可重构智能超表面：单元与表面级设计及其性能在可量化基准下的相互作用

Ammar Rafique、Naveed Ul Hassan，IEEE高级会员、Muhammad Zubair，IEEE高级会员、Ijaz Haider Naqvi、Muhammad Qasim Mehmood、Chau Yuen，IEEE会士、Marco Di Renzo，IEEE会士，以及M´erouane Debbah，IEEE会士

arXiv:2304.01843v1 [cs.IT] 4 Apr 2023

摘要——可重构智能表面（RIS）在远场产生复杂辐射方向图的能力取决于多种因素，例如单元的尺寸、形状、空间排列、调谐机制、通信与控制电路的复杂度，以及照射源的类型（点源/平面波）。关于RIS的研究主要集中于两个方面：首先，优化和设计单元，以在特定频带内实现所需的电磁响应；其次，探索RIS在各种场景中的应用，包括系统级性能分析。前者并不假定表面层面的任何特定辐射方向图，而后者则不考虑任何特定的单元设计。这两种方法在很大程度上都忽略了RIS控制电路的复杂度和功率需求。随着RIS逐步走向实际环境中的制造与应用，同时考虑单元设计、所需的表面级辐射方向图、控制电路的复杂度以及功率需求之间的相互作用，正变得越来越必要。本文采用一种RIS基准框架，在给定表面尺寸的条件下，针对不同的基于二极管的单元设计，对远场波束成形中单元指定辐射方向图与控制电路复杂度之间的性能和权衡进行比较与分析。该工作为优化单元设计和表面级辐射方向图奠定了基础，从而促进RIS辅助无线通信系统的优化。

索引词——6G、可重构智能表面、单元

一、引言

可重构智能表面（RIS）能够重构无线信道 [1], [2]。RIS 的设计包含一种称为单元的基础平面微结构，并配备二极管等集成电子元件以调节入射电磁波的幅度和相位 [3], [4]。随后，通过以亚波长周期间隔重复排列单元，制成表面。还需加入适当的控制电路，以调节 RIS 单元，从而实现所需的辐射方向图。由足够多单元构成的 RIS 能够生成复杂的辐射方向图 [5]。

图1展示了城市环境中面向室内/室外应用的可重构智能表面辅助无线通信部署。图中还展示了单元的典型结构、采用开/关控制的PIN二极管、PIN二极管的集总元件模型、由多个单元构成的可重构智能表面，以及用于控制PIN二极管开关以生成指定辐射方向图的微控制器。在城市环境中，非视距（NLoS）场景占主导，因为建筑物常常会阻挡信号。在这类情况下，可借助可重构智能表面实现单波束扫描、功率水平相等的多波束形成，以及功率水平不等的多波束形成，从而减少中断并提高频谱效率 [6], [7]。

按照惯例，天线或单元的近场定义为距离天线或单元最远至 $\frac{2D^2}{\lambda}$ 米的区域，其中 D 是包围天线或单元的球体的最小直径，λ 是波长 [8], [9]。假设可重构智能表面包含 N^2 个单元，则其近场区域是单个单元近场边界的 N^2 倍。根据可重构智能表面所含单元的数量，其近场区域可延伸至数十米甚至数百米。因此，用户或接收机可能位于可重构智能表面的远场区域或近场区域。同样，可重构智能表面也可能位于发射机/信源的远场或近场。如果可重构智能表面位于信源的远场，电磁波到达可重构智能表面时呈平面波形式，此时信源称为平面波源。另一方面，如果可重构智能表面位于信源的近场，电磁波到达可重构智能表面时呈球面波形式，为简便起见，此时信源称为点源。因此，在可重构智能表面辅助无线通信中，根据信源类型以及接收机相对于可重构智能表面的位置，可分为四种情况。

1) 情况1：对于可重构智能表面而言，发射机表现为点源，接收机位于可重构智能表面的远场。2) 情形 2：对于可重构智能表面而言，发射机表现为平面波源，接收机位于可重构智能表面的远场

A. Rafique、M. Q. Mehmood 和 M. Zubair 任职于巴基斯坦拉合尔旁遮普信息技术大学（ITU）电气工程系，邮编 54600。（电子邮箱：phdee19002@itu.edu.pk、qasim.mehmood@itu.edu.pk、muhammad.zubair@itu.edu.pk）。N. U. Hassan 和 I. H. Naqvi 任职于巴基斯坦拉合尔管理科学大学（LUMS）电气工程系，邮编 54792。（电子邮箱：naveed.hassan@lums.edu.pk、ijaznaqvi@lums.edu.pk）。C. Yuen 任职于新加坡科技设计大学（SUTD）工程产品开发系，地址为新加坡索马帕路 8 号，邮编 487372。（电子邮箱：yuenchau@sutd.edu.sg）。M. Di Renzo 任职于巴黎-萨克雷大学、法国国家科学研究中心、中央理工-高电力学院、信号与系统实验室，地址为法国吉夫叙尔伊维特约里奥-居里路 3 号，邮编 91192。（marco.di-renzo@universite-paris-saclay.fr）M´erouane Debbah 任职于阿布扎比马斯达尔城 9639 号技术创新研究院，同时任职于法国吉夫叙尔伊维特 91192 号巴黎-萨克雷大学中央理工-高电力学院（电子邮箱：merouane.debbah@tii.ae）。通信请联系 N. U. Hassan、M. Zubair 和 M. D. Renzo

。3) 情形 3：对于可重构智能表面而言，发射机表现为点源，接收机位于可重构智能表面的近场。4) 情形 4：对于可重构智能表面而言，发射机表现为平面波源，接收机位于可重构智能表面的近场。

在每种情况下，计算可重构智能表面产生的辐射方向图所采用的分析方法各不相同。远场假设大大简化了辐射方向图的计算，因为在远场中，可重构智能表面上每个单元对应的仰角和方位角近似相同 [10]。本文考虑前两种情况（情况1和情形 2），并研究可重构智能表面生成各种辐射方向图的能力。此研究的动机是，可重构智能表面通常在靠近信号源时性能更好 [11], ，而且接收机很可能位于可重构智能表面的远场区域。

可重构智能表面在室内和室外场景中发挥着关键作用，可利用点源和平面波源实现单波束扫描、等功率或不等功率水平的多波束形成，并提升可重构智能表面辅助通信系统的性能。如图1所示，多项研究探讨了可重构智能表面在不同应用场景和不同频段下的理论增益。这些研究已在 [6] 中得到全面综述。然而，这些理论分析往往忽略单元的形状和尺寸、可重构智能表面控制电路的复杂度和功率需求，以及表面层能力之外的其他因素。随着可重构智能表面在实际场景中的应用日益广泛，亟需开发相关工具，以便根据具体应用场景，针对点源或平面波源选择合适的单元设计。单元优化过程需要权衡单元优化、表面层辐射方向图生成能力、控制电路复杂度，以及相关的信道感知开销。最近， [12] 证明，在三维环境中对可重构智能表面进行最优定位，也能提升可重构智能表面辅助通信系统的系统级性能。本文主要关注可重构智能表面的单元设计和表面层设计考量，不涉及系统级优化。

本文旨在提出一种基准测试框架及相应指标，用于评估由各种单元构成、具体而言采用 PIN二极管进行调谐的可重构智能表面在远场波束成形中，基于点源/平面波源假设生成辐射方向图的能力、能量需求和控制电路复杂度。此外，我们还研究能否通过单元分组，以辐射方向图生成能力换取控制电路复杂度的降低。为实现这一目标，我们在框架中设定了一组简单和复杂的辐射方向图作为基准，因为近期一些研究强调，应考虑完整的方向图，以便在提高期望方向功率的同时，降低非期望方向的功率 [17]。

我们的研究重点是评估所提出的基准测试框架的有效性，并分析采用五种不同单元设计构建的五个可重构智能表面之间的权衡[13]–[16]。在这些设计中，两个可重构智能表面采用通过单个PIN二极管实现的1位控制，而另外两个可重构智能表面则通过多个PIN二极管实现2位控制。这四个可重构智能表面所采用的单元均经过优化，以在不同二极管控制状态之间产生最大的相位差，即 180° 对于1比特单元，以及 90° 对于2比特单元。第五个可重构智能表面同样采用单个PIN二极管实现1位控制，但其单元设计未经优化，因此仅产生 50° 相移。在法向入射下，本研究中的所有单元均表现出介于0.85和1之间的反射系数。

我们通过数值实验评估这些可重构智能表面在远场复现基准方向图的能力，并假设入射电磁波以法向入射，且采用点源或平面波源；这一假设在文献中被广泛采用 [18]。我们还分析并讨论了每种可重构智能表面所需的RIS控制电路复杂度和功率需求。主要发现总结如下。

- 在假设采用点源（情况1）时，我们发现，由于波前的球面曲率，采用 1 比特单元设计的可重构智能表面在控制电路复杂度和功率需求方面优于采用 2比特设计的可重构智能表面。
- 在采用平面波源（情形 2）时，与采用 2比特单元设计的可重构智能表面相比，采用 1 比特单元设计的可重构智能表面的波束扫描性能明显较差。
- 当可重构智能表面上的单元按组控制时，性能较差的设计受到的影响较小；这也表明，采用性能较差的设计构建大型表面，几乎无法提升表面性能。
- 如果只需简单的辐射方向图，例如在较小反射角（小于 40°）下进行单波束扫描，则可以采用未经优化的单元设计。
- 要生成复杂的辐射方向图，例如在不同的非均匀角度下形成多个波束，则采用具备多位控制的复杂且经过高度优化的单元设计，以及大尺寸表面，会很有帮助。
- RIS控制电路的功率需求和尺寸会随着每个单元设计中PIN二极管的数量及工作频率的增加而增大。
- 可重构智能表面几乎是无源器件，因为它们不会为输入的无线电信号增加新的功率，但控制电路的功率需求不容忽视。
- 为了有效比较可重构智能表面生成辐射方向图的能力，需要采用多种指标。本文提出三种实用指标——指向性误差（DE）、归一化均方误差（NMSE）和旁瓣比（SLR）——用于量化不同可重构智能表面的相对性能。

