可重构智能表面的控制平面

Fabio Saggese，*IEEE* 会员，Victor Croisfelt，*IEEE* 学生会员，Kyriakos Stylianopoulos，*IEEE* 学生会员，George C. Alexandropoulos，*IEEE* 高级会员，以及 Petar Popovski，*IEEE* 会士

arXiv:2603.01790v1 [eess.SP] 2 Mar 2026

摘要——**关于可重构智能表面（RIS）的研究主要集中在纯物理层方面，尤其关注如何通过可控的无线传播环境动态塑造信号。然而，将 RIS 集成为系统级网络元件，需要开发兼容 RIS 的控制平面。本文探讨了此类控制平面在两个关键维度上的设计方案：*i*）控制平面的频谱资源分配（带内或带外），以及 *ii*）数据平面的速率选择（复用或分集）。尽管我们的分析不可避免地经过简化，但它揭示了这些设计选择所固有的基本权衡，而这对于将可重构智能表面技术融入未来网络至关重要。**

索引词—**可重构智能表面、控制平面、控制信道、协议设计、性能分析。**

一、引言

可重构智能表面（RIS）因能够动态塑造传播环境，被视为即将到来的第六代（6G）无线网络的关键组成部分之一 [1], [2]。大多数关于可重构智能表面的研究工作仅关注物理层（PHY）方面，例如：开发能够考虑RIS单元、信源和目的端之间电磁相互作用的真实信道模型 [3]；针对特定可重构智能表面硬件 [5]，设计端到端信道或单个信道的专用信道估计（CE）方法 [4]；以及通过单独优化RIS或联合优化RIS与基站（BS）的运行，提升物理层通信指标，例如频谱效率和能量效率 [6]。然而，仍有一个重大挑战：如何将RIS有效集成到现有网络中。要解决这一问题，必须仔细考虑RIS部署对控制面和数据面的影响。本文的研究着重于设计兼容RIS的控制平面，并探讨不同设计选择所涉及的权衡。

A. 数据平面与控制平面

可重构智能表面的主要目标是优化无线传播环境，使用户数据能够可靠地传输，

本研究得到了丹麦 Villum 基金会的“WATER”Villum Investigator资助项目支持，以及欧盟 Horizon Europe 研究与创新计划下资助协议编号 101097101的 SNS JU TERRAMETA 项目支持；其中还包括 UKRI 根据英国政府 Horizon Europe 资助保障机制提供的追加资金。

F. Saggese、V. Croisfelt 和 P. Popovski 任职于丹麦奥尔堡的奥尔堡大学电子系统系（电子邮箱：{fasa, vcr, petarp}@es.aau.dk）。

K. Stylianopoulos 和 G. C. Alexandropoulos 任职于希腊雅典 15784 帕内皮斯蒂米奥波利斯伊利西亚的雅典国立卡波季斯特里亚大学信息学与电信系（电子邮箱：{kstylianop, alexandg}@di.uoa.gr）。

……。我们将专用于数据传输的一系列操作称为数据平面。然而，要充分发挥数据平面所承诺的潜力，就必须妥善设计控制规程、协议层面以及信令操作，这些统称为控制平面。尽管这一领域十分重要，但与纯粹的物理层主题相比，现有研究对在系统层面集成可重构智能表面的关注明显较少 [7]。值得注意的是，关于在可重构智能表面存在时系统考察通信范式及其相关控制平面方面，以便将该技术集成到未来网络中的文献仍存在显著空白。

B. 通信范式

传统上，我们可以区分两种不同的通信范式：面向复用和面向分集。前者通过调整关键性能指标（KPI）（例如数据速率），使其适应传播环境条件，从而满足服务质量（QoS）要求。另一方面，面向分集的设置会预先定义 KPI，并要求设备所处的传播环境满足 QoS 规范；若未能满足这些规范，系统便会发生故障。毫不意外，文献表明，已开发的 RIS赋能网络通信方案通常属于这两种范式之一。许多 RIS优化技术基于瞬时信道状态信息（CSI） [2]。为此，需要获取 CSI 并将其作为优化过程的输入，例如，用于配置可调 RIS 单元的响应；该过程与数据传输一道，必须在一个或几个信道相干时间内完成。我们将这类方法称为基于信道估计的优化（OPT-CE）方案，它们属于面向复用范式。然而，在存在可重构智能表面的情况下，估计瞬时 CSI 通常较为复杂，而且由于其无源单元数量庞大，会产生额外开销 [4]。为避免获取 CSI 及后续复杂的优化过程，另一种方法是基于码本的波束扫描（CB-BSW）：可重构智能表面依次遍历可用列表中的不同配置 ，每种配置规定了可重构智能表面单元的反射状态，从而使系统找到能够满足预定 QoS 的设置。该方案遵循面向分集范式 [8], [9]。

