



专题：6G 无线传输技术

可重构全息超表面辅助卫星通信关键技术

胡馨元¹, 邓若琪¹, 邸博雅¹, 张泓亮¹, 宋令阳^{1,2}

(1. 北京大学电子学院, 北京 100871; 2. 鹏程实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 超密集低地球轨道卫星通信网络能弥补传统地面网络频谱资源稀缺、覆盖范围有限的不足, 有潜力提供全球大规模接入的高速率服务。由于卫星的高速移动性, 卫星通信对天线性能, 如波束控制能力和天线增益等, 也提出了更为严苛的要求。因此, 对一种新型的超材料天线——可重构全息超表面 (reconfigurable holographic surface, RHS) 辅助卫星通信展开了研究。RHS 采用全息原理对超材料单元进行电控, 从而实现波束成形。基于 RHS 的硬件结构和全息工作原理, 提出了一种 RHS 辅助多卫星通信方案, 该方案同时考虑卫星跟踪和数据传输。同时, 设计了全息波束成形优化算法以最大化和速率。仿真结果验证了所提方案的有效性并表明了相较于传统相控阵天线, RHS 提供了一种成本效益更高的卫星通信支持方式。

关键词: 可重构全息超表面; 全息波束成形; 低轨卫星通信

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022273

Key technologies of satellite communications aided by reconfigurable holographic surfaces

HU Xinyuan¹, DENG Ruoqi¹, DI Boya¹, ZHANG Hongliang¹, SONG Lingyang^{1,2}

1. School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

Abstract: Ultra-dense low earth orbit (LEO) satellite communication networks can overcome the scarcity of spectrum resources and the limited coverage of traditional terrestrial networks, and thus have the potential to provide high data rate services and global massive connectivity for terrestrial users. However, due to the high mobility of the satellites, LEO satellite networks put more stringent requirements on antenna technologies in terms of accurate beam steering and high antenna gain. Reconfigurable holographic surface (RHS), as a new type of metamaterial antenna, is investigated to assist LEO satellite communications. The RHS can electronically control the metamaterial units by leveraging the holographic principle to generate desired directional beams. Based on the hardware structure and holographic working principle of RHS, an RHS-assisted multi-satellite communication scheme was proposed, which

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-10-11

通信作者: 宋令阳, lingyang.song@pku.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1804800); 国家自然科学基金资助项目 (No.62271012, No.6194110); 北京市自然科学基金资助项目 (No.L212027, No.4222005)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1804800), The National Natural Science Foundation of China (No.62271012, No.6194110), Beijing Natural Science Foundation (No.L212027, No.4222005)

considered both the LEO satellite tracking scheme and the data transmission scheme. A holographic beamforming optimization algorithm was also designed to maximize the sum rate. Simulation results verify the effectiveness of the proposed scheme and demonstrate that the RHS provides a more cost-effective way to support satellite communications than the conventional phased array antennas.

Key words: reconfigurable holographic surface, holographic beamforming, LEO satellite communication

0 引言

近年来,地面通信网络由于其频谱资源稀缺和覆盖范围有限,难以满足由大量移动设备和应用程序带来的爆炸式数据传输需求^[1]。为了弥补传统地面通信网络的不足,新兴的低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星通信网络具有频带宽、覆盖面广等一系列优势,有望为地面用户提供高速率数据服务并且实现全球大规模网络接入^[2]。由于卫星的高移动性和由通信距离长带来的严重路径损耗,LEO 卫星网络对传输性能提出了更为严苛的要求,例如,要求天线具有更精准的波束控制能力应对卫星的高移动性,同时还要求天线具有更高的增益对高路损进行补偿等。面对 LEO 卫星网络对天线性能和传输性能的高要求,传统天线技术难以通过进一步扩大天线规模来提升数据传输速率,从而满足爆炸式的数据需求。这是因为传统服务于卫星通信的天线大多为碟形天线或相控阵天线,这两种天线都依赖于笨重的机械器材或者昂贵的硬件组件进行波束调控。因此,传统天线的质量和硬件成本都会成为天线规模进一步扩大以提供更高数据速率服务的阻碍^[3]。