本文其余部分安排如下：第二节讨论单元设计以及可重构智能表面在远场产生的电场（E-field）；第三节讨论RIS控制电路，并分析其复杂度和功率需求；第四节介绍我们的基准测试框架和性能指标；第五节展示

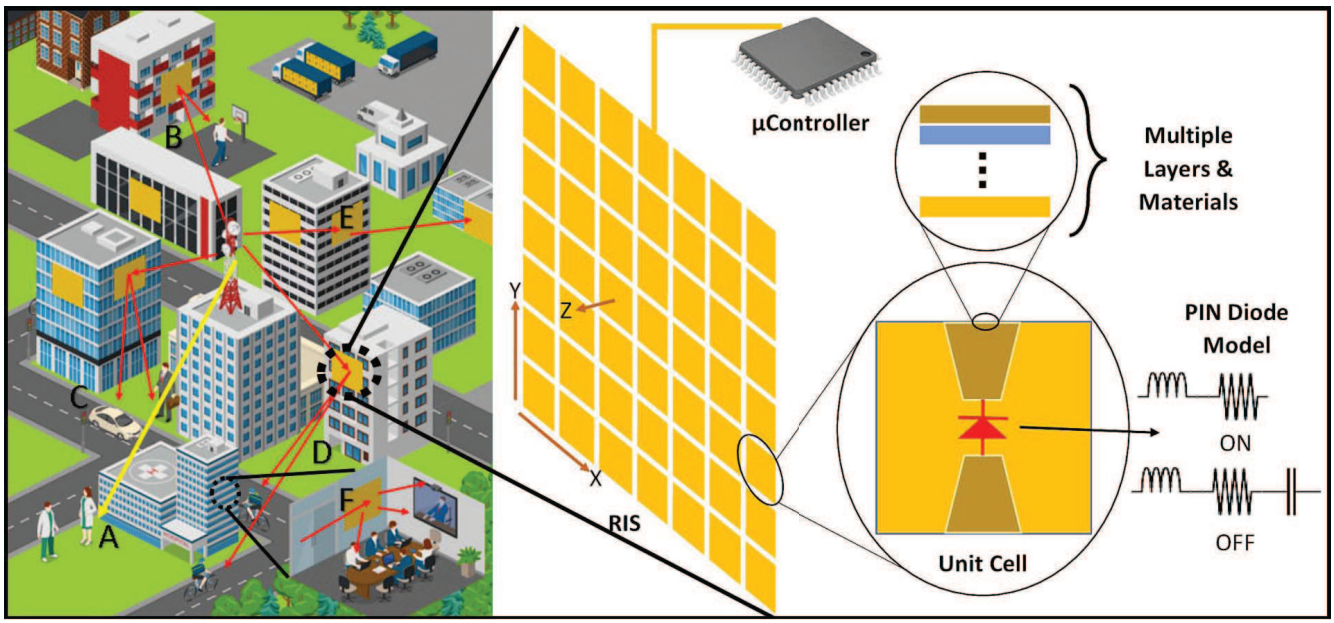


图1：可重构智能表面辅助的城市环境示例。

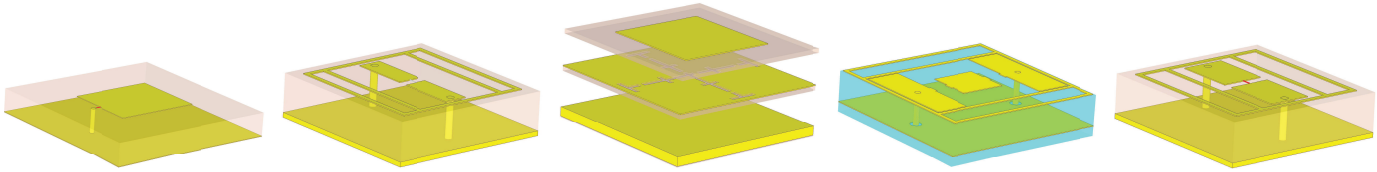


图2：（从左到右）S_1 [13], S_2 [14], S_3 [15], S_4 [16], S_5 [14]的单元布局。

我们的仿真结果并进行讨论；第六节总结全文。

II. 单元与可重构智能表面

A. 单元——RIS 的基本构成元素

RIS 的一个基本元素是称为单元的平面微结构。将单元排列成矩形阵列，即可形成平坦表面。单元的尺寸取决于工作频率，频率越高，所需尺寸越小。固定尺寸的可重构智能表面中单元的总数取决于其形状和尺寸。将多个带有重复单元图案的小型表面拼接起来，即可构成大型可重构智能表面。需要注意的是，我们将可重构智能表面定义为由单个控制器或一组控制器共同控制的重复单元图案。

一类可重构智能表面研究完全聚焦于单元设计及其电磁特性。通过在单元中加入 PIN 二极管等有源电子元件，预期可使由此构成的可重构智能表面实现灵活且实时的功能。基于这些理念， [13] 中采用所设计单元构成的可重构智能表面展现了灵活散射、平面聚焦、波束扫描和波束成形能力。 [13] 提出的单元采用夹层结构，由一个简单的矩形贴片、一块金属接地板和一个 PIN 二极管组成；该二极管通过金属通孔将贴片的一条边连接到接地板（1位控制）。 [14], 中，作者提出了一种三层单元设计，同样由一个 PIN 二极管进行控制（1位控制）。 [15]提出了一种相对更复杂的单元。该设计包含 5 个 PIN 二极管，但只需两个控制信号，因此可归类为 2比特设计。通过 5 个 PIN 二极管的四种配置，可产生彼此相差约 90° 的四种相移。该单元具有对称结构，但相对复杂，由上层贴片、开槽平面和接地板组成。 [16] 还提出了另一种仅使用 2 个 PIN 二极管的 2比特单元设计。图 2 展示了所有单元的布局。表 I 总结了这些单元在法向入射角下不同控制状态对应的设计频率、反射幅度和相位。

在本文中，由 [13]–[16] 中提出的单元设计制成的可重构智能表面分别表示为 S_1，、S_2，、S_3，和 S_4。此外，还考虑了从 [14] 获得的未经优化的单元设计，并将其称为 S_5。该设计的两种配置之间的最大相移仅为 50° ，从而可以测试单元优化对于实现良好性能的必要性及其程度。

B. 可重构智能表面的电场

一般而言，由 $M \times N$ 个相同类型的单元组成、排列成矩形平面阵列的可重构智能表面（RIS），在仰角和方位角分别表示为 θ 和 ϕ 时，

在观察者一侧，其电场可在远场中计算如下：

$$E(\theta,\phi)=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left[E_{in_{mn}}e^{j\alpha_{mn}}f(\theta_{mn},\phi_{mn})\times \Gamma e^{j\Phi_{mn}}f(\theta,\phi)e^{jk.\hat{r}_{mn}}\right]. \quad (1)$$

其中，$e^{jk.\hat{r}_{mn}}$ 表示波矢，$E_{in_{mn}}$ 和 α_{mn}分别表示照射振幅和相位（源辐射响应），$f(\theta,\phi)$表示单元辐射响应（散射方向图），角度 ϕ_{mn} 和 θ_{mn} 分别是源相对于$(m,n)^{th}$ 单元的方位角和仰角，Γ 是该单元的反射系数，Φ_{mn} 是由$(m,n)^{th}$ 单元产生的相移。通过改变PIN二极管的状态来控制该相移。例如，对于经过优化的2比特单元，$\Phi_{mn}\in\{0,\pi/2,\pi,3\pi/2\}$的值。因此，通过改变单元的配置，可重构智能表面能够实现不同的响应，即将入射信号引导至任意期望方向。

方程（1）对情况1和情形 2均成立。然而，在平面波源假设下（情形 2），我们可以进一步简化该方程中的一些项。源的辐射响应可简化为 $E_{in_{mn}}=E,\forall m,n$，且 $e^{j\alpha_{mn}}=1,\forall m,n$ （或某个常数）。类似地，单元辐射响应变为 $f(\theta_{mn},\phi_{mn})=f(\theta,\phi)$，因为源的所有方位角和仰角都几乎相等，即 $\theta_{mn}\approx\theta,\forall m,n$ 和 $\phi_{mn}=\phi,\forall m,n$。进一步假设可重构智能表面位于x-y平面，且单元在该平面内向各个方向的辐射均相同。在这种情况下，单元辐射响应可进一步简化为 $f(\theta)$ $\forall m,n$（不依赖于角度 ϕ）。经过上述简化，情形 2的电场方程变为：

$$E(\theta,\phi)=E\,\Gamma\,f^2(\theta)\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}e^{j\Phi_{mn}}e^{jk.\hat{r}_{mn}}. \quad (2)$$

比较（1）和（2）可见，平面波源假设对波束调控选项的限制相对较小；然而，它简化了电场计算，因为对于所有索引（m，n），单元辐射响应 $f(\theta)$ 都保持不变，因此可以将其作为常数从求和中提取出来。