*C. RIS*控制挑战

关键的是，5G新空口中基站与用户设备（UE）之间采用的一些现有控制信令方案，不能直接用于RIS辅助组网

而不考虑其对数据平面的影响 [10]。对此，必须解决用于控制操作的物理时频资源的可用性问题。这需要考虑控制面与数据平面的共存。主要需要考虑的是，如果控制通过无线信道传输，RIS对环境的影响可能会适得其反，对控制信令造成负面影响，从而引发“鸡生蛋悖论”：RIS的控制受到RIS自身当前状态的影响。当控制面与数据平面共享相同的频谱资源时，这一点尤为重要；为实现可靠控制，两者无法同时共存，却可能因此产生不必要的通信开销。因此，我们必须区分两种方案：*i*) 带内控制（*IB-C*），其会受到RIS配置的影响和/或与数据平面共享资源；以及*ii*) 带外控制（*OB-C*），则不会如此。此外，RIS对控制信号的响应并非即时，这会带来额外开销，进而损害性能。

鉴于上述挑战，要将可重构智能表面作为新型网络组件无缝集成到现有无线基础设施中，了解控制平面的各种可能方案至关重要。为此，本文探讨了RIS辅助无线网络的潜在控制方案，介绍如何评估RIS对通信性能的影响，并研究作为极端示例的OPT-CE和CB-BSW方案所能实现的性能。

II. RIS兼容控制分类体系

新空口的无线接口由物理层及更高层组成，包括媒体接入控制（MAC）和无线资源控制（RRC） [10]。新空口控制平面涵盖无线接口中所有与控制相关的跨层方面，其设计旨在促进网络设备之间的通信。例如，物理下行控制信道（PDCCH）等物理信道负责将控制信息从基站传送至用户设备，例如资源分配、调度以及混合自动重传请求（HARQ）反馈。然而，在考虑构建RIS兼容控制平面时，视具体情境而定，仅将RIS视为一种新型用户设备可能并不够。这是因为RIS并非独立运行，而是会与共享同一传播环境的所有其他无线网络设备交互，并影响它们的运行。因此，我们将从两个不同方面讨论控制平面：针对RIS和用户设备，并在现有标准 [10]的基础上加以扩展。

另一方面，需要注意的是，数据平面可能只需进行较小幅度的调整，其重要性低于控制平面中的调整。这是因为数据平面的目标始终是实现基站与用户设备之间的通信。然而，RIS控制会导致数据平面的物理层面发生变化。因此，RIS控制平面与用户设备控制平面及数据平面交互的方式会带来新的影响。

A. 可重构智能表面的控制

为兼容 RIS 的各种硬件实现方式 [5], ，我们将 RIS 设备抽象为分别涉及数据平面和控制平面的两个独立模块：RIS面板和 RIS 控制器（RISC）。前者涵盖与电子控制元件及其根据 RISC 输入进行调谐相关的所有硬件和软件组件；后者则由能够接收和处理控制信号，并据此控制 RIS面板行为的组件构成。负责管理 RIS 与网络之间控制信令的 RIS控制平面设计，会影响 RISC 的处理能力，在某些情况下也会影响整个 RIS 设备的硬件能力。此外，RIS 的存在可能会影响用户设备控制平面的设计。鉴于这些因素，表 I 概述了可重构智能表面的控制平面分类体系。

可重构智能表面的控制可以是隐式 或显式。在存在隐式控制时，可重构智能表面的控制平面没有专为RISC设计的专用资源和特定指令，而是通过与用户设备共享控制平面来交换信息，例如在新空口中经由物理下行控制信道和物理上行控制信道（PUCCH）。这使得可重构智能表面的控制脱离可能的第三方决策者，由RISC自主决定 RIS面板的行为。免除专用控制操作的负担，代价是 RISC的复杂度增加，需要更强的处理能力来推断RIS面板的最优控制。此外，RISC通常需要获取本地信道状态信息 [4] 或其他信道统计信息 [11] 才能做出决策；因此，文献中的许多方案要求RIS面板具备感知能力 [12], ，即至少配备一条在数据平面所用相同资源上工作的接收射频（RF）链，从而增加制造成本，并需要在物理层和媒体接入控制层采用特定的编排方法，以避免可重构智能表面的影响降低而非提升通信性能；编排示例见 [13]。

在显式控制 场景中，RISC 接收专用控制信息，以指挥 RIS面板 的行为。这意味着第三方设备（例如基站）充当网络的决策者，与 RISC 进行通信。因此，显式控制要求 RISC 配备专用收发器，以执行控制信令；根据具体的环境和基础设施需求，这些信令可以通过射频或有线连接传输。虽然这种方式减轻了 RISC 的处理负担，但也增加了控制操作的复杂性及其对通信性能的影响。根据可用的物理层资源，我们还可以进一步区分两种不同类型的显式控制：

- 带外控制，其中控制平面使用的物理资源与数据平面使用的物理资源相互正交。如果 RISC 通过无线方式与另一台设备通信，这可以表示为预留部分频谱用于控制信令；也可以表示为这种情况

