阻抗匹配,拓展天线的带宽并提升天线辐射效率。最后,为了兼顾蓝宝石的实际加工与结构强度,DR1 与 DR2 的值不能过小,经过 HFSS 仿真优化,DR1 和 DR2 分别确定为 14 mm 和 30 mm, DH1、DH2 和 DH3 分别确定为 5 mm、5 mm 和 9 mm。

在此基础上,为了研究探针针对匹配的影响,下面继续对同轴探针的相关参数进行仿真和优化。图 20(a) 描述了探针长度 TZ 在 16 mm、17 mm、18 mm 取值下的 S_{11} 对比,可以发现当 TZ 增大或减小时,只有第二个谐振频率随之移动,而第一、三、四谐振频率基本保持不变。由此可以判断第二个谐振点为探针谐振点^[19],即由于馈电结构而额外引入的谐振点,与玻璃谐振器本身无关。

图 20(b) 描述了玻璃盲孔直径 DTR 在 1.4 mm、1.6 mm、1.8 mm 取值下的阻抗对比,可以发现当 DTR 增大时,探针谐振点对应的容性降低,玻璃谐振器模

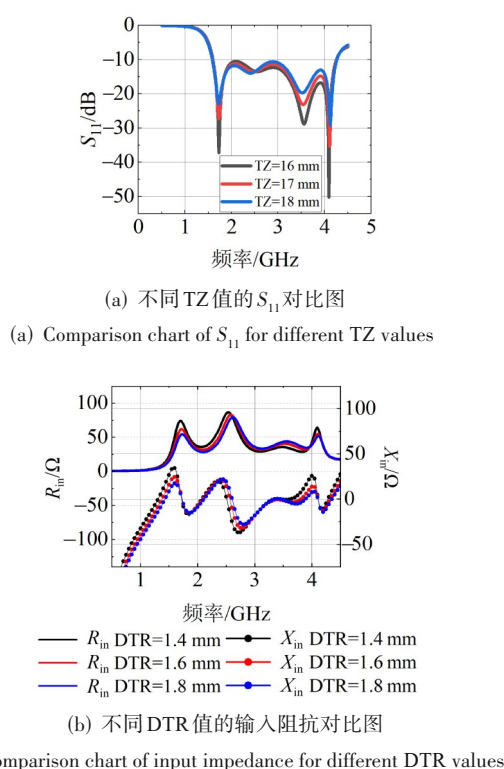


图 20 馈电结构参数对天线带宽与输入阻抗的影响
Figure 20 The influence of feed structure parameters on antenna bandwidth and input impedance

式对应的感性降低,阻抗虚部趋向于 0。上述变化表明,与馈电结构有关的变量不仅影响探针谐振频率,还会影响探针馈电结构与玻璃谐振器的耦合,通过合理调整探针结构,可以对天线的带宽产生积极的影响。

上述玻璃与探针的仿真表明,通过调整圆柱体玻璃的尺寸,可以调控玻璃谐振器与探针的谐振频率,并改善天线四个谐振点处的匹配情况,从而拓展天线的带宽。但是,调整圆柱体玻璃的尺寸后探针谐振频率也会随之变化,探针谐振点附近的匹配情况还需要进一步优化。于是,通过单独调整馈电探针的长度,将谐振频率调回原来的位置,实现探针谐振频率的独立调控,使其恰好处于玻璃谐振器两个模式的中间,最大化天线的阻抗带宽。

2.5 天线仿真结果

经过对圆柱体玻璃与探针尺寸的优化后,图 10(b) 中的圆柱玻璃天线最终演化为图 1 所示的阶梯式玻璃天线,并通过 HFSS 仿真得到图 21 的结果。天线的带宽覆盖 1.59 GHz~4.26 GHz,相对带宽为 91.3%,相比于图 10(b) 的圆柱玻璃天线阻抗带宽相对提升了 309%,带内的辐射效率优于 85%,平均增益为 3.3 dBi。同时,图 21(b) 给出了天线接地平面材料分别为纳米银线薄膜和金属铜的辐射效率对比,其中纳米银线薄膜的天线辐射效率仅比使用金属铜时低 2%~3%,该结果表明当纳米银线薄膜仅作为接地平面而不是主辐射体材料时,并不会使天线的辐射效率出现明显的恶化。

