打破吞吐量上限：利用反射面增强车辆快速数据交换的传输

任千尧、黄庆骁、邓怡琴，*IEEE*会员，陈显豪，*IEEE*会员，林峰，*IEEE*会士，以及方玉光，*IEEE*会士

arXiv:2603.02752v1 [cs.IT] 3 Mar 2026

摘要——**智能出行的迅速发展，要求目标车辆与其指定的边缘计算基站（BS）或路侧单元（RSU）之间通过单条链路进行大容量突发数据传输，并须在车辆驶过覆盖区域的短时间内完成。然而，在带宽受限场景下，传统通信系统中的单辆车面临根本性的吞吐量上限。即使将所有时频资源分配给单辆车，这一限制依然存在，因为底层信道缺乏足够的空间分集，无法支持更高的数据速率。为打破这一吞吐量上限，本文提出一种新颖的反射增强传输框架，通过沿道路策略性地部署专用镜面反射面，主动改善传输环境。该方案将来自多个方向的分散信号汇聚至目标车辆，类似于凹面放大镜的聚光效果，从而增强单个信道的空间分集和可达秩。这使基站能够为单个用户分配更多传输层，进而显著提高单辆车的吞吐量上限。此外，我们还提出了适用于现有通信系统的反射面板分块组动态虚拟化方法，以灵活管理与其他共存用户之间的干扰。此外，通过多个反射面板协同旋转，进一步增强信号汇聚效果。最后，本文通过符合3GPP规范的系统级仿真，严格验证了该方案的有效性，并展示了显著的吞吐量提升。**

索引词—**反射面、被动反射、智能车辆、大规模多输入多输出。**

I. 引言

THE 智能车辆的普及带来了新的功能需求，而这些功能需要更高的数据传输从而提高车载通信系统的速率并缩短时延 [1]。这些新兴车载应用要求车辆经过特定基站（BS）的覆盖区域时完成大量数据交换，这给传统通信系统带来了链路敏感性和流量突发性方面的挑战。链路敏感性是指，为了最大限度地降低端到端时延，数据交换主要发生在目标车辆（TV）与指定边缘计算设备（如路侧单元（RSU）或具备计算能力的基站）之间的一条特定链路上，而非通过云服务器进行。流量突发性则是指由事件触发且时限紧迫的传输：偶发的数据量可能远超基准流量水平，而且数据必须在车辆穿越期间全部传输完毕，因为车辆驶离指定服务区域后，数据会迅速过时。

作为自动驾驶车辆（AV）的关键功能，高清地图（HD Maps）需要在特定链路上快速传输突发数据，以支持高分辨率的实时地图更新 [2], [3]。例如，在道路紧急情况中，为避免同时传输 [4],造成严重的数据拥塞和过度的资源消耗， [5]更适合在精确位置从源车辆向指定的基站/路侧单元进行定向传输。链路敏感性和流量突发性对于自动驾驶车辆和高级驾驶辅助系统（ADAS）中的高分辨率视频数据及感知数据传输同样至关重要 [6]–[8]。类似地，对于增强现实抬头显示器（AR-HUD）等信息娱乐应用，参考车辆与特定路侧单元之间必须交换高精度定位数据 [9]。此外，传输用于驾驶系统 [6]或通信模块 [10]中人工智能（AI）模型的训练数据集和模型参数，也可能在特定时间间隔内引发突发流量。此外，在存储-携带-转发数据传输系统 [1], 中，车辆与驶近的基站之间快速交换数据，进一步凸显了这两项挑战的重要性。

单条链路上的突发流量需求超出了传统 5G 蜂窝通信系统的设计范围 [2], [11], [12]。当前 5G系统优先考虑最大化小区总吞吐量，而非保证每条链路的吞吐量，因此无法满足单链路高吞吐量场景的需求。尽管车辆可以在无线条件不佳或驶出覆盖范围时切换基站以维持连接，但这从根本上与

QianyaoRen、黄庆骁和方玉光任职于香港城市大学香港赛马会智慧城市联合实验室及计算机科学系，地址为香港九龙（电子邮箱：qianyaren2-c@my.cityu.edu.hk、qx.huang@my.cityu.edu.hk、my.fang@cityu.edu.hk）。

Yiqn Deng 任职于香港岭南大学数据科学学院，地址为香港屯门（电子邮箱：yiqindeng@ln.edu.hk）。

陈显豪任职于香港大学电机电子工程系，地址为香港薄扶林（电子邮箱：xchen@eee.hku.hk）。

林峰现任台湾大学计算机科学系暨信息工程学系，地址：台湾台北（电子邮件：plin@csie.ntu.edu.tw）。

本文所述研究工作在智慧城市 JC STEM 实验室开展，该实验室由香港赛马会慈善信托基金根据合同 2023-0108 资助。本文所述工作还部分获得了中国香港特别行政区研究资助局的资助（项目编号：CityU 11216324）。

链路敏感性和流量突发性相冲突。因此，如何在车辆经过基站/路侧单元的覆盖区域时，通过单条链路实现大容量突发数据传输，是本文探讨的核心研究问题。

数据传输速率由三个关键因素决定：调制与编码方案（MCS）、分配的带宽以及 MIMO 层的数量。车辆的高速移动会产生多普勒频移，使信号检测更加复杂，并降低信干噪比（SINR）。高载波频率会加剧这种频移，因此在移动场景中，6 GHz以下频段更为适用。尽管 5G 等通信系统支持更高的载波频率，目前的部署仍主要使用 6 GHz以下频段 [13]–[15]。这种较低的载波频率将可用带宽限制在高频场景的约四分之一 [16]，，从而形成带宽受限的场景。

大规模MIMO是提升传输速率的关键技术，它能够在相同的时频资源上同时传输多条独立数据流 [17], [18]。虽然基站支持的 MIMO 层数上限较高，但由于空间分集有限或用户侧天线阵列较小，实际分配给单个用户的层数受到严重限制[19]。传统通信系统通过多用户调度来解决这一限制：基站动态地为众多用户分配空间资源，以充分发挥复用能力。尽管这种方法能最大限度地提高小区总吞吐量，但单个用户可用的空间层数仍然有限，尤其是高速移动的车载用户。

受可用带宽和MIMO层的限制，单个电视接收机存在硬性的吞吐量上限。即便将全部时频资源专用于单个电视接收机，且接收信干噪比高到足以采用最高调制与编码方案，其个体吞吐量仍不足以支撑新兴车载应用。流量突发性进一步加剧了这一瓶颈，使其无法维持较长的传输时长；链路敏感性则限制了传统多用户系统中通常能够获得的空间复用增益。

为突破这一吞吐量上限，我们提出通过有策略地引入反射无线电路径，增强单辆车的空间信道分集，从而解锁更多 MIMO 层。本文介绍了一种利用一系列专用镜面反射表面（DSRS）的方法，这些表面有策略地设置在道路旁、与基站/路侧单元相对的位置。就像凹面镜将日光反射并聚焦到一点以点燃纸张一样，这些表面能够朝向特定电视接收机生成多个方向的反射无线电路径，以提升接收功率，如图1所示。这些额外的反射路径使电视接收机能够启用未直接朝向基站的天线面板，从而扩展信道维度并提高其最大可达秩。对这些多样化路径进行空间整合，还能显著改善信道分集，从而提高实际秩接近理论最大值的概率。这两项改进使基站能够为其调度更多

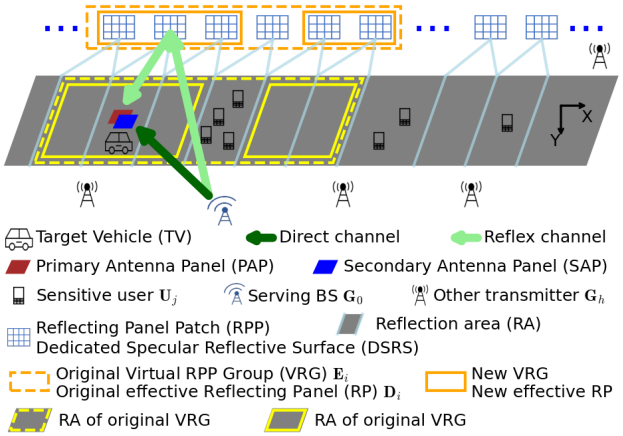


图1：反射增强传输框架（RETF）中反射面板块（RPP）的部署

电视接收机分配 MIMO 层，最终提高其吞吐量上限。在这一兼容框架下，基站能够显著提升具有突发性流量和链路敏感性要求的高优先级电视接收机的数据传输速率。如果没有此类电视接收机，系统则会无缝恢复采用传统的多用户调度机制，确保在普通用户之间公平、高效地分配资源。

本文首先介绍DSRS，它是传统智能反射面（IRS）的一种低成本替代方案。利用反射面板（RP）这一DSRS的实际实现，我们建立了系统模型。接下来，我们介绍状态切换机制（SSM）以及由动态分组虚拟化（RPP-DGV）系统管理的反射面板块（RPP），其设计旨在最大化电视接收机的传输速率，同时最小化对共存用户的干扰。借助贪心逐步搜索算法（GSSA），我们开发了一种快速虚拟化方案，并提出了反射增强传输框架（RETF）。为进一步提高吞吐量，我们提出旋转协作团队（RCT）和交替邻居选择（ANS）机制，使多个反射信号聚焦于特定区域。最后，我们基于3GPP TR 38.901 [20],开发了系统级仿真（SLS）平台，以定量评估RETF。

II. 专用镜面反射表面

智能反射面作为6G通信网络的一项前景广阔的技术，已受到广泛关注。通过智能配置每个反射单元的相移，智能反射面能够增强无线传输，从而提升系统容量和覆盖范围 [21]–[23]。利用智能反射面可提供替代路径以缓解阻挡并扩大覆盖范围 [24]，，还可通过连接更多基站和用户来提升毫米波（mmWave）MIMO系统的整体容量 [25]。一般而言，若能合理利用，传统智能反射面可部署在道路沿线，以改善无线环境并增强空间分集。

然而，将智能相位控制直接应用于新兴车载应用，无异于用

大锤敲核桃。正如第 I 节所述，这些应用主要用于低频、高移动性和单链路场景，此时智能反射面的复杂智能显得过度且多余。

智能反射面通过对大量单元系数进行动态优化，有效缓解高频通信中的严重路径损耗 [26], [27]。而在多径传播丰富的低频场景中，如图1所示，即使是简单的非智能反射，也能显著提升目标区域内 MIMO系统的空间复用容量。精确相位重构的潜力尚未得到充分利用，而且还受到低频范围内所需物理孔径尺寸不切实际这一问题的限制。