隐式控制	显式控制	
不向设备发送专用指令。所有涉及设备操作的决策都必须由设备在本地自行做出，并且可以由设备本身在本地完成，并且可以基于其他接收并解读的信号（例如导频符号、调度信息、同步信号（SS）等），这些信号会隐式地控制设备的行为。	显式指令由第三方决策者发送给设备。	
	带外控制 (OB-C)	带内控制 (IB-C)
	控制采用与……正交的资源可重构智能表面的工作频谱资源；控制不会影响数据平面（控制设计更简单，开销更低-所有频谱效率，且成本更高）。	控制使用与可重构智能表面工作频谱资源重叠的资源；控—制会影响数据平面（控制设计更复杂，频谱效率更高，成本更低）。

表 I：RIS兼容控制平面分类。

决策者与 RISC 之间通过专用电缆连接。

- *IB-C*，其中控制面和数据平面共享物理资源，这隐含地假设 RISC 与决策者之间需要进行无线通信。

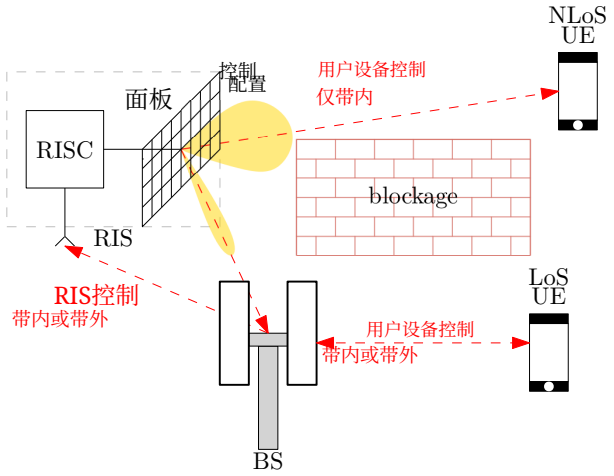
最后，我们指出，可采用混合模式进行 RIS 控制。例如，RIS 可以自主运行（隐式控制），直至收到基站指令，要求其加载特定配置（显式控制），以满足系统在当时的特定需求。在这种情况下，RIS硬件必须同时满足隐式控制和显式控制的技术要求。

此后，我们将分析 OB-C 和 IB-C 这两种极端情况，以更好地理解它们之间的权衡。未来的研究应着重于实现对可重构智能表面的混合控制。

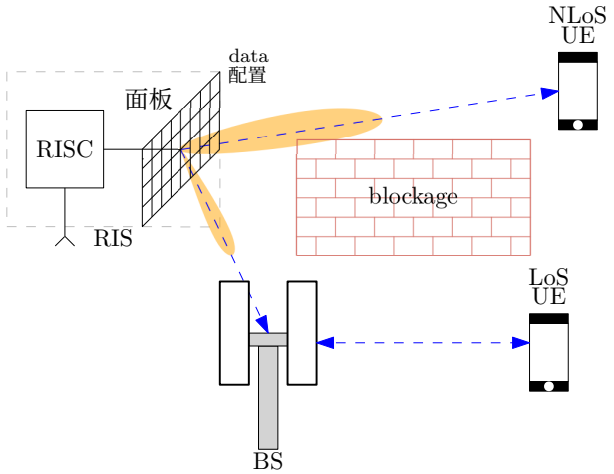
B. 用户设备控制

在没有可重构智能表面的情况下，往返于用户设备的控制信令也可以通过 IB-C 或 OB-C 传输。另一方面，部署可重构智能表面可能会限制所采用的用户设备控制方式。如图 1 所示，如果用户设备与基站有直接链路，则控制方式不受任何限制，因为基站与用户设备之间的控制信令可以照常传输。然而，如果用户设备仅与可重构智能表面有直接链路，基站与用户设备之间的控制信号就必须射向 RIS面板，才能到达目的端。考虑到 RIS面板是为数据平面资源而设计的，控制方式便受到限制，只能采用 IB-C。进而，这会产生

可重构智能表面需要加载特定配置，以向基站未覆盖的区域传送控制信息。此控制（*ctrl*）配置 必须设计为能够在广阔区域内提供可靠的通信性能。控制配置的潜在候选包括宽波束（如 [14], 中所示）以及分层波束码本，它们可提供更低时延的波束跟踪，以及可调节的可靠性与覆盖范围水平 [8]。



(a) 控制平面。



(b) 数据平面。

图 1：显式控制下数据平面和控制平面的简化示例，其中一个用户设备处于相对于基站的视距（LoS）条件下，另一个用户设备则处于非视距（NLoS）条件下。“Conf.”是 RIS 响应/反射配置的缩写。

III. 评估 RIS 控制的影响

为了借助所提出的分类体系探讨兼容RIS的控制平面所带来的影响，我们首先将通信协议这一概念抽象为其基本阶段，即“原子”。这种抽象使我们能够分析控制平面如何影响由这些“原子”的数量和排列方式各异的具体协议。随后，我们利用这一框架考察兼容RIS的控制平面对RIS辅助系统中两种常见通信范式实例的影响：OPT-CE和CB-BSW。

