arXiv:2512.18982v1 [eess.SP] 22 Dec 2025

重新构想无线连接：面向6G智慧城市的FAS-RIS协同

Tuo Wu、Kai-Kit Wong，*IEEE*会士，Jie Tang、Junteng Yao、Baiyang Liu、Kin-Fai Tong，*IEEE*会士，Chan-Byoung Chae，*IEEE*会士，Matthew C. Valenti，会士，*IEEE*，以及Kwai-Man Luk，*IEEE*终身会士

摘要——**流体天线系统（FAS）提出了将天线视为可重构物理层资源的理念，以拓展系统设计与网络优化，并启发下一代可重构天线的发展。FAS可通过天线重构释放新的自由度（DoF），实现新颖的空间分集。另一方面，可重构智能表面（RIS）能够重塑无线传播环境，但独立工作时往往受双重路径损耗和信号处理能力有限的制约。本文展望了一种面向未来智慧城市网络、具有变革意义的FAS-RIS集成架构，将FAS的适应性与RIS的环境控制能力融为一体。该框架包含五项关键应用：用于大规模波束成形的FAS赋能基站（BS）、具备精细空间分集能力的FAS用户设备，以及三种新颖的RIS范式——采用可重构单元的流体可重构智能表面（FRIS）、作为有源中继的FAS嵌入式RIS，以及利用建筑立面上的表面波重建视距（LoS）通信的超大规模流体天线系统（E-FAS）。双时间尺度控制机制可协调网络级波束成形与快速的设备级自适应。本文还探讨了从无线信息与能量同传（SWIPT）到通感一体化（ISAC）的各类应用，以及协同设计、信道建模和优化方面的挑战。最后，本文给出仿真结果，展示了FAS-RIS系统的鲁棒性和有效性。**

索引词—**流体天线系统、可重构智能表面、FAS-RIS 集成、智慧城市网络、双时间尺度控制、超大规模流体天线系统、6G 无线通信。**

I. 引言

SIXTH-generation（6G）无线网络设想实现超越第五代（5G）的跨越式发展，需要超可靠低时延通信（HRLLC）、用于同时进行环境感知和数据传输的通感一体化（ISAC）、泛在通信、边缘人工智能（AI）以及大规模智慧城市、工业及不可预测环境中的物联网（IoT）连接 [1]。与沉浸式通信共同构成 6G 的六大关键用例。

要迈向 6G 前沿，需要不断创新。过去几年，可重构智能表面（RIS） [2] 已成为无线通信领域最热门的话题之一。RIS 由许多相位可调元件组成，能够重新定向入射无线电波，实现智能反射，从而提高可靠性、提升速率并扩大覆盖范围。然而，实际应用中的 RIS 存在明显缺陷。例如，其实现所用的元件数量受到严格限制，而且相位控制通常具有有限的分辨率（例如 1-2 位）。因此，RIS 所宣称的增益往往难以实现。

在超越对无线环境进行被动工程设计的思路下，近期利用可重构天线实现无线通信的研究兴趣似乎正逢其时 [3]。事实上，在 2020 [4],Wong 等人提出了流体天线系统（FAS）的概念，将天线视为一种可重构的物理层资源（工程对象），从而拓展系统设计和网络优化，并推动了下一代可重构天线的发展。流体天线系统（FAS）可以采用多种形式，例如液态金属、机械致动器、电子可切换像素和可编程超表面 [5], ，因此与硬件无关。关于流体天线系统（FAS）潜力的近期文章可见于 [6]。

流体天线系统（FAS）强调天线在形状和位置方面的灵活性，使物理层拥有更大的空间自由度（自由度），从而催生新的调制、多址接入和信号处理方案，带来巨大的性能提升 [7]。受此启发，流体天线系统（FAS）可能成为使可重构智能表面（RIS）真正具有吸引力的关键，从而最终减轻基站的负担，并降低在频段提升时对网络致密化的需求。

本文探讨了 FAS-RIS架构，该架构倡导 FAS 与可重构智能表面的协同集成，超越简单共存 [8] ，构建多层次的智能无线网络。我们提出了三种 FAS-RIS 范式：

- 流体可重构智能表面（FRIS） [9]——此类型将“流体”可重构性融入可重构智能表面的每个单元。
- FAS嵌入式RIS——此类型将“流体”可重构性嵌入智能表面的每个单元；但可重构智能表面不再充当无源反射器，而是作为主动的智能中继处理器，每个单元都能够重新配置其接收位置，并选择另一个位置进行信号转发。
- 超大规模流体天线系统（E-FAS），又称表面波流体天线系统（SW- FAS） [10], [11]——这一范式利用表面波

（通讯作者：*K.-K.Wong* 和 *K.-F. Tong*。）

T. Wu 任职于香港中国香港城市大学太赫兹与毫米波国家重点实验室（电子邮箱：{tuowu2，eekmluk}@cityu。edu。hk）。K.-K. Wong 任职于英国伦敦 WC1E 6BT 的伦敦大学学院电子与电气工程系，同时任职于韩国首尔 03722 延世大学延世前沿实验室和综合技术学院（电子邮箱：kai-kit。wong@ucl。ac。uk）。J. Tang 任职于中国广州 510640 华南理工大学电子与信息工程学院（电子邮箱：eejtang@scut。edu。cn）。J. Yao 任职于中国宁波 315211 宁波大学电气工程与计算机科学学院（电子邮箱：yaojunteng@nbu。edu。cn）。B. Liu 和 K. F. Tong 任职于中国香港特别行政区香港都会大学科学与技术学院。（电子邮箱： {byliu，ktong}@hkmu。edu。hk）。C.-B. Chae 任职于韩国首尔 03722 延世大学综合技术学院。（电子邮箱：cbchae@yonsei。ac。kr）。M. C. Valenti 任职于美国摩根敦西弗吉尼亚大学 Lane计算机科学与电气工程系（电子邮箱：valenti@ieee。org）。