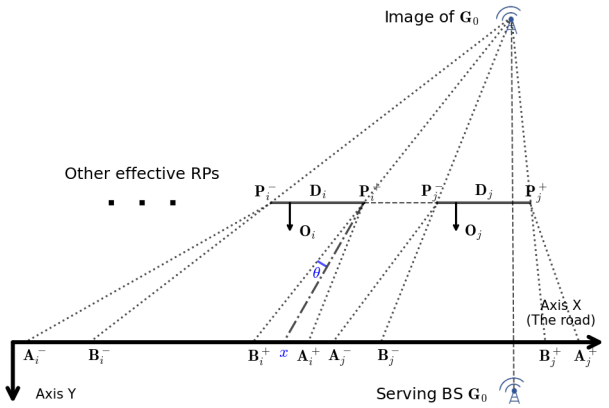


图2：反射面板（反射点）的反射区域（RA）

智能反射面的智能相位重构从根本上依赖准确的信道状态信息（CSI）[26], [28]。然而，在高移动性场景中，车辆位置和信道条件快速变化，导致 CSI 很快过时，因此需要频繁进行信道检测和 CSI 获取。在 6 GHz以下频段的多径环境中，CSI估计和 CSI反馈会消耗大量无线电资源 [29], [30] ，并对其他用户造成干扰，从而降低整体系统吞吐量。

与传统5G系统类似，这些智能反射面辅助MIMO系统主要致力于最大化小区总吞吐量，通常通过部署多个智能反射面和基站，为许多空间分离用户提供服务 [25], [26]。由于地理位置分散，这些用户对应的信道基本相互独立，从而形成高秩复合信道。然而，在单链路场景中，多天线电视不能等同于多个相互独立的单天线用户，因为天线相关性往往会导致低秩信道 [19]。因此，如何有效提升电视与其服务基站之间这一特定单链路通信的MIMO增益，仍是一个有待研究的问题。

因此，对于新兴的车载应用，智能反射面的部分功能得到了有效利用，使其沦为“非智能”设备。相反，其智能功能所带来的高昂部署成本、巨大的无线资源消耗以及显著的计算复杂度，构成了实际应用的一大障碍。为解决这一问题，我们需要一种新型“非智能”智能反射面，作为传统智能反射面的实用替代方案，并具备低成本、资源高效的固有优势。

近年来，全被动反射器（本质上是金属板）已被引入通信系统，以扩大覆盖范围 [31] 并提升MIMO信道秩 [32]。在 [23],中，我们提出了由高反射率金属板组成的可调反射器，通过机械调节在无线局域网（WLAN）系统中生成替代的视距（LoS）路径。在可移动天线的概念基础上 [33], , [34] 中提出的柔性反射器可通过调整其位置和方向，使其匹配镜面反射方向，从而扩大覆盖范围。同时，[35] 中的分析和实验表明，全被动反射器能够有效增强以镜面反射方向为中心的更广区域。

尽管这些研究聚焦于毫米波频率，但机械调节反射板的理念仍然适用于低频频段。在本文中，我们提出了 DSRS，将其作为一种经济高效的智能反射面范式，仅通过镜面反射运行，而无需进行相位操控。DSRS 可由任意物理物体实现，并具有几何上可预测的反射区域（RA）。鉴于低频移动场景中的多径无线环境更为复杂，如图 2 所示的镜面反射区域 region$\left[B_i^-, B_i^+\right]$ 能够实现接近最大值的接收功率。每个 DSRS 专用于一个固定的反射区域（RA），如图 1 中不同的灰色平行四边形所示，从而在地理区域与其对应的 DSRS 之间建立一一映射关系。在其专用的反射区域（RA）内，DSRS 着重通过增加多样化路径来增强传输环境，而不是通过相位重构对这些路径进行调整。

每个DSRS的反射区域（RA）仅由其相对于发射机的位置和方向决定，无需了解无线环境。这从根本上消除了精确获取信道状态信息（CSI）的必要性。基站（BS）只需掌握电视接收机（TV）的近似位置即可配置相应的 DSRS；由于电视接收机沿道路按照预定路线行驶，该信息是可获取的。此外，这种一对一关联使各个DSRS相互独立，从而提高了部署灵活性。在满足最小反射尺寸后，每个DSRS的物理尺寸和允许方向，以及DSRS间距，均可根据目标部署环境的条件进行调整。尽管DSRS的机械控制会引入少量延迟，基站（BS）仍可根据预测的目标车辆轨迹预先配置DSRS的方向，确保其在电视接收机进入特定区域时已准备就绪。

本文提出将反射面板（RPs）作为 DSRS 的实际实现方式。反射面板是一种可旋转的塑料面板，表面涂覆多层导电材料，以实现较高的电磁反射率。每个反射面板都集成了一个微型步进电机，使其能够像 [36]中带有可旋转轴的机械驱动式可移动天线一样精确旋转。实际应用中，反射面板可安装在道路或高速公路沿线的广告公告板、树木、路灯和建筑墙体上，也可安装在山体上。其形状和尺寸可根据需要定制，从而融入各种环境，同时不破坏环境美观。

III. 系统模型

A. 基本拓扑结构

本文分析一条直线道路，其中电视（TV）的行进路径对应X轴，正方向与电视的移动方向一致，如图1所示。基站沿道路的服务区域定义为区间 $[0, L]$。共有 $N_G + 1$ 个发射机，表示为

$$\mathcal{G} = \{\boldsymbol{G_h} = (\boldsymbol{Q}_h, \boldsymbol{A}_h, \bar{s}_h)\,,\ h = 0, 1, 2 \ldots N_G\} \quad (1)$$

其中 $\boldsymbol{Q}_h$ 表示第 h个发射机G_h的三维位置， $\boldsymbol{A}_h$ 表示其天线面板的朝向， s_h表示发射功率。第一个发射机 G_0（坐标为$\boldsymbol{Q}_0, \boldsymbol{A}_0, s_0$）代表电视的服务基站，其余则作为干扰发射机。电视在时刻 $t = 0$ 进入该区间，并在时刻 $t = T$ 离开，其位置记录为 $\boldsymbol{x_t} = (x_t, 0, 0)$，其中 x_t 是电视在时刻 t的X轴位置。

我们假设沿 $\boldsymbol{G_0}$对面的路侧部署了 N_D 个有效反射面板（反射点），在图1中以橙色矩形示出。每个有效RP是由一系列连续反射面板块组成的复合结构，详见第 IV-B 节。这些有效RPP的集合记为 $\mathcal{D}$，其定义为

$$\mathcal{D} = \{\boldsymbol{D}_i = \left(\boldsymbol{P}_i^-, \boldsymbol{P}_i^+, \boldsymbol{O}_i\right),\ i = 1, 2 \ldots N\} \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{P}_i^-$ 和 $\boldsymbol{P}_i^+$ 分别表示第 i个反射点 $\boldsymbol{D}_i$的起始与终止三维位置。 $\boldsymbol{O}_i = (\cos\ \alpha_i, \sin\alpha_i, \cot\ \gamma_i)$ 表示 D_i 在三维坐标中的朝向，方位角为 α_i，天顶角为 γ_i。考虑到车辆仅沿道路行驶而不横穿道路，我们将注意力集中在水平RA上。我们假设每个反射点借助合适的 γ_i在垂直方向上充分覆盖整条道路。

我们将传输性能因反射信号而下降的用户定义为敏感用户（SUs）。这些敏感用户连接到不同的基站（BS），或运行于其他通信系统中，因此当电视接收机经过他们身边时，服务基站无法通过将他们安排为空闲状态来减轻反射干扰。我们假设每个移动敏感用户均做匀速运动，并用 κ 表示移动敏感用户的比例。我们假设所有敏感用户都承载全缓冲业务，其位置沿道路随机生成，表示为

$$\mathcal{U} = \{\boldsymbol{U}_j = (x_j, y_j, h_j, v_j),\ j = 1, 2 \ldots N_U\} \quad (3)$$

其中 x_j 表示第 j个敏感用户 $\boldsymbol{U}_j$ 沿X轴的位置， $\boldsymbol{x}_j = (x_j, y_j, 0)$表示其三维坐标。 y_j表示到电视移动路线的随机距离，该距离不超过道路宽度。对于移动敏感用户，这些位置定义为与电视的相遇点。 $h_j \in \{1, 2 \ldots N_G\}$ 表示被指定为 $\boldsymbol{U}_j$的服务发射机的发射机索引。 v_j 表示 $\boldsymbol{U}_j$的速度，对于静态次级用户， $v_j = 0$。 N_U 表示次级用户的数量。

B. 视距角与天线方向图

对于直达信道，如图1中深色箭头所示，视距到达角和视距离开角由发射机与电视接收机的位置决定。相比之下，对于反射信道，如图1中浅色箭头所示，视距到达角由电视接收机与反射点的位置决定，而反射点与服务基站的位置则影响视距离开角。

为模拟智能车辆上朝向各个方向的大量天线面板，我们考虑一种典型的天线配置：两个相对的面板相隔 180 度放置，且各自配备数量相同的天线。这两个天线面板分别为主天线面板（PAP）和副天线面板（SAP），分别朝向基站一侧和反射点（RP）一侧，记为 $\boldsymbol{B}^{(p)}$ 和 $\boldsymbol{B}^{(s)}$。

对于电视接收机上的这两个天线面板以及发射机上的天线面板，我们采用 [20] 中所述的定向天线方向图。功率增益可根据 [20], 中的表 7.3-1 推导，表示为 $g(\boldsymbol{P}_A,\ \boldsymbol{P}_B,\ \boldsymbol{O}_A)$，其中 $\boldsymbol{P}_A$ 和 $\boldsymbol{O}_A$ 分别表示天线面板的位置和朝向， $\boldsymbol{P}_B$ 表示无线电链路上的任意一点，用于指示观测方向。天线面板朝向与入射波方向之间的偏差会显著降低功率增益。因此，相对于服务基站，这两个天线面板可视为彼此独立。直射信道与 PAP 相关联，而反射信道则与 SAP 相关联。由于敏感用户的位置是随机分布的，我们假设其天线为全向天线，以满足灵敏度要求，功率增益设为 1。