A. 通信协议的抽象视图

在通用无线网络中，通信遵循基于帧的协议，其边界由决定帧长度和结构的控制信息规定。典型的通信过程可分为三个主要阶段，这些阶段可能会

在每个帧中重复多次：“有效载荷”、“算法”和“信令”。根据系统需求，为每个阶段预留一定的时间、频谱和计算资源。

有效载荷： 有效载荷阶段与数据平面相关联，代表帧中用于实际数据传输的部分。在物理层，分配给该阶段的时间和频谱资源决定了可实现的通信性能，包括数据速率和可靠性。

算法： 算法阶段涉及旨在推断、优化并设置传输参数的处理操作，包括信道状态信息获取、基站和/或用户设备波束成形、用户设备频谱/时间调度、调制编码方案（MCS）选择等。该阶段的具体内容取决于所选的通信范式以及所采用方案的计算复杂度。为算法阶段预留的时间资源会产生开销时间；此外，任何算法任务中出现的错误都可能导致通信性能意外下降。考虑到可用的总资源和相关设备的计算能力，通常可以认为，为算法阶段预留的资源越多，优化过程中的错误就越少。例如，发送更多导频序列有助于信道状态信息获取，梯度下降迭代次数会影响解的最优性，等等。与此同时，留给有效载荷阶段的资源会减少，从而导致通信性能下降。因此，分配给算法阶段的资源与通信性能之间存在权衡。

信令：在信令阶段内，控制消息与网络节点进行交换，以告知其帧结构、指挥算法操作，或指示通信参数的设置，为有效载荷阶段做准备。为信令阶段预留的资源在实施IB-C时可能引入开销，从而降低整体通信性能。另一方面，鉴于信令的信息内容，为传输分配的资源量决定了控制消息的可靠性。同样，为信令阶段与有效载荷阶段预留的资源之间存在权衡。

B. 因果性问题

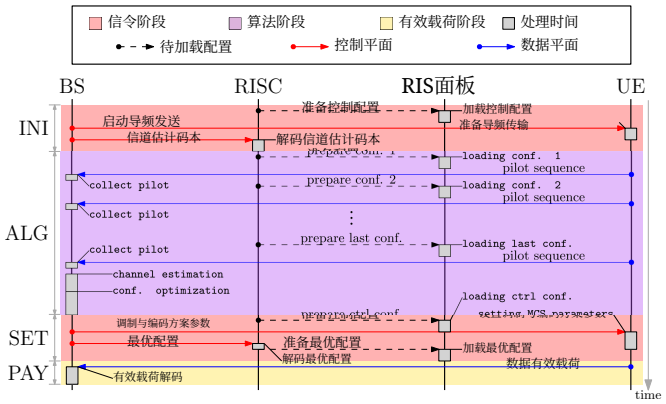
一个重要的考量是算法阶段和信令阶段的因果性 。控制消息中传递的通信参数信息需要先于数据进行解码。对于全数字硬件而言，这只会带来有限的问题，因为全数字硬件可以在接收信息后决定解码顺序。相反，对于模拟硬件而言，操作顺序至关重要。设想一台配备混合数字与模拟波束成形器的设备正在接收来自基站的数据，而基站是网络的决策者。虽然接收数据的数字处理可以在接收后进行，但这会影响端到端时延；设备波束成形器的模拟部分必须在传输开始前完成配置，否则数据可能无法解码。因此，必须事先 向设备发送控制消息，告知其要加载的波束成形器；这反过来又要求算法阶段在相关信令阶段之前输出该参数。需要指出的是，RIS面板本质上属于模拟硬件，因此在为RIS辅助无线网络设计控制平面时，必须认真考虑这一根本性问题。

*C. RIS*赋能系统的控制规程

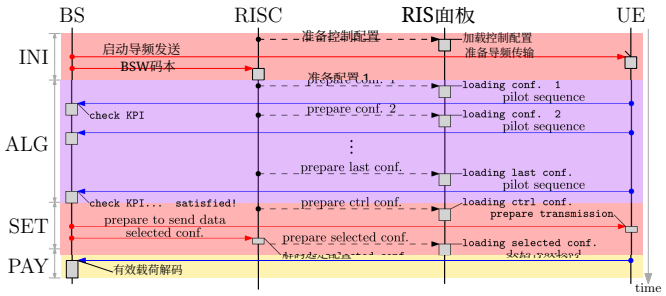
我们现在将重点描述在采用时分双工和显式控制的RIS赋能系统中进行上行链路通信所需的最低控制规程，并展示OPT-CE与CB-BSW方案之间的差异。当前场景聚焦于单个与基站没有直接链路的用户设备，因此需要可重构智能表面来扩展网络的覆盖范围，以凸显上述控制平面的特殊要求——参见图1中的非视距用户设备。根据对用户设备控制的考量，假定可重构智能表面在处于空闲状态的任何时刻都会加载控制配置，即每当它未收到加载特定配置的命令时。在这种情况下，我们观察到典型结构包括一个载荷阶段（PAY）、一个算法阶段（ALG）以及两个信令阶段：一个位于帧的起始处以初始化算法操作，称为“初始化（INI）”；另一个紧随算法阶段之后，用于为传输设置通信参数，称为“设置（SET）”。控制面和数据面操作及其顺序的示意图示例见图2。我们指出，可通过各种处理时间的流水线处理来优化操作时序。最后，我们强调，我们的方法可以很容易地加以调整，以描述其他协议，例如纳入额外的信令阶段，以适应频分双工系统中的反馈。