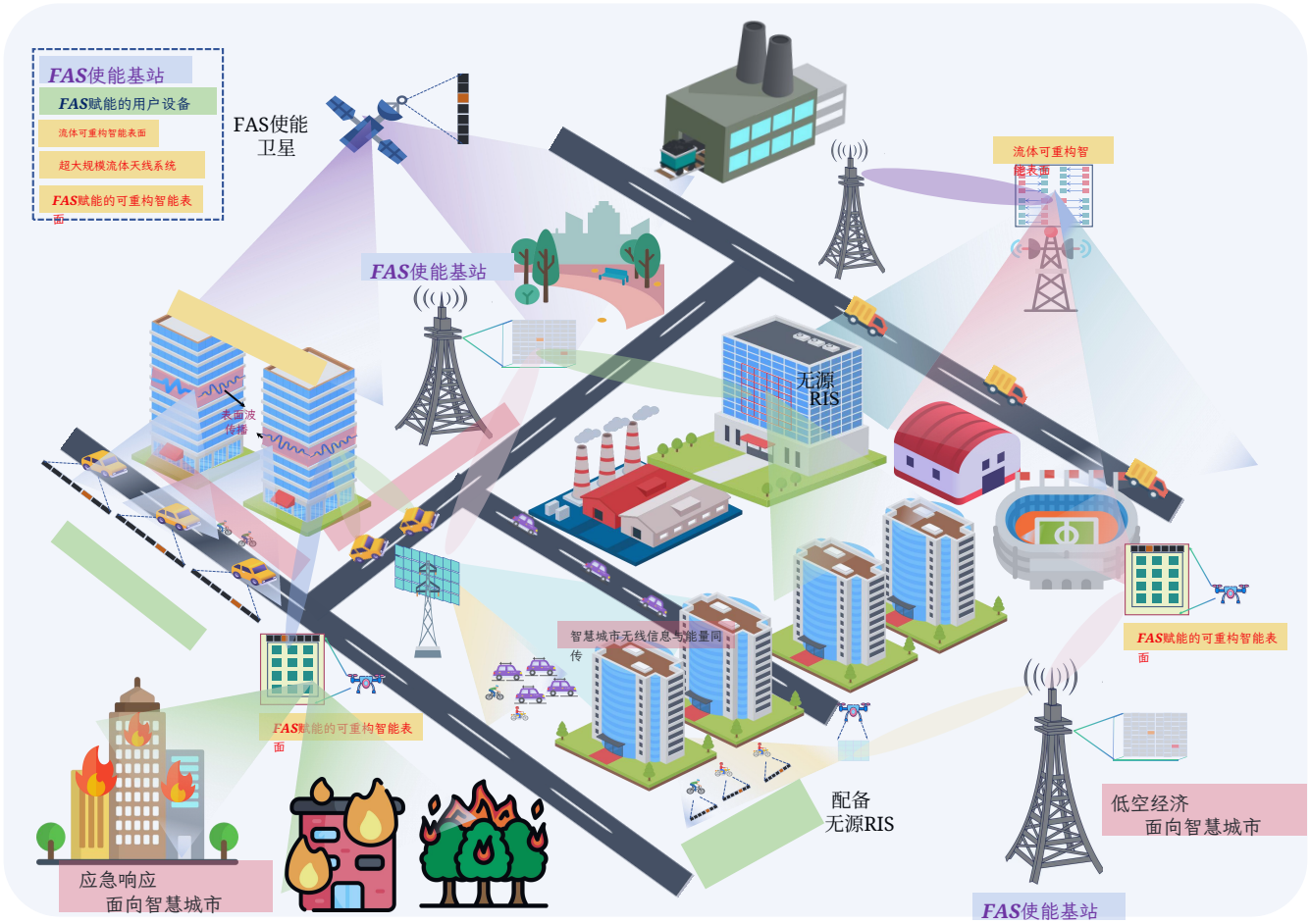


图1. 面向6G智慧城市无线网络的综合FAS-RIS系统架构，展示了多种部署场景，包括FAS使能卫星、基站、智能表面、无人机（UAV）和移动用户设备（UE）。

将整面建筑立面／墙体转变为低损耗的视距通信与感知孔径。

该架构不同于传统的简单共存，因为它需要一种双时间尺度控制方案，将网络级宏波束成形和RIS配置与设备级流体天线系统自适应进行协调。这种协同作用能够创建极具韧性和高效的链路，为复杂智慧城市场景中的高级应用铺平道路，包括通过可靠的自动驾驶车辆连接提升道路安全、通过节能型建筑一体化通信减少碳排放等。

本文旨在系统概述FAS-RIS框架。我们首先简要回顾其可能的硬件架构及其权衡。随后，我们将讨论智慧城市背景下FAS与RIS的协同作用，并在第II节解析三种FAS-RIS范式。第III节将无线信息与能量同传（SWIPT）[13] 和通感一体化（ISAC）[14] 确定为FAS-RIS的一些关键智慧城市应用，随后深入探讨开放挑战。第IV节给出了仿真结果，展示了FAS-RIS系统在多种环境中的鲁棒性和效率。在第V节，我们总结全文，并呼吁对这一主题开展进一步研究。

