本作品已提交至电气与电子工程师协会，拟供其　出版。版权可能在未另行通知的情况下转让，届时此版本可能不再可供访问

面向第六代移动通信的大规模多输入多输出技术趋势

Yiming Huo，电气与电子工程师协会高级会员，Xingqin Lin，电气与电子工程师协会高级会员，Boya Di，电气与电子工程师协会会员，Hongliang Zhang，电气与电子工程师协会会员，Francisco Javier Lorca Hernando，Ahmet Serdar Tan，Shahid Mumtaz，高级¨电气与电子工程师协会会员，Ozlem Tu˘gfe Demir，电气与电子工程师协会会员，以及 Kun Chen-Hu，电气与电子工程师协会会员

arXiv:2301.01703v2 [cs.IT] 5 Jan 2023

摘要——**在下一代无线系统和网络发展之初，大规模多输入多输出（MIMO）被视为一项关键使能技术。随着其在第五代移动通信及后续系统中的应用持续取得成功，大规模多输入多输出技术已展现出其优势、可集成性和可扩展性。此外，近年来，大规模多输入多输出的若干演进特征和变革性趋势逐渐显现，预计将重塑未来的第六代移动通信无线系统和网络。具体而言，未来大规模多输入多输出系统的功能和性能将通过结合智能全向表面（IOS）/智能反射面（IRS）、人工智能（AI）、太赫兹通信和无小区架构等创新技术、架构和策略得以实现和提升。此外，基于大规模多输入多输出的更多样化垂直行业应用将不断涌现并蓬勃发展，例如无线定位与感知、车联网通信、非地面通信、遥感和行星际通信。**

索引词—**第六代移动通信、大规模多输入多输出、智能全向表面（智能超表面）、智能反射面（智能反射面）、无蜂窝、人工智能、车载通信、太赫兹通信、非地面通信、遥感、行星际通信。**

I. 引言

大规模多输入多输出（MIMO）一直是第五代移动通信无线通信的关键技术之一，近年来其发展与部署更是经历了前所未有的增长。随着技术快速创新和商业需求不断增长，预计大规模MIMO将进一步演进，并以更广泛、更深入的方式重塑未来电信及相关领域。

对大规模多输入多输出的支持是5G新空口（NR）标准 [1]的内在特性。作为5G新空口的首个版本，第15版包含了在不同部署场景下支持大规模多输入多输出的基本功能，包括面向时分双工（TDD）系统的基于互易性的操作、针对多用户多输入多输出（MU-MIMO）的高分辨率信道状态信息（CSI）反馈，以及用于高频频段操作的先进波束管理和模拟波束成形等。

Yiming Huo 任职于加拿大维多利亚大学电气与计算机工程系，地址为加拿大不列颠哥伦比亚省维多利亚市 V8P 5C2（ymhuo@uvic.ca）。Xingqin Lin 任职于美国加利福尼亚州圣克拉拉市 95050 的英伟达（xingqinl@nvidia.com）。Boya Di 和 Hongliang Zhang 任职于中国北京大学电子学院，地址为中国北京市 100871（电子邮件：boya.di@pku.edu.cn；hongliang.zhang92@gmail.com）。Francisco Javier Lorca Hernando 和 Ahmet Serdar Tan 任职于英国英格兰伦敦的 InterDigital Communications, Inc.（电子邮件：javier.lorcahernando@interdigital.com；AhmetSerdar.Tan@interdigital.com）。Shahid Mumtaz 任职于葡萄牙阿威罗的 Instituto de Telecomuniç˜oes（电子邮件：smumtaz@av.it.pt）。¨Ozlem Tu˘gfe Demir 任职于瑞典斯德哥尔摩瑞典皇家理工学院计算机科学系（电子邮件：ozlemtd@kth.se）。Kun Chen-Hu 任职于西班牙莱加内˙斯 28911 的马德里卡洛斯三世大学信号理论与通信系（电子邮件：kchen@tsc.uc3m.es）。

第15版之后，第三代合作伙伴计划在第16版中进一步规定了大规模多输入多输出的增强功能。第16版中具有代表性的大规模多输入多输出增强功能包括：通过空域和频域压缩降低信道状态信息反馈开销、降低波束管理信令开销和时延，以及通过多个收发点（TRPs）进行非相干联合传输。

