光学透明超光栅嵌入后挡风玻璃的汽车雷达探测

Sergey Geyman[1], Dmytro Vovchuk[1, *], Denis Kolchanov[1], Mykola Khobzei[1,2], Vladyslav Tkach[1,2], Hagit Gilon[1], Eyal Cohen[1], Eran Yunger[1], Vjačeslavs Bobrovs[1], Aviel Glam[1], Ofer Amrani[1], 和 Pavel Ginzburg[1]

[1]里加工业大学光子学、电子学与电信研究所，拉脱维亚里加，*LV-1048*[2]尤里·费德科维奇切尔诺夫策国立大学无线电工程与信息安全系，乌克兰切尔诺夫策，*58002*

摘要

雷达通过实现可靠的目标探测，在汽车安全中发挥着至关重要的作用，既能辅助驾驶员，未来也有望成为自动驾驶的主要传感器之一。道路参与者的雷达可见性取决于其雷达散射截面（RCS）。虽然雷达散射截面是物体固有的属性，但与利用反光背心提高光学可见性类似，通过合作目标设计来增强雷达散射截面，可显著改善雷达探测。然而，现代汽车并非为此目的而设计；由于行业采取保守态度，且车辆外部可用空间有限，嵌入式反射器并未得到应用。后挡风玻璃提供了大片尚未利用的面积，但仍须发挥其主要功能并保持透明。我们提出利用这一区域嵌入反射表面，并考虑探测场景几何以及后挡风玻璃的角度倾斜，以确保波反射回雷达。该表面由细导线阵列构成，其周期性可针对设计入射角实现同相激励。由于汽车雷达工作在毫米波频段（77–81 GHz），因此需要制造精度达到亚毫米级的大面积表面。为此，我们将由银纳米颗粒和粘结剂构成的导电油墨压印到玻璃沟槽中。制成的10 × 10 cm^2 样品具有约90%的光学透明度，雷达散射截面达到8 m2，超过汽车的典型雷达散射截面。若将这一性能推广至嵌入超光栅的整个后窗，典型雷达散射截面可达到1,000 m2，从而使可探测距离提高近一个数量级。智能窗集成了多种功能，包括不会损害光学性能的电磁特性，可在无线通信领域实现先进应用，涵盖汽车应用场景、物联网等诸多领域。

关键词： 雷达散射截面增强；透明超表面；智能窗；汽车雷达，汽车反射器

*通讯作者：Dmytro.Vovchuk@rtu.lv

引言

确保道路安全是现代交通运输的首要任务，高级驾驶辅助系统（ADAS）需要使用多个传感器 [1_5]。随着自动驾驶技术的发展，这一需求变得更加重要，因为可靠的信息对于指导机器决策至关重要。在各种感知模态中，雷达凭借其在低能见度、雨天和雾天等多种环境条件下的稳健性，已成为主要传感器。汽车雷达主要工作在毫米波频段（77–81 GHz），用于碰撞规避、自适应巡航控制和目标探测 [6_10]。

尽管汽车雷达具有诸多优势，但要可靠地检测和跟踪车辆仍面临重大挑战。首要问题是角分辨率相对较低，通常难以达到 1 度以下。此外，道路交通杂波、地面反射和严重的多径效应也使目标检测和分类颇具挑战。影响雷达性能的一个关键因素是目标的雷达散射截面（RCS）。这一参数决定了物体对雷达的可见程度。与反光背心等旨在增强光学可见性的物品不同，车辆本身并未针对雷达探测进行优化。例如，乘用车的 RCS 约为 10 至 20 dBsm （ 10 至 100 m2 ），具体取决于车辆设计、方位角和表面材料等因素 [11_15]。例如，德州仪器的 ADAS 雷达（AWR2544）声称能够在最远 200 米处探测到乘用车 [16]。通过采用专为增强雷达散射截面而设计的协作目标（例如 [17_20]），可以提高雷达探测的可探测性和可靠性。这种方法在海事应用中已十分成熟，人们会在游艇桅杆顶部安装角反射器，以确保产生强雷达回波。

雷达散射截面增强带来的收益可通过雷达方程 [21], 估算，该方程预测接收功率遵循 $P_r \propto \sigma / R^4$, ，这意味着接收功率与雷达散射截面（σ）成正比，与距离的四次方（R^4）成反比。因此，将车辆的雷达散射截面从 10 dBsm 提高到 30 dBsm，以增强其反射能力，可使探测距离增加三倍以上，让车辆在远超 500 米的距离外仍可被探测到。或者，这也能提高接收机处的信噪比，从而实现更可靠的探测。还值得注意的是，协作目标 [22_24] 可以对反射进行编码，使雷达具备更先进的分类能力；不过，这一方面超出了本文的讨论范围。

尽管雷达协作具有明显优势，但在车辆上安装角反射器仍是一种颇具争议的做法，部分原因在于业内的决策往往受设计而非工程因素驱动，外观常常优先于性能。为了寻找未被其他功能性设备占用的空间，后挡风玻璃可视为一种可行选择。在许多情况下，其大部分面积仍保持透明且未发挥功能（为便于说明，此处不讨论由用于加热的电阻丝组成的后窗除雾器）。因此，所提出的解决方案是将后挡风玻璃改造成具有功能性的后向散射反射器，从而大幅提高雷达散射截面。后挡风玻璃的典型面积约为 1 m^2。作为粗略的初步估算，可以假设为正入射，并应用方形板的雷达散射截面

公式： $\sigma = 4\pi A^2/\lambda^2$，其中$A$是方形板的面积，$\lambda$ 是雷达中心波长。代入载波频率为 80 GHz 的数值，可得$dBsm$。尽管这一数值极高，且倾斜车窗在实际中不太可能达到，但它给出了一个上界，凸显了这种方法的潜在效果。图1以图示方式展示了这一概念，说明更强的反射如何提升雷达探测中的信噪比。

