智慧城市中的可重构智能表面与侧行链路通信：实现无缝定位与感知的关键

Hui Chen，*IEEE* 会员、Hyowon Kim，*IEEE* 会员、Mustafa Ammous，*IEEE* 学生会员、Gonzalo Seco-Granados，*IEEE* 高级会员、George C. Alexandropoulos，*IEEE* 高级会员、Shahrokh Valaee，*IEEE* 会士，以及 Henk Wymeersch，*IEEE* 高级会员

arXiv:2301.03535v2 [eess.SP] 9 Mar 2023

摘要——**智慧城市包含智能交通、人群监测和数字孪生等要素，而这些要素都需要通过无线通信链路交换信息，并对互联设备和无源物体（包括人）进行定位。尽管定位与感知（L&S）被视为未来通信系统的核心功能，但与通信相比，它们对基础设施的需求本质上有所不同。无线通信通常只需连接到一个接入点（AP），而定位与感知则要求同时具备通往多个接入点的视距传播路径，这些接入点充当位置与姿态锚点。因此，针对通信优化的智慧城市部署无法满足严格的定位与感知要求。本文指出，新兴的可重构智能表面（RIS）和侧行链路通信技术，是通过低成本、高能效技术方案为智慧城市中的定位与感知提供泛在覆盖的关键。为此，我们提出并评估了接入点协调和自协调的可重构智能表面赋能定位与感知架构，并详细介绍了三类应用场景，分别依托低复杂度信标、协作定位和全双工收发器。本文还列出了所提定位与感知系统面临的实际问题及由此产生的开放研究挑战。**

索引词—**智慧城市、可重构智能表面、定位、感知、侧行链路通信。**

一、引言

智慧城市这一新兴概念旨在通过在城市层面协调多种数字技术，提高公共服务的可及性，推进城市环境的数字化，并监测各种以人为本的流程及资产 [1]。这一广泛概念整合了多种独立应用，既能在社会层面带来改善（例如智能家居、智能交通、供应链和环境监测），也能在个人层面带来改善（例如室内导航和扩展现实（XR））。要实现智慧城市的构想，可靠、低时延、高速的通信系统（用于支持互联设备之间的信息交换与管理），以及精准的定位与感知（L&S）（用于支持通信并提供态势感知服务）至关重要。在本文中，我们用定位表示对目标用户设备（UE）的位置（以及可能的朝向）进行估计；用感知表示对无源物体（即没有联网基础设施或不合作的物体）进行位置估计。

通过利用毫米波/太赫兹系统的大规模天线阵列和宽带宽，近年来，业界和学术界在感知、定位与通信一体化（ISLAC）方面的研究活动日益增多，感知、定位与通信一体化（ISLAC）能够利用通信基础设施和信号，与定位与感知（L&S）协同，支持多种应用。为此，近期已有多项标准化工作和 3GPP 活动受到研究，例如在 TR 38.855 [2] 中定义新的无线电定位要求、评估方法和技术（无论是否依赖无线接入技术），以及在 IEEE 802.11bf 标准 [3] 中开发 Wi-Fi 感知技术（涵盖 7 GHz 以下频段和毫米波频谱）。

尽管高角度分辨率和高时延分辨率（得益于大型阵列和宽信号带宽）有利于定位与感知任务，但信号覆盖仍是一项重大挑战，尤其是在高频系统中，因为这类系统路径损耗高、阻塞概率也更大。虽然借助单个接入点（AP）（例如 gNB 宏基站）即可实现通信，但定位功能需要接入多个接入点，而感知则需要克服发射端（TX）—目标—接收端（RX）链路的衰减，因此定位与感知服务的覆盖范围可能相当有限。反射式可重构智能表面（RIS）近年来被视为智慧城市无线通信的一项有前景的技术 [1]，具有显著提升定位与感知性能的潜力，甚至能够在各种场景中实现定位与感知服务 [4]。然而，由于可重构智能表面无法生成自身信号，只能对入射其上的模拟波形进行调制，因此需要单独的信号源。

在 5G NR 定位中，[2], 下行链路（从接入点到用户设备）定位参考信号和上行链路（从用户设备到接入点）探测参考信号可作为 RIS 辅助定位与感知系统的潜在信号源。然而，部署具备完整通信能力且能耗较高的接入点成本高昂，而用户设备通常电量有限，无法提供足够的信号强度。为满足覆盖范围外或部分覆盖区域（例如室内用户设备和隧道中的车辆）无处不在的定位与感知需求，通过 PC5 接口进行侧行链路通信（即终端节点或用户设备之间直接通信，数据无需经过接入点）尤其有用 [5], [6]。通过更密集地部署复杂度较低、仅广播或接收定位与感知信号的信标，这种通信能够缓解较大的信号功率损耗（例如接入点与用户设备之间距离较远时）。此外，可利用多个用户设备之间的协作定位来实现或增强定位与感知。进一步而言，当用户设备配备全双工收发器 [7]（这是一种在集成感知、定位、辅助通信中广泛讨论的感知技术）时，便可同时发送和接收信号，通过单个 RIS 锚点实现自身定位。