单元的设计通常会影响 $f(\theta)$的形状。图3展示了本文所研究的四种单元的归一化辐射响应，并绘制了$f(\theta)=\cos^{\frac{1}{q}}(\theta)$在某些 q取值下的曲线，以供比较。S_1和S_3中所使用单元的辐射响应与$\cos^{\frac{1}{3}}(\theta)$相似，而$S_2$和$S_4$的辐射响应则与$\cos^{\frac{1}{5}}(\theta)$相似。然而，在平面波源假设下，无论 $f(\theta)$存在何种差异，只要采用具有 $\Gamma=1$ 且二极管状态之间相移最大分离的任意 n位优化单元构造尺寸足够大的可重构智能表面，其表面级性能应几乎相同。换言之，单元二极管状态的数量（2^n）在决定可重构智能表面的表面性能方面，比单元辐射响应 $f(\theta)$发挥更关键的作用。随着 n 增加，可重构智能表面生成相对复杂辐射方向图的能力也会增强，同时控制电路的复杂性和

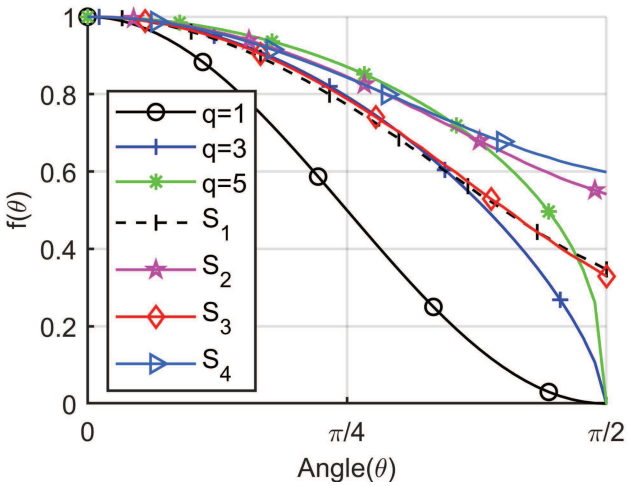


图3：S_1-S_4中使用的四种单元的归一化辐射响应 $f(\theta)$。图中还绘出了当 $q=1$ 分别为 3 和 5 时 $\cos^{\frac{1}{q}}(\theta)$ 的幂函数曲线。

功率需求也会增加（下一节将对此进行更详细的讨论）。然而，在点源假设下，$f(\theta)$的形状在决定表面级响应方面发挥着更重要的作用，因为它出现在公式（1）的求和项中。因此，在情况1中，我们应预期表面性能会因单元设计而产生显著差异。

目前缺乏标准化基准，用于评估和比较由不同单元构成的可重构智能表面在辐射方向图生成能力、控制电路复杂度和功率需求方面的表现。此外，不同作者假设的可重构智能表面单元数量及其间距也各不相同，有些研究使用了40×40、20×20、16×16或30×30个单元。这些差异使得在点源/平面波源假设下，难以比较不同单元设计生成表面级辐射方向图的相对性能。在实际应用中，传统设计方法通常先选择或设计单元结构（包括控制机制，如PIN二极管），然后使用多个单元构成能够生成特定辐射方向图的表面。然而，这种方法存在局限性：最终形成的有限尺寸可重构智能表面可能不具备所需的方向图生成能力，可能不适合预期应用，也可能消耗过多功率。

一项重大难点还在于，如何确定每个单元中 PIN二极管的状态，以实现所需的辐射响应。搜索空间的复杂度呈指数级增长，对于由 20 到 30 个 1比特单元构成的中等规模可重构智能表面而言，该问题仍是 NP难问题 [13] 。虽然已有高效算法可用于确定 PIN二极管的状态，但这些算法主要针对无线通信，且依赖简单的模型。它们的主要设计目标是在特定位置实现数据速率，而非优化整体辐射方向图。因此，这些算法在设计阶段并未考虑可重构智能表面如何将信号反射到其他方向。必须认识到，即使是最高效的算法也可能无法

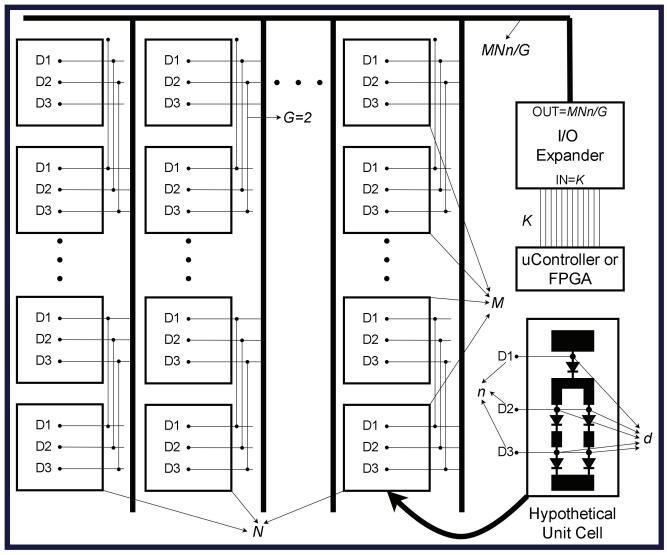


图4：可重构智能表面的控制电路、单元分组及用于寻址的输入/输出扩展。

成功——如果根据给定单元设计构建的有限尺寸可重构智能表面无法生成此前未经测试的特定辐射方向图。这些难点促使人们需要寻找有用的辐射方向图，以便将其作为基准来测试和比较各种设计的性能。

III. 可重构智能表面的控制与功耗要求

本节讨论采用不同单元设计的可重构智能表面的控制电路复杂度和功率需求。表 I 总结了可重构智能表面 S_1-S_5 的控制电路复杂度、功率需求及单位面积功耗要求。

A. 可重构智能表面上的物理与逻辑控制路径

每个单元都包含 PIN二极管，因此需要独立的控制信号。对于 n 位单元，需要 n 条独立控制线，并可生成 2^n 种不同相位。需要注意的是， n 位单元中的 PIN二极管总数可能超过 n；例如在 [15], 中，使用五个 PIN 二极管，仅通过两个控制信号即可产生四种不同的相移。控制信号由微控制器或现场可编程门阵列生成，这需要额外的接口电路。不过，这些控制器的引脚数量有限，可能不足以同时控制大型可重构智能表面上的所有单元。为解决这一问题，通常采用时分复用，这种控制架构称为有源矩阵架构或输入/输出扩展 [19]。

与变容二极管相比，由PIN二极管构成的控制电路更简单，数字高、低状态便足以实现其开/关控制 [20]。此外，PIN二极管的正向偏置电压要低得多（0.7V–0.8V），但正向偏置电流为毫安级。相反，变容二极管的工作电压显著高于PIN二极管的数字高电平，但需要 μA 或在采用相同工艺制造时，电流更低 [21]。因此，变容二极管通常比PIN二极管功耗更低。尽管如此，PIN二极管因控制简单而更受青睐。

可重构智能表面在不同功能之间切换的速率（我们称之为可重构智能表面功能切换）直接取决于控制电路的速度。在快速变化的无线信道中，可重构智能表面的功能切换也必须足够快。然而，可重构智能表面上的单元数量会影响信道感知开销和控制电路的复杂度。单元数量较少意味着信道感知开销较低、控制电路较简单，但可能会影响可重构智能表面生成复杂辐射方向图的能力 [5]。为降低信道感知开销和控制电路复杂度，可以将单元分组并同时控制。这也会对可重构智能表面的辐射方向图生成能力和整体功能产生负面影响。为研究单元分组对 RIS S1-S5 性能的影响程度，有必要使用下一节讨论的基准测试框架和性能指标量化这些权衡。

借助图4，我们展示了单元分组的概念，并区分物理控制路径与逻辑控制路径。图中展示了由两个单元组成的分组，每个单元包含三个 PIN二极管，分别标记为 D1、D2 和 D3，并置于一个矩形框内。该可重构智能表面包含 MN 个单元，可用作控制的微控制器引脚有 K 个，其中 $K < MN$。 K个引脚向前 K 个单元或单元分组同时发送控制信号，其余单元或分组则被禁用。随后，启用接下来的 K 个单元或单元分组，并由相同的 K 个引脚提供新的控制信号。该过程持续进行，直至所有单元或单元分组均被寻址，从而形成逻辑上相互分离的控制路径。值得注意的是，增加并行工作的控制器数量会提高整体设计成本，但也能增加控制引脚总数。

物理控制电路路径的数量可以表示为 $\frac{MNn}{G}$，其中 MN 是单元的总数， G 是每组中的单元数。通过增大单元组的规模，我们可以显著降低控制电路的复杂度。RIS 功能切换速率的量级可量化为 $O\left(\frac{GK}{MNn\tau}\right)$，其中 τ 表示控制路径中最慢元件的响应时间。例如，如果我们考虑一个由 2比特单元组成的 RIS，其 $G = 2$、 $M = N = 40$、 $K = 40$ 和 $\tau = 20$ 纳秒，则功能切换速率将为 1.25 MHz，使 RIS 能够在约 0.8μ 秒内将一个辐射方向图切换为另一个。在 1 GHz 至 30 GHz 的频率范围内，典型的无线信道相干时间从几百 μ 秒到几 μ 秒不等，这意味着 RIS 可以快速适应不断变化的信道条件。此外，包括 SMP1340 在内的若干 PIN二极管可以以 GHz 级切换速率运行，这可以使 RIS功能切换更快。然而，实际切换速率将取决于多个因素，例如信道感知开销和切换电路的功率需求。我们还可以观察到一种权衡，即

物理上独立的控制电路路径数量和功能切换速率。

B. RIS控制电路的功率需求

PIN二极管处于导通状态时的功耗取决于其正向压降和正向工作电流。单个PIN二极管的功耗相对较低，通常约为7-8mW [20]，但当多个含有多个PIN二极管的单元组合起来构成大型表面时，功耗就会变得显著。要确定实现各种功能所需正向偏置的单元平均占比颇具挑战。不过，我们知道，可重构智能表面的功率需求与其表面上的PIN二极管数量成正比。比例常数为处于导通状态的PIN二极管数量与PIN二极管总数之比。为简化分析并便于比较，我们假设该比例常数等于 1[1]。