II. FAS-RIS架构

图1 描绘了一个全面的6G无线网络生态系统，该系统在多种部署场景中集成了多种FAS-RIS配置，包括地面基站、卫星通信、无人机和移动用户设备。此外，表I将FAS与基站/用户设备处的固定位置天线（FPA）进行了对比，并比较了FAS赋能的可重构智能表面与传统无源RIS，同时将这些设计选择与后文将讨论的应用和挑战联系起来。

如图所示1，该架构支撑着多种关键智慧城市应用。自动驾驶车辆借助配备流体天线系统的路侧单元，即使身处密集的城市峡谷，也能实现可靠的车联网（V2X）连接；配备FRIS的无人机可用于应急响应；覆盖E-FAS的建筑立面可提供节能型通信基础设施；此外，FRIS还使物联网传感器网络能够无线采集能量，从而免去电池更换的需要；流体天线系统-可重构智能表面的通感一体化能力则支持智能交通管理和公共安全监测。

A. 实现技术

FAS与RIS能否成功集成，取决于是否具备多种FAS实现技术，见 [5],

表I 架构比较（基站/用户设备/可重构智能表面）及其应用与挑战。

维度		FAS 基站与 FPA 基站	FAS 用户设备与 FPA 用户设备	FAS赋能的可重构智能表面与无源RIS
能力	波束成形/自由度	更高、可重构	更高、抗移动性	环境塑造/中继/表面波
	端口/位置分集	✓	✓	✓（结构性）
	复杂度/功耗	高于固定位置天线	略高	各不相同（无源/有源/电子式可重构天线系统）
应用	无线信息与能量同传	FAS 基站定向发送信息 + 能量波束通过端口／位置／形状重构；目标有源或无源可重构智能表面	用户设备 FAS 端口／位置／形状分集找到能量 + 信息最佳点；提升能量采集（能量采集）和信噪比（信噪比）	有源全反射智能表面放大/分割；E-FAS 按需发射器传送至目标
	ISAC	基站构建感知 + 通信、双用途波束；安排任务（双时间尺度）	用户设备 FAS 通过精细感知快速端口切换；在运动/遮挡情况下具有鲁棒性	FRIS 塑造回波；E-FAS 表面波实现拐角感知与成像
	卫星	在轨 M-FAS 形式灵活点波束；快速重构；计数器大气/姿态；热点跟踪	用户设备 FAS 端口／位置／形状分集可对准卫星波束；缓解遮挡/运动；稳健链路	地面 FRIS 协同塑造上行链路（UL）/下行链路（下行链路）：上行链路预补偿，下行链路相干合并和障碍物绕行；扩展覆盖范围
挑战	架构和协同设计控制	双时间尺度网络级波束调度与覆盖范围编排	快速设备级适应与端口移动性下的选择	策略配置/更新反射、中继和表面波发射器；E-FAS 设备/面板工程工程
	统一信道建模	超越场响应和基于相关性的模型；捕获混合导引辐射传播	时变端口相关性与局部散射统计	级联信道与表面到空间的转换的级联信道
	分层信道状态信息（CSI）/训练	双时间尺度估计/反馈协议	低开销局部CSI获取与跟踪	全局CSI和结构状态推断适用于FRIS/E-FAS
	联合波束成形与重新配置	基站波束、FRIS状态和基站波束、FRIS状态，以及用户设备端口	端口选择与服务质量（QoS）/时延约束	选择反射/中继/发射激活点
	感知与定位	任务调度与感知波束设计	协作式用户设备感知与数据融合	E-FAS 表面波支持非视距（NLoS）或绕过拐角成像

[6], [7, 第六节], 每种技术都是整体架构中不同组件的构建模块，汇总见表 II。液态金属基FAS通过微流控通道重新定位导电流体，能够实现稳健的连续状态可重构性，非常适用于移动用户设备。机械可移动FAS利用致动器对天线单元进行物理重新定位，可实现大范围可重构性，但速度非常慢，因此尤其适用于静态部署，例如安装在建筑物上的可重构智能表面。可重构像素式FAS使用电子开关（如PIN二极管），以纳秒级的时间尺度在离散天线状态之间切换，因此非常适合

功率和空间受限的移动用户设备和基站。超流体天线（M-FAS）利用电子控制的超材料原子阵列，模拟流体般的电磁行为，实现纳秒级重构和非常高的空间自由度，适用于各种系统。随后，E-FAS 利用具备纳秒级切换能力和非常高空间自由度的表面波发射器，在 LED屏幕等大规模部署中尤其具有应用前景。

显然，每种实现方式在重构速度、硬件复杂度、功耗、带宽和可实现性能方面各有不同的权衡，使设计人员能够根据需求定制FAS-RIS部署

表 II 实现技术比较。

特征	液体金属	机械式像素级的		M-FAS	E-FAS
重构速度	慢（秒）	Very 慢（秒）	快速（纳秒）	快速（纳秒）	快速（纳秒）
控制方法	微型泵	电机	电子开关	超表面-atom 控制	表面-wave 启动器
精度	中	Low	High	High	High
功耗	中	High	Low	Low	中
硬件复杂度	High	High	中	中	中
可重构状态	连续	连续	离散 (few 状态)	离散（更多状态）	连续
空间自由度	中	中	有限	非常高	非常高
带宽	22-39 GHz	Wide	6-7 GHz	26-27 GHz	34-86 GHz
终端	UE	BS, RIS	通用通用室内外		室外