C. 功率损耗模型

由于发射机、反射点和电视接收机之间的距离较远，我们采用远场模型，并在入射路径和反射路径中均纳入平面波特性 [20]。反射引起的功率损耗主要取决于传播距离和无线电散射截面（RCS） [34],[35]。因此，对于与距离相关的损耗，我们采用 TR 38.901 [20] 中的统计损耗模型；对于与 RCS 相关的损耗，则引入基于面积的损耗。

1) 路径损耗（*PL*）：根据 TR 38.901 [20],，路径损耗取决于载波频率以及链路起点（$\boldsymbol{P}_A$）与终点（$\boldsymbol{P}_B$）之间的距离，记为 $d(\boldsymbol{P}_A,\ \boldsymbol{P}_B)$。相应的功率比 $\omega_{PL}(\boldsymbol{P}_A,\ \boldsymbol{P}_B)$ 可由 $PL = -10\log_{10}(\omega_{PL})$ 得出。对于反射信道，$\omega_{PL}^{(ref)}(\boldsymbol{P}_A,\ \boldsymbol{P}_B)$ 根据由 $d(\boldsymbol{P}_A,\ \boldsymbol{P}_*)$ 和 $d(\boldsymbol{P}_*,\ \boldsymbol{P}_B)$ 构成的两段距离之和推导得出，其中$\boldsymbol{P}_*$ 表示相应反射区域上几何反射点的三维位置。

2）反射损耗（*RL*）：功率比 ω_{RL} 表示一个反射点（RP）的最大雷达散射截面增益与吸收损耗的综合影响。对于给定尺寸的所有 RPP，该比值均为常数（第 IV-B 节）。反射损耗定义为 $RL = -10\log_{10}(\omega_{RL})$。

3) 偏置损耗（阻挡损耗）：根据 [35],中的实验，我们将入射角等于反射角的镜面反射区域建模为具有恒定

雷达散射截面和单位功率比。该区域之外的用户可能会经历显著的功率降低，我们将其定义为阻挡损耗。相应的功率比记为 $\omega_{BL} \leq 1$。

图2展示了 XOY 平面内的有效 RP $\boldsymbol{D}_i$ 及其 RA。$\boldsymbol{D}_i$ 的两个端点表示为$\boldsymbol{P}_i^- = \left(P_{i\,x,}^-, P_{i,y}\right)$ 和 $\boldsymbol{P}_i^+ = \left(P_{i\,x,}^+, P_{i,y}\right)$。方位角$\alpha_i$ 表示 $\boldsymbol{D}_i$ 在 XoY 平面上的朝向。如果 $\boldsymbol{D}_i$ 与道路对齐且未旋转，则 $\alpha_i = 90°$。

通过引入 BS 在 $\boldsymbol{D}_i$上的镜像（在 X 轴上的标记为 $[B_i^-, B_i^+]$ ），可以确定相应的镜面反射区域。该特定区域称为直接反射区域（DRA），可确保位于此指定区域内的车辆不会遭受额外的阻挡损耗。DRA 可根据与$B_{i\ ,x}^-$ 的几何关系计算，表示为

$$B_{i,x}^- = \frac{Q_{0,y} - 2P_{i,y}}{Q_{0,y} - P_{i,y}} P_{i,x}^- + \frac{Q_{0,x} P_{i,y}}{Q_{0,y} - P_{i,y}} \tag{4}$$

其中，$\overline{\boldsymbol{Q}}_0 = (Q_{0,x}, Q_{0,y})$ 是 BS 在 XoY 平面上的位置。同理，$B_{i\ ,x}^+$ 可由$P_{i\,x\,,}^+$确定。

由于发射机到反射点的信道存在角度扩展，实际入射角可能超出几何入射角。这会产生间接反射区域（IDRA），记为 $\left[A_i^-, B_i^-\right]$ 和 $\left[B_i^+, A_i^+\right]$，车辆在其中会经历额外的位置相关功率损耗，但仍可接收到反射信号。

根据 [20], 中的公式（7.5-11），图2中的角度 θ 服从零均值高斯分布。鉴于 IDRA 的长度远小于有效 RP 到道路的距离，可以合理地近似车辆在 $\left[B_i^+, A_i^+\right]$内位置 x 处的 $\left|x - B_i^+\right| \propto \theta$。相应的功率比因子 $\omega_{BL}(i,\ x)$ 建模为

$$\omega_{BL}(i,x) = e^{-\chi \left|x - B_i^+\right|^2}, \quad x \in \left[B_i^+, A_i^+\right] \tag{5}$$

其中 χ 表示一个常数衰减因子，由角度扩展定义，并遵循[20]第7.5节中的随机变化。对相反区域$\left[A_i^-, B_i^-\right]$也适用对称表达式。接着，我们将完整区域 $\left[A_i^-, A_i^+\right]$ 定义为 $\boldsymbol{D}_i$ 的RA，其中包括DRA和IDRA。

假设位于该区域之外的车辆无法从 $\boldsymbol{D}_i$ 接收到有效的反射波，因为功率增益低于指定阈值 $\omega_0 \in [0,1]$。DRA的单位功率比设为无阻挡损耗，而IDRA范围内的功率比由式（5）决定。因此，由一个DRA和两个IDRA组成的RA的近似长度表示为

$$\xi_i = \frac{Q_{0,y} - 2P_{i,y}}{Q_{0,y} - P_{i,y}} \eta_i + 2\sqrt{\frac{-\log \omega_0}{\chi}} \tag{6}$$

其中，第一项是DRA的长度，第二部分是两个IDRA的长度。$\eta_i = P_{i\ ,\ x}^+ - P_{i\ ,\ x}^-$是 $\boldsymbol{D}_i$的长度。

对于两个相邻反射点（RP）之间的间隙，即图2所示的区域$\left[A_i^+, A_{i+1}^-\right]$，由于在此区间内没有任何反射点（RP）可用于提供反射，因此功率比为零。如果两个反射点（RP）的间距更近，且A_{i+1}^- 位于 A_i^+ 的左侧，则该区域 $\left[A_{i+1}^-, A_i^+\right]$ 的总功率增益是来自每个反射点（RP）的两个功率比之和。一般而言，对于特定位置 x，阻挡损耗功率比可表示为:

$$\omega_{BL}(x) = \min\left(\sum_{i=1}^{N_D} \omega_{BL}(i,x), 1\right) \tag{7}$$

部署反射点后，我们可以准确计算每个位置的阻挡损耗 x as $BL = -10\log_{10}(\omega_{BL}(x))$。

D. 快衰落信道模型

本文采用 TR 38.901 [20] 中概述的快衰落模型。该模型由用于整体接收功率的大尺度模型（LSM）和用于每条射线的功率、时延和角度分布的小尺度模型（SSM）组成。所有参数均根据预定义的分布随机生成。

我们分别为直射信道和反射信道生成时域信道冲激响应（CIR）。按照 [20],第7节中的流程，直射信道的信道冲激响应表示为

$$h^{(dir)}(t) = \left\{h^{(dir)}(t, \tau_u) \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t} | u = 1, 2 \ldots N_{ray}^{dir}\right\} \tag{8}$$

其中，N_r 表示车辆侧每个天线面板上的天线数量，N_t 表示基站侧的天线数量。N_{ray}^{dir} 表示直射信道的射线数量。对于反射信道 $h^{(ref)}(t)$，大尺度模型阶段的总路径损耗包含反射损耗、阻挡损耗以及第III-C节讨论的两阶段路径损耗；小尺度模型阶段的射线角度则根据第III-B节讨论的调整后视距角度生成。

为了组合这两个信道，我们使用快速傅里叶变换（FFT）将 $h^{(dir)}(t)$ 和$h^{(ref)}(t)$转换到频域，得到相应的频域信道 $H_v^{(dir)} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 和 $H_v^{(ref)} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$，其中$v = 1, 2 \ldots N_B$和 N_B表示子载波数量。频域中的联合信道可表示为

$$H_v = \begin{bmatrix} H_v^{(dir)} \\ \sqrt{\omega_*} H_v^{(ref)} \end{bmatrix}, v = 1, 2 \ldots N_B \tag{9}$$

其中 ω_* 是一个功率因子，用于调整反射信道矩阵的幅度，以补偿功率差异，因为反射信道的接收功率低于直射信道。对于特定位置 x_t，功率因子 ω_* 可表示为

$$\omega_* = \frac{g_a^{(dir)}(x_t) \times \omega_{PL}(\boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{Q}_0)}{g_a^{(ref)}(x_t) \times \omega_{PL}^{(ref)}(\boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{Q}_0) \times \omega_{RL} \times \omega_{BL}(x_t)} \tag{10}$$

其中 $g_a^{(dir)}(x_t) = g(\boldsymbol{Q}_0,\ \boldsymbol{x}_t,\ \boldsymbol{A}_0) \times g\left(\boldsymbol{x}_t,\ \boldsymbol{Q}_0,\ \boldsymbol{B}^{(p)}\right)$ 和 $g_a^{(ref)}(x_t) = g(\boldsymbol{Q}_0,\ \boldsymbol{P}_*(\boldsymbol{x}_t)\ \boldsymbol{A}_0) \times g\left(\boldsymbol{x}_t,\ \boldsymbol{P}_*(\boldsymbol{x}_t)\ \boldsymbol{B}^{(s)}\right)$ 分别是直射信道和反射信道在发射机和接收机处的天线方向图增益。 $\boldsymbol{P}_*(\boldsymbol{x}_t)$表示相应的几何反射点。

至于电视与其他干扰发射机之间的信道（$\boldsymbol{G}_h, h = 1, 2 \ldots N_G$），每个发射机根据其所在道路的哪一侧对应于PAP或SAP。我们直接生成这些信道