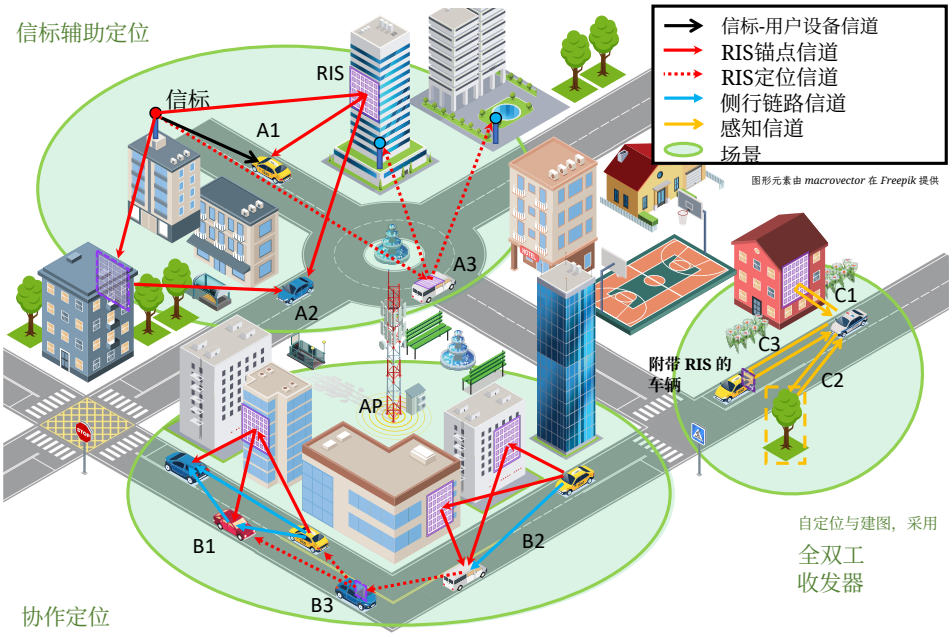

图1. 智慧城市中 RIS 赋能的无缝定位与感知场景：a) 信标辅助定位，b) 协作定位，以及 c) 使用全双工收发器的自定位与建图。来自可重构智能表面的信号可提供额外的距离信息（通过路径时延）和方向信息（通过到达角、出发角或空间频率），从而实现或改善定位与感知。

结合侧行链路通信与可重构智能表面，即可实现高效的无接入点定位与感知服务。

本文认为，可重构智能表面技术与侧行链路通信相结合，能够为部分覆盖区域和覆盖范围外区域提供无缝定位与感知服务，从而加速城市向智慧环境的智能化转型。本文的贡献如下：*i)* 提出接入点协调和无接入点定位与感知架构和协议；*ii)* 讨论具有代表性的 RIS 赋能的定位与感知场景（即信标辅助定位、协作定位，以及使用全双工收发器的自定位与建图，如图1所示）；并且*iii)*介绍智慧城市中所提出的 RIS 赋能的定位与感知系统面临的开放挑战，以及未来研究的潜在方向。

II. 定位与感知架构和协议

本节介绍所提出的、面向智慧城市并依托可重构智能表面和侧行链路通信的定位与感知系统中的不同实体类型，以及其支持架构；这些内容取决于是否存在用于定位与感知协调的接入点。

A. 实体类型与总体架构

在所提出的 RIS 赋能定位与感知系统中，如图 2 所示，存在几类实体：接入点、信标、可重构智能表面和用户设备。接入点为其覆盖范围内的设备提供蜂窝服务。信标可以是能够通过侧行链路通信发送和接收定位与感知参考信号的路侧单元（RSU）。这样一来，定位与感知任务便不需要明确调用成本高昂、功耗较大的接入点及其完整通信协议。可重构智能表面充当参考锚点，以辅助集成感知、定位、辅助通信任务；每个可重构智能表面均由本地可重构智能表面控制器（RISC）控制。该控制器能够自主切换可重构智能表面配置，也可由其他设备进行配置，例如通过侧行链路通信配置的用户设备，或通过可重构智能表面编排器（RISO）配置的其他可重构智能表面控制器 [8]。最后，用户设备可能具备不同的硬件能力（例如单天线/多天线、半双工/全双工），因而在定位与感知中承担不同角色（例如待定位的目标用户设备、位置已知或经测量得知且用于辅助定位与感知的辅助用户设备，或执行定位与感知任务的服务器/协调器）。尽管所有参与目标任务的设备都具备侧行链路通信能力，但信标通常比用户设备受到的功耗限制更少，而可重构智能表面控制器预计能够在低功耗模式下配置相位，无需发送或处理定位与感知参考信号 [9]。我们还考虑可重构智能表面之间协调其反射波束成形，可采用时分方式，或在时域中使用相位配置码；这些配置可以预先设定，也可以自适应配置（例如，利用机器学习算法优化定位与感知性能）。