第三代合作伙伴计划在第17版中继续推进大规模多输入多输出技术的演进。通过利用角度-时延互易性，进一步降低了信道状态信息反馈开销。引入了统一的传输配置指示符（TCI）框架，以增强多波束操作。通过引入小区间多收发点增强和多收发点专用波束管理功能，也改进了对多收发点的支持。第18版开启了 5G Advanced 的研究工作，其范围包括进一步推进大规模多输入多输出技术的演进。第三代合作伙伴计划正在研究的潜在方向包括上行多输入多输出增强（例如，在上行链路中使用八根发射天线以及多面板上行链路传输）、将统一 TCI 框架从单收发点扩展到多收发点场景、为多用户多输入多输出增加更多正交解调参考信号（DMRS）端口，以及针对中高速用户设备（UE）的信道状态信息报告增强。

随着标准化进程迅速推进且商业化前景广阔，大规模多输入多输出已成为第五代移动通信及后续技术的关键基础技术，预计将与其他赋能技术相结合，并拓展至更多新兴垂直领域。本文介绍并分析了大规模多输入多输出技术迈向第六代移动通信过程中的若干技术趋势。例如，一个关键观察是，近期智能表面 [2] 受到广泛关注，它们有望助力实现节能且经济高效的大规模多输入多输出。此外，智能反射面（IRS）赋能的大规模多输入多输出可支持通信、定位和感知功能的联合实现，从而广泛拓展新的应用场景，并提升第六代移动通信中无线系统的性能。

本文前两节分别介绍了面向大规模多输入多输出的智能反射面物理基础，以及智能反射面赋能的大规模多输入多输出在定位与感知中的应用。随后，我们综述了太赫兹频段的超大规模 MIMO，因为采用短波长和宽带宽会给无线系统设计几乎所有方面带来前所未有的挑战。接着，我们探讨了能够提升频谱效率和能效的无小区大规模 MIMO 技术。之后，我们综述并讨论了面向大规模多输入多输出的人工智能（AI），继而评述并探讨用于高速应用的大规模MIMO-OFDM

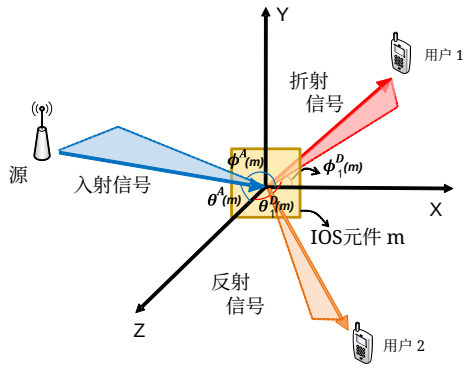


图 1. 智能表面单元的传输模型。

。作为面向第六代移动通信的未来大规模多输入多输出发展的最后一个方向，非地面网络（NTN）通信自2017 [3]以来一直是标准化工作的一个方向。因此，在总结本文之前，我们详细评述、讨论并分析了基于大规模多输入多输出的当前及未来非地面应用与架构。

II. 面向大规模多输入多输出的智能透射表面/智能反射表面物理基础

受无线数据流量爆炸式增长的推动，未来第六代移动通信亟需支持高数据速率的创新通信范式。大规模多输入多输出利用无线环境的隐含随机性，已受到广泛关注。然而，传统大规模多输入多输出依赖大规模相控阵，由于耗能的移相器，尤其是在天线数量增加时，会带来较高的硬件成本和功耗。这限制了其在实践中支持大规模多输入多输出的可扩展性。

近年来，智能超表面作为一种新型超薄二维超材料，嵌入了亚波长散射体，为以经济高效的方式实现大规模多输入多输出提供了一种全新技术。该表面能够同时反射和/或折射入射信号，并通过灵活的相移重构 [4]，主动将不可控的无线环境塑造成理想形态。由于每个单元的此类重构通常由一个或两个受偏置电压控制的PIN二极管实现，因此，与传统相控阵相比，其硬件和功耗成本都很低。因此，该表面易于扩展至大规模，为实现大规模多输入多输出提供了一种切实可行的方法。

图1展示了单个表面单元的一般传输模型。入射信号到达表面后，一部分被反射，其余部分则折射至另一侧。将反射折射比定义为 ϵ后，可得到图1所示的反射信号和折射信号。由此可将表面分为以下三种类型：

- 当 $\epsilon = 0$时，该表面仅反射入射信号，从而形成智能反射面。它可以安装在墙上，作为反射中继来扩大覆盖范围。
- 当 $\epsilon \to \infty$时，表面仅折射入射信号，作为可重构折射表面（RRS）。它可以取代基站上的天线阵列，用于信号的发送和接收。
- 当 $0 < \epsilon < \infty$时，表面可以同时反射和折射入射信号，称为智能全向表面（IOS）。与智能反射面相比，无论用户相对于表面处于何种位置，它都能实现全维无线通信。