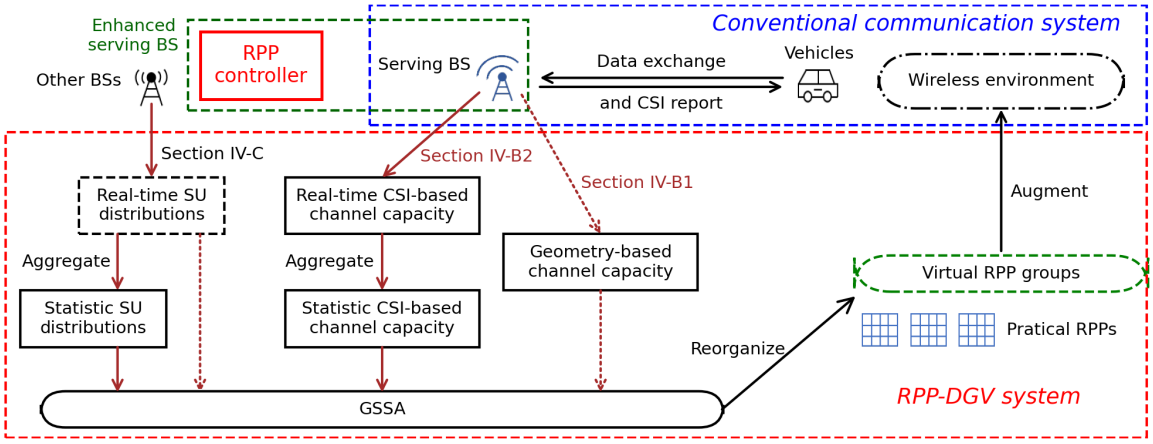


图3：RETF中RPP动态组虚拟化（RPP-DGV）系统示意图

按照 [20], 中第7节的步骤，记为 $H_v^{(h)}$，其中 h 是发射机的索引， v 是子载波的索引。类似地，对应于次级用户的信道（$\boldsymbol{U}_j, j = 1, 2 \dots N_U$）可表示为 $H_v^{(h,j)}$，其中j 是敏感用户的索引。

IV. 反射面板的动态部署

A. 状态切换机制

直观而言，长度无限的反射点（RP）可以使电视（TV）在整个服务区域内的总吞吐量最大化。然而，这会给次级用户（SUs）带来意料之外的干扰。与其通过复杂的系统设计和相位计算来抑制干扰功率，不如避免电视与次级用户之间的调度冲突，这样更为有效。对于由同一基站 $\boldsymbol{G}_0$ 服务的用户，服务基站可以优化调度，优先保障电视的高吞吐量传输。然而，对于连接到其他基站的次级用户，调度冲突无法避免，导致次级用户的传输性能严重下降。

为解决这一问题，出于实际考虑，我们沿道路部署离散反射面，而非采用连续面板，并采用状态切换机制（SSM）。电视沿路线行驶时，当其进入相应的反射区域（RA）时，反射点即可激活；当其离开该反射区域时，反射点则停用。无论是静止还是移动，每个次级用户在与电视处于同一反射区域时，都可能仅在一个连续的时间间隔内受到反射信号的干扰。由于次级用户与电视最多只能同时处于两个相邻的反射区域[1], , 每个次级用户接收额外反射干扰的持续时间很短[2]。因此，干扰对次级用户整体吞吐量的影响得以减轻。

[1]静态次级用户可以位于同一个 DRA 或两个 IDRA 中。与电视方向不同的移动次级用户可以位于一个 DRA 或 IDRA 中。与电视方向相同的移动次级用户可以位于多个离散的 DRA 中。它可以视为多个相互独立的次级用户，每个用户都可以位于一个 DRA 中。

[2]与电视共处一地较长时间的用户应由同一个服务基站提供服务，且不能被定义为次级用户。

SSM 内的激活和停用可以通过多种方式实现。例如，RPP控制器可以使用微型电机对有效 RP $\boldsymbol{D}_i$的天顶角 γ_i 进行物理调节，从而启用或停用道路上的覆盖切换。本文不具体说明实现方式，而是使用固定的处理时间间隔 T_g来表示 SSM 所需的时间。

借助 SSM，难以解决的冲突规避问题可转化为对有效反射点的可控状态管理。结合有效反射点（位置和长度）的最优部署，这一能力能够增强电视的数据传输，同时不会给次级用户带来过多额外干扰。

B. 虚拟反射面板补丁组

反射点的部署很大程度上取决于次级用户的分布。次级用户的实时分布变化显著，甚至其统计分布也会随着个别次级用户的出现或离开而随时间波动。为以动态方式有效管理并尽量减少对次级用户的干扰，我们提出沿路侧部署一系列 RPP。每个 RPP 本质上是一块独立的反射面板，其长度较短，反射区域也较小。随后，我们将若干连续的 RPP 编组为一个虚拟 RPP 组（ VRG ），使其发挥单个有效反射点的作用，如图1所示。这些 RPP 可以部署在实际位置，而 VRG 则作为虚拟逻辑实体，由服务基站或 RPP控制器进行管理。同一组中的所有 RPP 均设置为相同的旋转角，并可同时启用或停用。

与常规反射点相比，RPP 可以部署在难以部署大型反射点的位置，从而降低部署和维护成本。此外，RPP 有助于提升鲁棒性和灵活性。如果某些 RPP 发生故障，同一组中的其余 RPP 仍可继续运行，确保每个 VRG 的整个反射区域保持稳定。

服务基站可以调整 VRG，以满足各种场景中特定位置的 SUs 的需求。如

图1所示，原始 VRG 由六个 RPP 组成，起初没有 SUs。然而，当新的 SUs 意外进入该区域时，在 TV 穿过该区域期间，它们可能会受到显著干扰。为这些 SUs 提供服务的 BS 可以通知管理 RPP 的 BS，在 TV 进入受影响区域之前重新组织 VRG。可以将前三个和最后两个 RPP 分别编排为两个独立组，并停用中间的 RPP（对应于新 SUs 所在区域），以尽量减少干扰。尽管单个 RPP 的 RA 缺失可能导致该区域内 TV 的信道容量下降，但这种下降对其吞吐量的影响可能微乎其微。相比之下，减少额外干扰可以避免新 SUs 的吞吐量严重衰减。

在此，我们沿道路部署 N_e 个RPP，其长度均为 λ_0 ，间距为 μ_0。我们假设这些RPP到道路的距离相同且恒定，表示为 d_0。每个RPP可由唯一索引 e 标识，其中 $e = 0, 1, 2, \ldots N_e - 1$。对于每个索引 e，相应RPP在X轴上的起始位置和结束位置可分别表示为$(\lambda_0 + \mu_0)e$ 和$(\lambda_0 + \mu_0)e + \lambda_0 e$。VRG表示为

$$\mathcal{E} = \{\boldsymbol{E}_i = \left(e_i^-, e_i^+\right), i = 1, 2, \ldots, N_E\} \tag{11}$$

其中 e_i^- 和 e_i^+ 分别是VRG $\boldsymbol{E}_i$的起始RPP与结束RPP的索引。 N_E 是VRG的数量。 $\boldsymbol{E}_i$ 内的RPP数量记为 $n_i = e_i^+ - e_i^- + 1$。每个VRG $\boldsymbol{E}_i$ 对应一个有效RP$\boldsymbol{D}_i$，其中 $P_{i\ ,x}^{-} = (\lambda_0 + \mu_0)e_i^-$ 和$P_{i\ ,x}^{+} = (\lambda_0 + \mu_0)e_i^+ + \lambda_0 e_i^+$。该有效RP的反射区域定义为该组内所有RPP的RA的组合。

对于两个相邻 RPP 的重叠的干扰衰减区域上的给定位置，两个 ω_{BL} 之和可表示为

$$f(\Delta x) = e^{-\chi|\Delta x|^2} + e^{-\chi|\mu_0 - \Delta x|^2} \tag{12}$$

其中， Δx 表示给定位置与一个 RPP 的 DRA 端点之间的距离。直观而言，随着间距 μ_0 增大，总 ω_{BL} 会减小。可以证明，对于 $\mu_0 < \sqrt{2/\chi}$，$f(\Delta x)$在区间 $0 \le \Delta x \le \mu_0$ 上的最小值出现在端点处，且大于 1。随着 μ_0进一步增大，IDRA 中点处会出现另一个局部最小值，对应于 $\Delta x = 0.5\mu_0$。假设该局部最小值也保持大于 1，则均匀间距受以下条件约束：

$$\mu_0 \le 2\sqrt{\frac{\log 2}{\chi}} \tag{13}$$

采用这一间距时，两个相邻 RPP 均处于激活状态的情况下，这两个 RPP 的重叠的干扰衰减区域可视为具有 $\omega_{BL} = 1$的 DRA。这表明，在一组连续的 RPP 中，所有内部 RPP 的反射区域组合可视为相应有效 RP 的 DRA，而两个端点 RPP 的 IDRA 则起到该有效 RP 的 IDRA 的作用。

利用 VRG，我们的主要目标是在最大化电视的总吞吐量的同时，尽量减少次级用户所经历的干扰。鉴于电视和每个次级用户的绝对吞吐量在量级上可能存在显著差异，因此我们采用吞吐量比作为比绝对吞吐量更有效的衡量指标。VRG 优化的目标是最大化联合吞吐率 Φ，表示为

$$\Phi = \Phi_{tar} + \zeta \Phi_{sen} \tag{14}$$

其中， ζ 表示干扰等级因子（ILF），用于指示分配给次级用户的先验权重。当 $\zeta = 0$时，不考虑对次级用户的影响。随着 ζ 增大，避免干扰的重要性会更加突出。Φ_{tar} 和 Φ_{sen} 分别表示电视和次级用户的吞吐量比。这里，我们将 RPP-DGV 的优化问题定义为

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{\mathcal{P}}) \quad & \max_{\mathcal{E}} \Phi \\ s.t. \quad & 0 \le e_i^-, e_i^+ \le N_e \quad i = 1, 2 \ldots N_E \\ s.t. \quad & v_r T_g \le \xi_i \quad i = 1, 2 \ldots N_E \\ s.t. \quad & e_i^+ \le e_{i+1}^- \quad i = 1, 2 \ldots N_E - 1 \end{aligned} \tag{15}$$

第一个条件规定了取值范围的基本限制。第二个条件确保 VRG 有足够的时间激活和停用。 v_r 表示电视的额定速度，可以根据需求取平均速度、最大速度或其他设定速度。最后一个条件旨在防止 VRG 重叠，因为这可能导致同一个 RPP 被多个 RPP 组重复使用，从而造成覆盖缺失。

优化问题$\boldsymbol{\mathcal{P}}$中一项关键的未完成工作，是推导目标函数的表达式。在接下来的几个小节中，我们将分别给出吞吐量比 Φ_{tar} 和 Φ_{sen}的表达式。

C. 电视吞吐量比

电视的吞吐量比是指电视进入道路到驶离道路这段时间内的吞吐量比，表示为

$$\Phi_{tar} = \frac{\int_0^T C_{enh}(x_t)dt}{\int_0^T C_{org}(x_t)dt} \tag{16}$$