此外,通过对比图 21(c) 的输入阻抗可知,从圆柱玻璃天线演化到阶梯型玻璃天线的过程中,虽然天

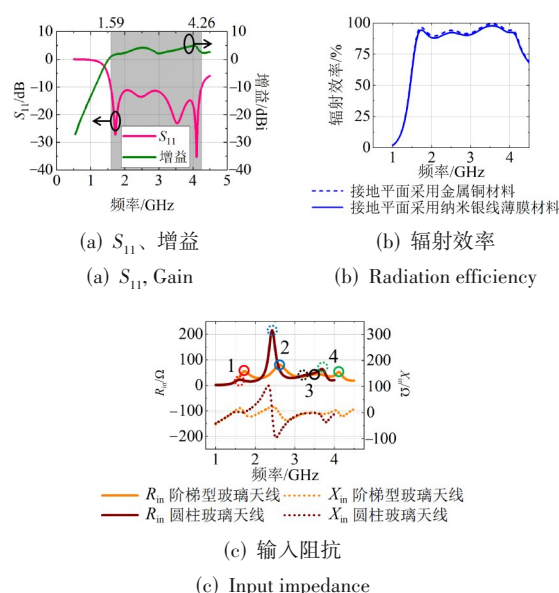


图 21 天线仿真结果
Figure 21 Antenna simulation results

线的边界条件发生改变,但在天线工作频段内依然只存在四个谐振频率,这四个谐振频率分别由 $TM_{01\delta}$ 模式、 $TM_{02\delta}$ 模式、 $TM_{011+\delta}$ 和探针模式贡献。

在此基础上,对比图 9 和图 22 中各模式谐振频率对应的电磁场分布,可以发现,这些电磁场分布的特性几乎一致。该仿真结果表明,在本文所提出天线的工作频带 (1.59 GHz~4.26 GHz) 内,只有 $TM_{01\delta}$ 模式、 $TM_{02\delta}$ 模式、 $TM_{011+\delta}$ 模式和探针模式四种电磁场模式参与天线的谐振与辐射,不存在其他寄生模式的干扰。

图 23 展示了天线在 1.59 GHz、2.92 GHz 和 4.26 GHz 处的 E 面和 H 面归一化方向图,并与未加载车载玻璃,加载长宽为 1 500 mm 和 1 200 mm 的标准车载天幕玻璃,以及加载边长 300 mm、曲率半径 4 000 mm 并且玻璃外围设置宽 75 mm 金属钣金结构的车载玻璃时的方向图进行对比。可以看出,方向图与未加载玻璃基板时没有明显变化,较好地实现了水平全向的辐射性能,表明此天线并未像上述的偶极子天线一样受到表面波带来的恶劣影响,方向图没有产生畸变,从

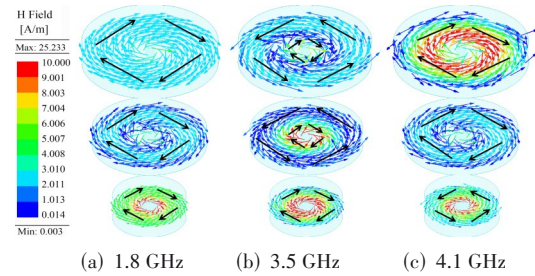


图 22 阶梯型玻璃磁场分布

Figure 22 The magnetic field distribution of the stepped glass

而天线实现了抗表面波特性。在标准车载天幕玻璃的仿真场景中,天线依然具有优异的水平全向辐射,表明车载玻璃的尺寸对天线的辐射性能不会带来负面影响,在实际的车顶环境中能实现良好的全向辐射。此外,在具有 4 000 mm 的曲率半径和宽 75 mm 金属钣金的车载玻璃仿真场景中,天线同样具有优异的水平全向辐射性能,表明玻璃曲率和金属车顶不会对天线的辐射性能造成负面影响。