针对本文所考虑的场景，我们提出了两种不同的架构：一种基于 AP 协调，另一种基于自协调。前一种架构适用于覆盖区域内或部分覆盖区域内（可使用侧行链路）的用户设备（以及其他定位与感知相关设备），需要指定一个接入点作为定位与感知协调器。定位与感知任务通过该协调器与位置管理功能（LMF）之间的交互来执行（例如通过 NR定位协议A（NRPPa） [10]），位置管理功能通过接入和移动性管理功能（AMF）控制并协调所有涉及的设备，如图 2 所示。自主协调架构明确依赖侧行链路通信，尤其适用于位于接入点覆盖范围外的用户设备，或连接到

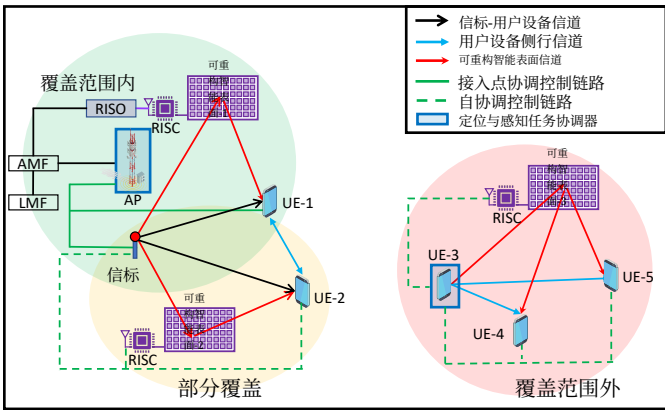

图2. 用户设备在不同覆盖区域内执行定位与感知。接入点协调架构适用于位于覆盖范围内或部分覆盖（需要侧行链路通信）区域的用户设备。当用户设备和所有定位与感知设备都无法接入任何周边接入点（即位于覆盖范围外区域）时，自主协调架构是提供定位与感知服务的唯一选择。

无法满足时延和空间分辨率要求的接入点（例如传统的3G/4G 接入点）的用户设备。在这种情况下，定位与感知任务在选定的任务协调器（例如某个用户设备）处执行。在两种架构中，定位与感知信号均可由信标、辅助用户设备或目标用户设备生成，具体取决于网络拓扑和特定的应用场景。尽管定位与感知任务需要专用算法，但可以使用以下架构和协议来执行。

B. 接入点协调架构

该架构依靠一个或多个接入点分配可用无线资源，并确保已连接设备之间的定时同步，这些设备包括用户设备、RIS控制器和专用信标节点。这种网络管理方案类似于侧行链路通信中的模式1 [5]，定位与感知协议可概括为以下6个步骤：

1) 目标用户设备向接入点（选定为任务协调器）发起定位与感知请求。2) 协调器交换相关位置信息（例如，系统中注册的周边信标和可重构智能表面），确定定位与感知配置（例如，通信模式和可重构智能表面控制器设置），并选择并通知参与定位与感知任务的附近信标、用户设备和可重构智能表面。3) 协调器为所有参与设备分配定位与感知所需的时频资源，并触发可重构智能表面控制器，在整个估计过程中配置可重构智能表面单元的相位配置。4) 信标和/或用户设备发送定位与感知参考信号，这些信号经参与任务的可重构智能表面反射后，由目标用户设备接收。5) 目标用户设备利用收集到的测量值执行定位和/或感知任务。或者，也可以将此计算任务卸载至定位与感知服务器（例如，负责协调的接入点，或另一台计算能力较强的用户设备）。对于无源反射式可重构智能表面，可重构智能表面控制器无法访问入射的无线电信号，因此无法执行任何估计。

6) 任务协调器会收到估计得出的定位与感知结果；此可选步骤可为后续使用提供先验信息。

对于部分覆盖场景，覆盖范围外的用户设备需要与接入点覆盖范围内的设备建立侧行链路通信。随后即可按照上述步骤执行定位与感知任务。

C. 自协调架构

当参与定位与感知任务的设备位于覆盖范围外区域时，需要采用无接入点架构。与模式2侧行链路通信类似， [5]，定位与感知任务可通过选择特定设备作为定位协调器来实现自主执行，具体如下：

1）目标用户设备通过侧行链路通信发现附近设备（例如信标、可重构智能表面和其他用户设备），并获取其位置信息（如果可用）。2）根据发现的邻近设备，目标用户设备确定一个定位与感知任务协调器（可以是其自身），并通知该协调器定位与感知配置。3）目标用户设备向协调器发起定位与感知请求，并执行与接入点协调架构相同的操作（即步骤2）至6））。