可重构智能表面，例如，LED 屏幕

，以适配特定系统组件和应用场景。

*B. FAS*使能基站

如图 1所示，在基站部署FAS可通过动态重构显著提升FAS-RIS系统的波束成形增益。对于基站部署而言，机械可移动FAS和M-FAS尤其具有吸引力，因为它们能够利用基站相对充裕的空间和功率预算，实现大规模物理重构并提升性能，尽管可移动式FAS只能响应长期信道统计特性。基于像素的FAS在此场景下也能发挥作用，但其优化会更加复杂。与传统固定位置天线相比，表I 中的FAS基站配置可提供实时端口/位置分集和可重构性，从而灵活地集中和引导信号功率。这一能力有助于补偿RIS辅助环境级联信道中的双路径损耗，改善信号覆盖范围和强度，并在复杂传播环境中维持较高的信噪比，从而提升通信链路的质量与稳定性。

基站处的流体天线系统（FAS）与其协调的可重构智能表面（RIS）单元共同采用双层控制架构：FAS执行自适应发射波束成形，而沿主导路径部署的无源或有源RIS（例如建筑立面、道路沿线、交叉路口和无人机平台）则塑造反射场。通常，无源RIS可重构非视距链路并抑制干扰，而有源RIS则支持信息与能量联合反射，以实现无线信息与能量同传（SWIPT）。此外，搭载于无人机的RIS可扩大角度覆盖范围。通过在统一控制环路内协同调度FAS波束更新与RIS相位配置——由FAS（机械式、像素式或M-FAS）负责粗粒度的大范围转向，由RIS负责精细的末米级重定向——该系统能够实现更高的端到端信噪比，更均匀的覆盖范围以及具备移动性鲁棒性的链路，同时保持适度的训练开销，如表I所示。

*C. FAS*赋能的用户设备

在 FAS-RIS架构中，FAS赋能的用户设备是至关重要的最后一环，其主要作用是在接收端提取细粒度空间分集。当基站和可重构智能表面塑造宏观尺度的传播环境时，用户设备的流体天线则通过在许多间距紧密的物理位置之间快速切换，找到并利用瞬时信号质量最佳的位置，从而发挥补充作用。在紧凑外形中利用空间分集的能力，是FAS-RIS协同的关键优势。这能带来更高的平均信噪比、显著更低的中断概率，并天然增强对多径衰落和物理遮挡的抵抗力——即使处于相同的 RIS辅助环境中，固定天线用户设备也无法达到这些性能提升。为满足移动设备对功耗和速度的严格要求，优先采用紧凑型像素式 FAS 和 M-FAS 实现，因为它们能够进行微秒级重构；而图1 中的车辆等较大型平台则可以采用液态金属或机械可移动 FAS，以提升通感一体化中的通信可靠性和感知能力。在用户设备作为发射端的上行链路中，这些优势同样存在。

为充分发挥这种空间分集的优势，系统采用了两级控制机制。在快速时间尺度上，用户设备执行连续端口切换（微秒级的“快速环路”），以便在局部信道波动时保持尽可能优质的链路。当发生较大尺度的信道变化时，例如用户转过拐角，设备会通知网络，触发对可重构智能表面和基站配置的较慢更新，从而重新优化宏观环境。这种无缝的“宏观塑造加微观采样”协同作用体现在图1所示的智慧城市场景中：行人的用户设备通过锁定无源RIS形成的局部信号最佳点来缓解盲区；借助有源RIS同时实现高速率数据传输与无线信息与能量同传；而在车辆中，则能在快速运动时维持稳健链路。这种智能的多级自适应能力使FAS赋能的用户设备成为FAS-RIS智慧城市愿景的基石，其主要优势总结于表I中。

*D. FAS*赋能的可重构智能表面

将流体天线系统直接集成到可重构智能表面层中，可使其从纯粹的反射器转变为动态智能表面，并可通过三种不同范式实现。

1) FRIS [9]： RIS 的反射单元不仅可以进行相位控制，还可以实现可重构。如果 RIS 的智能反射设计为仅响应长期信道统计特性，则可以通过机械致动器或液态金属技术实现这一点。其主要优势在于能够直接控制反射波束的覆盖范围。通过优化单元间距和排列方式，FRIS 可以拓宽反射波束，以便在更广阔的区域内为多个用户设备提供服务；也可以将波束集中成狭窄、高强度的波束，向特定目标输送最大功率。这种适应性在动态场景中尤其有吸引力，因为用户位置和密度会不断变化，系统必须在不同模式间切换

，在广域广播和精准能量传输之间进行切换。此外，RIS 单元的位置可重构性有助于弥补相位控制分辨率的损失，从而降低硬件成本。另一方面，当能够获取瞬时CSI时，则需要采用基于像素的技术或 M-FAS 技术来重构 FRIS 的单元。

*2）FAS*嵌入式可重构智能表面：在第二种范式中，通过将流体天线系统直接集成到无源RIS表面上，使其得到升级。这一改造将RIS从纯无源反射器转变为智能、低功耗的有源中继或收发器。其主要优势在于，嵌入式流体天线系统为有源操作提供了空间分集：RIS可在其表面动态选择一个最佳位置来接收信号（例如来自基站的信号），并选择另一个位置来发送新的、可能经过放大的信号（例如发送至用户设备），从而减轻中继链路上行链路和下行链路两段的局部衰落。这种范式尤其适用于移动平台，例如图 1 中高度灵活的无人机搭载的RIS，它可以充当灵活机动的空中中继站，为地面用户建立可靠的通信链路。这样一来，它既缓解了纯无源RIS的双重路径损耗限制，又为信号中继增添了强大的空间智能层。