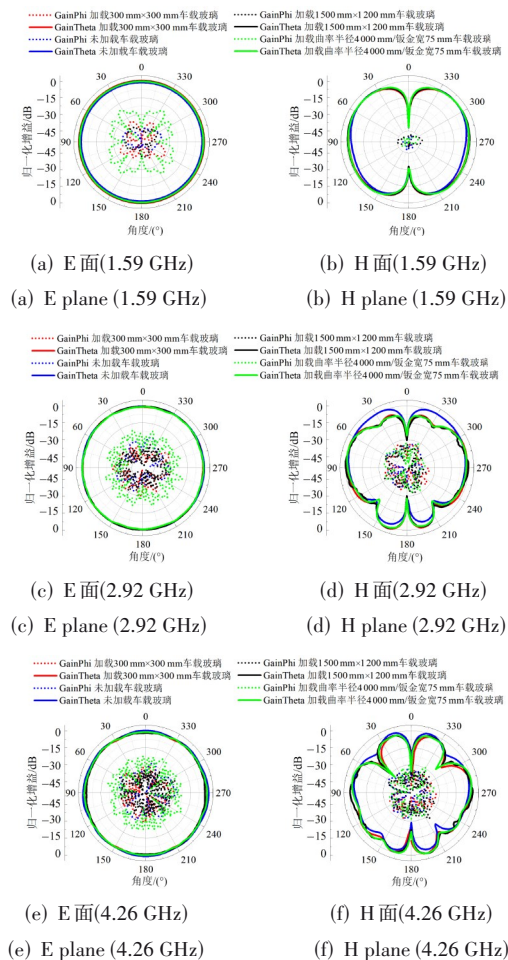


图 23 仿真归一化方向图

Figure 23 Simulation normalized direction pattern

如图 23(c)和图 23(e)所示,在 2.92 GHz 和 4.26 GHz 处 E 面方向图在 45°附近有一个零陷,这是因为天线此时处于如图 9 所示的高阶模式, E 面方向图出现旁瓣从而导致零陷现象的发生。同时天线的交叉极化大于 30 dB,具有良好的垂直极化特性。

3 天线测试结果分析

为验证天线性能,对图 1 的模型进行加工和测试,实物如图 24 所示。其中,天线接地平面使用的纳米银线薄膜表面覆盖有保护膜,以增加其耐久性,其背面铺设背胶,以增加其黏合可靠性。S 参数使用矢量网络分析仪测量,方向图和增益使用微波暗室测量。其中,图 25(a)为天线实测 S_{11} 和增益曲线图,图 25(b)为天线实测辐射效率,并与仿真数据进行了对比。可

以看出,天线的阻抗带宽为 1.56 GHz~4.16 GHz,相对带宽为 90.9%,与仿真带宽基本保持一致,能够很好地覆盖所需的主流无线通信频段 1.7 GHz~3.8 GHz。同时,天线在带内的实测辐射效率优于 80% 且天线平均增益为 3.9 dBi。

图 26 为天线在 1.56 GHz、2.86 GHz、4.16 GHz 处的实测 E 面和 H 面归一化方向图,同样与仿真数据进行对比。可以观察到,天线的实测与仿真数据相吻合,具有良好的水平全向辐射能力和抗表面波特性。在 2.86 GHz 和 4.16 GHz 处 E 面方向图在 30°附近时有一个零陷,这是因为天线此时处于高阶模式, E 面方向图出现旁瓣从而导致零陷现象的发生。同时,实测的 H 面交叉极化大于 15 dB,具有良好的垂直极化特性。至此,通过对天线加载车载玻璃基板的情况进行

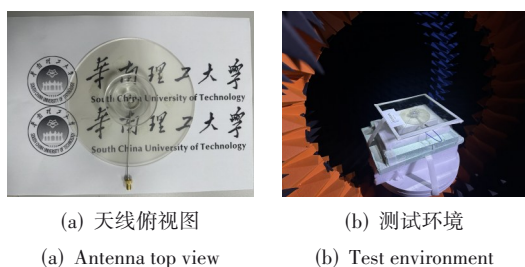
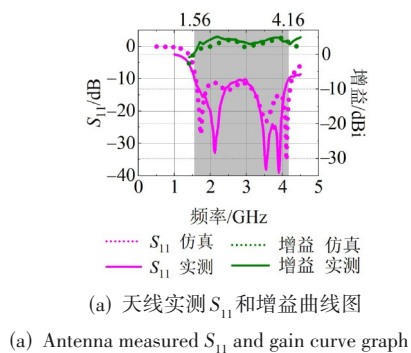
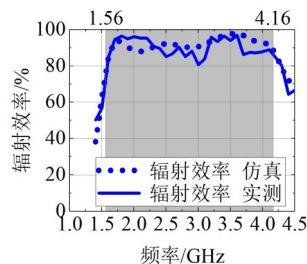