1) 基于信道估计的控制： OPT-CE方法的主要思想是根据传播条件调整传输数据速率。因此，基站旨在获取用户设备-RIS-基站端到端信道的瞬时信道状态信息，并根据用户设备的目标服务质量，利用该信息优化RIS配置和调制编码方案。一般而言，信道状态信息获取依赖于传输已知导频序列的副本，同时RIS依次遍历信道估计配置码本中的配置，每个副本对应一个配置，以解决用户设备-RIS链路和RIS-基站链路的不确定性 [4]。另一方面，网络参数的优化取决于系统目标；例如，为了最大化用户设备的数据速率，RIS配置所引起的相移应补偿用户设备-RIS-基站端到端信道的相位，并且调制编码方案应设置为最优配置下可实现的最大值 [6]。

根据图2a的示意图，我们可以详细说明所需的控制操作。在 INI阶段，当可重构智能表面已



(a) OPT-CE 操作。



(b) CB-BSW 操作。

图2：OPT-CE和CB-BSW方案的控制信息交换图。使用等宽字体表示处理操作。“Conf.”是RIS响应配置的缩写。

加载控制配置后，基站会通知用户设备和 RISC，CE过程即将开始，从而告知后者所使用的信道估计码本，并告知前者要使用的导频序列、其副本数量以及导频传输的周期，同时考虑 RISC 从码本加载每个配置所需的时间。然后，算法阶段包括接收导频序列、从接收到的数据中获取信道状态信息，以及优化可重构智能表面的配置和调制编码方案 [6]。之后，SET阶段开始：RISC 加载控制配置，基站指示用户设备在数据传输中使用的调制编码方案，同时通知可重构智能表面要加载的最佳配置。最后，进入 PAY阶段。

值得注意的是，向RISC显式发送配置可能需要传输相对大量的控制数据，因为必须发送RIS面板中每个单元的相移值。虽然通常只需用1或2比特控制单个可调谐单元，但为使反射信号获得显著增益，单元数量往往非常多 [2]。此外，为解决信道状态信息获取中的不确定性，信道估计码本中的配置数量与RIS面板的单元数量处于同一数量级 [4]。因此，如果资源编排未针对可靠传输进行专门设计，控制平面很容易受到控制错误的影响，即因控制信息解码错误而在数据平面中产生错误——例如通信中断 [15] ——传输大量控制数据。

2）波束扫描控制：在CB-BSW中，基站会在传输前选择一个通信关键性能指标，例如通信信噪比（SNR），并从一组预先确定的配置（即*BSW*码本）中寻找合适的RIS配置，以达到目标服务质量。与前一种通信方法类似，RIS在用户设备发送导频序列的同时遍历码本。随后，基站评估每个导频序列对应的关键性能指标，并从满足目标服务质量的配置中选出最合适的一项。如果没有配置满足要求，通信就会失败并发生中断。

根据图2b所示的示意图，我们可以详细说明CB-BSW所需的控制操作。在INI阶段，RIS已加载控制配置，基站向RISC告知BSW码本，并向用户设备告知导频信令；这需要与OPT-CE类似的控制信息。接下来，ALG阶段包括接收导频序列并评估关键性能指标 [9]。在SET阶段，RISC加载控制配置，基站通知用户设备为数据传输做好准备。随后，基站命令RISC加载选定的配置。最后进入PAY阶段。

值得注意的是，在算法阶段的波束扫描过程中，一旦测得的关键性能指标值高于目标服务质量，就可以停止该过程，而无需等待遍历整个 BSW码本；这会缩短开销时间。我们将此称为提前停止。不过，这要求控制平面设计能够及时通知用户设备算法阶段意外结束，从而在每次关键性能指标评估后为可能发送 SET控制消息预留资源。

最后值得一提的是，向 RISC发送信令以从码本加载配置，所需的控制数据比指定每个 RIS单元的相移要少。实际上，只需传输所选配置在 BSW码本中的整数索引，即可明确指示 RISC。

IV. 性能评估与比较

本节介绍所研究系统的性能评估[1]。通过对 RIS赋能系统进行数值仿真展示结果，该系统采用窄带数据传输，由基站通过 RIS为单个非视距用户设备提供服务，从而为该用户设备形成 IB-C（见图 1）。关于 RIS控制，分别评估带外控制和 IB-C方案的性能。此外，帧结构经过设计，使其采用类似于 5G NR标准的参数，即使用参数集 0进行单个物理资源块（PRB）的正交频分复用（OFDM）传输，其中控制和数据操作的基本传输时间间隔（TTI）设为半个子帧，即 0.5 ms [15]。