3）E-FAS [10], [11]：最具变革性的范式或许是E-FAS（又称SW-FAS），它从根本上重新构想了信号的传播方式。E-FAS在墙壁等表面铺设一种可重构的双用途平台，使其同时充当传播介质和辐射源。E-FAS不依赖自由空间反射，而是作为波导，沿墙壁引导信号以低损耗表面波传播，从而有效打造一条“通信超级高速公路 [12]”。随后，应用流体天线系统原理，实现可按需工作的辐射源，从表面上的任意点向自由空间辐射高增益波束。这带来两大优势：通过重新建立视距，大幅降低传播损耗；并显著减轻多次自由空间反射所引发的干扰，构建稳健、高容量的通信网络。如此一来，整个建筑结构都成为智能辐射实体，展现了智能无线电环境近乎终极的愿景，RIS对比见表 I。

III. 应用与开放挑战

接下来，我们概述下一代通信系统中 FAS-RIS 的关键应用机遇与开放挑战。在表I中，我们将第 II 节中的架构比较与代表性应用和研究挑战进行汇总，提供一览式概述，将设计选择与应用场景及尚待解决的问题联系起来。

A. 潜在应用

1) 无线信息与能量同传：如图 [13], 中的有源RIS场景所示，FAS-RIS架构非常适合增强无线信息与能量同传1。在这一设置中，FAS使能基站通过动态调整其天线端口、位置或形状，向战略性部署的有源RIS发射高度聚焦的高功率能量波束，从而启动整个过程。与无源RIS不同，有源RIS能够放大并分配入射信号，形成彼此独立且经过优化的波束，用于信息和能量传输至不同用户。在接收端，FAS使能用户设备利用自身的空间分集，通过切换端口锁定入射能量或信息波前的最强峰值。这种由三个阶段协同构成的协同增效——FAS基站波束成形、有源RIS放大与分配，以及FAS用户设备接收——有效缓解了传统无线信息与能量同传系统所面临的严重路径损耗和空间限制，从而在智慧城市环境中实现可靠、高效的无线充电，如表I所示。

2) 通感一体化：FAS-RIS架构能够通过构建高度可控的感知环境，自然地增强通感一体化[14]。如图 1所示，FAS使能基站可以生成定制化感知波束；不同类型的RIS（无源、有源或流体RIS）能够反射并塑造来自目标的回波；FAS使能用户设备则可以从其特定位置执行精细感知。与传统通感一体化架构相比，这种多点协同感知框架能够提升目标检测和参数估计性能。

在各种方案中，E-FAS范式尤其具有变革性。它通过引导信号沿建筑结构以表面波形式传播，将建筑立面转变为兼具通信和感知功能的巨大有源孔径。相同的表面波场既承载通信数据，又探测周围环境。例如，表面波可以与街道更远处的车辆保持稳健连接，同时其与另一个物体的相互作用会产生反向散射，并沿表面被捕获，从而实现高分辨率感知。这一独特机制使网络能够“绕过拐角”进行通信和感知，大幅扩展其超越基站视距链路的感知范围，并构建出非常适合智慧城市应用的分布式感知网络。

*3）*其他应用：除了无线信息与能量同传和通感一体化之外，FAS-RIS框架还可有力支持一系列新兴应用，包括空间复用、多址接入的新方式 [7, 第五节], 近场通信中的波束转向，以及面向物理层安全的动态信道整形。此外，如图1所示，同一框架还为地面网络与非地面网络的融合提供了一种稳健方案，其中包括FAS使能卫星。在卫星上，流体天线系统可动态重构其辐射方向图，以减轻大气畸变并形成灵活点波束，无需依赖复杂的机械式组件即可提升覆盖范围和链路可靠性。在地面，周边的FAS-RIS基础设施可对上行信号进行预补偿，或相干合成下行信号，从而构建具有韧性的多层网络。这种协同对于将6G服务扩展至偏远及服务不足的地区至关重要，可为全球物联网、应急通信和灾害应对提供无处不在的连接。

B. 挑战与机遇

尽管 FAS-RIS 愿景具有显著优势，但要充分发挥其潜力，仍需应对若干独特的研究挑战，这些挑战源于其多层次且技术多样化的架构。

1) 架构与控制协同设计：首要的架构挑战在于联合设计一个三层

控制系统，该系统必须协调基站的宏观尺度波束成形、可重构智能表面的环境塑造（通过反射、中继或表面波传播），以及用户设备的微观尺度分集选择。一个关键的未决问题是，如何构建高效的跨层控制平面，使其能够在两个不同的时间尺度上运行：较慢的时间尺度用于根据大尺度移动性或信道统计特性进行网络级自适应，较快的时间尺度则用于响应局部信道波动，实现设备级响应，同时保持稳定并限制信令开销。此外，针对不同类型的流体天线系统-可重构智能表面的部署策略——例如将 E-FAS 嵌入建筑立面，或在无人机平台上使用移动式 FAS嵌入式RIS——必须根据具体的城市应用场景量身定制。

对于 E-FAS，这一协同设计挑战还包括：(i) 确定大型结构上的最佳表面波发射位置，以向用户设备发送无线电信号；(ii) 设计具有稳定阻抗和辐射特性的高效率宽带发射器；(iii) 开发低阈值电压驱动电子设备和偏置网络，以实现高能效激励；(iv) 针对传播损耗和频率／信道划分优化导引路径；(v) 为毫米波或太赫兹面板选择低损耗、高介电常数（透明）介质基板；以及 (vi) 在 SW-FAS 面板之间设计低损耗、相位相干的互连，以支持可扩展部署。