由于实现技术成熟，智能全向表面和智能反射面都被视为实现大规模多输入多输出的有效方法。尤其是，近期发展的智能全向表面技术也为该领域带来了新的挑战：

- 智能全向表面的折射信号和反射信号彼此耦合，并由PIN二极管的状态同时决定。这种耦合效应使人们无法确定当信号从智能全向表面的不同侧入射时，智能全向表面对电磁波的影响是否相同，也就是说，采用智能全向表面的传输是否仍具有信道互易性。
- 此外，为了充分利用智能超表面的折射与反射特性，还需要在给定基站和用户分布的情况下，研究智能超表面的最佳位置和朝向，以扩展智能超表面两侧的覆盖范围。
- 此外，由于面向不同用户的反射波束和折射波束彼此相互依赖，因此应重新考虑并针对 IOS辅助传输 定制波束成形方案 [5]。

III. 使用智能超表面/智能反射面赋能的大规模多输入多输出进行定位与感知

在未来的第六代移动通信中，无线定位与感知功能将内置于各种应用中，例如导航、交通运输和医疗保健。因此，提供高分辨率感知和高定位精度的服务具有很高的需求。要实现这一愿景，大规模多输入多输出可以成为一种很有前景的解决方案，因为采用更大的天线阵列可以减小波束宽度，从而实现更高的空间分辨率。然而，这些系统中的无线环境正变得日益复杂，例如，视距（LoS）链路可能被建筑物或物体阻挡，从而降低感知和定位的准确度。幸运的是，智能超表面的发展能够提供有利的传播条件，从而提高感知和定位精度 [6]。一方面，智能超表面可以为目标提供额外路径，扩大覆盖范围。另一方面，凭借操纵传播条件的能力，可以定制来自不同物体或目标的《信号》，使其更易于区分，如图2所示。

然而，将智能超表面集成到无线感知/定位系统中并非易事，通常会带来以下挑战：

- 优化与智能超表面相关的配置将是一项挑战。与用于

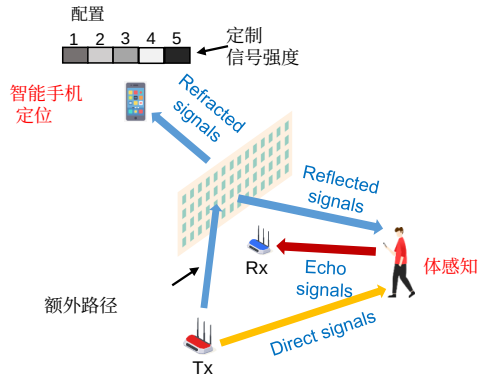


图2. 使用智能超表面赋能的大规模多输入多输出系统进行无线定位与感知的示意图。

通信的智能超表面设计不同，此处的优化旨在最大化感知/定位性能，因此需要采用新的设计。例如，可以将指标定义为来自不同目标/位置的两种信号模式（分别对应智能超表面的一种配置）之间的距离，使接收器能够更轻松地识别两个目标/位置，从而提高准确度。此外，由于智能超表面单元数量可能很大，枚举所有配置将导致极高的时延。因此，选择适当数量的配置，以实现时延与准确度之间的权衡，将至关重要。

- 决策函数与智能超表面优化之间的耦合，使得最优函数难以确定。具体而言，接收器需要通过决策函数将接收信号转换为目标/位置的信息。由于接收信号可以由智能超表面进行调整，决策函数的选择也会受到智能超表面配置的影响。因此，有必要进行联合优化，以提升性能 [6]。

- 除了上述信号处理方面的挑战之外，实际实现也是另一项挑战。智能超表面的部署位置及其尺寸的确定需要谨慎处理，同时还应考虑环境的拓扑结构。

总而言之，大规模多输入多输出技术有望提供融合通信、定位与感知的多功能服务。智能超表面能够定制传播环境，被认为是未来大规模多输入多输出系统的附加赋能技术，有助于实现这种融合。

第四：太赫兹频段的超大规模 MIMO

根据国际电信联盟无线电通信部门（ITU-R）的定义，太赫兹频段是指 0.1 THz–10 THz 范围内的频率。潜力最大的低频区域，即 0.1 THz 至 0.3 THz，通常称为亚太赫兹频段。太赫兹和亚太赫兹信号在无线电频率与光频之间搭起桥梁。它们的波长处于毫米和亚毫米范围，因此非常适合实现第六代移动通信所承诺的超高容量通信、出色的态势感知能力和超高分辨率环境感知。如此短的波长也带来了信道特性高度不确定的问题，导致无线电链路不可靠且时断时续，并受到以下一种或多种因素的影响：