首先，我们展示计入控制平面所产生开销的结果，即由信令和

[1]模拟代码和详细参数可在 https://github. com/lostinafro/ris-control 查阅。

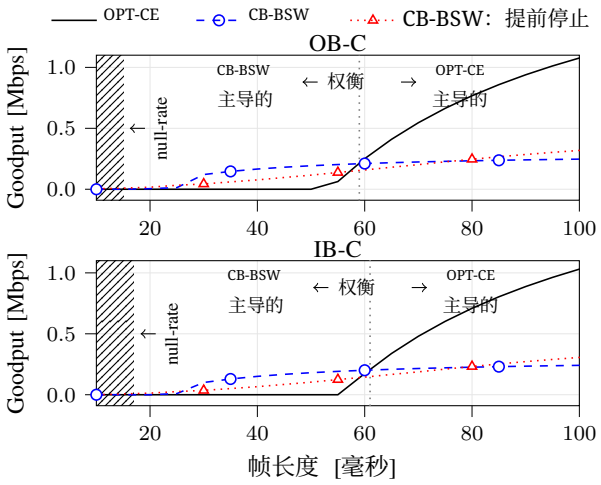


图 3：有效吞吐量性能与帧长度的关系分析。

算法阶段产生的开销，并假设控制可靠性完美。为此，我们将有效吞吐量作为比较指标，对 OPT-CE、CB-BSW 以及采用提前停止的 CB-BSW 进行评估。对于 CB-BSW，我们将信噪比作为待测关键性能指标，目标服务质量为 10 分贝。图 3 展示了平均有效吞吐量随总帧持续时间的变化。值得注意的是，帧持续时间与信道的相干时间直接相关：相干时间越长，帧持续时间越长。结果表明，不同控制方式对开销的影响可忽略不计（$\leq$ 2 ms），因而对有效吞吐量性能的影响也可忽略。另一方面，通信方式的选择高度依赖于帧时间。当帧持续时间较短时，没有足够的时间执行控制操作，从而导致速率为零。CB-BSW 的主要优势在于，即使在相干块较小的情况下，也能提供非零传输速率。在带外控制下，采用提前停止的 CB-BSW 能够在帧持续时间为 $>$ 15 ms 时提供非零速率，CB-BSW 至少需要 25 ms，而 OPT-CE 则需要更多时间来获取信道状态信息并执行有效载荷阶段（$\geq$ 50 ms）。然而，如果时间跨度至少达到 59 ms，OPT-CE 的表现将优于另外两者。

现在，我们研究控制平面的可靠性所产生的影响，并比较带外控制（OB-C）和带内控制（IB-C）两种方案。在后一种情况下，将连接基站与用户设备（UE-CC）以及连接基站与RISC（RIS-CC）的物理层控制信道（CC）建模为瑞利衰落信道。采用OB-C时，UE-CC仍建模为瑞利衰落信道，而RIS-CC则被视为理想的无差错信道，因为系统设计者可以轻松地将其可靠性做到尽可能高。为比较这两种通信方式，我们评估了在整个控制信令流程中达到至少99%可靠性所需的最低平均信噪比，即假设信息内容如 [15]所述时，传输图2所示全部四条控制消息的可靠性。图4以热图形式展示了在RISC和UE处测得的平均信噪比对应的可靠性，并叠加显示OB-C与IB-C的性能。图中仅为满足目标可靠性（$\geq$ 99%）的区域着色，并标出了达到该目标所需的最低平均