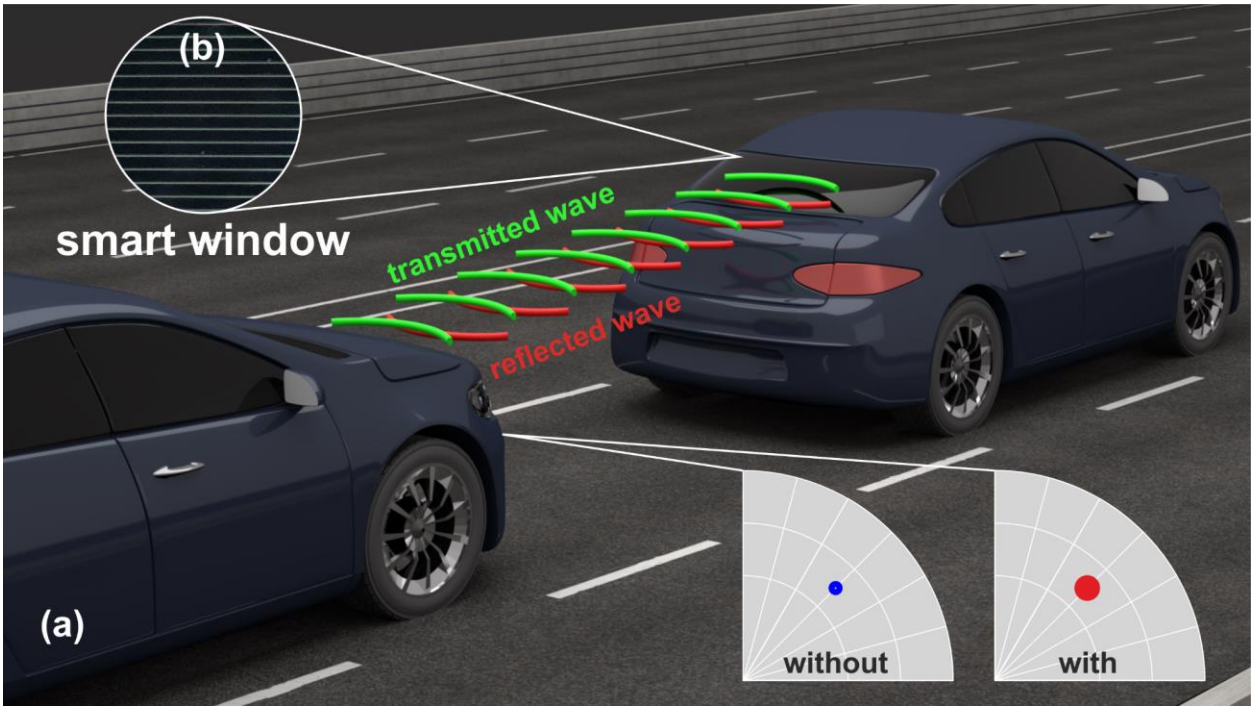

图*1. (a)* 智能后挡风玻璃的概念图，展示了雷达散射截面的数量级提升，使其能够与高级驾驶辅助系统高效协作。*(b)* 系统的放大视图（为便于观察，超光栅位于黑色桌面上的玻璃上），展示了支持强后向反射的导电线。

在这一用例中，另一个需要考虑的重要方面是在不影响后挡风玻璃主要功能的前提下保持光学透明度。由于能够在各种既要求电磁功能又要求视觉透明度的应用中发挥潜力，透明天线和反射器受到了广泛关注 [25–28]。在汽车工业中，透明天线可以集成到车辆挡风玻璃中，以支持无线通信，同时不遮挡驾驶员视线 [29,30]。在可穿戴技术，尤其是智能眼镜和增强现实设备中，透明天线也发挥着类似作用 [31–33]。在国土安全应用中，叠加于摄像机孔径上的表面可以阻挡用于电子战反制措施的入射辐射脉冲，从而防止传感器饱和并维持运行完整性。这一用例的简要综述凸显了透明天线和反射器的广泛适用性，其应用范围不仅限于我们旨在探索的特定用例。

透明天线通常通过几项关键技术实现，下面将对其进行简要介绍。透明导电氧化物（TCO）传统上应用于电光领域，这是因为它们能够在较低频率下保持良好电导率的同时提供高光学透明度[34–36]。氧化铟锡（ITO）是应用最广泛的透明导电氧化物，以优异的电导率和高透明度而闻名。然而，ITO 存在一些局限性，包括易碎以及铟成本高昂。因此，人们正在探索铝掺杂氧化锌（AZO）等替代材料。与 ITO 相比，AZO 可提供相当的透明度和电导率，但成本更低，且原材料储量更丰富。这些特性使 AZO 成为显示器和光伏器件中的透明电极等应用的理想候选材料[37]。金属丝网是透明导电氧化物的替代方案，尤其适用于要求柔性和耐久性的应用。这些网格由经过图案化处理的细金属线组成，形成具有高光学透明度的导电网络。例如，NANOWEB® 是一种获得专利的透明导电膜，由隐形的纳米结构金属网制成。它可以制造在包括玻璃和塑料在内的各种表面上，从而兼具高透明度和高电导率[38]。同样，3MTM Transparent Conductor Film 使用铜网格作为导电层，具有高透光率和低方阻，因此适用于隐蔽式天线等应用[39]。我们将采用这项技术来付诸实践，实现我们的概念。

本报告的结构如下：首先介绍制备方法，随后展示一系列设计和实验验证。具体而言，先分析极化敏感性，再设计并演示一种雷达反射器，使其符合后挡风玻璃集成要求。最后，通过使用商用汽车雷达开展一系列室内和室外实验，对整个概念进行验证。

大规模线阵的制备

在现有制造方法中，[40–42], 图案转印（PTPTM）值得一提，本报告将采用该方法制备样品。PTPTM以聚合物薄膜上的激光诱导沉积为基础，该薄膜用作银浆载体。使用带图案的刚性金属印模，在聚合物薄膜上压印出所需的沟槽几何形状；随后将薄膜收卷成卷，并安装到PTP设备上。压印有图案的聚合物卷材用作载体，将银浆印刷到承接基底上。PTPTM可实现10-30 μm的线宽[43]。

商业PV浆料（PV43A Solamet，Dupont）通过行星式混合机（Thinky SR-500，美国）以1200 rpm混合4分钟，以达到均匀状态。随后，将浆料装入印刷头，并使用金属刮刀填入沟槽中。载体段靠近一块$10 \times 10 cm^2$ 玻璃。高功率连续波1070nm激光束透过透明聚合物薄膜照射已填充的沟槽，使浆料从压印聚合物薄膜转移到

玻璃上，形成金属线。该方法的主要步骤 [43] 如图2(a)所示。图2(b)展示了缩小视野后的线阵列光学图像，直线均匀地印刷在整个面积上。在毫米尺度上测得的轻微线条弯曲仍小于雷达波长，证实其质量满足我们的应用要求。这支持采用该方法替代光刻，因为它具有更好的可扩展性和更低的成本，同时能够在不增加不必要复杂性的情况下提供所需质量。图2(c)展示了印刷线横截面的扫描电子显微镜（SEM）图像，揭示了其内部结构。银纳米颗粒和颗粒状纹理清晰可见。尽管存在这种颗粒性，这些线仍保持导电性，经对10 cm样品进行直流电阻测量得以验证。供应商标称的电导率为（1.7-2.0）$\cdot 10^7$ S/m，这也通过我们的独立评估得到了验证。后续实验演示还将表明，这些线在高频下表现良好，满足毫米波要求。

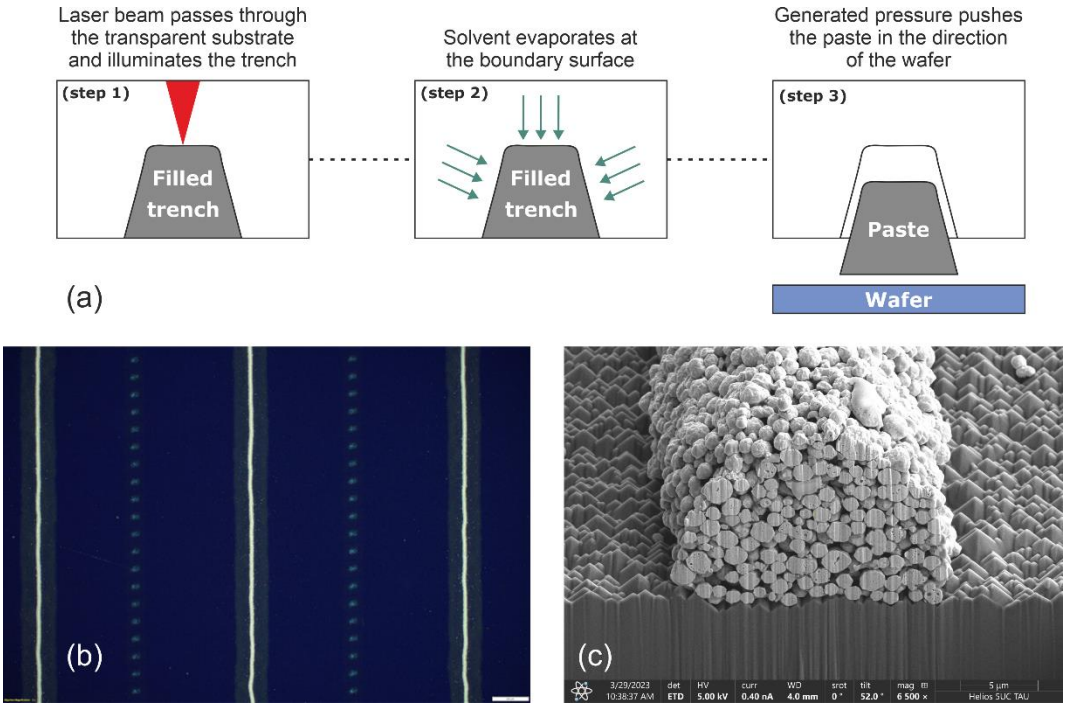

图*2. (a) PTPTM* 制备步骤示意图。*(b) PTP* 打印在光伏硅片上的银线阵列光学显微镜图像，放大倍数为 *5*× 。白色比例尺表示 *1 mm*。*(c)* 打印线截面的扫描电子显微镜图像。