其中， $C_{org}(x_t)$ 和 $C_{enh}(x_t)$ 分别表示原始信道容量（仅 PAP）和增强信道容量（PAP 和 SAP）。

1）基于几何的信道容量：在实际应用中，通常无法获得准确的信道状态信息（CSI），因为电视驶上道路之前 CSI 尚不可知，而且会因快速变化的衰落信道而迅速过时。在这种情况下，可利用几何信干噪比 [37], 计算信道容量，其表达式为

$$\begin{aligned} C_{org}(x_t) &= WN_r \log_2 \left(1 + \frac{s_0^{(p)}(x_t)}{\sum_{h=1}^{N_G} s_h^{(p)}(x_t)}\right) \\ C_{enh}(x_t) &= C_{org}(x_t) + WN_r \log_2 \left(1 + \frac{s_0^{(s)}(x_t)}{\sum_{h=1}^{N_G} s_h^{(s)}(x_t)}\right) \end{aligned} \tag{17}$$

其中， W 为频带宽度。 $s_h^{(p)}(x_t)$ 和 $s_h^{(s)}(x_t)$分别表示从 G_h 到 PAP 和 SAP 的接收功率，

表 I：不同受损范围对一个敏感用户（SU）的影响 U_j

案例	A	B		C			D
子案例[2]	A1	B2	B3	C4	C5	C6	D7
RPP 状态[3]	N N N	A N N	N N A	A A N	A N A	N A A	A A A
受损范围[4]	GAP	IDRA		DRA/IDRA	两次 IDRA	DRA	
端点[5]	True						否

[1] U_j 位于 RPP e^j 的 DRA 或右侧 IDRA 中。[2] 由于最小长度的限制，子情况 (N A N) 被删除。[3] RPP e^j-1、e^j 和 e^j+1 的序数状态，其中 A 和 N 分别表示该 RPP 是否被组织在某个虚拟 RPP 组 (VRG) 中。[4] 表示通过反射信道对 U_j 造成的干扰。GAP 表示没有干扰。DRA 表示使用 $\omega_{BL}=1$ 时干扰较强，而 IDRA 表示使用 $\omega_{BL}<1$ 时干扰较弱。两次 IDRA 表示 U_j 可能受到两个 VRG 的干扰，且影响时长较长 $T_j^{(int)}$。[5] 这三个 RPP 是否属于同一个 VRG，或者其中是否存在某个 VRG 的端点。

分别。对于 $h=0,1,2\ldots N_G$, $s_h^{(p)}(x_t=s_h\times\omega_{PL}\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{x}_t\times g(\boldsymbol{x}_t\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{B}^{(p)})\times g\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{x}_t\,\boldsymbol{A}_h)(,)$，，(，，)。$h=$

对于$1\ 2\ldots N_G$ $s_h^{(s)}\ x_t=s_h\times\omega_{PL}\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{x}_t\times g\,\boldsymbol{x}_t\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{B}^{(s)}\times$，，()(，，)

$g(\boldsymbol{Q}_h,\ \boldsymbol{x}_t,\ \boldsymbol{A}_h)$。对于服务基站 G_0 通过反射信道到 SAP 的接收功率，$s_0^{(s)}(\omega_{PL}^{(ref)}\,\boldsymbol{Q}_0\,\boldsymbol{x}_t\times\omega_{RL}\times\omega_{BL}\,x_t\times g(\boldsymbol{x}_t\,\boldsymbol{P}_*\,\boldsymbol{x}_t\,\boldsymbol{B}^{(s)})\times)(,)()，()g(\boldsymbol{Q}_0,$

$\boldsymbol{P}_*(\boldsymbol{x}_t)\ \boldsymbol{A}_0)$

2) 基于 *CSI* 的信道容量：假设可以获取电视的实时 CSI，或者可以从其他车辆获取统计 CSI，则可推导出 MIMO 信道容量为 $C=W\sum_{r=1}^{R}\log_2\left(1+\rho_r\sigma_r^2\right)$，其中 R 表示层的总数，对应于通过发射端预编码实现的正交子信道的最优数量。 ρ_r 表示第 r 层的接收信干噪比，由发射机的功率分配决定。 σ_r 表示超过预定义阈值的相应奇异值。与 5G 蜂窝系统保持一致，我们采用层间均匀功率分布和秩自适应。对于联合信道矩阵H_v, $v=1,\ 2\ldots N_B$, 奇异值由平均协方差矩阵 Cov计算得出，其表达式为

$$Cov=\frac{1}{N_B}\sum_{v=1}^{N_B}\left(\boldsymbol{H}_v^{(dir)H}\boldsymbol{H}_v^{(dir)}+\omega_*\boldsymbol{H}_v^{(ref)H}\boldsymbol{H}_v^{(ref)}\right) \tag{18}$$

通过对 Cov 进行特征值分解，我们可以得到所有有效特征值 σ_r^2。信道容量可计算为

$$C_{enh}(x_t)=W\sum_{r=1}^{R}\log_2\left(1+\frac{s_0^{(p)}(x_t)\sigma_r^2(x_t)}{R\sum_{h=1}^{N_G}s_h^{(p)}(x_t)}\right) \tag{19}$$

其中， $\sigma_r^2(x_t)$ 表示 Cov 在位置 x_t 处的第 r 大特征值。类似地，原始信道 $C_{org}(x_t)$ 的信道容量也可仅基于 $H_v^{(dir)}$ 计算。

显然，基于 CSI 的信道容量考虑了两个信道矩阵的组合，因此更接近真实的通信环境。因此，相应的基于CSI的RPP-DGV能够在电视和次级用户之间实现更好的性能平衡。由于针对每个位置独立计算信道容量，RPP可以采用混合方法：先使用基于几何的信道容量初始化RPP-DGV，再针对可获取CSI的位置更新为基于CSI的RPP-DGV，以此完善虚拟化。

D. 敏感用户的吞吐量比

如第四节所述，每个次级用户可能只受一个或两个VRG影响。这些VRG的索引取决于次级用户的位置和速度。我们用集合 $\boldsymbol{I}_j$ 表示这些索引，该集合最多包含两个分量。如果 $\boldsymbol{I}_j=\varnothing$，则表示 $\boldsymbol{U}_j$ 位于两个有效RP之间的间隙中，可能不会受到任何有效RP的干扰。 $\boldsymbol{U}_j$ 的总干扰持续时间可表示为

$$T_j^{(int)}=\sum_{i\in\boldsymbol{I}_j}\min(\frac{\xi_i}{v_r},\frac{\psi_{i,j}}{v_j}) \tag{20}$$

其中，$\psi_{i,\ j}$ 表示 $\boldsymbol{U}_j$ 与 RPP 组 $\boldsymbol{E}_i$ 在激活时对应端点之间的距离。次级用户的平均吞吐量比可表示为

$$\Phi_{sen}=\frac{1}{N_U}\sum_{j=1}^{N_U}\left(1-\frac{T_j^{(int)}\left(C_{nrm}^{(j)}(x_j)-C_{int}^{(j)}(x_j)\right)}{\int_0^T C_{nrm}^{(j)}(x_j+v_j(t-t_j))dt}\right) \tag{21}$$

其中， $t_j=x_j/v_r$ 表示电视与 $\boldsymbol{U}_j$ 相遇的时间。 $C_{nrm}^{(j)}(x_t)$ 和 $C_{int}^{(j)}(x_t)$ 分别表示 $\boldsymbol{U}_j$ 在位置 x_t 处的正常信道容量和受干扰信道容量。鉴于 $\boldsymbol{U}_j$ 在时长 $T_j^{(int)}$ 内的位置变化远小于其与服务发射机之间的距离，我们使用位置 $x_t=x_j$ 处的容量差来表示干扰影响。

鉴于这些次级用户未与服务基站关联，RPP控制器只能利用其各自服务发射机更新的几何信息来估计其信道容量，表示为

$$C_{nrm}^{(j)}(x_t)=W\log_2\left(1+\frac{s_{h_j}^{(j)}(x_t)}{s_0^{(j)}(x_t)+n^{(j)}(x_t)}\right)$$
$$C_{int}^{(j)}(x_t)=W\log_2\left(1+\frac{s_{h_j}^{(j)}(x_t)}{s_0^{(j)}(x_t)+r_0^{(j)}(x_t)+n^{(j)}(x_t)}\right) \tag{22}$$

其中， $n^{(j)}(x_t)=\sum_{h=1,\ h\neq h_j}^{N_G}s_h^{(j)}(x_t)$ 表示除 $\boldsymbol{G}_0$ 之外的发射机产生的总干扰功率。 $s_h^{(j)}(x_t=s_h\times\omega_{PL}\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{x}_t^{(j)}\times g\,\boldsymbol{Q}_h\,\boldsymbol{x}_t^{(j)}\,\boldsymbol{A}_h)(,)(,,)$

表示 $\boldsymbol{U}_j$ 从 $\boldsymbol{G}_h$ 接收到的功率，其中 $\boldsymbol{x}_t^{(j)}=(x_t,\ y_j,\ 0)$ 表示 $\boldsymbol{U}_j$ 在时刻 t 的三维坐标。 $r_0^{(j)}(x_t)=s_0\times\omega_{PL}^{(ref)}(\boldsymbol{Q}_0,\ \boldsymbol{x}_t^{(j)})\times\omega_{RL}\times\omega_{BL}(x_t)\times g(\boldsymbol{Q}_0,\ \boldsymbol{P}_*(\boldsymbol{x}_t)\ \boldsymbol{A}_0)$ 表示其通过反射信道从 $\boldsymbol{G}_0$ 接收到的功率。

E. 贪心逐步搜索算法（*GSSA*）

将 RPP-DGV付诸实践的关键步骤是求解优化问题 $\boldsymbol{\mathcal{P}}$。虽然可以采用多种方法来解决这一优化问题，但这些方法通常需要大量迭代，耗时较长。为便于在 SUs 分布动态变化或无线信道环境波动时快速重新配置 RPP，我们提出了一种称为 GSSA 的贪心方法。该方法独立评估每个 SU，从而能够更高效、迅速地解决这一优化难题。

每个 RPP 只有两种状态：要么归入某个特定的 VRG，要么不归入任何 VRG。由于 RPP 数量庞大，通过穷举搜索来探索 N_e 个 RPP 的所有可能状态以确定最优解并不现实。不过，次级用户的数量通常要少得多。对于每个次级用户 U_j，其位置位于索引为 e^j 的 RPP 的反射区域内。U_j 只能受索引为 e^j-1、e^j 和 e^j+1 的三个相邻 RPP 影响。因此，这三个 RPP 至多有八种不同的状态组合，如表 I 所示。