由 MN 个单元组成的可重构智能表面的最大功率需求为 $dMNP_D$，其中 P_D 是一个PIN二极管在正向偏置（导通状态）时消耗的功率。显然， $d > n$ 的单元配置不如 $d = n$ 高效。此外，随着每个单元的 n 增加，功率需求也会随之增加。单元分组对功耗的影响取决于各组的二极管状态。例如，对于1比特单元设计，组内所有单元在收到导通信号时都会处于导通状态；收到关断信号时则都会处于关断状态。平均而言，最大功率需求仍将保持不变。不过，分组可以简化控制电路，因为组内所有单元都将根据同一个控制信号处于相同状态。

为由数百个工作在极高频率下的单元组成的可重构智能表面持续供电，可能是一项挑战。可重构智能表面单位面积的功耗（W/m^2）是一个需要考虑的关键因素。在表 I 中，我们计算了可重构智能表面 S_1-S_5，的这些供电需求，假设各单元以半波长间距均匀排列。表中还列出了单元尺寸和设计频率。例如，可重构智能表面-S_1 工作在 11.1 GHz，其单位面积功耗为 44W/m^2。假设我们希望使用在日照时段能产生 100-200W/m^2 的太阳能板。在此假设下，为可重构智能表面-S_1 供电所需的太阳能板尺寸小于可重构智能表面的尺寸。然而，当考虑更高频率（高于 30 GHz）时，这些情况很快就会发生变化，因为单元尺寸会变小，为由此形成的可重构智能表面供电所需的太阳能板尺寸将大于可重构智能表面本身的尺寸。

IV. 基准测试框架——RIS 辐射方向图与性能指标

在非视距情况占主导的智慧城市环境中，我们期望可重构智能表面具备三项重要功能。

[1]实际上，比例常数应小于 1，因为只有一部分二极管会处于导通状态（ON），以产生典型的辐射方向图。

这些分别是单波束扫描、具有相等功率水平的多波束形成，以及具有不同功率水平的多波束形成。在下一小节中，我们提出一种灵活的基准框架，用于测试由不同单元设计构成的可重构智能表面的这些波束成形能力，并采用点源/平面波源假设（情况1和情形 2）。

A. 基准辐射方向图

作为基准，我们基于非视距场景确定了一组典型辐射方向图。该组包括八种辐射方向图，如图5第一列所示。这些辐射方向图标记为 B_1-B_8 ，以供引用。辐射方向图 B_1 和 B_2 用于测试可重构智能表面在单一方向上的波束扫描能力。辐射方向图 B_3 （2 个波束）、B_4 （3 个波束）、B_5 （4 个波束）、B_6 （4 个波束）和 B_7 （8 个波束）用于测试等功率多波束成形能力。辐射方向图 B_8 用于测试多个不等功率波束（4 个波束）的形成。图5展示了这些辐射方向图中各波束的相对角度。在后续讨论中，这些方向图称为基准方向图。基准方向图中的显著波束称为主瓣。所有基准方向图中的旁瓣都应可忽略不计。在本研究中，假定入射电磁波的极化和工作频率与原论文中各单元的设计假设相匹配。我们提出的框架具有灵活性，可根据应用场景将更多辐射方向图纳入基准集合。

B. 性能指标

我们关注如何量化不同可重构智能表面（RIS）再现基准方向图的相对能力。为此，需要采用能够比较两个辐射方向图的适当指标。在本文讨论中，我们将使用“实现的辐射方向图”和“参考辐射方向图”这两个术语，其中，实现的辐射方向图是指可重构智能表面针对给定参考辐射方向图所产生的方向图。我们提出三种性能指标。第一种是指向性误差（DE），用于衡量可重构智能表面再现参考辐射方向图主瓣的能力。第二种是归一化均方误差（NMSE），用于量化所有方向上实现的辐射方向图与参考辐射方向图之间的累积均方误差。第三种是旁瓣比（SLR），用于量化主瓣与旁瓣之比，其中主瓣的位置由参考辐射方向图确定。请注意，我们的指向性误差、归一化均方误差和旁瓣比均为比较指标，即用于检验实现的辐射方向图与参考辐射方向图的匹配程度。下文将进一步介绍这些指标。

方向性误差（DE）：我们按如下方式定义方向性误差：

$$\mathrm{DE} = \frac{D_r - D_a}{D_r}. \tag{3}$$

表 I：RIS S_1-S_5 的控制电路复杂度和最大功率需求，每个由 MN 个单元构成。 P_D =8mW。

RIS	n	d	可重构智能表面控制电路复杂度		可重构智能表面的最大功率需求					
			可重构智能表面物理原理 控制电路路径	RIS功能切换 **Rate**	RIS总计功率 ($dMNP_D$)	单元尺寸 **(mm)**	**Unit Cell Area** $\times 10^{-4}$ **(m^2)**	反射系数 法向入射角处 (幅度∠相位°)	f (GHz)	**RIS** 功率 **Per Unit Area** (W/m^2)
S_1 [13]	1	1	MN/G	$GK/(MN\tau)$	MNP_D	5.8 × 4.9	1.82	0.95∠$_1$0°, 0.92∠$_2$180°	11.1	44
S_2 [14]	1	1	MN/G	$GK/(MN\tau)$	MNP_D	6 × 6	2.89	0.90∠$_1$0°, 0.88∠$_2$180°	8.82	27.7
S_3 [15]	2	5	$2MN/G$	$GK/(2MN\tau)$	$5MNP_D$	50 × 50	42.3	0.95∠$_1$0°, 0.95∠$_2$90°, 0.98∠$_3$180°, 0.92∠$_4$270°	2.3	9.46
S_4 [16]	2	2	$2MN/G$	$GK/(2MN\tau)$	$2MNP_D$	8.8 × 8.8	2.72	0.88∠$_1$0°, 0.85∠$_2$90°, 0.92∠$_3$180°, 0.90∠$_4$270°	9.08	58.8
S_5 [14]	1	1	MN/G	$GK/(MN\tau)$	MNP_D	6 × 6	6.25	0.92∠$_1$0°, 0.94∠$_2$50°	6.00	12.8

其中， D_r 是参考方向性系数值，通过对参考辐射方向图中主瓣波束宽度范围内的功率（电场的平方）进行积分得出；D_a 是实现的方向性系数值，通过对实现的辐射方向图中、由参考辐射方向图主瓣波束宽度确定的起始角和终止角范围内的功率进行积分得出。我们采用第一零点波束宽度（FNBW）准则计算主瓣的波束宽度。请注意，在 D_r 和 D_a两种情况下，均使用参考辐射方向图主瓣的起始角和终止角，因为目标是重现参考方向图的主瓣。由于采用了 D_r进行归一化，方向性误差通常应为正值，最大为 1。方向效率值为 1 表示主瓣未形成在预期方向上，而是指向完全不同的方向（性能较差）。方向性误差为负值则意味着实现的辐射方向图优于目标辐射方向图（如果未将基准方向图用作参考辐射方向图，则可能出现这种情况）。

归一化均方误差：归一化均方误差的计算公式如下：

$$\text{NMSE} = \frac{1}{L}\sum_{\theta,\phi}\left(\frac{E_r(\theta,\phi)}{E_{rmax}} - \frac{E_a(\theta,\phi)}{E_{amax}}\right)^2 \tag{4}$$

其中， $E_r(\theta,\phi)$是参考辐射方向图的电场值， $E_a(\theta,\phi)$是方位角和仰角 θ 及 ϕ处实现的辐射方向图的电场值。我们分别用各辐射方向图对应的最大值对电场值进行归一化，即参考辐射方向图的电场值除以 E_{rmax} ，实现的辐射方向图的电场值除以 E_{amax} 。然后，我们对所有方向上归一化电场值之差的平方取平均，得到归一化均方误差。在仿真中，我们使用 $L = 180 \times 360$。

旁瓣比（SLR）：旁瓣比以分贝尺度计算：

$$\text{SLR} = 10\log_{10}\frac{\text{Power density of intended lobe}}{\text{Power density of side lobe}} \tag{5}$$

请注意，我们根据参考辐射方向图确定目标波瓣的位置（起始角和终止角）。在这些角度处，我们查找实现的辐射方向图中的功率密度。另一方面，我们仅根据可重构智能表面的实现辐射方向图确定旁瓣，并将其定义为最突出的非目标次级波瓣。我们使用“目标”一词，是因为这些指标旨在衡量参考辐射方向图的复现忠实度。在我们的数据集中，还有一些多波束（B_3 –B_8）参考辐射方向图。对于此类方向图，我们按照公式（5）分别计算每个目标波束的旁瓣比，然后报告其平均值。

我们所选取的基准方向图是理想的，非预期波瓣可以忽略不计。由1比特或2比特单元构成的任何尺寸合适的可重构智能表面，都难以忠实地再现这些方向图。因此，将基准方向图作为计算定量指标时的参考辐射方向图，并不能有效分析S_1-S_5的相对性能。为避免这一问题，我们可以选取合适的单元，然后构建一个参考可重构智能表面。我们将这种参考可重构智能表面称为S_0。我们可以根据S_0产生的辐射方向图计算定量指标。请注意，在计算性能指标时，主瓣的起始角和终止角始终采用基准方向图中给出的角度，即使使用参考可重构智能表面方法也是如此。采用这种方法，指向性误差也可能为负，这表示与S_0相比，给定的可重构智能表面在基准方向图所示的预期方向上产生波束的性能更好。