在下文中，我们将介绍图1所示的、采用可重构智能表面和侧行链路通信的定位与感知场景。场景A和C近期已在 [11]，[12]中介绍；然而，据我们所知，现有公开技术文献尚未报道更一般的三维定位、姿态估计和移动性情况，以及场景B1-B3。

III. 可重构智能表面赋能的定位与感知场景

本节将介绍三种具有代表性的可重构智能表面赋能的定位与感知场景，这些场景面向智慧城市应用，并依托上述架构和协议。

A. 信标辅助定位

采用低复杂度信标，可实现定位与感知系统安装和部署的高度灵活性。一个典型用例是火车站，其中多个低成本信标广播定位与感知参考信号，引导用户设备在可重构智能表面的支持下进行室内导航。在此类别中，我们考虑用户设备定位（借助一个或多个可重构智能表面）和可重构智能表面定位（借助多个信标）。

A1)单个可重构智能表面支持的用户设备定位：在此场景中，假设可重构智能表面和信标状态均已知，因此可以根据信标的定位与感知参考信号估计额外时延以及可重构智能表面路径的出发角（AOD）。随后，可通过视距路径与可重构智能表面路径的双曲线（即到达时间差（TDOA））与可重构智能表面处沿出发角方向的直线的交点，对目标用户设备进行定位。强多径会影响性能 [11]；然而，通过适当的可重构智能表面配置设计，可以将可控的可重构智能表面信道与不可控的多径信道分离，从而获得更好的性能。这是可重构智能表面支持的基本定位场景，只需要一个低复杂度信标。

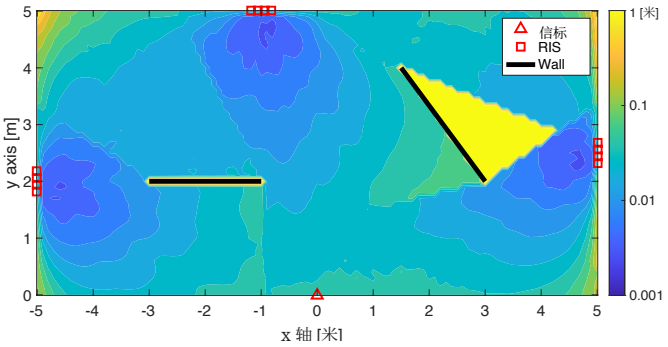

图3. 场景A1和A2：在28 GHz下，采用 10×10 个可重构智能表面的多RIS辅助单输入单输出定位场景中，不同用户设备位置对应的位置误差界（单位：米）。目标用户设备可通过单个 RIS 和信标-用户设备视距路径进行定位；在视距阻塞条件下，则至少需要2个 RIS（更多详情请参见 [11] ）。

A2)多个可重构智能表面支持的用户设备定位： 如果同时存在多个可重构智能表面，则无需满足视距和时延估计的要求。可以估计来自不同可重构智能表面的出发角，并通过求出发角线的交点来定位用户设备。图3显示了目标用户设备在 5×10 米^2 区域内不同位置时的位置误差界。如图所示，在存在多个可重构智能表面的情况下，即使信标与用户设备之间的视距路径受到遮挡，也仍然可以对用户设备进行定位。然而，当用户设备只能看到一个锚点（信标或可重构智能表面）时，无法执行定位任务（见点 $[3, 3]$米周围的黄色三角形区域）。

A3) 通过多基地感知进行***RIS*** 定位： 在被动用户设备或物体覆有可重构智能表面的场景中，定位（或感知，视具体场景而定）可采用半被动方式进行，只需少量能量用于定位协调和RIS相位轮廓控制。此类定位任务可利用多个位置已知的信标，以及估计得到的时延和空间频率（而非场景A1和A2中使用的出发角），来估计覆有RIS的物体的位置（和朝向）。请注意，几何约束可大幅降低此类场景的难度。例如，可将RIS的朝向视为一维参数（如车辆行驶方向）。此外，在信标处采用天线阵列还可进一步简化RIS 定位问题。

B. 协作定位

侧行链路通信，或称为车联网通信（V2X）的车载通信版本，已被引入毫米波频段，用于车辆之间的信息交换，从而为众多用例开辟了道路，例如车辆编队、碰撞规避和自动驾驶 [5]。可重构智能表面与侧行链路相结合，预计不仅能提供低时延高可靠通信 [13]，还能以协作方式辅助定位与感知 [14]。我们将重点关注后一种情况，即利用可重构智能表面锚点（也就是已知位置和朝向信息的锚点）估计绝对位置，且不涉及任何接入点或信标。一个典型场景是城市区域中的协作车联网，其中接入点信号和全球定位系统信号严重受阻。我们考虑单RIS和多RIS参与的定位场景，其中单天线用户设备通过侧行链路信号协作估计各自的位置。我们还考虑一种更一般的场景，其中涉及覆有RIS的物体，从而实现协作式 RIS 定位。