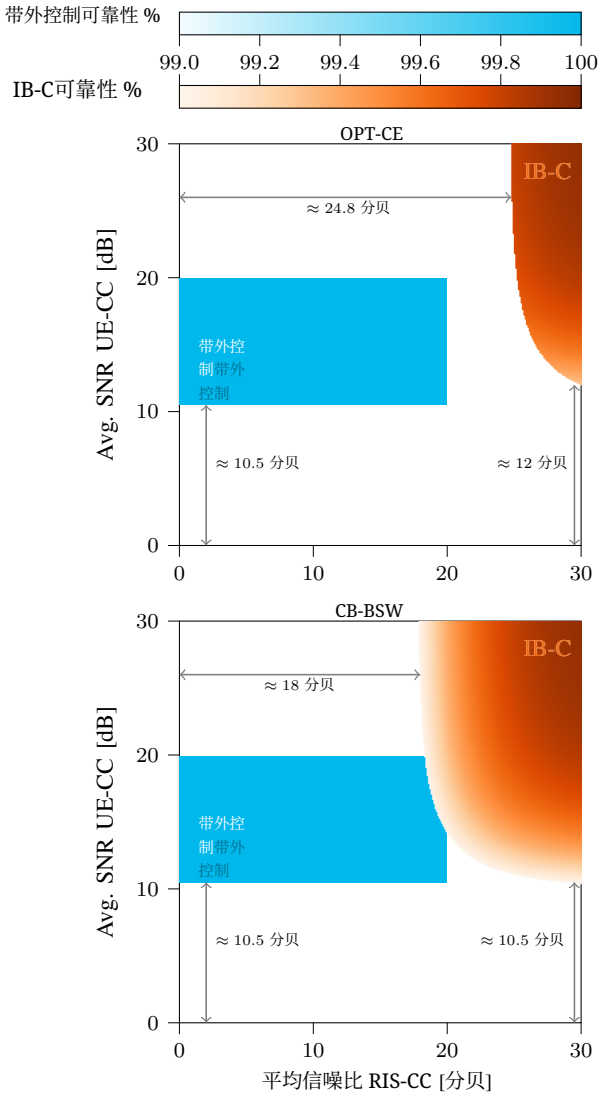


图4：对带外控制和 IB-C 的可靠性性能进行评估。低于 99% 的可靠性未着色。

信噪比；热图中未着色的部分表示不满足目标可靠性（$<$ 99%）的信噪比取值。对于IB-C，OPT-CE需要比CB-BSW更高的信噪比才能达到相同的可靠性，这是因为前者控制数据包的信息内容更多。具体而言，在OPT-CE的SET阶段显式传输每个RIS单元的响应，会显著影响所需的最低信噪比，这意味着OPT-CE更容易出现控制错误。采用OB-C时，两种方案的可靠性均有所提升，因为控制平面可用于传输关键控制数据包，即码本和配置。因此，只要在资源可用性和成本方面具备部署可行性，OB-C就优于IB-C。

五、讨论与结论

本文介绍了为配备可重构智能表面的无线系统设计控制平面的方案。与大量聚焦于物理层的理论和实验研究相比

，本文的价值在于阐明了可重构智能表面的一个实际层面，而这一层面从系统集成和标准化的角度来看至关重要。本文的讨论勾勒出可重构智能表面控制平面的设计空间。分析虽不可避免地有所简化，但仍揭示了主要的权衡：一方面，IB-C和带外控制的选择主要影响系统的可靠性，对开销的影响则微乎其微；另一方面，面向复用的通信方法能够实现优于分集方法的性能，但代价是更容易受到控制错误的影响，并产生更高的开销。通过投入带外控制资源，或为IB-C设计稳健的资源分配方案，可以缓解控制错误。另一方面，我们指出，利用决策者可获得的先验信息可以降低开销。例如，用户设备定位信息可帮助CB-BSW [11], [12],缩小BSW码本的规模，并更快地收敛到理想波束。数据平面统计信息有助于OPT-CE：当数据信道具有相关性或稀疏性时，可以缩小信道估计码本的规模，从而降低信道状态信息获取的开销。本文为简明起见，没有深入探讨更复杂的方面，但为未来更精细的控制平面设计奠定了基础，以优化各种计算和通信参数。

参考文献

[1] E. Calvanese Strinati、G. C. Alexandropoulos、H. Wymeersch、B. Denis、V. Sciancalepore、R. D'Errico、A. Clemente、D.-T. Phan-Huy、E. D. Carvalho 和 P. Popovski，“面向第六代移动通信智能连接性的可重构、智能且可持续无线环境”，*IEEE* 通信杂志，第59卷，第10期，第99–105页，2021年。[2] Q. Wu、S. Zhang、B. Zheng、C. You 和 R. Zhang，“智能反射面辅助无线通信：教程”，*IEEE* 通信汇刊，第69卷，第5期，第3313–3351页，2021年。[3]ETSI GR RIS 003，“可重构智能表面（RIS）；通信模型、信道模型、信道估计与评估方法”，2023年6月。[4] M. Jian、G. C. Alexandropoulos、E. Basar、C. Huang、R. Liu、Y. Liu 和 C. Yuen，“面向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”，智能融合网络，第3卷，第1期，第1–32页，2022年。[5] E. Basar、G. C. Alexandropoulos、Y. Liu、Q. Wu、S. Jin、C. Yuen、O. Dobre 和 R. Schober，“面向第六代移动通信的可重构智能表面：新兴应用与开放挑战”，*IEEE* 车辆技术杂志，待发表，2024年。[6] E. Björnson、H. Wymeersch、B. Matthiesen、P. Popovski、L. Sanguinetti 和 E. de Carvalho，“可重构智能表面：面向无线应用的信号处理视角”，*IEEE* 信号处理杂志，第39卷，第2期，第135–158页，2022年。[7] G. C. Alexandropoulos、D.-T. Phan-Huy、K. D. Katsanos、M. Crozzoli、H. Wymeersch、P. Popovski、P. Ratajczak、Y. Bénédic、M.-H. Hamon、S. Herraiz Gonzalez、R. D'Errico 和 E. Calvanese Strinati，“RIS 赋能的智能无线环境：部署场景、网络架构、带宽与影响范围”，*EURASIP* 无线通信网络期刊，第103号，第1–38页，2023年。[8] G. C. Alexandropoulos、V. Jamali、R. Schober 和 H. V. Poor，“面向 RIS 赋能毫米波多天线系统的近场分层波束管理”，载于*IEEE SAM* 会议录，挪威特隆赫姆，2022年。[9] J. An、C. Xu、Q. Wu、D. W. K. Ng、M. Di Renzo、C. Yuen 和 L. Hanzo，“可重构智能表面的基于码本的解决方案及其开放挑战”，*IEEE* 无线通信，第31卷，第2期，第134–141页，2022年。[10] X. Lin、J. Li、R. Baldemair、J.-F. T. Cheng、S. Parkvall、D. C. Larsson、H. Koorapaty、M. Frenne、S. Falahati、A. Grovlen 和 K. Werner，“5G新空口：揭示下一代无线接入技术的要点”，*IEEE* 通信标准杂志，第3卷，37，2019年 3，30期 页 – 。