2）统一信道建模：传统的FAS信道建模主要依赖场响应模型或基于相关性的模型 [7], ，但FAS-RIS框架所涉及的多样物理机制和多层结构，使这些方法日益难以胜任。多个FAS单元与异构RIS配置的集成会形成复杂的级联信道，简单的几何描述或基于相关性的描述无法忠实刻画这些信道。统一建模框架必须考虑FAS和RIS元件的动态重构、流体天线位置切换所引发的时变空间相关性，以及不同实现方式（液态金属、机械式、基于像素的、M-FAS等）各自不同的电磁特性。此外，该框架还必须反映三级控制结构，其中基站侧FAS、RIS平台和用户设备侧FAS以不同时间尺度运行，且耦合程度各异。一个关键目标是开发全面的模型，描述所有FAS-RIS范式下的端到端信道，突破当前模型的局限，同时保持足够的可处理性，以支持分析和算法设计。

3) 分层信道估计：要在FAS-RIS系统中准确且高效地获取CSI，需要采用分层双时间尺度估计策略 [15]。在实践中，这意味着需要处理两种不同类型的CSI：一种是快速更新的瞬时CSI，用于支持快速的设备级自适应；另一种是较慢更新的统计CSI，用于指导网络级配置。核心挑战在于设计导频和反馈机制，以尽可能降低信令开销，同时获取这两种CSI。对于E-FAS，问题则更加复杂，因为需要估计大型连续表面的状态，并区分表面波信道与辐射自由空间信道。

4) 联合波束成形与资源分配：在FAS-RIS系统中，要实现有效的波束成形，就必须解决一个横跨全部三个架构层的高维联合优化问题。核心挑战在于通过联合设计基站波束、RIS配置（例如无源RIS的反射矩阵、有源FAS嵌入式RIS的接收/发射端口，或E-FAS上的激励点）以及用户设备端口选择，动态分配资源。这需要能够（近乎）实时求解此类耦合问题的新算法。尤其对于E-FAS，波束成形归结为实时设计最优的表面波发射模式和激励点，使结构上最有效的位置产生所需的辐射。

*5) E-FAS*赋能的感知与定位： 虽然所有FAS-RIS范式都能提升定位性能，但E-FAS带来了一个真正全新的机遇：将整个结构转变为高分辨率感知平台。核心挑战与机遇在于利用表面波实现前所未有的感知能力。通过分析这些导引表面波与表面上或附近物体的相互作用，E-FAS有望实现沿建筑立面对车辆和行人的连续高精度跟踪。此外，将表面视为大型分布式天线阵列，还能对位于任何单个基站视距之外的目标进行“拐角感知”定位与成像，为智慧城市感知应用开辟新的前沿。

IV. 案例研究

A. 设置

为验证所提出的FAS-RIS架构并展示其性能优势，我们进行了全面仿真，对比六种系统配置：传统的基于FPA的系统（固定基站、固定用户设备和无源RIS）、FAS使能基站、FAS赋能的用户设备、双FAS（在基站和用户设备两端均部署FAS）、FRIS以及FAS嵌入式RIS。该系统由一个基站、一个包含 M 个反射单元的RIS和一个用户设备组成。基站与用户设备之间的直达链路中断，因此需要使用RIS重新建立通信链路，如图2所示。具体而言，基站、RIS和用户设备分别位于坐标(0, 0, 5) m、(15, 15, 5) m和(50, 0, 0) m处。系统工作频率为 $f_c = 28$ GHz，波长为 $\lambda \approx 1.07$ cm。基站与RIS之间以及RIS与用户设备之间的信道均采用莱斯衰落模型，路径损耗指数为2.2，莱斯因子为1。对于FAS使能配置，我们考虑 $N = 10$ 至100个端口，间距为 0.25λ。RIS单元数设为 $M = 5 \times 5$，发射功率范围为8至20 dBm，噪声功率为 -85 dBm。假设散射相对丰富，FAS端口之间的空间相关性遵循Jakes模型。我们进行了5000次相互独立的信道实现蒙特卡罗仿真，以评估系统性能 [8]。

对于FAS嵌入式RIS配置，我们将RIS建模为一种有源中继，在接收端和发射端均具备FAS位置可重构性，并设有 $N_{\mathrm{RX}} = N_{\mathrm{TX}} = \lfloor N/4 \rfloor$个端口。TheFRIS配置在 $\lfloor N/3 \rfloor$ 种配置中优化单元位置和间距（从 0.4λ 到 1.2λ），以