为了在下一节中量化性能，我们将考虑一个参考2比特单元，其归一化功率方向图 $f(\theta)$ 为 $\cos(\theta)$ [22], [23]。该响应在图3中以 $q = 1$ 曲线绘出。我们假设该单元经过完美优化，具有 $\Gamma = 1$ ，且任意两个连续二极管状态之间的相位差为 90°。由这一参考单元构成的可重构智能表面称为 S_0，我们将用它来评估性能指标。

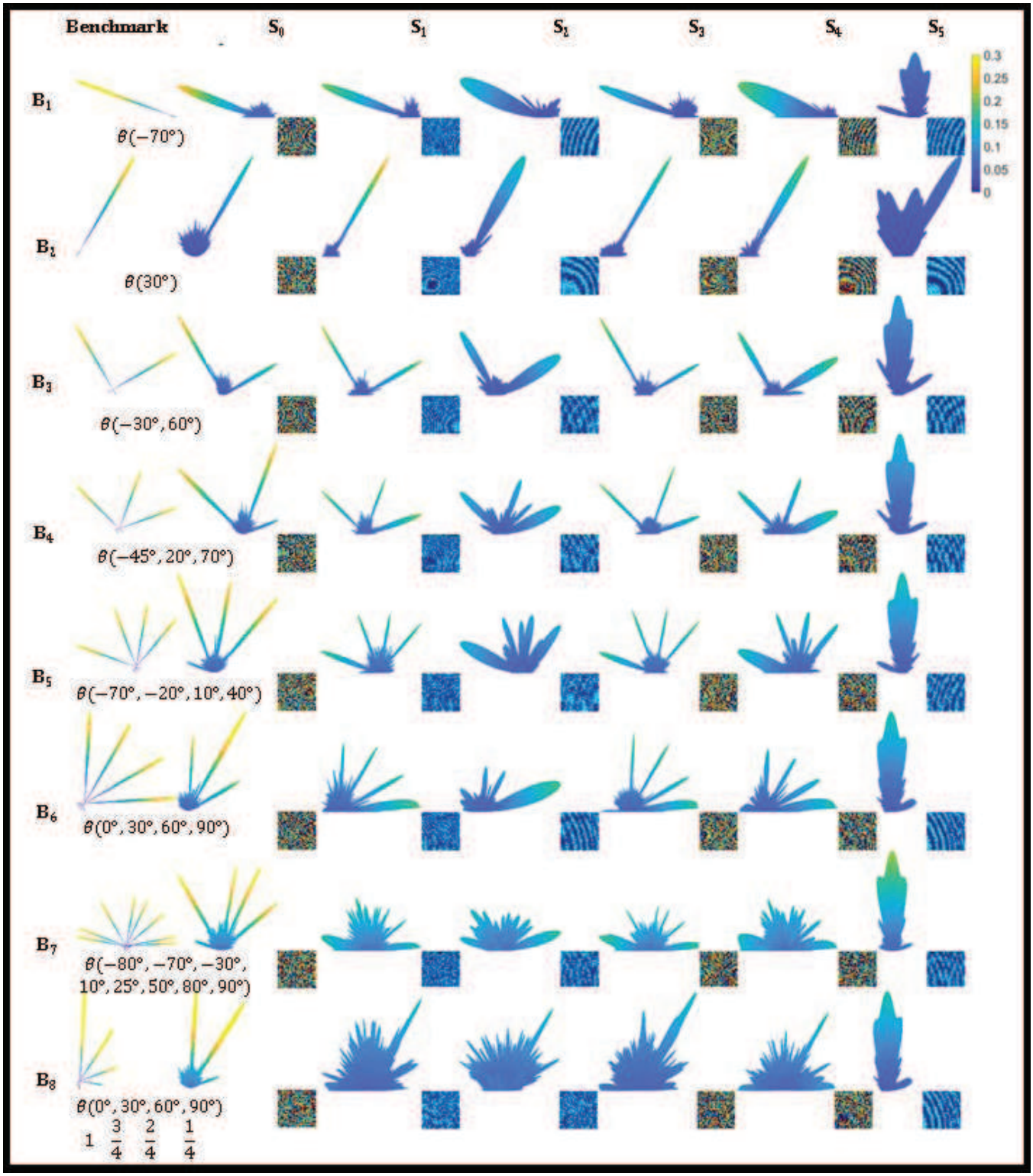


图5：基准辐射方向图 B_1-B_8 以及在点源假设（情况1）下、未进行单元分组时由可重构智能表面 S_1-S_5 获得的辐射方向图。图中也展示了参考可重构智能表面 S_0 的结果。可重构智能表面配置矩阵（40×40）也以彩色图像形式呈现（单元状态 1=蓝色、 2=青色、 3=黄色、 4=红色）。仰角标示波束方向（θ，范围介于 0° 和 90°之间），方位角（ϕ，仅取两个值 0° 和 180°）。为避免重复这两个 ϕ 值，采用了 θ 和 $-\theta$ （$-\theta=\theta_{\phi=180^\circ}$）。

表 II：在点源假设下且观测者位于远场时，五种可重构智能表面 S_1 –S_5, 在有无单元分组情况下的定量结果（情况1）。最优值（指向性误差和归一化均方误差取最小值，旁瓣比取最大值）以粗体标出；最差值（指向性误差和归一化均方误差取最大值，旁瓣比取最小值）以斜体标出。

ID	分组	相对指向性误差（指向性误差）					相对归一化均方误差（归一化均方误差）					旁瓣比（SLR）- 分贝				
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
B_1	No	0.5	0.39	**0.16**	*1*	0.94	0.1004	*0.1248*	0.091	0.1131	**0.0889**	11.58	9.02	8.69	**12.62**	*-1.11*
B_2		0.3	0.54	0.7	**0.24**	*0.82*	**0.0284**	0.0459	0.0381	0.0311	*0.0516*	9.96	11.01	8.86	**11.62**	*6.27*
B_3		0.22	0.29	0.47	**0.18**	*0.91*	**0.0757**	0.0774	*0.0919*	0.0852	0.0808	8.14	8.35	**8.86**	8.58	*-0.55*
B_4		**0.14**	**0.14**	0.19	0.16	*1*	0.1277	0.1382	0.1288	**0.1143**	*0.1412*	**9.21**	2.63	7.34	9.17	*-2.79*
B_5		0.07	0.39	**0.01**	0.04	*1*	0.1467	0.1569	**0.1414**	0.1427	*0.1812*	5.19	1.77	**5.65**	4.24	*-2.54*
B_6		0.15	0.53	**0.07**	0.26	*1*	0.137	0.1659	**0.1339**	0.1359	*0.1826*	5.16	**5.78**	3.63	3.41	*-0.71*
B_7		**0.16**	0.32	**0.16**	0.22	*1*	**0.1995**	0.2358	0.2136	0.2255	*0.305*	-0.65	-1.73	-0.26	**0.91**	*-7.26*
B_8		0.06	0.42	**0.01**	0.24	*0.79*	0.1634	0.1547	0.1623	**0.143**	*0.1657*	*-4.44*	-4.41	**2.22**	-3.96	-0.71
B_1	Yes	0.41	0.2	*1*	**0.14**	0.83	0.1071	*0.1139*	0.0961	**0.0952**	0.101	**10.09**	4.83	-9.79	9.67	*-14.68*
B_2		*1*	**0.67**	*1*	0.8	0.8	0.0627	0.059	*0.0722*	**0.0528**	0.0568	6.78	2.87	-2	**7.73**	*-7.72*
B_3		0.78	**0.49**	*1*	0.65	0.85	0.0847	**0.0813**	*0.1005*	0.0953	0.0896	3.54	3.18	-4.35	**7.32**	*-11.82*
B_4		0.97	0.74	*1*	0.73	**0.69**	0.1443	0.1296	0.1298	**0.1082**	*0.1582*	0.26	0.68	-1.19	**3.29**	*-12.43*
B_5		0.97	0.74	*1*	**0.7**	*1*	0.158	0.16	**0.1522**	0.1552	*0.1982*	**0.93**	-1.69	-6.41	0.07	*-13.54*
B_6		0.8	0.71	*1*	0.64	**0.26**	0.1606	0.1673	**0.145**	0.1525	*0.1836*	0.34	-2.08	-3.27	**3.21**	*-4.23*
B_7		*1*	**0.14**	*1*	0.56	0.7	0.2252	**0.2116**	0.2135	0.2137	*0.3168*	**-2.33**	-3.48	-3.89	-4.42	*-12.38*
B_8		0.93	**0.61**	*1*	0.63	*1*	0.1928	0.1871	*0.2205*	**0.1628**	0.1822	*-7.62*	-3.92	**-1.25**	-5.22	-0.77

V. 基于基准的评估结果

在本节中，我们测试可重构智能表面 S_1-S_5 重现 B_1-B_8的能力。参考可重构智能表面 S_0 也用于重现相同的基准方向图。每个可重构智能表面（包括 S_0）均包含 40x40（1600）个单元。我们使用商用全波电磁求解器（CST）进行单元格仿真，以获取其辐射响应。我们采用 Skyworks S MP1340-040LF PIN二极管的集总元件模型（散射参数）。我们使用来自 CST 的单元数据和阵列因子近似，在点源/平面波源假设下仿真可重构智能表面的辐射方向图。使用 MATLAB 实现的遗传算法（GA）确定每个可重构智能表面上各单元的最优配置（二极管开/关状态），以生成基准方向图。具有离散相位控制的有限尺寸可重构智能表面可能无法精确生成所需的辐射方向图。因此，在我们的仿真中，我们允许 GA 在运行 350 个迭代代数后停止，因为我们观察到，即使允许运行更长时间，结果也不会有显著改善。GA 停止后，我们选取最佳匹配结果。我们使用 S_0 生成的方向图作为参考辐射方向图，以计算指向性误差、归一化均方误差和旁瓣比指标。