- 高路径损耗、分子吸收和阻塞。这些频段天线孔径面积较小，导致自由空间路径损耗较高；再加上分子吸收、阻塞、漫散射，以及雨、雪或雾造成的额外衰减，链路会变得高度间歇。因此，必须采用超窄波束成形来提高链路可靠性。

- 能效低。对于给定的功率放大器（PA）技术，射频输出功率每增加一个数量级便会衰减 20 dB。这会削弱链路预算，并进一步凸显采用配备大量天线的大规模收发器的必要性。

- 大规模收发器。提高链路可靠性所需的高波束成形增益，要求收发器配备大量天线（通常超过 1024 根）。这些收发器产生的窄化超窄波束，对移动性和波束跟踪构成了重大挑战。

- 相位噪声。在亚太赫兹/太赫兹频段，相位噪声引起的载波间干扰（ICI）会严重降低循环前缀正交频分复用的性能。增大子载波间隔可以减轻其影响，但相应缩短的符号持续时间会导致覆盖范围受损，并削弱抑制大时延扩展的能力。

- 信道稀疏性。超窄波束与类射线波传播共同作用，使信道的空间自由度较少，且秩受限于一个视距分量和少数几个多径分量，从而给MIMO运行带来挑战。

- 球面波与近场效应。大规模收发器所配备的电尺寸较大的天线结构会产生显著的球面波与近场效应，增加了MIMO预编码策略的复杂性。

- 波束斜视。平面阵列中移相器的窄带响应会导致随频率变化的波束失准，称为波束斜视。采用波束展宽技术可以缓解波束失准造成的损耗，但会缩小覆盖范围；使用真时延（TTD）单元则可避免此问题，但会增加复杂性。

已有大量研究致力于开发收发机架构和网络解决方案，以改善上述一些问题，尤其是受亚太赫兹/太赫兹频段传播挑战所推动的研究。在这些网络解决方案中，前文提到的配备大量小型天线单元的智能反射面/可重构智能表面备受关注，因为它们能够定制反射波束和折射波束的特性 [2], [7]。亚太赫兹/太赫兹频段的智能反射面/可重构智能表面利用

波束偏转来克服遮挡和路径损耗；通过聚焦波束利用近场效应，以改善波束成形和三维成像；还能够提高信道的多径丰富度，增强亚太赫兹/太赫兹频段的空间复用能力。

V. 无小区大规模 MIMO

无小区大规模 MIMO 被视为超越5G系统的一项很有前景的技术，因为它能够显著提高频谱效率和能效。因此，不仅学术界，业界也对无小区大规模 MIMO 表现出浓厚兴趣。工业界研究人员也将其称为“分布式MIMO”或“分布式大规模MIMO” [8]。该技术旨在借助联合收发以及密集部署的低成本接入点所带来的宏分集，为覆盖区域内的每个用户设备提供近乎均匀的优质服务。与面向未来的可扩展系统设计相适应的物理层技术，例如接收合并设计、发射预编码设计和功率分配算法，如今已相当成熟。对于可扩展（就信号处理复杂度和前传信令负载而言）的无小区大规模 MIMO 系统，每个接入点只能服务有限数量的用户设备。一种以服务为导向的设计方案，是根据各用户设备的需求，以用户为中心组建为其提供服务的接入点。如图3所示，每个用户设备由多个接入点提供服务，这些接入点具有较优的信道条件，位于图中带颜色阴影的圆形区域内。

在面向 6G通信系统构建的实际无小区大规模 MIMO运行中，集中式计算处理单元及其与接入点之间的前传链路是两个主要层。当边缘云部署在接入点与中心云之间时（如图 3 所示），中传以及由边缘云和中心云组成的协同处理单元，便是无小区网络中的附加组件。因此，应从端到端（从无线边缘到中心云）的角度分析其中的不完善之处、局限性和能耗。开展关于低成本、高能效无小区大规模 MIMO实现方案的端到端研究，对于加快其在第六代移动通信中的实际部署至关重要。

无小区大规模 MIMO的网络架构

接入点通过前传链路连接至中央处理单元的系统，完全顺应了移动通信网络云化的浪潮。因此，从一开始，人们就预期在云无线接入网（C-RAN）之上构建未来的无小区网络。虚拟化云无线接入网支持将接入点的数字单元集中部署在边缘云或中心云中，并具备虚拟化和计算资源共享能力。超越虚拟化云无线接入网，研究者还探讨了在开放无线接入网（O-RAN）之上实现无小区大规模 MIMO 的方案，旨在构建智能、虚拟化且完全互操作的第六代移动通信架构 [9]。