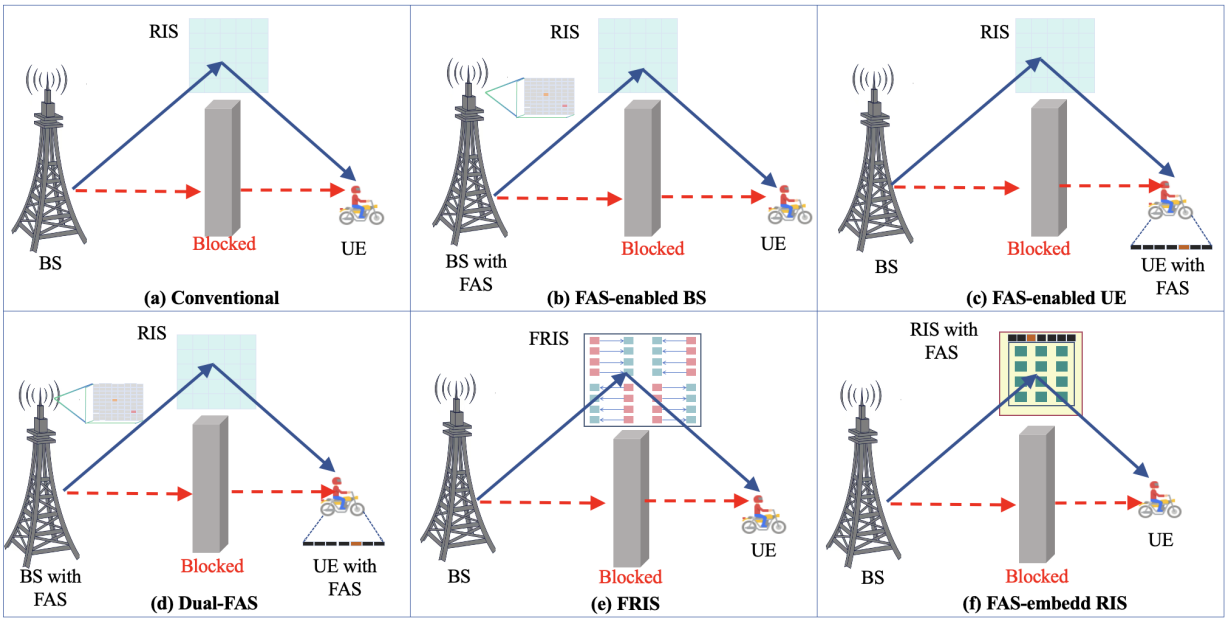


图2. 案例研究中所考虑的设置。

最大化信道增益。双可重构天线表面系统在缩小的搜索空间中联合优化基站和用户设备的端口选择，以平衡性能与复杂度。

B. 吞吐量与*FAS*端口数量的关系

在图3中，给出了吞吐量性能随FAS端口数量变化的结果，N，假设固定发射功率为 $P = 10$ dBm。我们观察到，双流体天线系统配置实现了最高吞吐量，在4.6 bps/Hz的 $N = 100$ 个端口下达到约该值，展现了同时在基站和用户设备启用流体天线系统的显著优势。这一卓越性能源于对联合空间分集的利用，系统能够选择最优端口组合，从而有效减轻衰落并最大化端到端信道增益，以获得最佳性能。此外，FAS使能基站配置在4.1 bps/Hz的 $N = 100$个端口下达到约该值，优于FAS赋能的用户设备（~ 3.7 bps/Hz）和FAS嵌入式RIS（~ 3.7 bps/Hz）。这一优势源于基站更丰富的资源，包括更高的发射功率、更大的物理孔径（在0.53 m、 $N = 100$个端口时约为该值），以及相比移动用户设备更稳定的信道条件。FRIS配置通过优化RIS单元位置和间距，实现了 ~ 3.4bps/Hz，凭借其可重构性，相较传统系统（~ 2.1 bps/Hz基线）取得了适度增益。值得注意的是，所有FAS使能配置的吞吐量均随 N增加，这证实了空间分集在提升系统性能方面的有效性。传统系统由于缺乏任何可重构性，无论 N为何，均保持恒定的基线性能。

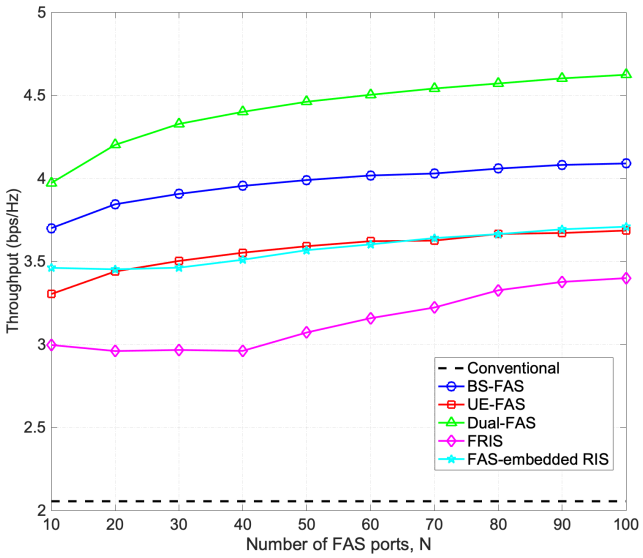


图 3. 吞吐量与 FAS端口数量 N 的关系，发射功率为 $P = 10$ dBm。

C. 吞吐量与发射功率

图 4展示了在固定8、12、16和 20 dBm 条件下，不同发射功率级别的吞吐量性能（FAS端口数量为 $N = 50$。正如预期，所有配置的吞吐量均随发射功率单调递增。在最高功率水平 20 dBm 下，双可重构天线表面配置达到约 7.1 bps/Hz，其次依次为 BS-FAS（$\sim$ 6.5 bps/Hz）、FAS嵌入式RIS（$\sim$ 6.1bps/Hz）、UE-FAS（~ 6.2 bps/Hz）和 FRIS（~ 5.5 bps/Hz）。相比之下，基于固定位置天线的传统系统仅达到约 4.4 bps/Hz，可作为基准。不同架构之间的性能差距在较高功率水平下更加明显，凸显了FAS赋能的空间分集在高信噪比区域中的重要性。具体而言，在 20 dBm 下，双可重构天线表面配置的吞吐量几乎是传统系统的两倍，而