A. 情况1：点源

点源假设下的定性和定量结果如图5和表 II 所示。表 II 给出了单元分组对降低控制电路复杂度的影响。

1）未进行单元分组时的性能：图5展示了各个可重构智能表面在单独控制各单元时所重现的辐射方向图质量的可视化结果。图中还绘出了 S_0 的性能。可重构智能表面 - S_1：B_1-B_6 的可视化效果出色，而 B_7 和 B_8 的效果较差。B_6, B_7 和 B_8 中存在少量不理想的主瓣以及几个功率较高的旁瓣，尤其是在 B_8中。不过，B_8 的指向性误差值非常小。各案例中指向性误差、归一化均方误差和旁瓣比的对应数值均为最优或非常接近最优，这印证了辐射方向图质量出色的观察结果。

RIS - S_2：S_2 产生的辐射方向图在视觉效果上似乎不如S_1 产生的方向图。从表 II 可以看出，在几乎所有基准下，DE（B_1除外）和SLR（B_6, B_8除外）的数值都比S_1 差。从表 I 可以看出，S_1 和S_2 的控制电路复杂度及功率需求相同。因此，在不进行单元分组的点源假设下，在几乎所有性能指标方面，S_1 都优于S_2 ，是优化的1比特可重构智能表面中更好的选择。

RIS - S_3：S_3产生的B_1-B_6 在视觉效果上与S_1 相似，并且在更复杂的基准下表现更好。此外，B_6-B_8 的质量看起来明显优于S_1 和S_2。在若干基准方向图下，定量指标也更好。从表 I 可以看出，S_3 的控制电路复杂度是S_1 和S_2的两倍，而其功能切换速率是两者的一半。由于S_3 专为S波段工作而设计，其单位面积功耗要求明显低于S_1 和S_2。然而，S_3 的总功率需求在所有可重构智能表面中最高，因为每个单元有5个PIN二极管。

RIS - S_4：由 B_2-B_6 生成的视觉质量与 S_4 生成的视觉质量类似于 S_1, S_2 和 S_3。B_1-B_8 的质量看起来比 S_3 和 S_1 差，但优于 S_2。我们注意到，指向性误差并不明显较差，但由于旁瓣和散射较高，性能实际上有所下降。S_4 的控制电路复杂度和功率需求是 S_1 和 S_2的两倍。不过，该可重构智能表面每个单元仅使用 2 个 PIN二极管，与 S_3相比显著降低了功率需求。

可重构智能表面 - S_5：该表面由未经优化的1比特单元组成。在所有基准上的视觉效果都不如

其他所有可重构智能表面。不过，在B_2, 上可以看到主瓣；其中一个位于期望方向，另有两个高功率旁瓣。B_1-B_8 上的视觉效果较差，因为目标方向图与S_5, 产生的方向图之间没有相关性，也就是说，S_5 除了非常小角度的简单情况外，无法进行波束扫描。S_5 的控制电路复杂度和功率需求与S_1 和S_2相近。

在不进行单元分组的情况下，基于点源假设重现 B_1-B_8 时，S_3 的整体性能最佳，其次是 S_1，、S_4，、S_2 和 S_5。综合考虑控制电路复杂度、功率需求以及指向性误差、归一化均方误差和旁瓣比，S_1 似乎是更好的选择。然而，在主要需要 B_6-B_8 的应用场景中，尽管 S_3 复杂度和功率需求较高，仍应优先选择它。最后，如果应用场景只要求小角度波束扫描（例如 B_2），我们也可以采用 S_5或其略经优化的版本。

2）单元分组时的性能：现在我们考虑可重构智能表面 S_1-S_5 ，并假设单元两两分组。这样一来，可重构智能表面的复杂度和感知开销都会减半。然而，最大功率需求保持不变。单元分组对可重构智能表面生成基准方向图能力的影响，已在表 II 下半部分进行了量化。可以看出，所有设计的各项指标表现都较差。不过，单元分组对各设计性能的影响程度并不相同。

当单元成对控制时，S_2 的性能最佳，其次是 S_4, S_1, S_5 和 S_3。请注意，方向效率值为 1 表示表面未能在预期方向上产生主波束。观察发现，性能较差且未进行分组的表面（S_2, S_4, S_5）受单元分组的影响最小。即使通过增加单独控制的单元数量来进一步增大可重构智能表面尺寸，其性能提升也应当有限。另一方面，随着可重构智能表面尺寸相应增大，S_1 和 S_3 的性能提升应会显著增加。同时，波束扫描角的选择以及波束功率等级的变化，可能会显著提高可重构智能表面设计人员所需满足的性能指标，这一点在 B_8情形中可见。

B. 情形 2：平面波源

平面波源假设下的定性和定量结果见图 6 和表 III。在这种情况下，单元控制状态的数量会对性能产生重大影响。

1）无单元分组时的性能：无单元分组时的定性结果如图 6 所示，相应的定量结果列于表 III 的上半部分。

RIS - S_1：我们可以观察到，RIS 能够重现主瓣，但 S_1 产生的每个辐射方向图中都存在非预期旁瓣。这些旁瓣称为“量化旁瓣”。由于相位舍入量化效应更加显著，它们通常出现在由 1比特单元构成的 RIS 中 [24], [25]。RIS 能够重现 the

主瓣；因此，在八个基准方向图中的四个（B_1-B_3, B_5）中，DE值非常好，但与同一测试中针对可重构智能表面 S_4获得的最佳归一化均方误差相比，归一化均方误差非常差。S_1 的旁瓣电平在某些情况下接近 0 或为负，表明散射电平接近主瓣。

RIS - S_2：该1比特RIS同样会产生量化旁瓣。可以观察到，与 S_1 相比，主瓣更宽。在定量指标方面，除 B_6，外，S_2 的总体性能较差，并且在所有测试中，归一化均方误差都与 S_1 非常接近。旁瓣接近主瓣，甚至其幅度大于主瓣，因此旁瓣比值接近 0 或为负值。

RIS - S_3：S_3 产生的辐射方向图中没有量化旁瓣。主瓣看起来也较窄且集中。然而，该可重构智能表面无法在预期方向上形成主瓣。基准和实现的辐射方向图中主瓣的起始角和终止角彼此非常接近，但由于 S_3 形成的波束较窄，二者并未重叠。因此，指向性误差和旁瓣比值都极差，因为尽管波束扫描效果明显，但扫描方向并非预期方向。另一方面，归一化均方误差相对较好，并且在两种情况下（B_2 和 B_3）排名第二。

RIS - S_4：S_4 产生的辐射方向图在视觉上也很理想，而且没有出现量化旁瓣。S_4 在所有基准测试中的整体表现都明显更好。该可重构智能表面能够产生旁瓣电平较低的主瓣。此外，与S_3 相比，主瓣更宽，且基准方向图与实现的辐射方向图中的主瓣起始角和终止角相吻合。因此，在平面波源假设下的多个基准测试中，其DE值优于S_3，但相对逊于 S_1 。然而，在所有基准测试中，其归一化均方误差和旁瓣比的数值都显著优于S_1 和S_3（通常是最优的）。

RIS - S_5：该可重构智能表面采用未经优化的1比特单元，很明显，它在几乎所有基准方向图中都表现不佳。由于在平面波源假设下缺乏波束扫描能力，其视觉效果最差。S_5 的量化结果在所有基准方向图中也最差。在B_7, 中，指向性误差接近0，但归一化均方误差和旁瓣比仍然最差。指向性误差数值较好，是因为B_7 包含八个波束，较强的散射至少能够满足部分预期方向的要求。不过，考虑到非预期方向上的误差时，从归一化均方误差和旁瓣比数值可以看出其表现仍然不佳。B_8 的情况也相同：旁瓣比表现较好，但另外两个指标最差。

2）单元分组时的性能：将单元两两分组后，在平面波源假设下，所有可重构智能表面的性能都会进一步下降。如表 III 下半部分所示，由 1比特单元组成的可重构智能表面 S_1 和 S_2 ，与由 2比特单元组成的可重构智能表面 S_3 和 S_4 相比，在所有指标上的性能均有所下降。可重构智能表面 S_5 的性能仍然最差。1比特单元与 2比特单元之间的区别，以及单元辐射响应的影响，在决定可重构智能表面