线阵列偏振器

线阵列（也称为超光栅）最直接、最基本的测试，是检验其是否具有显著的偏振相关响应。沿导电线方向线性极化的电磁波应会因

与结构高效耦合而产生强烈反射。相比之下，垂直于导线极化的波与阵列的相互作用应很弱，使样品对该极化近乎透明。为使此类器件正常工作，工作频带内导线之间的周期性间距必须小于波长的一半，以避免结构共振和栅瓣。因此，在本实验中，导线之间的距离设为 0.15 mm。

实验装置如图3(a)所示。两只喇叭天线连接至串联连接的是德科技 P9374A 网络分析仪的端口，该分析仪驱动扩频系统，从而能够在 75–110 GHz 频率范围内测量复数透射系数和反射系数，完全覆盖汽车雷达频段。待测样品（SUT）放置在发射天线前方 50 mm 处，并相对于天线极化进行旋转。在每个方向上测量透射系数（$|S_{21}|^2$）光谱。图3(b)显示了 0°（电场垂直于导电线）、45°（对角线方向）和 90°（平行方向）下的测量结果。结果表明：(i) 0°（蓝色曲线）与 90°（黄色曲线）之间的衰减超过 8 分贝；(ii) 0° 曲线与自由空间响应（FS）高度吻合，表明其具有近乎完美的透明性；(iii) 透射特性表现出极小的色散，因为导线间距无法在整个频段内支持晶格共振。蓝色曲线与红色曲线之间的差异约为 3 分贝，这与 cos(45°) 所给出的预期衰减一致。若要增强不同极化之间的隔离，应减小导线之间的间距。由于导线厚度超过电磁趋肤深度，且横截面仍处于亚波长范围内，因此响应实际上与半径无关。我们的数值验证表明，在半径变化十倍的范围内，变化幅度低于 2%。

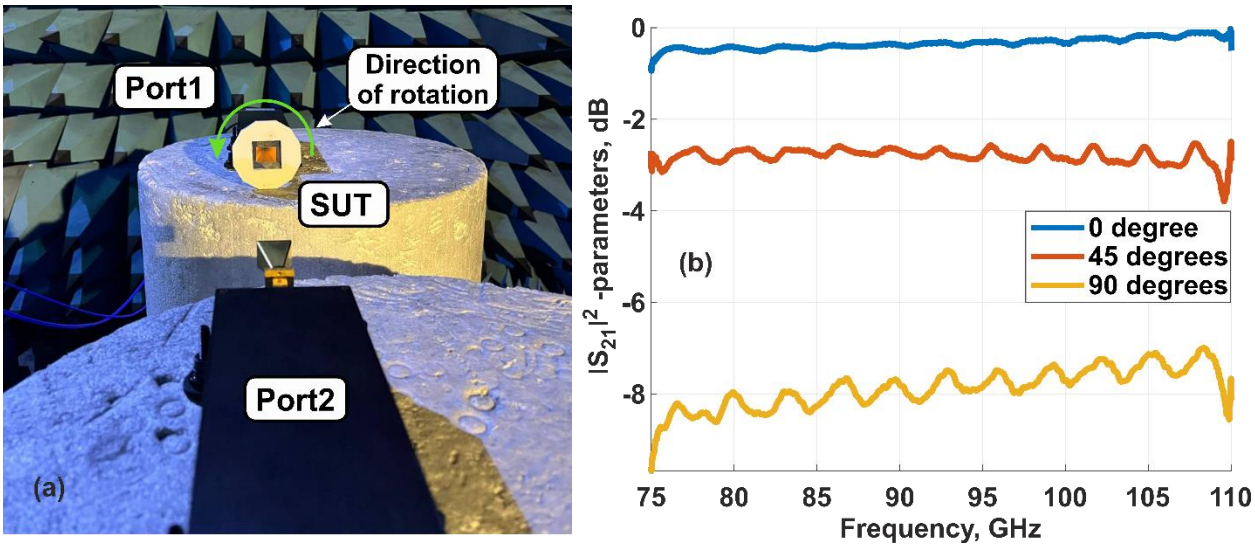

图 *3. (a)* 消声室内实验装置的照片。*(b)* 偏振样品在不同线阵列相对方向下的透射功率谱

图例中所示的波极化，归一化至自由空间的透射功率谱。

汽车反射器

与偏振器的工作原理不同，偏振器要求导线间距远小于波长，而导线的同相（相差为 2π 的整数倍）激励则由 Floquet 定理 [44] 所描述的谐振机制决定。对于由无限长、平行、细导线构成的理想电导体（PEC）阵列，根据对称性，只有传播角满足光栅方程的 Floquet 模式才允许存在：$sin\,\theta_m = sin\,\theta_i + m\lambda/d$，其中 θ_m 是第 m 个模式的角度，θ_i 是入射角，λ 是波长，$m \in Z$ 是衍射级次，d 是相邻导线之间的间距。为了使给定入射角 θ_i下的波实现逆反射，周期选取为：

$$2dsin\,\theta_i = \lambda, \tag{1}$$

这样，只有索引为 *m = 0* 和*m = -1*的模式仍能传播，而所有高次谐波均变为倏逝波，因此不携带能量。我们的设计针对这样的汽车应用场景：后挡风玻璃相对于入射方向倾斜 θ_i 角。鉴于探测距离长达数百米，跟车车辆上的雷达与后挡风玻璃之间的角度变化可忽略不计。

图 4(a) 展示了线阵列的几何结构。线间周期经过调节，以满足利用公式 1 计算得到的同相激励条件。分析采用 CST Microwave Studio，并使用频域求解器。尽管我们的网格尺寸有限，无限阵列理论的主要预测仍然成立。金属线采用 PEC 建模，即细导线近似。基底为 1 mm 厚的玻璃层，以匹配后续的实验实现。未施加周期性边界条件，以验证结果是否适用于有限尺寸结构。图 4(a) 中的插图显示，主瓣附近存在较弱的旁瓣，说明了与有限孔径相关的边缘效应。远场散射图针对入射角 θ_i = 45 度、频率 *f = 80 GHz*、结构周期 *d = 2.65 mm* 以及阵列尺寸 10×10 cm^2 （每侧约为 26.7 λ ，即 38 个周期）进行计算。在这种情况下，可以观察到明显的回射和另外三个瓣，与 Floquet 定理完全一致。每个传播级次 m 都会产生两种模式：一种透过网格传播，另一种发生反射。*m = 0* 级次产生熟悉的镜面反射对，即反射波束和透射波束均以相同的 45° 角相对于法线传播。*m = –1* 级次产生其余两个波：反射波束恰好朝向