B1)单 ***RIS*** 辅助协作定位： 考虑这样一种场景：多个用户设备和一个 RIS 锚点参与其中，用户设备希望估计自身位置。我们假设每个用户设备都可以向其他用户设备发送侧行链路信号（即作为发射端），这些信号通过两条路径（即用户设备-用户设备路径和用户设备-RIS-用户设备路径）到达作为接收端的用户设备。通过适当控制可重构智能表面单元，可以将这两条路径分离。随后，可以利用接收端收到的符号，估计不同路径的时延以及与各 RIS 相关的空间频率信息（类似于 A3）。最后，可以利用收集到的测量值估计发射端和接收端的位置。该场景至少需要三个用户设备协作，才能在不存在模糊性的情况下实现可行定位。图 4 比较了在可重构智能表面辅助和信标辅助的三维协作定位场景中，三个用户设备的位置误差界随 RIS 单元数量变化的情况。

B2)多 ***RIS*** 辅助单向侧链路定位：在至少包含两个可重构智能表面的场景中，单向侧链路通信足以定位发射端和接收端用户设备。使用两个可重构智能表面时，发射端与接收端之间可以通过视距（LOS）路径和两条可重构智能表面路径获得三个时延测量值。不过，这需要对两个可重构智能表面的反射单元进行最优联合设计，才能让接收端区分这些路径。此外，在区分出可重构智能表面路径后，我们还可以估计每个可重构智能表面的空间频率信息。因此，可以利用收集到的测量值估计发射端和接收端的位置。

B3)协作式 ***RIS*** 定位： 考虑一种更一般的场景：使用一个（或多个）处于已知状态的可重构智能表面，定位多个具备侧链路通信能力的用户设备和物体（表面覆盖有可重构智能表面）。由于网络复杂度高且未知量众多，这种场景颇具挑战性。不过，通过合理设计所有相关的可重构智能表面配置和传输协议，可以将该问题分解为协作定位（见 B1）和 RIS 定位（见 A3）两个问题。与 B1 类似，至少需要若干用户设备（具体数量取决于场景）充当发射端，并通过直达路径和间接路径向其他用户设备发送侧链路信号。用户设备完成定位后，可按照与 A3 类似的方式解决 RIS 定位任务，并通过处理所有可用信息来改进估计结果。

C. 配备全双工收发器的自定位与建图

当用户设备配备全双工收发器（如雷达）时， [7], 就无需采用多 RIS 配置，也无需用户设备之间协作。相反，该用户设备可利用单个 RIS 进行自定位，并利用多径分量随时间推移测绘环境；这一过程称为单基地同步定位与建图（SLAM）。需要注意的是，SLAM 并不局限于全双工用户设备，在用例 A1-A3 和 B1-

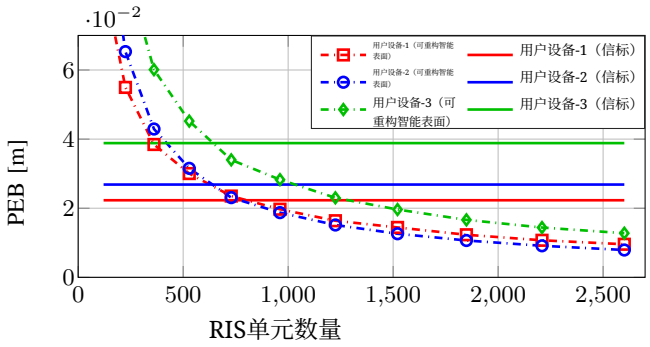

图4. 在固定随机相位配置的设置下，不同RIS尺寸时，RIS赋能的定位与信标辅助协作定位的位置误差界。结果表明，当可重构智能表面单元数量足够多时，可用被动锚点（RIS）替代主动锚点（发射功率为10 dBm、传输5次的3×3 信标阵列），而不会降低性能。

B3。接下来，我们将介绍三个采用全双工用户设备的无信标定位与感知场景。

C1)***RIS***赋能的自定位： 考虑一个由单天线用户设备和一个可重构智能表面组成的系统，其中用户设备发送定位与感知参考信号，并接收其反向散射版本，即用户设备-RIS-用户设备（受控路径）和用户设备-地标-用户设备（非受控路径）信号。可选的一种RIS相位配置是采用定向反射波束；当用户设备位置不确定性（包括移动场景下）已知时，可以高效地设计此类波束 [12]。在这种场景下，可以估计用户设备-RIS-用户设备信道在RIS处的时延和角度信息，并据此对用户设备进行定位。图5展示了RIS采用两种不同相位配置时的波束图，重点关注用户设备不确定区域。如图所示，与定向相位配置相比，优化后的相位配置 [12] 可提供足够的波束成形增益，从而提升定位与感知性能。