算法 1 贪心逐步搜索算法（GSSA）

初始化
计算一个组中所需的最少 RPP 数量（如果需要）。否则，$n_0=0$。
$n_0 = V_r T_g/(\lambda_0+\mu_0)$。
按与 $\boldsymbol{G}_0$ 的距离递增顺序对 $\mathcal{U}$ 中的次级用户进行排序。
生成初始 VRG。
$\mathcal{E}^{(0)} = \{\boldsymbol{E}_1 = (\mathbf{0}, N_e-1)\}$.
计算初始联合吞吐率 $\Phi^{(0)}$。
对于每个 $\boldsymbol{U}_j$ in $\mathcal{U}$, **do**
找到对应的三个 RPP：e^j-1、e^j 和 e^j+1。
对于 表 I 中的每个子案例 , **do**
重新组织 VRG：$\mathcal{E}$。
计算联合吞吐率 Φ。
如果 $\Phi<\Phi^{(j-1)}$ 或 $\exists \boldsymbol{E}_i$ 与 $n_i<n_0$
移除此子案例。
结束条件判断
结束循环
如果仍有子案例，则选择最优项
$\mathcal{E}^{(j)} \leftarrow \mathcal{E}$ 和 $\Phi^{(j)} \leftarrow \Phi_{\max}$
Else
$\mathcal{E}^{(j)}$ 和 $\Phi^{(j)}$ 保持不变。
结束条件判断
结束循环

通过探索与三个指定 RPP 相关的七个子案例，我们可以确定适用于U_j的最优 VRG。我们首先使用一个涵盖所有 RPP 的 VRG，随后分析所有次级用户，以确定 VRG 的最优数量和组合，如算法 1 所示。当次级用户分布稀疏时，该算法能够获得最优结果。如果次级用户数量较多，且单个 VRG 可能影响多个用户，该算法仍能得出次优结果。它既可作为 RPP-DGV算法，也可作为其他基于迭代的优化方法的起点。

为了有效应对次级用户的动态分布，可根据当前状态使用 GSSA。当某个次级用户不再存在时，可将相关的三个 RPP 重新分配给最近的 VRG。反之，当有新的次级用户加入时，可将当前的 VRG 组织方式作为初始方案，其联合吞吐率为 $\Phi^{(0)}$。随后可直接对这些新用户应用 GSSA。该策略使 RPP控制器能够根据次级用户分布的任何变化，迅速重新组织 VRG。

F. 反射增强传输框架（*RETF*）

现在，我们可以介绍用于反射增强数据传输的框架，并将其命名为 RETF，如图 3 所示。RETF 由两个不同的系统组成：RPP-DGV系统和传统通信系统。

在RPP-DGV系统中，RPP控制器会根据CSI是否可用，在基于几何的RPP-DGV与基于CSI的RPP-DGV之间动态切换，具体讨论见第 IV-C2 节。由于基于CSI的信道容量具有时效性，控制器会忽略过时记录。如果当前可用信息不足，控制器就会像在初始部署阶段一样，切换回基于几何的RPP-DGV。RPP-DGV系统采用动态策略，控制器根据CSI的可用情况，在基于几何的RPP-DGV与基于CSI的RPP-DGV之间进行选择，具体讨论见第 IV-C2 节。鉴于基于CSI的信道容量具有时效性，系统会丢弃任何过时记录。当当前CSI不足时，系统会像在初始部署阶段一样，切换回基于几何的RPP-DGV。

RPP-DGV系统的一个显著特点是其运行独立于传统通信系统。它能够改善无线环境，但不控制数据交换流程，因此可以快速应用于任何现有系统。RPP控制器可以作为独立实体运行，管理指定区域内供所有通信系统使用的 RPP。或者，它也可以集成到服务基站中，使其能够组织 RPP以提升特定系统的性能，如图3所示。

V. 虚拟 RPP 群组的旋转协作

一般而言，由于传输距离更长且存在反射损耗，反射信道的接收功率低于直射信道。即使电视位于DRA内，接收功率仍可能不足，此时 $\omega_{BL}=1$。在秩自适应过程中，根据（18）计算特征值，其中 ω_* 对应PAP与SAP之间的功率差。

鉴于 $N_r \ll N_t$，直射信道和反射信道的协方差矩阵都可以视为低秩矩阵。当反射信道与直射信道正交时，联合信道矩阵的特征值可以解释为这两个信道特征值的组合。ω_* 的较小值可能会加剧各层之间的特征值差异。由于发射功率

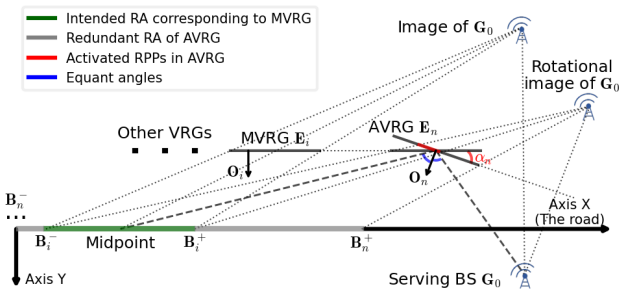


图 4：旋转协作团队（RCT）中两个 VRG 之间的中点校准

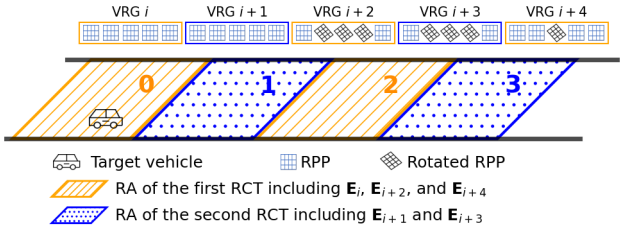


图 5：RCT 的交替邻居选择（ANS）

在发射机的各层之间均匀分配，因此当所有特征值相等时，可获得最大的信干噪比。层间差异越大，越可能导致功率利用效率降低以及有效信干噪比下降。因此，即使整体信道具有较高的秩，发射机在秩自适应过程中通常也会选择较少的层数。

为了增强反射信道的接收功率，我们提出一种信号聚焦方法，通过物理旋转调整特定团队中 VRG 的朝向，该团队称为 RCT。该技术使多个 VRG 能够同时将信号反射至同一台电视（TV），就像用放大镜将微弱的阳光聚焦到一点并将其点燃，从而提高整体接收功率。

A. 旋转协作团队（*RCT*）

RCT 由多个 VRG 组成。当一台电视（TV）位于特定的反射区域（RA） $\boldsymbol{F}_i$ 时，与之对应且未经旋转的 VRG $\boldsymbol{E}_i$ 被视为主要虚拟 RPP 组（MVRG）。其余组则归类为关联虚拟RPP组（AVRG）。每个 RCT 中有一个 MVRG 和若干个 MVRG，具体取决于 TV 所处的 RA。

为了确定与指定 MVRG $\boldsymbol{E}_i$ 对应的附加虚拟路组的旋转角，我们采用 RA 中点校准技术，如图 4 所示。为简化起见，每个 VRG 的 RA 近似为其所有组成 RPP 的 DRA。随后，通过将每个附加虚拟路组的 RA 中点与 MVRG 的 RA 中点对齐，得到其旋转角，表示为

$$\alpha_n = \arctan \frac{(\sigma-1)h + h_0}{(\sigma-1)d_0 - q_0} \tag{23}$$

其中， h_0 和 h 分别表示服务基站 $\boldsymbol{G}_0$和给定 AVRG $\boldsymbol{E}_n$ 沿 X轴到 MVRG $\boldsymbol{E}_i$ 的距离。 q_0 表示 $\boldsymbol{G}_0$ 到道路的距离。 σ表示距离因子，其表达式为

$$\sigma = \frac{\sqrt{(h-h_0)^2 + (d_0+q_0)^2}}{\sqrt{h^2+d_0^2}} \tag{24}$$

RPP旋转会导致其相对于道路发生错位。因此，即使各RA的中点重合，每个AVRG投影到道路上的有效RA也与未旋转的对应部分不同。如图4所示，这会产生冗余区域 $[B_n^-, B_i^-]$ 和 $[B_i^+, B_n^+]$，这些区域无法提供预期收益，还可能对其他次级用户造成干扰。为解决这一问题，必须在每个AVRG中有选择地停用导致这些冗余区域的特定RPP。

对于给定的 RCT 和 MVRG $\boldsymbol{E}_i$，AVRG $\boldsymbol{E}_n$ 中激活 RPP 的第一个索引对应于范围 $[e_n^-, e_n^+]$ 内满足以下条件的最大索引：

$$e_*^- + \frac{d_0}{\tan(2\alpha_n - \beta_e)} \le \frac{(q_0+2d_0)(\lambda_0+\mu_0)e_i^- - q_0 d_0}{(q_0+d_0)(\lambda_0+\mu_0)} \tag{25}$$

其中， $\beta_e \in [0,\pi]$ 表示与 $\boldsymbol{G}_0$相关的角度，其表达式为

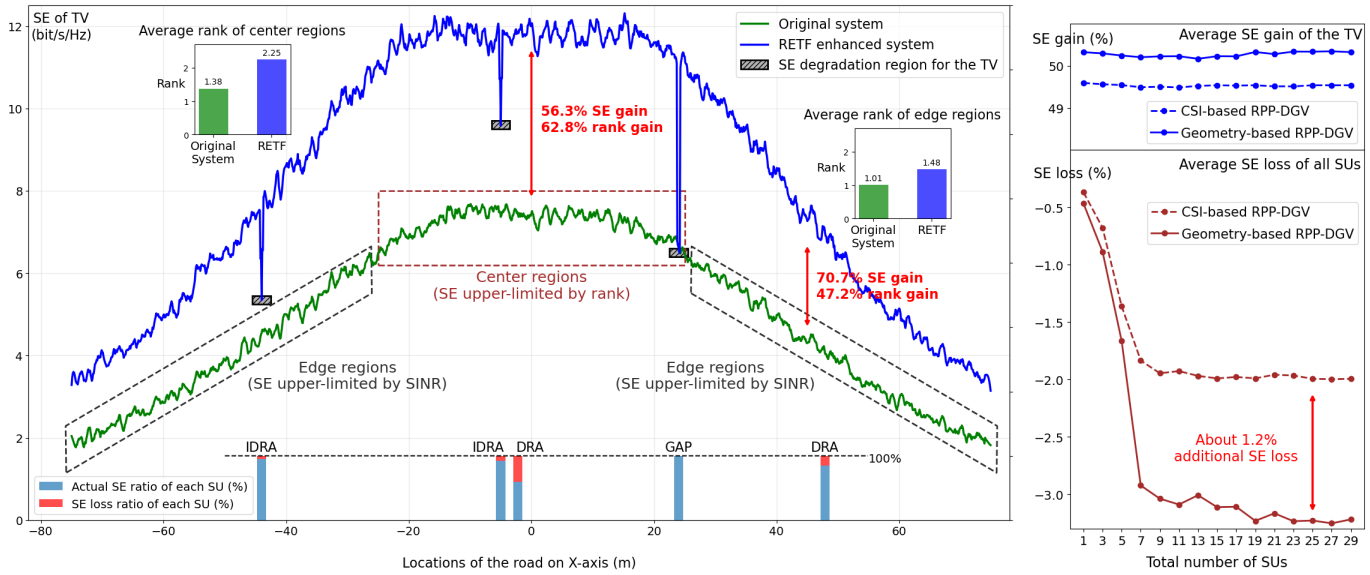
$$\beta_e = \arctan \frac{q_0+d_0}{Q_{0,x} - (\lambda_0+\mu_0)e_*^-} \tag{26}$$