源（回射），而其透射对应波束则对称地进入前向半空间。

为评估周期为2.65 mm的10 × 10 cm^2 样品对角度和频率的敏感性，我们对其雷达散射截面频谱进行了建模。图4(b)展示了结果，其中给出了雷达散射截面伪彩图；每个垂直切片代表一个频谱，其强峰值对应同相激励条件，这一点可通过应用式1加以验证。结果表明，10 × 10 cm^2 样品的雷达散射截面已达到8 m2，与私家车的雷达散射截面相当。考虑到缩放关系 $\sigma = 4\pi A2/\lambda 2$，如果线阵列覆盖整个后窗，雷达散射截面便可大幅增强。此外，估算的散射波瓣半宽为2.7°，这使系统能够容忍雷达与样品之间的定位误差。引入非周期性可以放宽这一条件，但代价是雷达散射截面性能下降。鉴于制备采用图案转印技术，评估可能出现的电导率降低所带来的影响很有价值。图4(b)中的插图展示了在入射角为45°时，若干电导率值对应的后向雷达散射截面随频率的变化。在跨越七个数量级的电导率范围内，雷达散射截面的变化最多仅为一个数量级，表明其性能稳定。所考察的电导率值远低于供应商规格；因此，建模中采用高电导率近似是合理的。

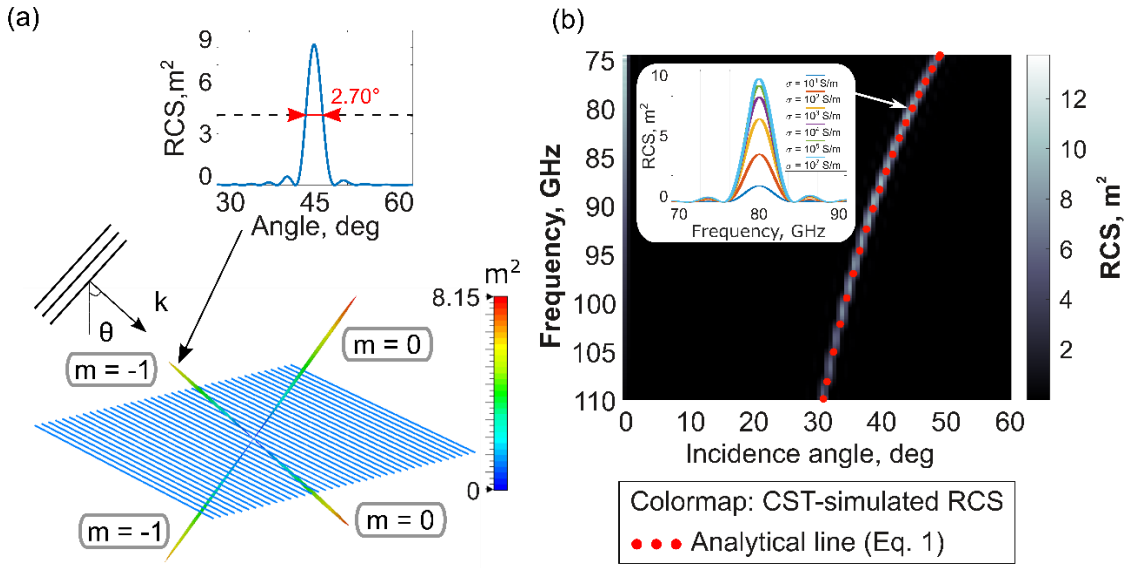

图 *4.* 基于 *CST Microwave Studio* 中获得的数值结果得出的线阵列性能。*(a)* 平面波以 *80 GHz* 频率、*45°* 入射角照射阵列时的散射方向图。插图：散射波瓣的轮廓。*(b)* 平面波条件下，随频率和入射角变化的对数刻度雷达散射截面伪彩图。红点表示一阶后向散射的同相激励条件（公式 *1*）。插图：不同电导率值下后向雷达散射截面随频率的变化。

实验样品按照设计规格，并采用“制备”部分所述技术构建。参考样品由拉伸铜线组成阵列，并将其固定在粘合纸上。该参考样品用于验证玻璃上增材制造样品的电磁性能。图5(a-c)展示了实验装置和实验样品。在这组实验中，测量了反射系数。为此，发射天线和接收天线布置在同一位置，这与此前用于验证偏振器性能的透射装置不同。为了验证同相激励条件下的强反射，并确认其与数值分析结果一致，我们在消声室中进行了角度相关的反射测量，如图5(a)所示。实验装置通过PC上的MATLAB进行全面控制；被测样品（SUT）放置在旋转台中央的白色泡沫塑料圆柱体上，该泡沫塑料对GHz波透明。测量了两种被测样品：用作参考样品的金属线阵列，其尺寸为 10×10 cm^2, ，导线直径为0.02 mm，晶格周期为2.65 mm（图5(b)）；以及在玻璃基底上印有导电线的样品（图5(c)）。测量时的方位角旋转精度为1^o ，测量范围从0^o 到60^o，导电线与垂直极化天线平行。

因此，在 0° 处，从 75 到 110 GHz 的整个频率范围内均观察到强反射，仅在 90 GHz 附近出现轻微的最小值。此外，由于为 45° 而设计的同相激励条件，反射峰会根据波长出现在 30° 和 50° 之间的角度范围内。图5(d)总结了参考样品的实验结果，而面板(e)展示了玻璃上的线阵列的性能。尽管参考样品与基础理论更加吻合，且性能优于基于玻璃的结构，但两组结果均具有良好的一致性。这些差异主要可归因于两个因素。首先，玻璃基底会引入轻微的欧姆损耗（在汽车玻璃中，80 GHz 下的损耗角正切（*tan(δ)*）可能在 0.01 到 0.02 之间变化），而参考样品未使用基底。其次，两者的电学性质存在差异。参考样品中的镍线非常接近理想电导体，而玻璃上使用的银浆可能会引入额外损耗。不过，这种性能下降相对较小，不会显著影响器件的整体性能，支持其作为雷达反射器的应用，并证实了后续雷达测试的可行性。

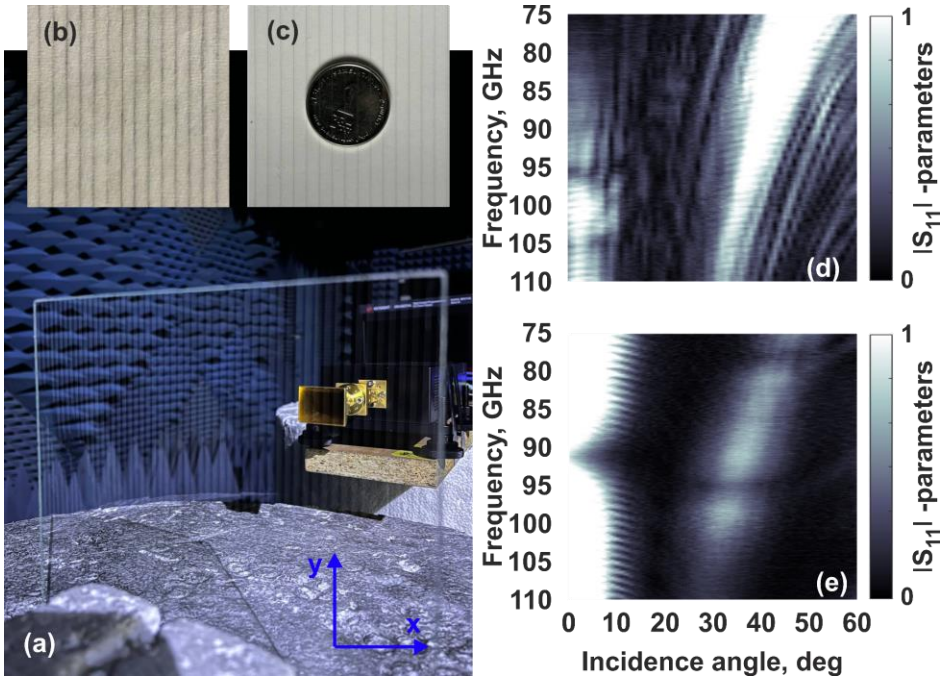

图*5.* 线阵列中同相激励条件的验证。*(a)* 消声室内的实验装置。样品：*(b)* 带有拉伸铜线的参考样品，以及 *(c)* 挡风玻璃上的导线阵列。为便于观察，将玻璃样品放在纸上，以显露导电线；否则，它会像 *(a)* 图所示那样透明。顶部放置了一枚小硬币，用于表示尺寸比例。天线极化为垂直极化，金属线也呈垂直方向。*(d, e)* 反射系数伪彩图，显示其随样品旋转角度（横轴）和频率（纵轴）的变化。在 0° （正入射）以及 30° 与 50^o之间观测到强反射，这对应于同相激励条件。*(d)* 图显示参考样品，*(e)* 图显示挡风玻璃样品。