C2) ***RIS***赋能的同步定位与建图： 如果用户设备配备全双工多输入多输出（MIMO）天线阵列 [7],，则可实现同步定位与建图。与场景C1类似，通过优化RIS相位配置和预编码器/合并器，可以分辨来自不同路径的信号。以下信道参数可以估计：*i)* 用户设备-RIS-用户设备信道的信号传播时延、RIS处的出发角（AOD）以及用户设备处的到达角（AOA）；以及*ii)* 每个用户设备-地标-用户设备信道的时延和用户设备处的到达角。除了从受控路径获得的位置参数（如场景C1所示）外，还会利用到达用户设备阵列的非受控路径参数来感知传播环境。采用最先进的同步定位与建图滤波，可以提升用户设备定位和无线电环境建图（即感知）的性能。图6展示了不同相位配置下的感知性能评估，突显了RIS反射优化的重要作用。

C3)全双工阵列辅助的***RIS***定位： 考虑 C1 中更一般的场景：墙上安装了一个锚定RIS，用户设备配备全双工MIMO收发机，且多个物体表面覆有可重构智能表面（例如安装在车辆前后两侧）。除了接收锚定RIS反射的信号（C1 场景中也有）之外，用户设备还会接收来自

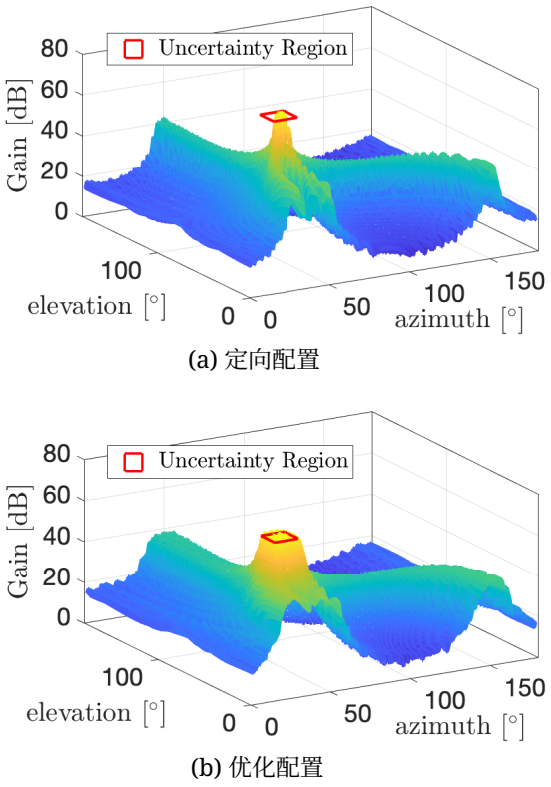

图 5. 使用可重构智能表面时的反射波束成形增益（单位：dB）：(a) 使用定向相位配置；(b) 通过 [12]（50×50 RIS阵列、20 次传输、 $20°$ 以及方位角和仰角上的 $16°$ 角度不确定性）得到的优化相位配置。红色方块表示需要覆盖的用户设备角度不确定性区域。

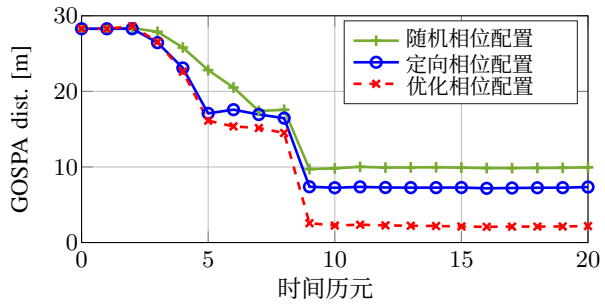

图 6. 使用配备不同相位配置（随机、定向及通过 [12] 优化）的 20×20 可重构智能表面，并采用 20 次传输和 4×4 用户设备阵列，在具有 4 个可见地标的环境中，对可重构智能表面赋能的同步定位与建图性能进行评估，评估指标为广义最优子模式分配距离（GOSPA）。

安装在物体上的可重构智能表面。可以估计每条信号路径的时延、到达角以及信道增益的幅度，并将其用于定位自身及覆盖可重构智能表面的物体。当存在多个用户设备并协作进行估计时，还可以获得这些物体的朝向。在没有任何锚点的场景中，这种 RIS 定位也有助于估计主动用户设备和被动用户设备的相对位置。

IV. 开放研究挑战

借助低复杂度信标、协作定位和全双工无线电，可以显著扩大智慧城市应用的定位与感知覆盖。不过，仍有若干实际问题亟待深入研究。本节将讨论所提出的 RIS赋能的定位与感知系统面临的关键挑战，并列出未来研究的可能方向。

A. 锚点部署优化

锚点（例如信标和可重构智能表面）的部署位置对于满足服务区域内定位与感知的关键绩效指标（KPI）要求至关重要（例如，误差界低于特定阈值，如图3所示）。在没有任何主动锚点的场景中（例如B1-B3和C1-C3），定位与感知设计需要考虑所有相关设备的状态分布和硬件能力。部署工作需要优化锚点的位置和朝向，同时考虑周围环境中的遮挡。RIS辅助SLAM有助于创建此类环境地图，协作侧链路用户设备可为此提供支持。随后可采用启发式优化方法来确定最优锚点位置。