[11] G. C. Alexandropoulos、I. Vinieratou 和 H. Wymeersch，“通过配备单接收射频链的多个可重构智能表面进行定位”，*IEEE* 无线通信快报，第11卷，第5期，第1072–1076页，2022年。[12] G. C. Alexandropoulos、N. Shlezinger、I. Alamzadeh、M. F. Imani、H. Zhang 和 Y. C. Eldar，“混合可重构智能超表面：为 6G 无线通信实现可调反射与感知的同步进行”，*IEEE* 车辆技术杂志，第19卷，第1期，第75–84页，2024年。[13] V. Croisfelt、F. Devoti、F. Saggese、V. Sciancalepore、X. Costa-Pérez 和 P. Popovski，“面向可重构智能表面开放系统模型的编排框架”，*arXiv* 预印本 *arXiv:2304 10858*，2023年。。[14] P. Ramezani、M. A. Gimyk 和 E. Bjornson，“采用平面阵列的 RIS 辅助 MIMO 系统的宽波束反射”，载于阿西洛马信号、系统与计算机会议录，美国太平洋格罗夫，2023年。[15] F. Saggese、V. Croisfelt、R. Kotaba、K. Stylianopoulos、G. C. Alexandropoulos 和 P. Popovski，“论控制信令对 RIS 赋能无线通信的影响”，*IEEE* 通信学会开放期刊，第5卷，第4383–4399页，2024年。



Fabio Saggese（IEEE会员）于2015年和2018年分别以最优等成绩获得比萨大学电信工程理学学士和理学硕士学位。2022年4月，他获得比萨大学信息工程博士学位；其答辩论文于2022年9月获GTTI评为意大利通信技术领域最佳博士论文。自2021年11月起，他在丹麦奥尔堡大学电子系统系连接部门工作。

他的研究涉及未来无线网络的资源分配、MAC 协议设计和网络切片。



Victor Croisfelt（IEEE研究生会员）于2018年获得巴西隆德里纳州立大学电气工程理学学士学位，并于2021年获得巴西圣保罗圣保罗大学理工学院电气工程理学硕士学位。目前，他正在丹麦奥尔堡奥尔堡大学电子系统系连接部门攻读博士学位。他目前的研究兴趣是利用机器学习工具设计新的、更高效的通信

通信协议。



Kyriakos Stylianopoulos（IEEE研究生会员）于2019年毕业于希腊雅典的雅典国立卡波季斯特里亚大学信息学与电信系。2020年，他获得英国剑桥大学的哲学硕士学位。目前，他正在雅典国立卡波季斯特里亚大学信息学与电信系攻读博士学位，研究机器学习与超越5G无线通信的交叉领域。他的研究领域更广泛地

研究兴趣包括模式识别、深度学习、强化学习、观测天文学、可重构智能表面与智能无线电环境，以及下一代无线通信网络。



George C. Alexandropoulos 获得了希腊帕特雷大学的博士学位。他目前是希腊雅典国立卡波季斯特里亚大学信息学与电信系副教授，也是美国伊利诺伊州芝加哥市伊利诺伊大学芝加哥分校电气与计算机工程系兼职教授。他的研究兴趣涵盖无线网络算法设计与性能分析等广泛领域，尤其关注多天线收发器硬件架构

架构、全双工无线电、有源和无源可重构智能表面、集成感知与通信、毫米波与太赫兹通信，以及分布式机器学习算法。



Petar Popovski （IEEE会士）是奥尔堡大学教授，在该校领导连接性分部，并担任不来梅大学访问杰出讲席教授。他于斯科普里圣西里尔与圣美多德大学获得通信工程工程学文凭和理学硕士学位，并于2005年在奥尔堡大学获得博士学位。他目前担任《IEEE通信领域精选期刊》主编及IEEE通信理论技术委员会主席。他著有《无线连接性：直观而基础的指南》。他的研究兴趣集中于无线通信与通信理论领域。