光学性质

采用标准光透射装置研究了玻璃上的线阵列的光学性质，如图6(a)和图6(b)所示。来自 Avantes（AVALIGHT-HAL-S-MINI）灯的白光束通过透镜准直，确保样品受到面积约为 180 mm2 的均匀圆形光斑照射。该装置确保样品的照明区域内包含超过八条导线（作为参考，初始电磁研究中使用的汽车反射器在玻璃基底上的线间距为 2.75 mm，在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）基底上的线间距为 0.15 mm）。随后，使用聚焦透镜将透射光收集到光纤中。透射光谱由 Avantes（AvaSpec-ULS2048L）光谱仪记录，并以未放置样品时测得的灯信号进行归一化。

为评估潜在的透明度下降，将普通玻璃基底的光透射率与沉积有导线阵列的玻璃进行了比较。如图6(c)所示，裸露

玻璃在可见光范围内的平均透射率约为 90%，与普通玻璃的标准值（ASGS 参考）一致。由间距较大的导电线组成的汽车反射器结构沉积后，透射率仅下降约 2%，表明光学损耗可以忽略不计，且透明度保持效果出色。

为进一步展示该制造方法的通用性，我们还在厚度为 100 μm 的 PET 薄膜上制备了线阵列。图 6(d) 展示了这种基于 PET 的汽车反射器的透射特性。在这种情况下，在整个可见光范围内，平均透射率降低了约 4.6%。这一更为明显的下降归因于 PET 基底本身较低的透明度，而沉积过程中可能引入的热致雾化效应也可能进一步导致损耗。重要的是，在玻璃和 PET 样品中，透射率降低均呈光谱平坦特征，这表明不存在光学共振现象，并证实观测到的损耗主要源于几何和材料效应，而非干涉或等离激元共振。

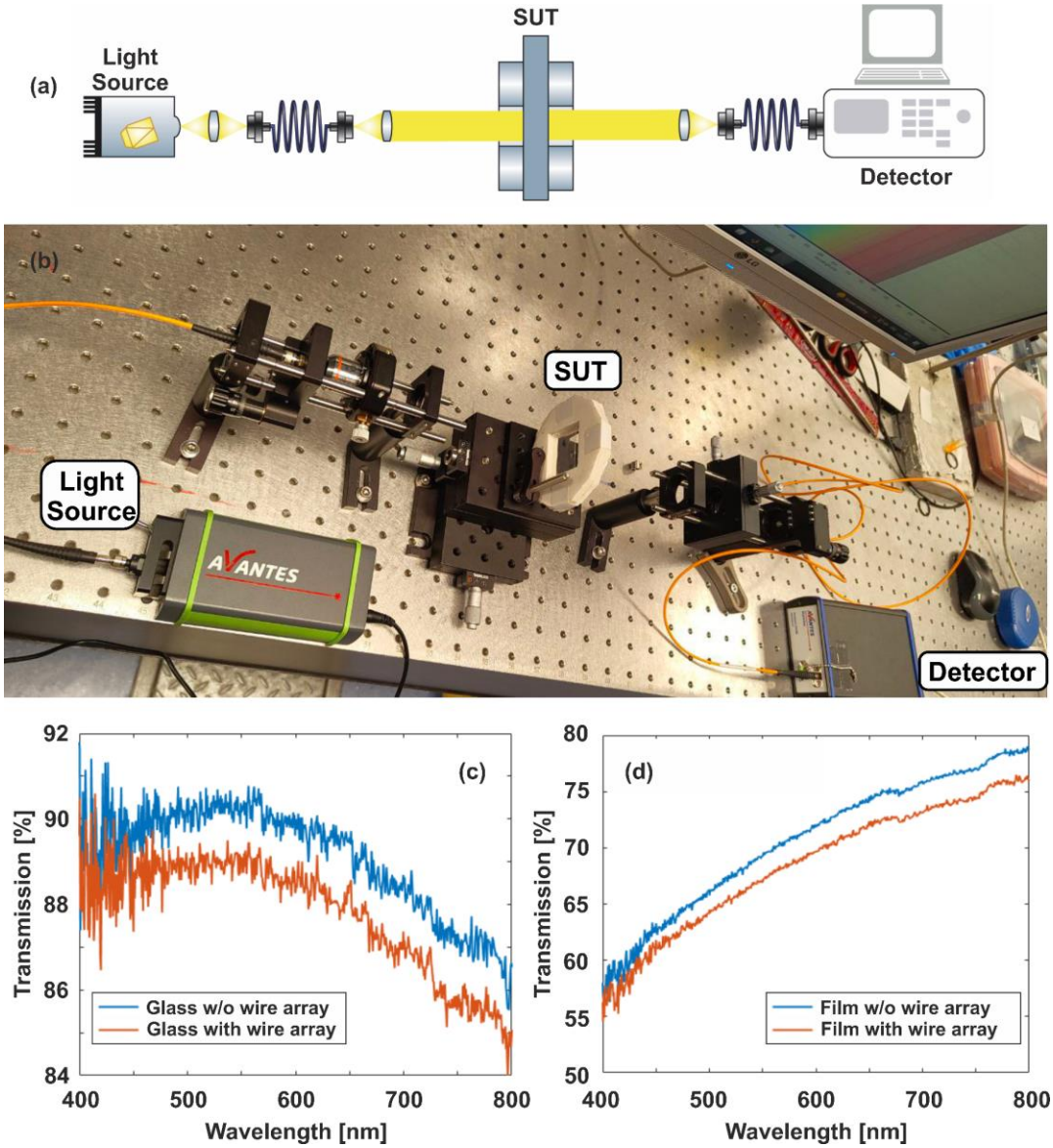

图 *6.* 光学透明度评估。（*a*）实验装置示意图。（*b*）测量布置照片。（*c*、*d*）玻璃和聚合物薄膜基底上线阵列的透射光谱，以及图例中所示的参考样品。

使用 TI AWR1642 汽车雷达进行验证

室内测量，静态目标

实验装置由一台工作于 77–81 GHz频段的 TI AWR1642 汽车调频连续波（FMCW）雷达以及两种样品组成：二面角反射器（10 × 20 cm）和玻璃上的线阵列（尺寸为 10 × 10 cm^2 in）（图7a）。电场为垂直极化方向，并与导线平行。雷达通过

MATLAB，可采集物体坐标、相对后向散射功率和距离信息。在后续实验中，还将进行多普勒频移测量。样本放置在距离雷达1.5米处，位于旋转台中心，因此可以测量0°至60°范围内不同入射角下的数据。与雷达散射截面测量不同，雷达输出的是相对接收功率，并按距离单元和速度单元进行测量。在消声室中，可以在雷达的目标距离单元内清晰识别物体产生的强反射。

图7(b)显示了距离单元的相对接收功率随目标相对于雷达的旋转角变化的情况。作为参考的角反射器在入射角不超过40°时呈现均匀的后向散射，并在45°附近出现额外的峰值，这是二面角反射器的典型特征（图7(b)，蓝色实线）。由于实验中使用的商用角反射器孔径是线阵列的两倍，因此进行了6 dB校正，以补偿面积翻倍导致的雷达散射截面增至四倍，校正结果如红色虚线所示。对线阵也采用了相同的测量流程，结果以黄色曲线表示。