B. 资源分配与协调

定位与感知任务的资源分配（包括功率和时频分配、波束成形设计及调度）必须经过精心设计，以确保与传统通信服务之间实现有利的权衡。根据发送定位与感知服务请求的应用所提出的KPI要求，应制定并满足兼顾定位感知与通信一体化的新目标。资源分配的一个重要部分是RIS相位轮廓优化和复用 [11]。宽RIS波束会缩小覆盖范围，而窄铅笔波束则容易受到失准影响。因此，需要高度自适应的RIS轮廓设计，并尽可能利用用户设备与物体状态信息。当涉及多个RIS和用户设备时，资源分配会变得更加复杂，增加的协调开销也需要纳入考量。RIS复用可通过时分复用、时间编码以及利用较高路径损耗实现空间复用来处理。上述资源分配问题可结合传统的基于优化的方法（例如凸优化）和基于学习的方法（例如强化学习）加以解决。

C. 估计算法

从算法角度来看，信道参数估计、动态环境中的跟踪以及锚点校准都面临挑战。与大多数假设可重构智能表面与主动信号源（例如接入点）之间的信道已知的现有研究不同，在协作定位（场景 B1 和 B2）和可重构智能表面定位（例如场景 A3、B3 和 C3）任务中，可重构智能表面处的到达角/出发角相互耦合，因此需要开发新算法来处理估计得到的空间频率。更精细的信道参数估计还需要准确的信道模型，以及对可重构智能表面影响信道的因素进行建模，例如近场效应、波束斜视效应、RIS单元故障和硬件损伤。由于移动性，信号遮挡、不可分辨信号路径和严重路径损耗等恶劣条件会影响定位与感知性能。多个可重构智能表面可协同应对这些遮挡，从而扩展覆盖范围。感知也面临一些固有的复杂问题，例如物体数量和类型未知、信号路径的检测概率未知、存在扩展物体以及多次反弹观测。应开发专用滤波器来处理这些复杂问题，并将其集成到定位与感知框架中。最后，锚点校准与可重构智能表面定位（如场景 A3、B3 和 C3 所述）类似，需要校准代理纳入其他来源的定位估计（即传感器融合）。

D. 了解锚点硬件替代方案

还可以通过改进信标、可重构智能表面和用户设备所部署的硬件，拓展定位与感知覆盖。在信标和用户设备侧，可以采用多面板阵列（即三维阵列）进一步扩展覆盖范围。在可重构智能表面侧，除了近乎无源的反射式可重构智能表面 [15]，还涌现出新型可重构智能表面。如前所述，有源可重构智能表面可用于增强信号能量（即改变入射信号的幅度和相位），从而改善覆盖。接收型可重构智能表面（也称为混合型可重构智能表面或同时反射与感知型可重构智能表面）能够在可重构智能表面侧进行参数估计，为定位与感知估计方法的设计提供额外的自由度。全向可重构智能表面旨在实现同时反射与折射（即 360° 覆盖），从而支持室内外三维定位。集成非互易移相器的非互易可重构智能表面支持全双工通信；时延可调可重构智能表面则能够调整不同可重构智能表面单元反射信号的时延，有助于减轻波束斜视效应。所有这些替代方案都会影响定位与感知服务，值得进一步研究。

E. 隐私、安全与社会接受度问题

协作定位与感知需要设备之间大量交换本地测量值，这可能引发隐私问题。例如，场景B2中的接收端可以通过单向导频信号传输来估计发射端的位置，这可能导致隐私信息泄露。此外，各类网络攻击可能降低定位与感知服务可用性，甚至提供无法检测到的错误位置估计结果，这对于安全关键型应用而言是不可接受的。目前，已有若干安全管理系统实现标准化（例如 IEEE 1609.2），且针对侧行链路通信的安全威胁也已得到识别。然而，关于定位与感知任务相关的安全问题，目前仍处于初步探讨阶段，潜在威胁亟待探索并消除。可重构智能表面广泛应用的另一项相关因素是社会接受度。可重构智能表面应

以融入环境的方式部署（理想情况下应做到透明）。为此，应展示并推广可重构智能表面在提升安全性、减少电磁辐射方面的益处。总之，除了通过可重构智能表面和侧行链路通信提供无缝的定位与感知服务外，隐私、安全和社会接受度问题也极为重要，值得进一步研究并推动法规制定。