前传/中传传输技术是将无小区大规模

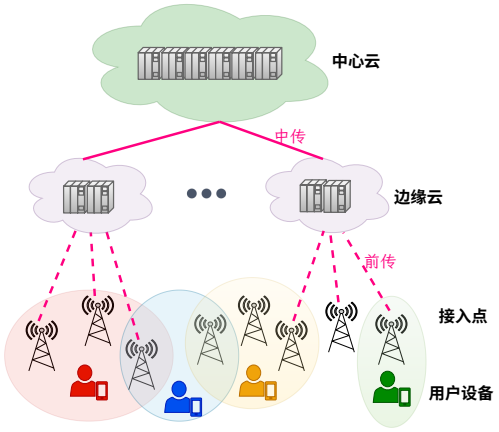


图 3. 具备无小区大规模 MIMO 功能的云无线接入网架构。

多输入多输出部署到传统网络中的关键组成部分之一。在大规模无小区大规模多输入多输出系统中，在每个接入点与边缘云或中心云之间部署专用光纤链路，成本极高且不可行。爱立信开发的所谓“无线条带”前传架构通过将接入点依次接入共享前传线路，降低了布线成本。当接入点分布在广阔区域时，毫米波和太赫兹无线通信等其他低成本前传传输技术既能提供巨大带宽，又能避免昂贵的有线光纤链路。另一种选择是采用光纤-无线前传/中传传输，在链路质量与成本之间取得平衡。在后一种方案中，可在每个接入点与其对应的边缘云之间，以无线方式部署短距离前传链路。另一方面，从边缘到中心的中传可利用高可靠性的光纤连接。缓解接入点和无线前传节点所部署的低成本收发器自然产生的硬件损伤，也是将无小区大规模多输入多输出部署到传统网络中的另一个关键方面。

近年来，移动运营商采用的节能技术在减少环境影响以及以绿色、可持续的方式设计下一代移动通信系统方面日益重要。为此，已有多项研究探讨在无小区大规模 MIMO 系统中采用接入点开关方法以节省能耗。此外，云资源和前传/中传资源的虚拟化与共享对于最大限度地降低端到端总能耗至关重要。归根结底，要全面考量无小区大规模 MIMO 系统的能效，就应考虑边缘云和中心云中数字单元及处理器的局限性、能耗模型和节能机制。

第六章 适用于大规模多输入多输出的人工智能

人工智能（AI）赋能的大规模多输入多输出技术可应用于工业5.0。这项技术能够实现工业信息的高可靠实时传输

第五代移动通信及其他信息，并实现可靠的人机交互（HCI）。大规模多输入多输出是第五代移动通信的核心技术。然而，天线数量的增加也带来了新的挑战，尤其是信道估计与反馈成本的快速增长。此外，信道估计和预测的准确度仍需提高。人工智能技术有望解决上述问题。不过，上述新兴技术仍存在一些问题。一方面，从产业角度来看，主要挑战包括：

- 有效控制训练数据集与实际信道之间的差异并非易事。人工智能算法泛化能力不足可能导致系统性能下降。

- 无线人工智能数据和应用具有其独特特点。然而，如何将图像和语音处理领域的经典人工智能算法与无线数据有机结合，目前仍不明朗。
- 应用于工业5.0的大规模多输入多输出通信系统具有一个特点：通信场景复杂多变（室内、室外等），业务形态也多种多样。因此，如何在算力有限的情况下，使无线人工智能解决方案适用于各种通信场景和业务形态，是行业亟待克服的一项重大挑战。

另一方面，从研究角度来看，也有一些值得关注的趋势。首先，将机器学习应用于资源分配，有望以较低复杂度实现大规模多输入多输出系统，并降低运营成本。这一策略可以提高频谱效率和能效，增加用户数量，同时降低能耗和时延。其次，在大规模多输入多输出系统中使用机器学习或深度学习进行信号检测，有望缓解传统线性和非线性检测方法所面临的高复杂度问题。第三，人工智能在大规模多输入多输出系统的干扰管理中可能发挥作用，例如确定并预测干扰源的数量和强度，进而减轻干扰。最后但同样重要的是，随着大规模多输入多输出技术拓展至更多垂直领域，为特定应用开发并部署合适的细分人工智能策略至关重要。

VII. 面向高速应用的大规模MIMO-OFDM

对于大规模多输入多输出系统，使用大量天线，既可在对多个用户进行空间复用时降低多用户干扰，也可在采用高于微波的频率（如毫米波）时补偿路径损耗。通常采用相干解调方案，以利用多输入多输出正交频分复用；其中，信道估计和前置/后置均衡过程复杂且耗时，需要大量导频开销，并会增加系统时延。此外，还考虑了新的挑战性场景