根据所得结果可以得出两点结论：(i) 角反射器的散射性能比线阵高出 10 分贝，这并不意外，因为对于电大非谐振结构，角反射器提供了雷达散射截面的上界。(ii) 线阵的散射角度依赖性遵循图5(g)中在 80 GHz中心频率下观察到的规律。具体而言，入射角在 0° 至 8° 之间时出现散射最大值，随后下降 20 分贝；在 48° 时散射增强（相较于CST模型略有偏移），对应于同相激励条件。

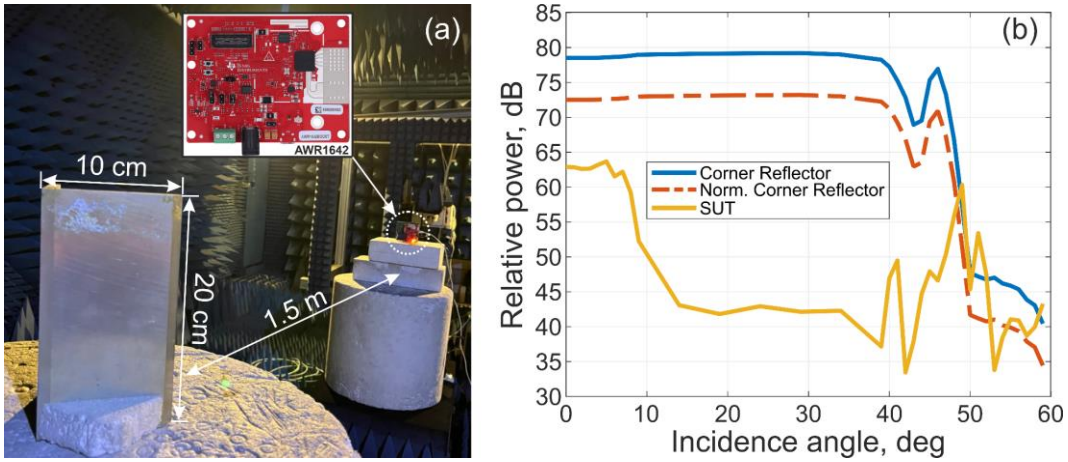

图7。*(a)* 使用 *AWR1642* 汽车雷达的室内实验装置照片。电场为垂直极化，方向与导线平行。*(b)* 角反射器（蓝色）和线阵列（黄色）雷达接收信号相对功率的角度依赖性。为使样品面积相匹配，将角反射器孔径缩放至与阵列相同的尺寸，插值响应以红色虚线表示。

室内测量，运动中的目标

为评估运动的影响，实验装置采用AWR1642汽车雷达，并配合传送带实现受控目标平移（图8）。通过MATLAB控制的雷达接口可调节啁啾和帧配置等参数，并可应用杂波去除滤波器。可视化输出可设置为显示距离、多普勒、坐标和相对峰值功率。同时，MATLAB控制传送带的速度、初始和最终位置以及启动时间。传送带位于雷达前方，距离约为 1.4 至 1.5 米。

在这组实验中，对两个目标进行了评估：一个角反射器（图 8(a)）和线阵列（被测系统），其倾斜角为 48°（图 8(d)）。

图 8(b) 和图 8(e) 展示了目标轨迹。极坐标图显示了雷达输出，其中不同距离单元和方位角上的目标以点的形式呈现。俯仰角固定为 0°，整个探测场景均处于同一平面内。目标沿直线移动，并在整个运动轨迹上对其位置进行采样，这些位置可在图中看到。从这组实验可以看出，雷达散射截面较高的目标（角反射器）在传送带运动的整个距离范围内、方位角为 90° 时均能被准确检测。相比之下，线阵列在较远距离处存在一定的检测模糊性。这直接表明，较高的雷达散射截面可提升检测信噪比，进而改善雷达性能。

面板 (b) 和 (e) 中的插图显示了反射相对功率峰值随距离变化的分布。这些是 TI 在线演示版本的截图，用于确认所采用的算法。观测到的数厘米级定位精度虽不直接代表分辨率，但与调频连续波雷达的 4 GHz 带宽相符。

为考察杂波的影响，我们使用雷达的标准未定制界面记录了雷达输出强度。对于传送带上的十个不同雷达距离单元，分别在数秒的时间窗口内记录强度，图8(c)中的每个点对应其中一次测量。可以看出，尽管测量环境受控，强度仍在约10分贝的范围内波动。此外，接收信号的绝对值表明，角反射器产生的信号比线阵列强约15分贝，这与图7(b)所示结果完全一致。为解决杂波问题，我们应用了多普勒滤波器，仅跟踪运动目标。图8(f)和图8(g)显示了提取出的两个目标的速度，结果精度很高，与传送带控制器提供的真实值高度吻合。在这两种情况下，无论雷达散射截面有何差异，测得的速度均保持稳定，没有波动。分析的运动距离为1.45米至1.85米，真实速度为6毫米/秒。检测如此缓慢的运动并非易事，因此这项测量精度尤为突出。

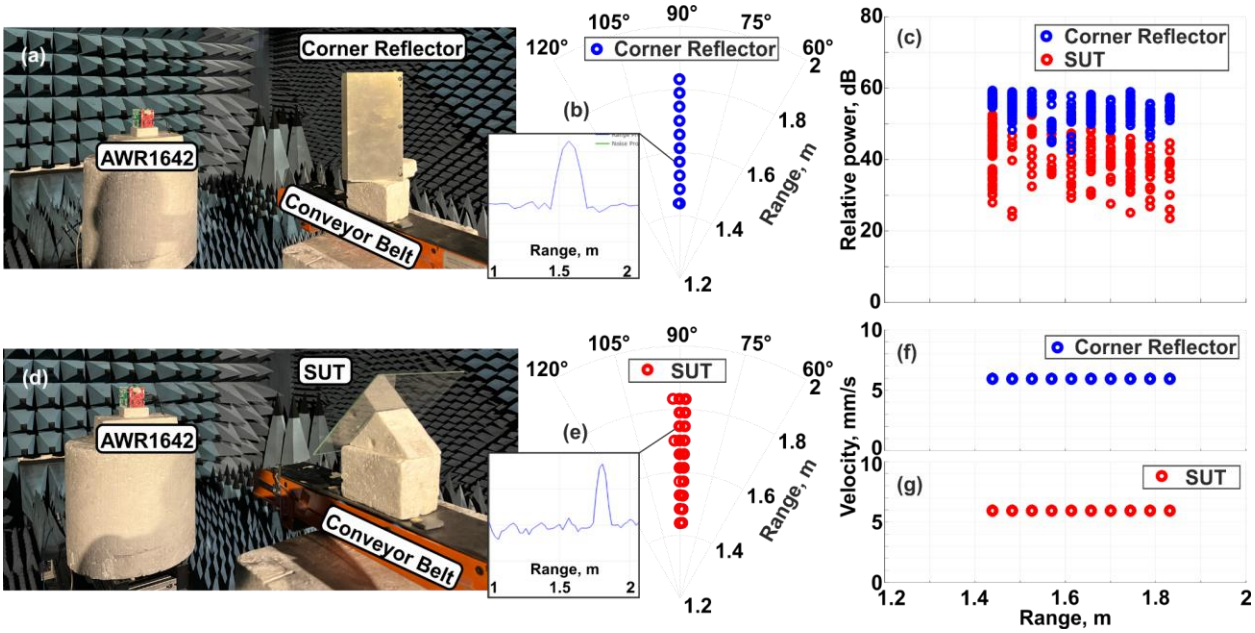

图 *8.* 运动状态下的目标评估。*(a)* 角反射器和 *(d)* 线阵列（被测系统）放置在消声室内的传送带上。使用 *TI AWR1642* 汽车雷达对目标进行探测，同时让目标沿传送带上的直线轨迹移动，以此采集数据。*(b, e).* 运动过程中的目标轨迹。极坐标图显示雷达输出，其中位于不同距离单元和方位角的目标以圆点表示。俯仰角固定为 *0°*，测量在单一平面内进行。目标沿直线移动，并在整个轨迹上对其位置进行采样。插图展示了探测线上的反射能量分布（选定位置），截图取自 *TI* 在线演示界面。*(c)* 不同传送带位置处的反射信号强度波动。*(f)* 和 *(g)* 为在 *1.45–1.85 m* 路径上不同距离处提取的速度，证实真实值为 *6 mm/s*。