其中， e_*^-对应于有效 RP 的左端点，右端点可根据 ($\lambda_0+\mu_0)e_i^+ + \lambda_0$以类似方式表示。该方法使 RPP控制器能够在单个 AVRG 内选择性地旋转特定 RPP，从而覆盖整个反射区域（RA），且不会在相邻区域引入干扰。

B. 交替邻居选择

在特定 RCT 中，电视的移动可能触发 MVRG 的切换，从而导致某一特定 AVRG 的旋转参数发生变化，包括 α_i 以及有效的 RPP 索引。通常，一旦 RPP-DGV 完成，所有旋转参数都会被计算并存储。然而，当电视即将进入某个特定反射区域时，基站需要足够的时间来完成该 RCT 中每个 AVRG 内 RPP 的旋转。因此，相邻的 RPP 组无法在单个 RCT 内同时工作，这意味着一个 RCT 无法有效服务相邻的 RA。

为确保完整的道路覆盖，我们提出一种选择RCT的方法，称为交替邻居选择（ANS）。该方法至少需要两个 RCT，如图5所示。我们将 $\boldsymbol{E}_i$、 $\boldsymbol{E}_{i+2}$和 $\boldsymbol{E}_{i+4}$分配给一个 RCT，而将 $\boldsymbol{E}_{i+1}$ 和$\boldsymbol{E}_{i+3}$ 分配给另一个RCT。当电视位于区域0时， $\boldsymbol{E}_i$ 作为MVRG， $\boldsymbol{E}_{i+2}$ 和 $\boldsymbol{E}_{i+4}$ 则作为附加虚拟路组。与此同时， $\boldsymbol{E}_{i+1}$ 和 $\boldsymbol{E}_{i+3}$ 正在为后续的区域1做准备。 $\boldsymbol{E}_{i+1}$ 中的RPP被切换至非旋转状态，而 $\boldsymbol{E}_{i+3}$ 中的部分RPP则被调整为朝向区域1。如果 $\boldsymbol{E}_{i+1}$ 与 $\boldsymbol{E}_i$ 一同作为区域0的AVRG，则没有足够的时间



(a) 道路上不同位置处电视和次级用户的频谱效率

(b) 次级用户总数的影响

图 6：目标车辆（电视）和敏感用户的性能

目标车辆（电视）和敏感用户（敏感用户）

供 $\boldsymbol{E}_{i+1}$ 在电视进入区域1时正确调整其朝向。类似地，当电视位于区域1时， $\boldsymbol{E}_{i+2}$ 被切换至非旋转状态以覆盖区域2，而 $\boldsymbol{E}_i$和 $\boldsymbol{E}_{i+4}$ 则被旋转，以承担覆盖区域2的相应角色。因此，电视在其整个路径上都将由这两个RCT交替增强。

VI. 性能评估

为使评估与实际的5G 蜂窝系统保持一致，我们依据TR 38.901 [20] 和TR 36.889 [38]中规定的3GPPRAN1指南，开发了一个系统级仿真（SLS）平台。我们基于[20], [39]中的配置和结果，通过信道模型校准和MIMO校准确保其准确性。结合第III-D节中的反射信道模型，该平台能够实现RETF，以评估电视接收机和次级用户的性能。

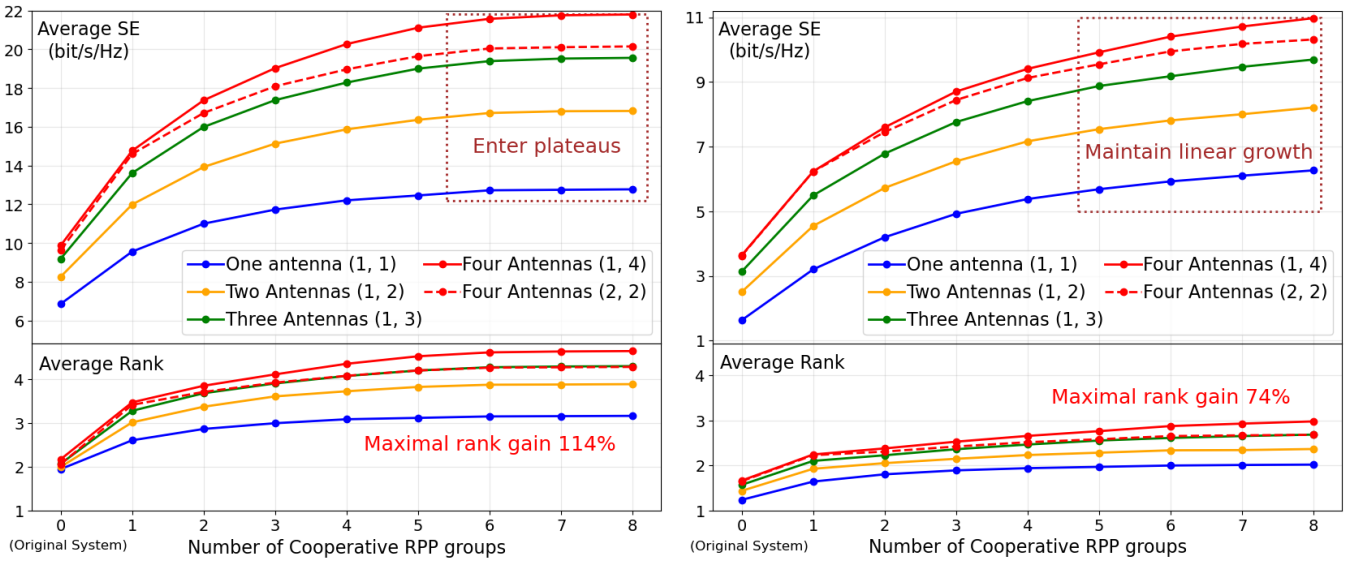
在仿真中，服务基站配备了32根天线，位于道路沿X轴方向的中点处。电视接收机的PAP和SAP彼此相对放置，间隔180度。通过3GPP TS 38.214 [18]中标准化的增强型Type II码本实现CSI反馈。服务基站直接利用上报的CSI计算预编码矩阵，并为电视接收机分配全部频带。电视接收机和次级用户均采用动态秩自适应和最小均方误差干扰抑制合并（MMSE-IRC）接收机。为确保通用性，吞吐量以频谱效率（SE）进行量化，单位为bit/s/Hz。

图6a展示了在PAP和SAP上配备两根双极化天线的电视的性能评估。在信干噪比较高、能够采用最高调制与编码方案的中心区域，吞吐量上限主要受可实现的信道秩限制。与传统系统中的单条直达路径相比，RETF方案引入了额外的反射路径，增强了信道分集。这种分集使平均信道秩从1.38提高到2.25，从而能够在相同的时频资源上并行传输更多数据流，显著提升可实现的频谱效率。在6 GHz以下频带的最大带宽条件下，峰值传输速率约为1.2 Gbps。

相比之下，边缘区域由于接收信号较弱且干扰较强，信干噪比较低，因此吞吐量上限受信干噪比而非信道秩限制。在这种情况下，调度更多层会降低每层的发射功率，使干扰抑制比提升信道秩更为重要。在 RETF 中，来自大致相反方向的反射路径使 TV 能够利用 SAP 上的额外天线，从而增强 MMSE-IRC 接收机的干扰消除能力。因此，即使 RETF 中的信道秩仍低于 1.5，信干噪比的提升也能带来超过 70% 的频谱效率增益。

值得注意的是，如图6a所示，在受损范围（DRA、IDRA 和 GAP）内，对 TV 和 SUs 频谱效率的影响都是暂时的。由于 SSM 的作用，在整个观测期间，频谱效率的下降幅度都很小。图6b进一步表明，随着 SUs 数量增加，SUs 的平均频谱效率损失仍控制在 3% 以下，而 TV 的频谱效率增益则保持稳定。与基于CSI的RPP-DGV相比，基于几何的RPP-DGV会使 SUs 的频谱效率额外损失 1.2%。这是因为缺少准确信道信息，无法对反射路径造成的干扰进行准确估计。因此，在信道状态信息充足时，优先采用基于CSI的RPP-DGV。否则，在基于几何的RPP-DGV的执行过程中，可在 Φ_{sen} 的计算中引入经验功率因子，以补偿被低估的干扰。

接下来，我们研究 RETF 在不同-



(a) 中心区域　　(b) 边缘区域

图 7：不同 RCT 中 VRG 数量下的平均频谱效率和秩曲线[3]

天线结构与 RCT 规模（RCT 中的 VRG 数量）下的性能。如图 7 所示，中心区域和边缘区域的平均频谱效率均随 RCT 规模显著提升。然而，在中心区域，当 RCT 规模超过六时，频谱效率与秩的提升均趋于饱和，因为额外的附加虚拟路组距离 MVRG 过远，无法有效贡献信道分集。相比之下，在边缘区域，尽管秩的提升有限，频谱效率仍几乎随 RCT 规模线性增长，因为即便较小的功率增益对信干噪比改善也至关重要。如表 II 所量化，8-VRG RCT 相对于 1-VRG RCT 的频谱效率增益在边缘区域（118.3%）显著大于中心区域（70.8%）。因此，一种实用策略是在中心区域采用较小的 RCT（本仿真中少于六组）以降低对次级用户的干扰，而在边缘区域可采用较大的 RCT 以最大化频谱效率，从而在整条道路上平衡性能与干扰。

表 II：最大与最小 RCT 尺寸下 4 天线性能的比较

RCT 尺寸	中心区域		边缘区域	
	Rank	SE	Rank	SE
1 VRG	59.9%	49.5%	34.8%	76.0%
8 个 VRG	113.4%	120.3%	71.2%	194.3%
Delta	53.5%	**70.8%**	36.4%	**118.3%**