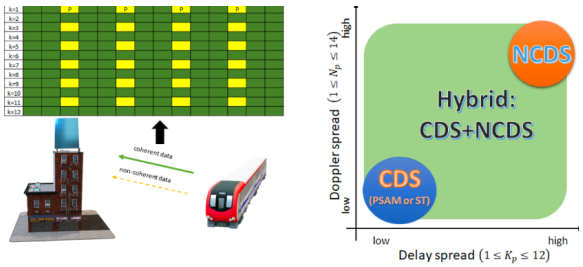


图4. 面向高速应用的大规模多输入多输出：混合解调方案的设计示例。

在第五代移动通信及后续通信系统中，例如高移动性场景（如车联网通信）。由于参考信号无法以可接受的开销有效跟踪信道的快速变化，传统相干解调方案的性能会更差。

作为一种替代方案，有人提出了将基于差分调制的非相干解调方案（NCDS）与大规模MIMO-OFDM相结合的方法 [10]。研究表明，即使没有参考信号，在无需参考信号的高速场景中，该方案的性能也能显著优于相干解调方案（CDS），且复杂度更低。为了在MIMO-OFDM系统中成功实现NCDS，应注意以下相关细节。首先，大量天线是成功部署NCDS的关键因素。在上行链路中，这些天线用作空间合并器，能够降低差分调制产生的噪声和自干扰。在下行链路中，将波束成形与NCDS相结合，以扩大覆盖范围并对不同用户进行空间复用。随后，差分调制应映射到OFDM符号的二维时频资源栅格中。目前提出了多种方案：时域、频域和混合域。其中，混合域方案的性能最佳，因为它能将所需信令减少到每个传输突发仅需一个导频符号。最后，在MIMO-OFDM系统中，还可以在星座域对多个用户进行复用；这是现有空间、时间和频率维度之外的一个附加维度。在发射机处，每个用户选择各自独立的星座；在接收器处，接收到的联合星座是所有用户各自星座的叠加。以误码率（BER）衡量的整体性能取决于接收联合星座的设计、所选的所有独立星座，以及每个符号映射的比特。这个非凸优化问题可通过进化计算求解；进化计算是人工智能的一个分支，能够解决这类数学问题。

最后，针对低移动性或中移动性场景，文中提出了一种混合解调方案（HDS）： [11],该方案以一种新的差分编码数据流取代相干解调方案（CDS）中的传统参考信号，并可对该数据流进行非相干检测。无需了解信道状态信息即可对后者进行解调，随后还可将其用于信道估计。一个设计示例

如图 4 所示。因此，HDS 可以兼具相干解调方案（CDS）和非全双工系统（NCDS）的优势，从而提高频谱效率。结果表明，其信道估计性能几乎与 CDS 相当，同时在复杂度仅略有增加的情况下，误码率性能和吞吐量在不同信道条件下均有所提升。

VIII. 非地面通信中的大规模多输入多输出

随着第五代移动通信标准化第一阶段和第二阶段在3GPP第15版和第16版中完成，2022年上半年见证了全球第五代移动通信标准的第三次发布在3GPP第17版中完成系统设计。这一版本被视为第五代移动通信在新设备和应用方面的持续拓展。具体而言，3GPP第17版引入了5G新空口对卫星通信的支持，而卫星通信是非地面网络（NTN）的重要组成部分。事实上，非地面网络涵盖任何涉及空中或太空飞行物体的网络，其中包括卫星通信网络、高空平台站（HAPS）（包括飞机、气球和飞艇）以及空地网络 [3]。

作为第三代合作伙伴计划非地面网络工作的重点，卫星通信网络可实现普遍连接以及为偏远或农村地区提供覆盖等先进功能。此外，它们包含两个不同方面：一个侧重于卫星回传通信，适用于用户驻地设备（CPE）等应用场景，并为手持设备提供直接的低数据速率服务；另一个旨在使增强型机器类通信（eMTC）和窄带物联网（NB-IoT）的运行适应卫星通信。近年来，低地球轨道（LEO）卫星推动的宽带接入和服务空前繁荣，受到广泛关注 [12]。在该领域的几家主要商业运营商中，包括星链（SpaceX）、柯伊伯（亚马逊）、OneWeb、波音和Telesat，星链在卫星巨型星座的规模和维度以及服务用户数量方面处于领先地位。

推动天基宽带接入快速蓬勃发展的若干关键因素包括：发射成本下降、私人资本投入、人工智能和云计算/边缘计算的广泛部署，以及高性能卫星无线通信与组网技术。从无线通信，特别是大规模多输入多输出的角度出发，下面概述相关趋势和挑战。