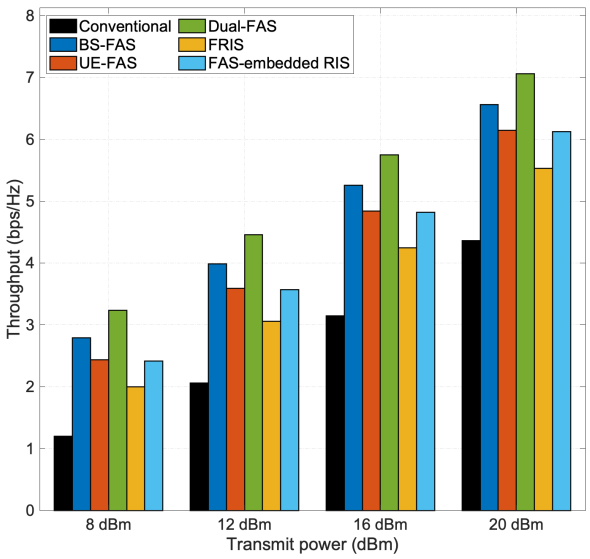


图4. 吞吐量与发射功率的关系 P，其中 $N = 50$。

单侧FAS配置（BS-FAS 和 UE-FAS）的性能仍显著优于基准。FAS嵌入式RIS和FRIS配置也实现了显著提升，验证了在无法部署双侧FAS时，它们作为经济高效替代方案的潜力。

V. 结论

FAS-RIS架构代表了智慧城市网络的一次范式转变，通过将设备级空间敏捷性与环境级电磁控制紧密结合，克服了传统大规模MIMO和纯无源RIS的局限性。所提出的框架包含五个关键架构组件：用于宏观波束成形的FAS使能基站、用于细粒度空间分集的FAS赋能的用户设备，以及三种RIS范式：FRIS、FAS嵌入式RIS和E-FAS。结合双时间尺度控制方案，该架构能够支持从无线信息与能量同传到通感一体化等变革性应用，并具备“绕过拐角”的能力。随着我们迈向6G，FAS-RIS框架有望释放无线系统设计中的新自由度，将其打造成为构建智能、自适应且具备感知能力的智慧城市的关键基础模块。本文所概述的架构比较与研究路线图，为未来研究以及下一代城市通信网络的实际部署提供了清晰基础。

参考文献

[1] IMT-2030推进组，《6G愿景与候选技术白皮书》，2021年6月。[2] C. Huang、A. Zappone、G. C. Alexandropoulos、M. Debbah和C. Yuen，《可重构智能表面在无线通信中的能效研究》，*IEEE*无线通信汇刊，第18卷，第8期，第4157–4170页，2019年8月。[3] R. W. Heath, Jr. 等人，《三混合MIMO架构》，即将在 *IEEE*通信杂志上发表，*arXiv*预印本，arXiv:2505.21971，2025年。[4] K. K. Wong、A. Shojaeifard、K.-F. Tong和Y. Zhang，《流体天线系统》，*IEEE*无线通信汇刊，第20卷，第3期，第1950–1962页，2021年3月。

[5] K.-F. Tong、B. Liu和K. K. Wong，《流体天线系统硬件的设计与挑战》，《电子学》，专题：面向未来的天线：可持续、高效、可重构与智能设计，第14卷，第7期，第1458页，2025年4月。[6] W.-J. Lu等人，《流体天线：重塑固有特性，实现智能无线网络中的灵活辐射特性》，《IEEE通信杂志》，第63卷，第5期，第40–45页，2025年5月。[7] W. K. New等人，《6G网络流体天线系统教程：涵盖通信理论、优化方法和硬件设计》，《IEEE通信调查与教程》，第24卷，第4期，第2325–2377页，2025年8月。[8] J. Yao等人，《FAS-RIS系统框架：性能分析与吞吐量优化》，《IEEE无线通信汇刊》，doi:10.1109/TWC.2025.3590458，2025年。[9] H. Xiao等人，《从固定到流体：释放流体可重构智能表面（FRIS）的新潜力》，arXiv预印本，arXiv:2509.18899，2025年。[10] Q. Liu、F. Zhao、F. Wu、K. F. Tong和K. K. Wong，《表面波传播系统OTA特性的仿真验证》，发表于IEEE国际微波、天线、传播与无线通信电磁兼容技术研讨会（MAPE）论文集，2024年11月27日至30日，中国广州。[11] K. K. Wong等人，《超大规模流体天线系统（E-FAS）：重新思考无线通信的未来》，[在线] 可查阅：https://sciety-labs.elifesciences.org/articles/by?article doi=10.21203/rs.3.rs-8002084/v1，2025年。[12] K. K. Wong、K. F. Tong、Z. Chu和Y. Zhang，《智能无线电环境愿景：表面波通信高速公路》，《IEEE无线通信》，第28卷，第1期，第112–119页，2021年2月。[13] L. Zhou等人，《流体天线辅助的无线信息与能量同时传输系统》，《IEEE车辆技术汇刊》，第74卷，第5期，第8285–8290页，2025年5月。[14] C. Wang等人，《通过深度强化学习，以流体天线系统释放通感一体化中的多用户MIMO潜力》，《IEEE无线通信汇刊》，第23卷，第9期，第10879–10894页，2024年9月。[15] H. Xu等人，《FAS辅助多用户毫米波系统的信道估计》，《IEEE通信快报》，第28卷，第3期，第632–636页，2024年3月。