图 24 天线实物图

Figure 24 Antenna physical diagram



(a) Antenna measured S_{11} and gain curve graph



(b) Antenna measured radiation efficiency curve graph

图 25 天线实测结果

Figure 25 Antenna measurement results

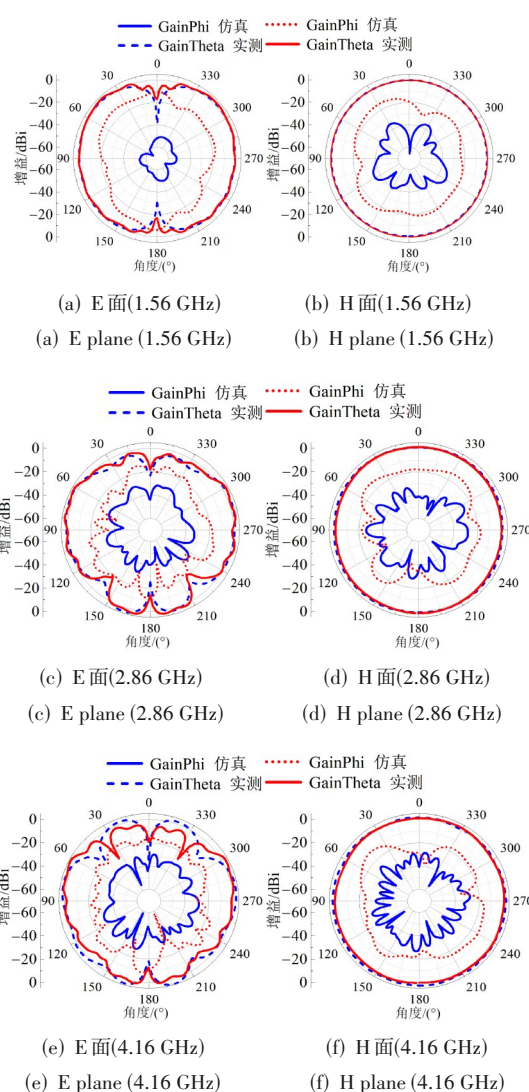


图 26 实测归一化方向图

Figure 26 Measured normalized direction pattern

测试验证,结果表明,天线可以有效地应用于汽车天幕等大尺寸玻璃场景,并且不会对天线的辐射性能造成不良影响。

表2为本文所提出的天线与一些现有参考文献在介质尺寸、带宽、增益等方面的对比,表中 λ_0 为中心频率波长, λ_g 为中心频率导波波长。相较于文献[20]和文献[21]两种现有的透明天线,本文提出的天线具有更高的增益和辐射效率;对比现有的车载天线技术

文献[22-23],本文提出的天线方案除了具有透明度的优势外,还具有更宽的带宽。此外,上述文献[20-23]均未考虑大尺寸车载玻璃的表面波辐射对天线性能的影响,不具备抗表面波的能力,而本文提出的阶梯式玻璃天线不仅具有明显的电气性能和物理尺寸优势,而且在无需额外结构加载的情况下,实现了自身的抗表面波性能,在融合车载玻璃的场景下具有良好的应用前景。

表2 本文提出的天线与现有部分文献中天线的性能对比

Table 2 The performance comparison of the antenna proposed in this paper with that of some existing literature

文献	电尺寸/ λ	(百分比/带宽)/(%/GHz)	平均增益/dBi	辐射效率/%	是否抗表面波	是否透明	天线类型
文献[20]	$1.57\lambda_0 \times 1.71\lambda_0 \times 0.67\lambda_0$	176/1~16	-3.2	N.A.	N.A.	是	透明单极子天线
文献[21]	$0.61\lambda_0 \times 0.61\lambda_0 \times 0.14\lambda_0$	42.3/4.1~6.3	3.8	70.7	N.A.	是	透明ME偶极子天线
文献[22]	$1.11\lambda_0 \times 0.55\lambda_0 \times 0.11\lambda_0$	54.5/4~7	4.1	81	否	否	单极子天线
文献[23]	$0.56\lambda_0 \times 0.56\lambda_0 \times 0.24\lambda_0$	34.5/4.8~6.8	7.1	80	否	否	双层超表面天线
本文	$0.49\lambda_0 \times 1.49\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$ ($1.48\lambda_g \times 1.48\lambda_g \times 0.54\lambda_g$)	90.9/1.56~4.16	3.9	80	是	是	介质谐振器天线