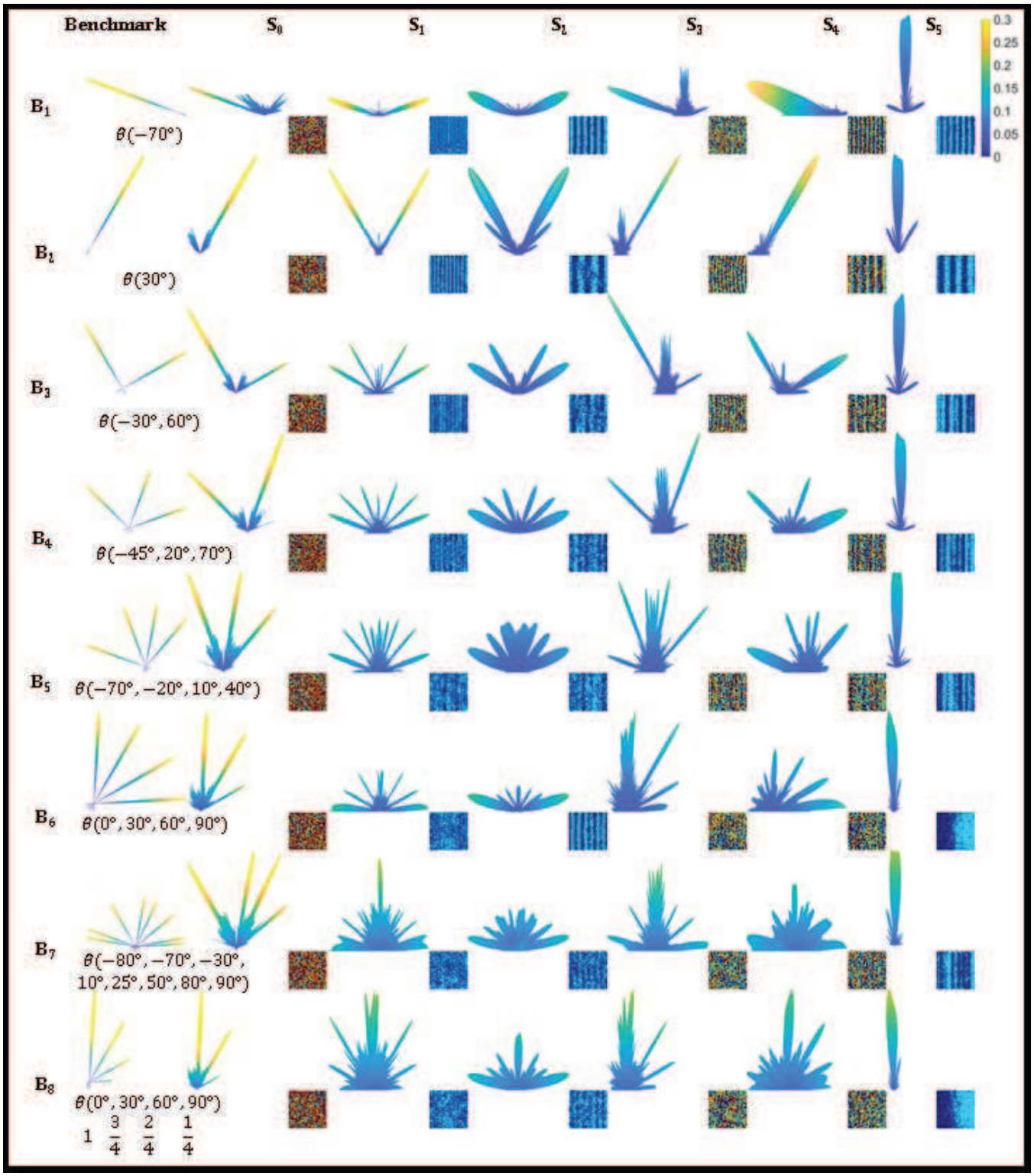


图 6：基准辐射方向图 B_1-B_8，以及在平面波源假设（情形 2）下未进行单元分组时由可重构智能表面 S_1-S_5 获得的辐射方向图。图中还显示了参考可重构智能表面 S_0 的结果。可重构智能表面配置矩阵（40×40）也以彩色图像呈现（单元状态 1=蓝色、 2=青色、 3=黄色、 4=红色）。仰角标识波束方向（θ，范围为 0° 至 90°），方位角（ϕ，仅取两个值： 0° 和 180°）则标识方位角度。为避免重复这两个 ϕ 值，使用 θ 和 $-\theta$ （$-\theta=\theta_{\phi=180°}$）。

表 III：在平面波源假设下、观测者位于远场时，五种 RIS S_1 –S_5，在采用和未采用单元分组情况下的定量结果（情形 2）。最佳值（对于指向性误差和归一化均方误差为最小值，对于旁瓣比为最大值）以粗体标示，最差值（对于指向性误差和归一化均方误差为最大值，对于旁瓣比为最小值）以斜体标示。

ID	分组	相对指向性误差（指向性误差）					相对归一化均方误差（归一化均方误差）					旁瓣比（旁瓣比）- 分贝				
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
B_1	No	**-0.13**	0.73	*1*	0.15	*1*	*0.0166*	0.0138	0.014	**0.0102**	0.0158	0.04	0.17	-8.51	**14.14**	*-14.03*
B_2		**0.12**	0.93	0.99	0.55	*1*	*0.01*	0.0092	0.0082	**0.0049**	0.0097	-0.03	0.05	-3.28	**10.2**	*-8.82*
B_3		**0.61**	0.89	0.98	0.8	*1*	0.0119	0.0112	0.0113	**0.0074**	*0.0129*	-0.09	0.02	-8.34	**6**	*-12.97*
B_4		0.78	0.91	*0.99*	**0.76**	*0.99*	0.0117	0.0116	0.0121	**0.0083**	*0.0141*	-0.17	-0.49	-9.84	**5.7**	*-16.3*
B_5		**0.86**	0.92	*0.93*	0.88	0.87	0.0139	0.0142	0.0158	**0.0112**	*0.0184*	-0.14	-3.38	-11.79	**0.98**	*-15.62*
B_6		0.6	**0.52**	0.84	0.75	*0.88*	0.0141	*0.0171*	0.0119	**0.0079**	0.0154	-1.58	-3.19	*-8.15*	**2.39**	-6.49
B_7		0.97	0.97	0.92	*0.98*	**-0.05**	0.0185	0.0184	0.0237	**0.018**	*0.0259*	-5.68	**-3.29**	-16.15	-4.74	*-20.78*
B_8		*1*	*1*	*1*	**0.99**	*1*	0.0131	0.0131	0.0148	**0.012**	*0.0171*	-4.72	3.58	-1.25	*-6.15*	**5.04**
B_1	Yes	0.16	0.74	*1*	**0.14**	0.98	0.1988	**0.1553**	*0.3117*	0.1762	0.2235	-0.19	-0.264	-1.958	**2.704**	*-3.088*
B_2		**0.13**	*1*	*1*	0.52	*1*	*0.2335*	0.1829	0.1096	**0.0317**	0.1279	-0.172	-0.276	-0.94	**1.936**	*-1.918*
B_3		**0.82**	*1*	*1*	*1*	*1*	0.1773	*0.2782*	0.2049	**0.0996**	0.2776	-0.308	-0.162	-1.926	**1.098**	*-2.77*
B_4		*1*	0.95	*1*	**0.85**	*1*	0.2178	**0.0701**	0.0887	0.1299	*0.3023*	-0.15	-0.266	-2.154	**0.918**	*-3.474*
B_5		*1*	*1*	0.99	*1*	**0.81**	0.1942	*0.2579*	0.2359	0.1888	**0.1287**	-0.292	-0.848	-2.578	**-0.018**	*-3.288*
B_6		0.72	**0.69**	*1*	0.87	0.96	0.2251	*0.3974*	0.1984	**0.0493**	0.129	-0.524	-0.738	*-1.734*	**0.232**	-1.404
B_7		0.94	*1*	*1*	0.94	**0.09**	0.2183	*0.3955*	**0.1911**	0.2659	0.3232	-1.328	**-0.926**	-3.334	-1.164	*-4.384*
B_8		*1*	**0.98**	*1*	*1*	*1*	**0.0649**	0.1213	0.2442	0.1574	*0.3597*	-1.236	0.424	-0.368	*-1.43*	**0.88**

平面波源假设下的波束扫描能力。就使不同控制状态下产生的相移尽可能分离而言，对单元进行优化对于获得良好性能也变得至关重要。

C. 讨论与比较

在图7中，我们展示了 S_1 （1比特单元）在点源/平面波源假设下，以及分别采用或不采用单元分组时，再现基准方向图 B_4 所生成辐射方向图的视觉质量。可以看出，在不进行分组的点源假设下，结果最佳，这意味着可重构智能表面上的全部1600个1比特单元均拥有独立控制。另一方面，在点源假设下，若对单元进行成对控制，表面再现给定方向图的能力会严重下降，功率显著散射到各个方向。在平面波源假设下且不进行单元分组时，除所有期望的主瓣外，还能看到量化旁瓣。为降低控制电路开销而将单元成对分组时，平面波源假设下的性能会下降。

在图8中，我们展示了 S_3 （2比特单元）在点源/平面波源假设下，以及成对进行/不进行单元分组时，再现基准方向图 B_4 所产生的辐射方向图的视觉质量。在点源假设下且不进行单元分组时，可以看到三条波束。在这种情况下，与 S_1生成的辐射方向图相比，非预期方向上的散射电平相对较低。当我们将单元成对分组时，在点源假设下性能显著下降，其表现变得同样糟糕，这一点可从 S_1中观察到。在平面波源假设下且不进行单元分组时，S_3 的性能与点源情况下相当，可以看到三条主瓣中的两条。与 S_1, 不同，此时没有量化旁瓣。

最后，在进行分组并采用平面波源假设时，S_3失去波束扫描能力，无法形成任何主要主瓣。

这些结果清楚地表明，单元设计、为降低控制电路复杂度而进行的分组、每个单元的二极管控制状态数量、单元辐射响应、RIS控制电路的功率需求，以及可重构智能表面在点源/平面波源假设下生成辐射方向图的能力之间存在相互影响。我们的基准测试框架、指标及这些观察结果，有助于研究界在不同智慧城市应用场景中做出适当的设计选择和权衡，以实现期望的远场波束成形性能。

VI. 结论

我们详细分析了由多种单元设计构成的可重构智能表面的性能方面。我们开发了一套基准测试框架，其中纳入了智慧城市环境中常见的辐射方向图，并提出了性能指标，用于量化在点源/平面波源假设下，可重构智能表面生成辐射方向图的能力（相对于基准方向图）、控制电路复杂度和功率需求。利用该框架，我们测试并比较了五种由五种不同单元设计组成的可重构智能表面（S_1-S_5）。这些表面上的单元最初分别独立控制，随后以分组方式控制。对于各种应用场景和信号源类型假设，该框架有助于从现有设计中选择单元。我们还可以用该框架评估未来设计的实用性及其最适用的应用场景。借助所提出的框架，我们还可以确定最佳分组规模，在便于实施与降低信道感知开销之间实现最优权衡。深入理解单元级与表面级可重构智能表面设计之间的相互作用，有望带来更好的