- 在 2,000 千米以下部署并运营不断扩张的卫星星座，可能会带来应对竞争和促进共存方面的挑战。为了尽可能缩短传播时延，许多低地球轨道巨型星座的建设者可能希望将卫星部署在尽可能低的轨道上，而国际电信联盟则在国际电信联盟合作系统中采用“先到先得”的方式获取轨道/频谱资源。随着低地球轨道空间日益拥挤，且碰撞事件不断被报道， [12], 要应对日益增长的空间交通，并妥善处理卫星/航天器的安全离轨与处置，需要制定相关法规、策略并采用相应技术。随着

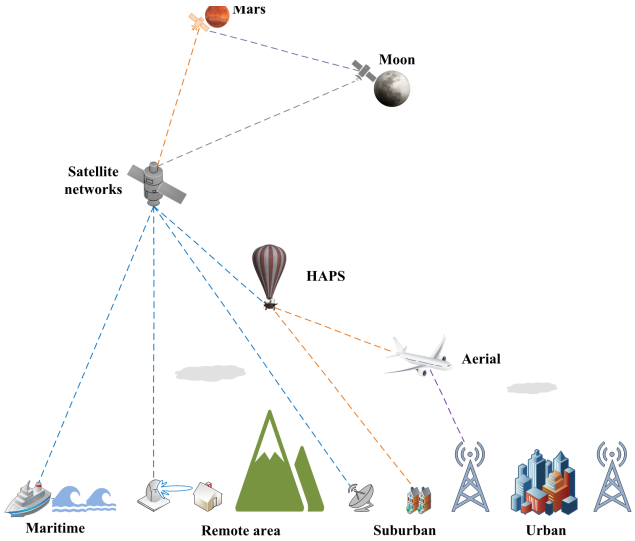


图5。 非地面网络中大规模多输入多输出的示意图 网络）。

逃逸速度为 7.8 千米/秒，即使采用当代人工智能辅助的感知和探测技术，追踪、定位卫星/航天器并进一步实现避碰也可能十分困难。

- 此外，频谱管理也是一项关键内容，因为频谱资源通常有限，这带来了严峻挑战。为推动非地面网络采用5G新空口，第三代合作伙伴计划第17版已研究支持卫星为用户驻地设备提供回传通信，并利用7 GHz以下S波段为手持设备提供低数据速率服务的直连；而使用高于10 GHz的频率则将在第三代合作伙伴计划第18版中进行研究。与此同时，星链第一代系统（即第一代）主要使用Ku波段和Ka波段传输不同类型的链路和方向的数据，其第二代系统则会新增V波段。无论是7 GHz以下S波段，还是Ku/Ka/V波段，在一定程度上都会与正在部署的第五代移动通信和未来第六代移动通信系统，和/或其他在这些频段运行的系统共享部分频谱。因此，不同系统和网络之间可能会产生干扰和共存挑战。事实上，SpaceX和OneWeb均表示担忧：如果地面5G使用12 GHz频段，非地球静止轨道卫星互联网可能受到干扰。此外，使用7 GHz以下S波段支持更多卫星直连用户设备，也会加剧这一干扰挑战。预计未来将进一步研究天基大规模多输入多输出的频谱资源（例如更高频段）及频谱管理。

- 此外，同一空间网络内部以及不同空间网络之间都可能出现多种干扰。例如，同一巨型星座的用户终端（UT）和地面站可能发生带内/带外干扰（或发射）。对于多个空间网络的情况，一座巨型

星座的卫星传输可能会干扰其他巨型星座所属用户终端和地面站的接收。此外，用户终端/地面站的发射也可能干扰不同星座中的卫星。传统上，共存的空间网络需要通过协调彼此共享频率分配（包括上行链路和下行链路），以减轻干扰。然而，未来要应对更加复杂的情况，还需要性能更高的干扰缓解技术。

- 从宏观角度来看，一方面，非地球静止轨道巨型星座将支持地球静止轨道（地球同步轨道）网络、高空平台站、空地网络、无人机网络等，或与它们高效协作。构建这样一个更大的非地面网络生态系统，会带来更多有关共存与竞争的处理挑战。另一方面，空间赋能网络和大规模多输入多输出将扩展至近地空间及其以外。近地空间是指从中性大气层各层（160–200 km）延伸至月球轨道（约384,400 km）的空间。例如，诺基亚贝尔实验室将为美国国家航空航天局的阿耳忒弥斯计划在月球部署首个长期演进网络。在所提出的太阳系通信与防御网络（SCADN）概念中， [13], 基于覆盖整个太阳系的大量航天器/卫星组成的互联网，构建大规模多输入多输出感知与通信框架，以便及早探测并缓解对地球和地外人类基地构成的潜在威胁（如小行星/彗星），并在其他天体上建立人类活动之前或之后，为太阳系内的无线连接提供基础设施。地球与其他天体之间极大的传播距离和时延，对无线感知与通信构成了严峻挑战，因此需要人工智能、机器学习/深度学习、边缘计算、边缘人工智能、分布式学习和联邦学习等更具创新性的解决方案。