4 结论

本文提出了一种针对智能网联汽车1.7 GHz~3.8 GHz移动通信频段的抗表面波的宽带高效率透明玻璃天线。天线采用同轴探针激励圆柱体玻璃中的 TM_{0n} 模式,通过分析 TM_{0n} 模式的电磁场特性,证明了天线具有垂直极化并且水平全向的辐射能力,同时实现抗表面波的特性。在此基础上,逐层向下调控圆柱体玻璃的尺寸,改善天线的匹配性能,大幅拓展了天线的带宽并提升了天线的辐射效率。天线采用圆柱体蓝宝石玻璃为介质,无色有机玻璃为基板,纳米银线薄膜为天线的电气地,以此实现了天线的透光性能。最终测试结果表明,天线能够覆盖1.56 GHz~4.16 GHz的频段范围,相对带宽大于90%。同时,天线具有良好的水平全向辐射能力和垂直极化特性,频带内的平均增益为3.9 dBi,辐射效率大于80%。并且在大尺寸车载玻璃环境中,天线不受表面波的干扰,辐射方向图没有出现畸变。因此,本文提出的天线可以安放于车辆的天幕玻璃等位置,能够满足新一代智能网联汽车的通信需求。

参考文献

[1] Zhou Yonghong, Jiang Ting, Li Hanxin, et al. A 5G MIMO multiband low-profile antenna design for automotive shark-fin systems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(5): 1588-1592.

[2] Chen Shengjie, Liu Xiaoming, Yu Shuo, et al. Compact broadband four-port MIMO antenna for AAV to assist automotive communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2026, 13(4): 5442-5450.

[3] 林玉, 张超, 邹棋, 等. 一种超宽带全透明高增益ITO玻璃天线及应用[J/OL]. 微波学报, 1-7. (2025-10-13)[2026-04-28]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1493.TN.20251013.1418.002>.
Lin Yu, Zhang Chao, Zou Qi, et al. An ultra-wideband fully transparent high-gain ITO glass antenna and its applications[J/OL]. Journal of Microwaves, 1-7. (2025-10-13)[2026-04-28]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1493.TN.20251013.1418.002>. (in Chinese)

[4] Al-Nuaimi M K T, Huang Zhuo, Huang Guanlong, et al. Optically transparent smart electromagnetic skin for energy-free 5G signal redirection in smart cities[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2026, 25(1): 79-83.

[5] An Kang, Sun Peng, Deng Yueguang, et al. A large-scale high-gain transparent grid array antenna for millimeter-wave communication[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(5): 1598-1602.

[6] 张墅野, 邵建航, 何鹏. 银纳米线透明导电薄膜仿真研究现状[J]. 材料导报, 2024, 38(10): 118-127.
Zhang Shuye, Shao Jianhang, He Peng. Research progress