V. 结论与展望

智慧城市范式是数字服务广泛应用于满足社会需求的典范。人们期待这一范式能造福民众和城市级企业，提供高效、安全、舒适的生活空间，以及日常智慧生活应用。为实现这一总体目标，不同设备之间的无缝无线通信以及定位与感知至关重要，从而支持信息交换、设备定位和环境测绘。本文探讨了实现低成本、高能效无缝定位与感知的关键，即将反射式可重构智能表面与侧行链路通信相结合。我们介绍了接入点协调和无接入点系统架构，并详细阐述了三种由可重构智能表面赋能的定位与感知场景，其中每种场景都包含多个用例，且大多依赖侧行链路通信。显而易见，与使用具备完整通信能力的接入点相比，广泛部署低复杂度信标和可重构智能表面，便可赋能绿色定位与感知智慧城市应用。此外，当多个具备侧行链路通信能力的用户设备接入同一网络时，协作定位可以减少对多个锚点的需求。进一步而言，当设备配备全双工收发器时，仅借助单个 RIS 锚点，便可实现自身定位并测绘周围环境。最后，本文列举了与所提出的可重构智能表面赋能无缝定位与感知概念相关的一系列开放研究挑战，包括锚点部署优化、资源分配方案优化、算法与隐私问题，以及多功能可重构智能表面的作用。

参考文献

[1] S. Kisseleff 等，“面向智慧城市的可重构智能表面：研究挑战与机遇”，*IEEE Open J. Commun. Soc.*，第1卷，第1781–1797页，2020年11月。[2] “3GPP TR 38.855 V16.0.0：新空口定位支持研究（第16版）（访问日期：2023年2月10日）”，2019年3月。 [在线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3501

[3] C. Chen 等，“基于IEEE 802.11bf的Wi-Fi感知”，*IEEECommun. Mag.*，第61卷，第1期，第121–127页，2023年1月。[4] H. Wymeersch 等，“利用可重构智能表面进行无线电定位与测绘：挑战、机遇与研究方向”，*IEEE Veh. Technol.Mag.*，第15卷，第4期，第52–61页，2020年10月。[5] M. H. C. Garcia 等，“5G新空口车联网通信教程”，*IEEE Commun. SurveysTuts.*，第23卷，第3期，第1972–2026页，2021年2月。[6] “3GPP TR 38.845 V17.0.0：覆盖范围内、部分覆盖和覆盖范围外新空口定位用例的场景与需求研究（第17版）（访问日期：2023年2月10日）”，2021年9月。 [在线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3806

[7] G. C. Alexandropoulos 等，“全双工大规模多输入多输出架构：最新进展、应用与未来方向”，*IEEE Veh. Technol. Mag.*，第17卷，第4期，第83–91页，2022年10月。[8] “RISE-6G交付件5.1：基于RIS的定位与感知控制（访问日期：2023年2月10日）”，2022年4月。 [在线]。可访问：https://rise-6g.eu/Documents/LIVRABLES/RISE-6G WP5 D5.1 Final.pdf [9] E. Strinati Calvanese 等，“面向6G智能连接的可重构、智能且可持续的无线环境”，*IEEE Commun. Mag.*，第59卷，第10期，第99–105页，2021年10月。[10] “3GPP TS 38.455 V17.2.0：新空口定位协议A（NRPPa）（第17版）（访问日期：2023年2月10日）”，2022年9月。 [在线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3256

[11] K. Keykhosravi 等，“用户移动性和空间宽带效应下的RIS赋能单输入单输出定位”，*IEEE J. Sel. Topics Signal Process*，第16卷，第5期，第1125–1140页，2022年5月。[12] H. Kim 等，“RIS赋能且无接入点的同步无线定位与制图”，*arXiv preprint arXiv:2212.07141*，2022年。[13] X. Gu 等，“面向低时延和高可靠性通信的智能表面辅助D2D-V2X系统”，*IEEE Trans. Veh. Technol.*，第71卷，第11期，第11 624–11 636页，2022年7月。[14] S.-W. Ko 等，“基于V2X的车辆定位：机遇、挑战与未来方向”，*IEEE Wireless Commun.*，第28卷，第2期，第144–151页，2021年3月。[15] M. Jian 等，“用于无线通信的可重构智能表面：硬件设计、信道模型与估计技术综述”，*Intell. Converged Netw.*，第3卷，第1期，第1–32页，2022年3月。

Hui Chen (hui.chen@chalmers.se) 是瑞典查尔姆斯理工大学的博士后研究员。

Hyowon Kim (hyowon@chalmers.se) 是瑞典查尔姆斯理工大学的博士后研究员。

Mustafa Ammous (mustafa.ammous@mail.utoronto.ca) 是加拿大多伦多大学的博士生。

Gonzalo Seco-Granados (gonzalo.seco@uab.cat) 是西班牙巴塞罗那自治大学的教授。

George C. Alexandropoulos (alexandg@di.uoa.gr) 是希腊雅典国立卡波季斯特里亚大学信息与电信系的助理教授。

Shahrokh Valaee （valaee@ece.utoronto.ca）是加拿大多伦多大学的教授。

Henk Wymeersch （henkw@chalmers.se）是瑞典查尔姆斯理工大学的教授。