根据图 7，随着天线数量增加，频谱效率增益也会提升，这是因为更大的天线阵列能够增强信道分集和干扰消除能力。比较红色实线和虚线可知，水平天线配置带来的性能增益高于垂直天线配置。这一结果与我们的仿真几何布局一致，其中所有 RPP 均主要分布在水平面内并旋转。在实际应用中，同时在水平和垂直维度部署 RPP，可使服务基站在 RPP-DGV 过程中，根据电视的具体天线配置动态选择最合适的 RPP。该策略能够以极低的额外 RPP部署开销进一步提升频谱效率。

VII. 结论

本文基于对新兴智能车辆应用的链路敏感性和流量突发性要求的分析，研究了低频、高移动性、单链路场景下传统通信系统中单辆车的吞吐量上限。为突破这一吞吐量上限，我们提出了一种新方案，通过部署专用镜面反射面来提供多条无线电路径。这些额外的无线电路径从不同方向传向目标车辆，从而激活更多天线并增强空间分集。与凹面镜将光线反射并聚焦于一点的原理类似，该方法能够相干地整合信号，提高联合信道矩阵的秩，最终使服务基站能够为目标车辆分配更多层。在本研究中，我们沿道路部署了一系列反射面板块，并将相邻的面板块编组成一个虚拟组，使其能够作为一个有效的反射面板运行。通过采用动态虚拟化和状态切换机制，我们能够最大限度地提高目标车辆的传输速率，同时尽量减少其他现有敏感用户所受的干扰。针对已知和未知 CSI 的场景，我们分别提出了基于 CSI 和基于几何的虚拟化技术。此外，我们还提出了一种适用于任何现有通信系统的新型反射增强传输框架。在该框架中，一种快速优化算法

[3]图例中的双极化天线结构同样适用于 PAP 和 SAP，具体讨论见第 III-B 节。

被提出，用于支持反射面板块的实时动态重组。我们还介绍了旋转协作团队和交替邻居选择方法，以进一步增强反射信号收敛。最后，我们利用 3GPP 提供的系统级仿真评估了该框架的性能，结果表明，正如预期，吞吐量上限能够得到显著提升。

参考文献

[1] X. Chen、Y. Deng、H. Ding、G. Qu、H. Zhang、P. Li 和 Y. Fang，“车辆即服务（vaas）：利用车辆为智慧城市构建服务网络和能力”，*IEEE*通信调查与教程，第26卷，第3期，第2048–2081页，2024年。[2] G. Elghazaly、R. Frank、S. Harvey 和 S. Safko，“高清地图：全面综述、挑战与未来展望”，*IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*，第4卷，第527–550页，2023年。[3] F. Jomrich、J. Schmid、S. Knapp、A. Höß、R. Steinmetz 和 B. Schuller，“分析自动驾驶中用于众包后端生成高清地图的通信需求”，载于*2018 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*，2018年，第1–8页。[4] F. Jomrich、A. Sharma、T. Ru¨ckelt、D. Burgstahler 和 D. Bo¨hnstedt，“高度自动驾驶车辆的动态地图更新协议”，载于*Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*，2017年，第68–78页。[5] D. Pannen、M. Liebner、W. Hempel 和 W. Burgard，“如何保持自动驾驶高清地图的及时更新”，载于*2020 IEEE International Conferenceon Robotics and Automation (ICRA)*，2020年，第2288–2294页。[6] Y. Wang、Z. Han、Y. Xing、S. Xu 和 J. Wang，“自动驾驶车辆决策数据集综述”，*IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*，第16卷，第2期，第23–40页，2024年。[7] P. Y. Leong 和 N. S. Ahmad，“自动驾驶车辆基于激光雷达的避障：全面综述”，*IEEE Access*，第12卷，第164 248–164 261页，2024年。[8] H. Wang、J. Li、Y. Cai、L. Chen 和 Y. Li，“Lidar-pdp：一种基于激光雷达的全景动态驾驶环境感知算法”，*IEEE Transactions on Transportation Electrification*，第11卷，第1期，第1848–1862页，2025年。[9] Z. Lv、J. Liu 和 L. Xu，“一种基于大面积体积全息光学元件的多平面增强现实抬头显示系统”，*IEEE Photonics Journal*，第13卷，第5期，第1–8页，2021年。[10] X. Lin、L. Kundu、C. Dick、E. Obiodu、T. Mostak 和 M. Flaxman，“6G数字孪生网络：从理论到实践”，*IEEE*通信杂志，第61卷，第11期，第72–78页，2023年。[11] M. A. M. Albreem，“5G无线通信系统：愿景与挑战”，载于*2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*，2015年，第493–497页。[12] A. Gohil、H. Modi 和 S. K. Patel，“5G移动通信技术：综述”，载于*2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*，2013年，第288–292页。[13] H. K. O. Lab，“中国移动5G创新中心3.5吉赫和28吉赫频段5G基站及用户设备试验报告”，技术报告，2018年。[14] C. Unicom，“中国电信5G技术白皮书”，技术报告，2018年。[15] B. Cai、X. Zhao、C. Hu 和 W. Xie，“5G网络部署的频谱重耕方法分析”，载于*2022International Conferenceon Information Processing and Network Provisioning (ICIPNP)*，2022年，第52–56页。[16] 3GPP，“TS 38.101 V18.5.0：新空口；用户设备（UE）无线电发射与接收；第1部分：频段1独立组网”，*3GPP*技术规范，2024年。[17] M. Ramesh、C. G. Priya 和 V. A. A. Ananthakirupa，“面向5G系统的高效大规模MIMO设计——现状与过往：综述”，载于*2017 InternationalConference on Intelligent Computing and Control (I2C2)*，2017年，第1–4页。[18] 3GPP，“TS 38.214 V18.5.0：新空口；数据物理层过程（版本18）”，*3GPP*技术规范，2024年。[19] V. Kumar、S. Arya 和 S. K. Patra，“天线相关性条件下上行大规模多输入多输出系统的可达速率与功率效率”，载于*2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*，2017年，第1–5页。

[20] 3GPP，“TR 38.901 V18.0.0：0.5至100吉赫频段信道模型研究（版本14）”，3GPP技术报告，2024年。[21] Y. Liu、X. Liu、X. Mu、T. Hou、J. Xu、M. Di Renzo 和 N. Al-Dhahir，“可重构智能表面：原理与机遇”，IEEE通信调查与教程，第23卷，第1577页，2021年，第3期，第1546页。[22] S. Gong、X. Lu、D. T. Hoang、D. Niyato、L. Shu、D. I. Kim 和 Y.-C. Liang，“借助智能反射表面实现智能无线通信：当代综述”，IEEE通信调查与教程，第22卷，第4期，第2283–2314页，2020年。[23] L. Zhang、L. Yan、B. Lin、H. Ding、Y. Fang 和 X. Fang，“改善通信的传输环境增强：可调反射器辅助毫米波无线局域网”，IEEE车辆技术汇刊，第69卷，第7期，第7416–7428页，2020年。[24] X. Tian、N. Gonzalez-Prelcic 和 R. W. Heath，“优化可重构智能表面在毫米波车载系统中的部署”，载于GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE全球通信大会，2022年，第5261–5266页。[25] Y. Wang、Y. Zhang、Y. Ren、L. Pang、Y. Chen 和 J. Li，“多RIS辅助无线网络中基站-RIS-用户关联与部署设计的联合优化”，IEEE无线通信快报，第28卷，第2185页，2024年，第9期，第2181页。[26] Y. Zhu、G. Zheng 和 K.-K. Wong，“大规模智能表面辅助毫米波网络的随机几何分析”，IEEE通信领域精选期刊，第38卷，第8期，第1749–1762页，2020年。[27] Q. Zhu、R. Liu、Y. Liu、M. Li 和 Q. Liu，“RIS辅助毫米波MIMO通信中混合波束成形与反射波束成形的联合设计”，载于2021 IEEE Globecom研讨会（GC Wkshps），2021年，第1–6页。[28] R. Li、B. Guo、M. Tao、Y.-F. Liu 和 W. Yu，“RIS辅助毫米波MIMO系统中混合波束成形与反射系数的联合设计”，IEEE通信汇刊，第70卷，第4期，第2404–2416页，2022年。[29] R. M. Dreifuerst 和 R. W. Heath，“CSI类型II码本的码本集合”，载于2023 IEEE第24届无线通信信号处理进展国际研讨会（SPAWC），2023年，第116–120页。[30] C.-K. Wen、W.-T. Shih 和 S. Jin，“大规模MIMO CSI反馈的深度学习”，IEEE无线通信快报，第7卷，第5期，第748–751页，2018年。[31] W. Khawaja、O. Ozdemir、Y. Yapici、F. Erden 和 I. Guvenc，“利用无源反射器增强非视距毫米波链路覆盖”，IEEE通信学会开放期刊，第1卷，第263–281页，2020年。[32] C. K. Anjinappa、F. Erden 和 I. Güvenç，“城市毫米波网络中基站与无源反射器的部署”，IEEE车辆技术汇刊，第70卷，第4期，第3525–3539页，2021年。[33] L. Zhu、W. Ma 和 R. Zhang，“无线通信中的可移动天线：机遇与挑战”，IEEE通信杂志，第62卷，第6期，第114–120页，2024年。[34] H. Lu、Z. Yu、Y. Zeng、S. Ma、S. Jin 和 R. Zhang，“利用柔性反射器进行无线通信：面向覆盖增强的位置与旋转联合优化”，IEEE无线通信汇刊，第24卷，第10期，第8252–8266页，2025年。[35] Z. Yu、C. Feng、Y. Zeng、T. Li 和 S. Jin，“利用金属反射器进行无线通信：反射建模与实验验证”，载于ICC 2023 - IEEE国际通信大会，2023年，第4701–4706页。[36] B. Ning等，“可移动天线增强的无线通信：通用架构与实现方法”，arXiv:2407 15448，2024年。[37] T. M. Duman 和 A. Ghrayeb，《MIMO信道的容量与信息率》，2007年，第43–70页。[38] 3GPP，“TR 38.889 V16.0.0：新空口免许可频谱接入研究（版本16）”，3GPP技术规范，2018年。[39] Z. Microelectronics，“R1-1701526 NR-MIMO第一阶段和第二阶段校准结果”，载于3GPP TSG RAN WG1 NR特别会议，2017年。