室外测量

室外测量使用同一台雷达进行，以线阵列（1）、角反射器（2）和汽车（3）作为样品（图9(a)）。数据采集采用供应商界面的雷达输出，所有雷达设置均与室内测量时相同。图9(a)和(d)为照片，展示了被测物体的布置情况：汽车、角反射器和线阵列放置在玻璃上。两种场景的区别在于是否存在汽车；有汽车的场景对应第一排图组的结果，无汽车的场景则对应下排。目标的相对位置经过设置，以确保汽车、角反射器和线阵列的反射功率处于相近水平；具体做法是根据雷达方程中的距离四次方关系调整它们与雷达的距离。图9(b)和(e)展示了散点图，作为

由雷达软件生成。主要目标清晰可见，此外还有少数其他点对应杂波。相对检测阈值还可以进一步调整，但此处将其设置为符合当前场景的要求。图9(c)和(f)显示了相对接收功率随距离（距离门）的变化。这里考虑了一个指向目标的雷达波束（可在软件中选择该波束）。在第一个场景中，三个目标均清晰可见。角反射器的回波更强，因为它距离近一倍，相较于汽车多出12分贝的优势。在场景2中，导线阵列的反射弱了20分贝；与前一种情况一样，距离变化还带来了额外损失。总体而言，这些结果与图7(b)中的精确测量结果吻合良好。室内和室外实验证实，采用导线阵列的后挡风玻璃增强概念行之有效，展现了其在实际汽车雷达应用中的潜力。

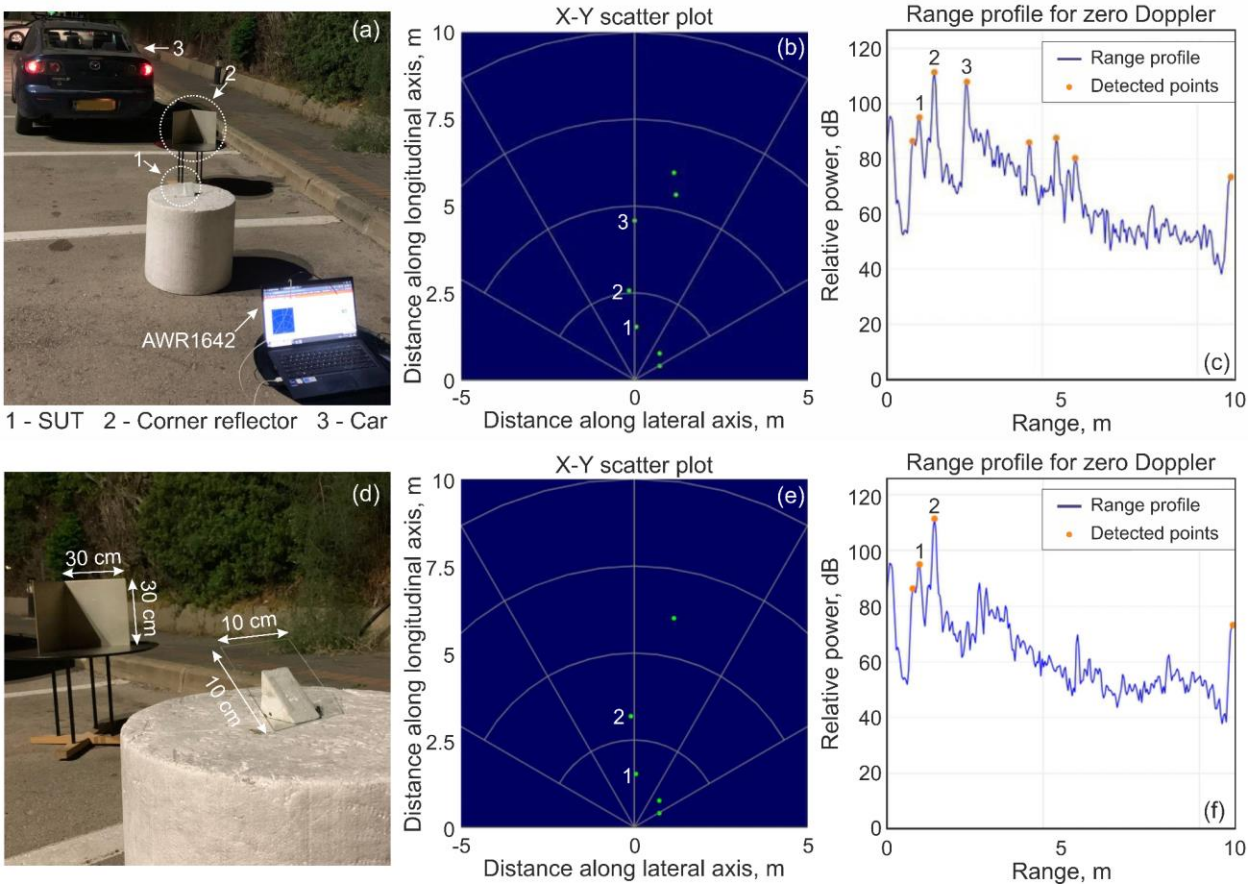

图 *9.* 室外实验 *(a)*、*(d)* 室外场景照片，其中 *(1)* 为线阵列，*(2)* 为角反射器，*(3)* 为汽车。*(b)*、*(e)* 雷达软件中显示的相应散点图。*(c)*、*(f)* 相对反射功率随目标距离的变化关系。选取了中央雷达波束。

结论

本文解决了如何增强车辆的毫米波雷达散射截面，从而提升汽车雷达的探测能力、提高行车安全这一挑战。具体做法是在后挡风玻璃上集成透明导线阵列，不增加笨重部件，也不改变车辆几何形状，从而保持车辆外形合规，并保留光学透明度和机械完整性。为满足这一需求，我们开发了一种可扩展且经济高效的方法，采用PTP在玻璃和柔性聚合物基底上制备导线阵列。我们制备了周期为2.65 mm、线宽为20 μm的阵列，面积最大可达 10×10 cm^2。光学测量证实，其具有较高的透明度，可见光透射率降低不到2%；电磁仿真和实验则表明，该阵列在75–110 GHz频段内能够有效控制偏振，并产生强反射。通过使用TI AWR1642模块进行雷达实验，验证了这些结构的实际效果：即使在低速下，也能清晰检测目标、增强反射信号并稳定地进行基于多普勒效应的速度跟踪。该概念在室内和室外场景中均得到验证，证实了在保持透明度的同时增强雷达散射截面是可行的。若将这一已验证的概念扩展至完整的后挡风玻璃，雷达散射截面最高可达1000 m2，可靠探测距离有望超过500 m，从而显著提升信噪比和汽车雷达系统的探测可靠性。

所展示的技术可扩展至其他透明车辆表面，包括挡风玻璃、侧窗和天窗，以增强高级驾驶辅助系统和车联网系统中的雷达协同。除汽车应用外，类似的基于超表面的方法还可用于基础设施到车辆通信、智能交通系统中的透明标牌，以及在毫米波雷达探测下需要实现隐身与可见状态转换的无人机着陆平台。此外，该概念还可发展为集成于透明结构中的功能性天线，从而实现传感与通信的双重用途。这里展示的可扩展性和低成本制备工艺为将先进电磁功能集成到适用于多种场景的透明表面中开辟了道路。

数据可用性声明

文　　章数据将在通讯作者提出合理请求后共享　　r.