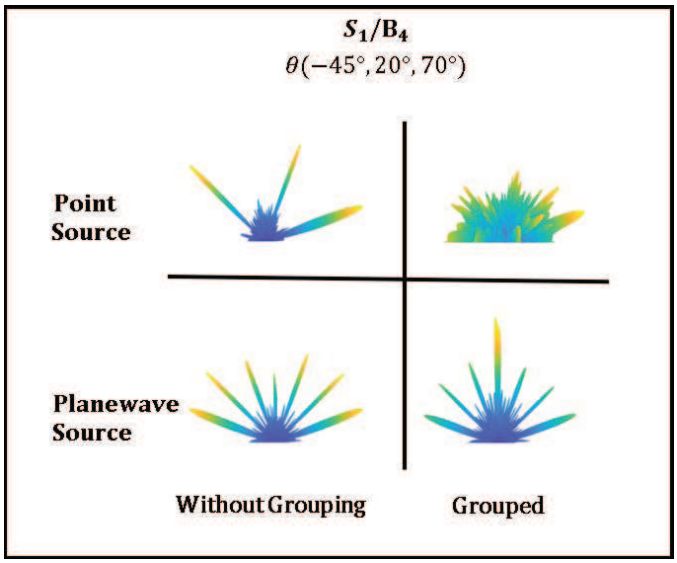


图7：在点源/平面波源假设下，采用或不采用成对单元分组时，S_1 （1比特单元）复现基准方向图 B_4 所生成的辐射方向图。

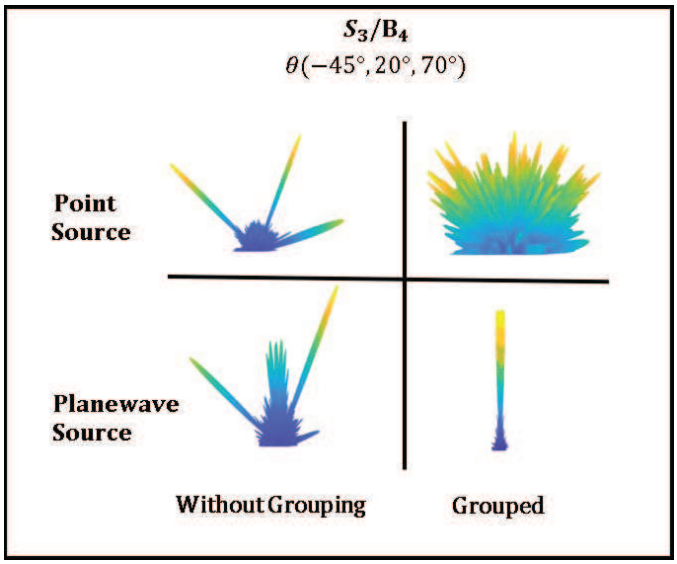


图8：在点源/平面波源假设下，采用或不采用成对单元分组时，S_3 （2比特单元）复现基准方向图 B_4 所生成的辐射方向图。

可重构智能表面辅助通信系统的系统级性能提升策略。

参考文献

[1] C. Huang、A. Zappone、G. C. Alexandropoulos、M. Debbah 和 C. Yuen，“用于提高无线通信能效的可重构智能表面”，IEEE《无线通信汇刊》，第18卷，第8期，第4157–4170页，2019年。[2] C. Huang、S. Hu、G. C. Alexandropoulos、A. Zappone、C. Yuen、R. Zhang、M. Di Renzo 和 M. Debbah，“面向6G无线网络的全息MIMO表面：机遇、挑战与趋势”，IEEE《无线通信》，第27卷，第5期，第118–125页，2020年。

[3] M. Di Renzo、A. Zappone、M. Debbah、M.-S. Alouini、C. Yuen、J. De Rosny 和 S. Tretyakov，《可重构智能表面赋能的智能无线电环境：工作原理、研究现状与未来发展方向》，IEEE Journal on Selected Areas in Communications，第 38 卷第 11 期，第 2450–2525 页，2020年。[4] X. G. Zhang、W. X. Jiang、H. L. Jiang、Q. Wang、H. W. Tian、L. Bai、Z. J. Luo、S. Sun、Y. Luo、C.-W. Qiu 等，《用于编程电磁功能的光驱动数字超表面》，《自然·电子学》，第 3 卷第 3 期，第 165–171 页，2020年。[5] H. Zhang、B. Di、L. Song 和 Z. Han，《有限相移下的可重构智能表面辅助通信：需要多少个相移才够？》，IEEE Transactions on Vehicular Technology，第 69 卷第 4 期，第 4498–4502 页，2020年。[6] 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 Transactions on Communications，2021年。[7] H. Zhang、N. Shlezinger、F. Guidi、D. Dardari、M. F. Imani 和 Y. C. Eldar，《面向近场多用户 MIMO 通信的波束聚焦》，IEEE Transactions on Wireless Communications，2022年。[8] C. A. Balanis，《天线理论：分析与设计》，第 4 版，John Wiley & Sons，2016年。[9] E. Bj¨ornson、¨ O. T. Demir 和 L. Sanguinetti，《阵列与可重构智能表面近场波束成形入门》，载于 2021 年第 55 届阿西洛马会议：信号、系统与计算机。IEEE，2021年，第 105–112 页。[10] X. Wei、L. Dai、Y. Zhao、G. Yu 和 X. Duan，《超大规模可重构智能表面的码本设计与波束训练：远场还是近场？》，《中国通信》，第 19 卷第 6 期，第 193–204 页，2022年。[11] G. Bartoli、A. Abrardo、N. Decarli、D. Dardari 和 M. Di Renzo，《可重构智能表面近场 MIMO 信道中的空间复用》，IET信号处理，第 17 卷，12195，2023年3月，第 e 页。[12] X. Cheng、Y. Lin、W. Shi、J. Li、C. Pan、F. Shu、Y. Wu 和 J. Wang，《IRS 辅助无线通信的全局优化：从物理学和电磁学视角出发》，arXiv 预印本 arXiv:2105.05618，2021年。[13] H. Yang、X. Cao、F. Yang、J. Gao、S. Xu、M. Li、X. Chen、Y. Zhao、Y. Zheng 和 S. Li，《具有动态极化、散射和聚焦控制功能的可编程超表面》，《科学报告》，第 6 卷第 1 期，第 1–11 页，2016年。[14] X. Wan、M. Q. Qi、T. Y. Chen 和 T. J. Cui，《基于数字控制编码超表面的现场可编程波束重构》，《科学报告》，第 6 卷第 1 期，第 1–8 页，2016年。[15] L. Dai、B. Wang、M. Wang、X. Yang、J. Tan、S. Bi、S. Xu、F. Yang、Z. Chen、M. Di Renzo 等，《基于可重构智能表面的无线通信：天线设计、原型开发与实验结果》，IEEE Access，第 8 卷，第 45 913–45 923 页，2020年。[16] Q. Ma、G. D. Bai、H. B. Jing、C. Yang、L. Li 和 T. J. Cui，《具有自适应可重编程功能的智能超表面》，《光：科学与应用》，第 8 卷第 1 期，第 1–12 页，2019年。[17] M. Di Renzo、A. Ahmed、A. Zappone、V. Galdi、G. Gradoni、M. Moccia 和 G. Castaldi，《数字可重构智能表面：现实再辐射模型的影响》，arXiv 预印本 arXiv:2205 09799，2022年。[18] M. Di Renzo、F. H. Danufane 和 S. Tretyakov，《可重构智能表面的通信模型：从表面电磁学到无线网络优化》，《IEEE会刊》，第 110 卷第 9 期，第 1164–1209 页，2022年。[19] H. Kamoda、T. Iwasaki、J. Tsumochi、T. Kuki 和 O. Hashimoto，《采用单比特移相器的 60 GHz 电子可重构大型反射阵》，IEEE Transactions on Antennas and Propagation，第 59 卷第 7 期，第 2524–2531 页，2011年。[20] J.-H. Lim、G.-T. Back、Y.-I. Ko、C.-W. Song 和 T.-Y. Yun，《采用可切换 PIN 二极管和微调变容二极管的可重构平面倒F天线，适用于 USPCS/宽带码分多址/移动WiMAX/无线局域网》，IEEE Transactions on Antennas and Propagation，第 58 卷第 7 期，第 2404–2411 页，2010年。[21] R. Fara、P. Ratajczak、D.-T. Phan-Huy、A. Ourir、M. Di Renzo 和 J. De Rosny，《反射相位连续可控的可重构智能表面原型》，IEEE Wireless Communications，第 29 卷第 1 期，第 70–77 页，2022年。[22] W. Tang、X. Chen、M. Z. Chen、J. Y. Dai、Y. Han、M. Di Renzo、S. Jin、Q. Cheng 和 T. J. Cui，《毫米波频段可重构智能表面的路径损耗建模与测量》，IEEE Transactions on Communications，第 70 卷第 9 期，第 6259–6276 页，2022年。[23] W. Tang、M. Z. Chen、X. Chen、J. Y. Dai、Y. Han、M. Di Renzo、Y. Zeng、S. Jin、Q. Cheng 和 T. J. Cui，《基于可重构智能表面的无线通信：

路径损耗建模与实验测量》，IEEE Transactions on Wireless Communications，第 20 卷第 1 期，第 421–439 页，2020年。[24] B. G. Kashyap、P. C. Theofanopoulos、Y. Cui 和 G. C. Trichopoulos，《缓解毫米波低比特可重构反射表面的量化旁瓣》，IEEE Open Journal of Antennas and Propagation，第 1 卷，第 604–614 页，2020年。[25] M. Smith 和 Y. Guo，《相控阵中随机化相位量化误差方法的比较》，IEEE Transactions on Antennas and Propagation，第 31 卷第 6 期，第 821–828 页，1983年。