总而言之，大规模多输入多输出技术正迅速拓展人类在地形乃至地球之外的通信与感知能力，这无疑将助力全人类迎来更加繁荣的太空时代。

IX. 结论

本文全面概述了大规模多输入多输出技术在迈向第六代移动通信的演进过程中所呈现的前景趋势。首先，我们概述大规模多输入多输出近期的标准化工作与研究进展。然后，重点探讨能够实现经济高效大规模多输入多输出通信的智能反射面/智能超表面技术。此外，我们展望利用智能反射面/智能超表面促进并增强大规模多输入多输出定位与感知能力所面临的挑战。接下来，我们研究太赫兹频段的超大规模MIMO，并揭示影响系统设计的若干问题。随后，我们介绍并分析无小区大规模 MIMO 架构，该架构能够提升频谱效率和无线系统的能效。除此之外，本文还深入讨论人工智能应用于大规模多输入多输出时面临的挑战与发展趋势。同时，未来的大规模多输入多输出将助力并强化更多关键垂直行业应用。因此，本文综述并介绍了大规模MIMO-OFDM支持的高速通信，并提供了一些设计实例。最后，我们详细介绍并分析了面向非地面网络的大规模多输入多输出通信当前及未来的发展趋势，尤其是近地空间与星际应用。

致谢

我们衷心感谢电气与电子工程师协会未来网络大规模多输入多输出工作组，以及电气与电子工程师协会未来网络第二届大规模多输入多输出研讨会组委会。所有共同作者对本文的贡献均等。

参考文献

[1] X. Lin 等，“5G新空口：揭示新一代无线接入技术的核心”，*IEEE*通信标准杂志，第3卷，第3期，第30-37页，2019年9月。[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5月，doi：10.1109/TCOMM.2021.3051897。[3] X. Lin、S. Rommer、S. Euler、E. A. Yavuz和R. S. Karlsson，“来自太空的5G：第三代合作伙伴计划非地面网络概述”，*IEEE*通信标准杂志，第5卷，第4期，第147-153页，2021年12月，doi：10.1109/MCOMSTD.011.2100038。[4] H. Zhang和B. Di，“智能全向表面：面向全维无线通信的同步折射与反射”，*IEEE*通信综述与教程，第24卷，第4期，第1997-2028页，2022年第四季度。[5] H. Zhang 等，“用于全维无线通信的智能全向表面：原理、技术与实现”，*IEEE*通信杂志，第60卷，第2期，第39-45页，2022年2月。[6] H. Zhang 等，“借助可重构智能表面实现泛在感知与定位”，*IEEE*会刊，第110卷，第9期，第1401-1422页，2022年9月。[7] A. Shojaeifard 等，“通过可重构智能表面和流体天线系统推动超越第五代移动通信的MIMO演进”，*IEEE*会刊，第110卷，第9期，第1244-1265页，2022年9月，doi：10.1109/JPROC.2022.3170247。[8] G. Interdonato、E. Bj¨ornson、H. Q. Ngo、P. Frenger和E. G. Larsson，“泛在无小区大规模MIMO通信”，*EURASIP*无线通信与网络期刊，第2019卷，第1期，第1-13页，2019年。[9] V. Ranjbar 等，“开放无线接入网架构中的无小区大规模MIMO支持：面向第五代移动通信及后续网络的物理层视角”，第6卷，第1期，第28-34页，2022年3月。[10] K. Chen-Hu、Y. Liu和A. G. Armada，“基于差分调制的非相干大规模MIMO-OFDM下行链路”，载于*IEEE*车辆技术汇刊，第69卷，第10期，第11281-11294页，2020年10月，doi：10.1109/TVT.2020.3008913。[11] M. J. Lopez-Morales、K. Chen-Hu和A. Garcia-Armada，“上行链路大规模SIMO-OFDM的差分数据辅助信道估计”，载于*IEEE*通信学会开放期刊，第1卷，989，2020年，976 10 1109 2020 3008634页 - doi：. /OJCOMS. . . [12] Y. Huo，“太空宽带接入：竞赛才刚刚开始”，《计算机》，第55卷，第7期，第38-45页，2022年7月，doi：10.1109/MC.2022.3160472。[13] Y. Huo，“用于多行星防御与繁荣的航天器互联网”，《信号》，第3期，第428-467页。https://doi.org/10.3390/signals3030026