致谢

里加工业大学和尤里·费德科维奇切尔诺夫策国立大学的团队感谢地平线欧洲项目“迈向拉脱维亚量子光子学卓越中心”（资助协议编号：101160101）提供的支持。

利益冲突披露
作者声明不存在利益冲突。

参考文献

[1] L. Joseph, A. K. Mondal, 《自动驾驶与高级驾驶辅助系统（ADAS）：应用、开发、法律问题与测试》2021年，1.[2] M. Q. Khan, S. Lee, 《传感器》2019年，第19卷，第5540页 2019年，19，5540.[3] J. Nidamanuri, C. Nibhanupudi, R. Assfalg, H. Venkataraman, 《IEEE智能车辆汇刊》2022年，7，326.[4] M. Hasenjager, M. Heckmann, H. Wersing, 《IEEE智能车辆汇刊》2020年，5，335.[5] V. K. Kukkala, J. Tunnell, S. Pasricha, T. Bradley, 《IEEE消费电子杂志》2018年，7，18.[6] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, M. Ali, 《IEEE信号处理杂志》2017年，34，22.[7] C. Waldschmidt, J. Hasch, W. Menzel, 《IEEE微波期刊》2021年，1，135.[8] G. Hakobyan, B. Yang, 《IEEE信号处理杂志》2019年，36，32.[9] A. Pandharipande, C. H. Cheng, J. Dauwels, S. Z. Gurbuz, J. Ibanez-Guzman, G. Li, A. Piazzoni, P. Wang, A. Santra, 《IEEE传感器期刊》2023年，23，11097.[10] H. Xu, J. Liang, W. Lin, B. Yan, I. P. Roberts, 《电子学》2025年，第14卷，第1436页 2025年，14，1436.[11] M. Dudek, D. Kissinger, R. Weigel, G. Fischer, 《欧洲雷达会议》2011年.[12] E. Bel Kamel, A. Peden, P. Pajusco, 《2017年第11届欧洲天线与传播会议》，EUCAP 2017 2017年，2445.[13] “23–27 GHz汽车相关物体的雷达散射截面测量结果 | IEEE会议出版物 | IEEE Xplore”，网址为 https://ieeexplore.ieee.org/document/5782525?arnumber=5782525，无日期。[14] W. J. Liao, Y. C. Hou, C. C. Tsai, T. H. Hsieh, H. J. Hsieh, 《IEEE天线与无线传播快报》2018年，17，418.[15] P. J. B. Morris, K. V. S. Hari, 《IEEE传感器快报》2021年，5，数字对象标识符 10.1109/LSENS.2021.3085087.[16] “TI 在国际消费电子展上推出新型汽车芯片，助力汽车制造商打造更智能、更安全的车辆 |TI.com”，网址为 https://www.ti.com/about-ti/newsroom/news-releases/2024/2024-01-08-ti-debuts-new-automotive-chips-at-ces--enabling-automakers-to-create-smarter--safer-vehicles.html，无日期。[17] D. Dobrykh, K. Grotov, A. Mikhailovskaya, D. Vovchuk, V. Tkach, M. Khobzei, A. Kharchevskii, A. Glam, P. Ginzburg, 《通信工程》2025年 4:1 2025年，4，1.[18] D. Vovchuk, M. Khobzei, V. Tkach, O. Eliiashiv, O. Tzidki, K. Grotov, A. Glam, P. Ginzburg, 《IEEE天线与传播汇刊》2025年，数字对象标识符 10.1109/TAP.2025.3540278.[19] A. Mikhailovskaya, D. Vovchuk, K. Grotov, D. S. Kolchanov, D. Dobrykh, K. Ladutenko, V. Bobrovs, A. Powell, P. Belov, P. Ginzburg, 《通信工程》2023年 2:1 2023年，2，1.[20] A. Mikhailovskaya, K. Grotov, D. Vovchuk, D. Dobrykh, C. Rockstuhl, A. Mikhailovskaya, 《IEEE天线与传播汇刊》2025年，73，2596.[21] “《雷达系统导论》- Merrill I. Skolnik - Google图书”，网址为 https://books.google.co.il/books/about/Introduction_to_Radar_Systems.html?id=Y6- APwAACAAJ&redir_esc=y，无日期。[22] X. Zhang, F. Wang, H. Li, 《IEEE信号处理快报》2022年，29，16.[23] G. Wen, H. Song, F. Gao, Y. Liang, L. Zhu, 《IEEE无线通信汇刊》2022年，21，4098。

[24] S. Edstaller, D. Mueller, 《IEEE微波理论与技术汇刊》2021年，69，4118.[25] A. R. Chishti, A. Aziz, M. A. Qureshi, M. N. Abbasi, A. M. Algarni, A. Zerguine, N. Hussain, R. Hussain, 《应用科学》2023年，第13卷，第210页 2022年，13，210.[26] S. Y. Lee, M. Choo, S. Jung, W. Hong, 《应用科学》2018年，第8卷，第901页 2018年，8，901.[27] Z. J. Silva, C. R. Valenta, G. D. Durgin, 《IEEE天线与传播杂志》2021年，63，27.[28] A. S. M. Sayem, A. Lalbakhsh, K. P. Esselle, J. L. Buckley, B. O'Flynn, R. B. V. B. Simorangkir, 《IEEE天线与传播开放期刊》2022年，3，1109.[29] C. Mias, C. Tsakonas, N. Prountzos, D. C. Koutsogeorgis, S. C. Liew, C. Oswald, R. Ranson, W. M. Cranton, C. B. Thomas, 《IEE 专题研讨会（摘要）》2000年，51.[30] L. Kannappan, S. K. Palaniswamy, M. Kanagasabai, J. K. Pakkathillam, S. Kumar, M. I. Hussein, 《科学报告》2023年，13，数字对象标识符 10.1038/S41598-023-44475-Y.[31] Y. Morimoto, S. Shiu, I. W. Huang, E. Fest, G. Ye, J. Zhu, 《IEEE天线与传播开放期刊》2023年，4，159.[32] S. Hong, S. H. Kang, Y. Kim, C. W. Jung, 《IEEE 天线与传播汇刊》2016年，64，2797.[33] Y. X. Sun, D. Wu, X. S. Fang, J. Ren, 《IEEE车辆技术汇刊》2023年，72，93.[34] H. Hosono, K. Ueda, 《施普林格手册》2017年，1.[35] Z. Wang, C. Chen, K. Wu, H. Chong, H. Ye, 《固体物理学报（A辑）：应用与材料科学》2019年，216，1700794.[36] H. Hosono, H. Ohta, M. Orita, K. Ueda, M. Hirano, 《真空》2002年，66，419.[37] C. Habis, J. Zaraket, M. Aillerie, 《缺陷与扩散论坛》2022年，417，257.[38] "NANOWEB® - META"，网址为 https://metamaterial.com/products/nanoweb/，无日期。[39] "3M™ 透明导电膜 3M23-MS，450 mm x 450 mm，5片/箱 | 3美国 M"，网址为 https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b5005340001/，无日期。[40] B. S. Kim, S. W. Lee, H. Yoon, M. S. Strano, Y. Shao-Horn, P. T. Hammond, 《材料化学》2010年，22，4791.[41] A. Carlson, A. M. Bowen, Y. Huang, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, 《先进材料》2012年，24，5284.[42] D. Song, A. Mahajan, E. B. Secor, M. C. Hersam, L. F. Francis, C. D. Frisbie, 《ACS 纳米》2017年，11，7431.[43] J. Lossen, M. Matusovsky, A. Noy, C. Maier, M. Bähr, 载于《能源学报》，爱思唯尔有限公司，2015年，第156–162页。[44] S. Tretyakov，2003年，284。