- in simulation of silver nanowire transparent conductive films[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(10): 118-127. (in Chinese)
- [7] Kagaya O, Arai K, Watanabe T, et al. Generation of surface wave in C-band automotive on-glass antenna and an easily realizable suppression method for improving antenna characteristics[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2022, E105.B(1): 51-57.
- [8] Anjum A, Mudiganti J C. Flexible cylindrical dielectric resonator antenna for X-band satellite, space, wireless sensor networks, and flexible applications[J]. *IEEE Access*, 2026, 14: 3216-3228.
- [9] Fang Xiaosheng, Li Xiang, Li Chaoqun, et al. Wideband, high-gain, and tri-polarized cylindrical dielectric resonator antenna employing six high-order modes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(2): 1185-1190.
- [10] Li Ziwei, Chen Zhijiao, Li Huanxin, et al. Wideband dielectric resonator antenna with linear and circular polarization diversity for UAV applications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2026, 75(2): 3348-3353.
- [11] Yu Zhehao, Yang Kangyu, Duan Yu, et al. Grid-shaped dielectric resonator antenna with heatsink and ultrawideband design[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2026, 25(1): 289-293.
- [12] 罗燕航, 李高升, 徐含静, 等. 应用于S波段穿墙雷达的介质谐振器天线设计[J]. *无线电工程*, 2025, 55(5): 1037-1043.
- Luo Yanhang, Li Gaosheng, Xu Hanjing, et al. Design of dielectric resonator antenna for S-band through-wall radar[J]. *Radio Engineering*, 2025, 55(5): 1037-1043. (in Chinese)
- [13] Ma Qianxi, Xu Guanghui, Luo Yanbin, et al. An ultrawideband comb-slot-fed symmetrical comb-groove-dielectric resonator antenna for B5G/6G millimeter-wave applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2026, 25(3): 1359-1363.
- [14] Zhang Jiaying, Hu Pengfei, Wa Leung K, et al. Dual-band dual-polarized glass dielectric resonator antenna with wide bandwidths and low sidelobes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(10): 8277-8282.
- [15] Collin R E. *Field theory of guided waves*[M]. 2nd ed. New York: IEEE Press, 1991.
- [16] Chauhan M, Pandey A K, Mukherjee B. A novel compact cylindrical dielectric resonator antenna for wireless sensor network application[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2018, 2(2): 3501004.
- [17] Yang Tian, Ren Jian, Zhang Bing, et al. Wideband diversity cylindrical dielectric resonator antenna based on multimode resonance[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(9): 2205-2209.
- [18] Kishk A A, Zhang Xiao, Glisson A W, et al. Numerical analysis of stacked dielectric resonator antennas excited by a coaxial probe for wideband applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(8): 1996-2006.
- [19] Hu Pengfei, Pan Yongmei, Leung K W, et al. Wide-/dual-band omnidirectional filtering dielectric resonator antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(5): 2622-2627.
- [20] 林玉, 邹棋, 赵梓彤, 等. 基于CPW馈电的超宽带透明单极子天线[J]. *微波学报*, 2026, 42(3): 64-70.
- Lin Yu, Zou Qi, Zhao Zitong, et al. Transparent monopole antenna with ultra-wide bandwidth utilizing CPW feeding[J]. *Journal of Microwaves*, 2026, 42(3): 64-70. (in Chinese)
- [21] Liu Yifeng, Luk K M. An optically transparent magneto-electric dipole antenna design by integrating flexible transparent metal mesh film on glass[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(7): 5569-5577.
- [22] Chen Huibing, Chen Haidong, Che Wenquan, et al. A wideband V2X antenna with tilted beam pattern and transparent characteristics[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(7): 1959-1963.
- [23] Cheng Youfeng, Chen Qian, Peng Lin, et al. Dual-wideband structure-reused antenna with diverse radiation and polarization features for vehicular wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(3): 3707-3717.

作者简介



张柏豪 男,2001年10月出生于吉林省吉林市。现为华南理工大学电子与信息学院硕士研究生。主要研究方向为智能网联汽车车载玻璃天线及其抗表面波技术。

E-mail: ee202321012489@mail.scut.edu.cn



陈志兴 男,1983年2月出生于湖南省岳阳市。现为福耀玻璃工业集团股份有限公司汽玻工程院副院长。主要研究方向为终端天线、基站天线及无源元件。

E-mail: zhixing.chen@fuyaogroup.com



周文骏 男,1990年4月出生于江苏省无锡市。现为华南理工大学电子与信息学院博士研究生。主要研究方向为智能网联汽车车载玻璃天线。中国电子学会会员编号:E190181632A。

E-mail: eezwjzhou@mail.scut.edu.cn



张 劭 男,1984年10月出生于湖南省衡阳市。现为福耀玻璃工业集团股份有限公司智能网联研发部广州天线研发所所长。主要研究方向为玻璃天线、基站天线和终端天线。

E-mail: shao.zhang@fuyaogroup.com



邓固颖 男,1997年1月出生于湖南省永州市。现为华南理工大学电子与信息学院博士后。主要研究方向为全息天线、超表面、电磁算法及其应用。中国电子学会会员编号:E190181627M。

E-mail: dengguying@scut.edu.cn



区俊辉 男,1990年7月出生于广东省广州市。现为华南理工大学未来技术学院副教授、博士生导师。主要研究方向为智能通信、微波智能无线充电(能量信息同传)、射频天线与电路设计。中国电子学会会员编号:E190188468M。

E-mail: oujunhui@scut.edu.cn



苏华峰 男,1983年10月出生于海南省儋州市。现为人工智能与数字经济广东省实验室(广州)副研究员。主要研究方向为终端天线、基站天线及全息超表面天线。中国电子学会会员编号:E190033676M。

E-mail: huafeng.su@pazhoulab.cn



章秀银 男,1978年12月出生于湖北省广水市。现为华南理工大学微电子学院教授、博士生导师。主要研究方向为天线、射频集成电路、射频组件及子系统、智能无线通信与传感技术。中国电子学会会员编号:E190011182F。

E-mail: eexyz@scut.edu.cn