为了克服传统天线的上述局限性,一种新的传输范式——全息多输入多输出(holographic multiple input multiple output, HMIMO)被提出。具体而言,在 HMIMO 中,大量小型且廉价的天线或可重构元件紧凑集成在天线面板上,从而以低成本实现高方向性天线增益^[4-5],为支持卫星通信提供了一种有前景的解决方案。作为一种具有代表性的超材料天线,可重构全息超表面(reconfigurable holographic surface, RHS)由排布

紧凑的亚波长超材料单元组成,信号可以在连续孔径的超表面上进行传输,因此,RHS 为实现 HMIMO 提供了一种切实可行的方法^[6]。RHS 的紧凑结构也使其可以方便地集成在地面终端,从而作为收发天线支持卫星通信。具体而言,在 RHS 中,馈源与超表面紧密集成,馈源产生的电磁波(也被称作参考波)沿着超表面传播并且逐一激励辐射单元^[7]。RHS 的独特之处在于它可以根据全息干涉原理在超表面上构建全息图案,基于该全息图案,超材料辐射单元可通过电控的方式控制电磁波的辐射幅度,以生成所需的定向波束。上述波束成形方法也被称为全息波束成形^[8]。在卫星通信中,RHS 集成在地面终端处,通过全息波束成形生成定向波束,与多颗低轨卫星通信。

RHS 作为一种新型的超材料天线,现有对 RHS 的初期研究主要集中在天线硬件结构设计^[9]以及提高天线定向增益的软件控制设计^[10]两个方面。文献[9]提出了可用于制作 RHS 的超材料单元,该单元可通过控制二极管开关状态来控制单元辐射幅值。文献[10]提出了一种用于 RHS 的自适应波束控制器,以消除旁瓣并提高方向性增益。正是因为 RHS 独特的工作原理和超薄结构,RHS 也引起了工业界的广泛关注,孵化出了各种应用。例如 Pivotal Commware 公司开发了 1~70 GHz 的商用定制 RHS 系统,将全息波束成形技术用于扩展地面通信的覆盖范围,构建智能中继器生态系统^[11]。但大多数现有工作仅证明了 RHS 在静态地面通信场景中有生成给定目标方向波束的能力,这不能保证 RHS 在具有高动态性的卫星网络中能提供良好的服务质量。并且,在卫星通信中以视距(line of sight, LOS)为主的信道与地面通信方案中的信道



有所不同,需要新的全息波束成形方案^[12]。

为了支持配备 RHS 的地面用户终端与多颗卫星的高数据速率通信,本文考虑了 RHS 辅助 LEO 卫星通信系统,并探索了 RHS 辅助多颗卫星通信的可能性。这是一项有挑战性的工作,原因有如下两点。第一,全息波束成形方案与卫星的位置密切相关,因此,需要设计一种高效的卫星追踪方案来应对 LEO 卫星的移动性,从而避免频繁的卫星定位;第二,传统的基于相位控制的模拟波束成形算法无法直接应用于基于幅度控制的全息波束成形优化中,因此,需要设计一种全新的基于幅度控制的全息波束成形优化算法。面对上述挑战,本文考虑了一种 RHS 辅助 LEO 卫星上行通信系统。在此系统中,配备 RHS 的地面终端上传用户数据至多颗 LEO 卫星进行通信。本文提出了一种包含卫星追踪和全息波束成形优化的 RHS 辅助多卫星通信方案。在卫星追踪方案中,利用卫星的轨道运动规律可以预测卫星位置,有效避免频繁的卫星定位,便于支持卫星的连续通信。同时,提出了一种最大化和速率的全息波束成形优化算法。仿真结果验证了该算法的有效性,同时表明了相较于传统的相控阵天线,RHS 提供了一种成本效益更高的方式来支持卫星通信。进一步地,本文还探讨了 RHS 辅助卫星通信中未来可能的发展方向。

1 可重构全息超表面基本介绍

1.1 硬件结构

RHS 是一种特殊的漏波天线,由馈源和大量密集的亚波长超材料辐射单元组成,RHS 硬件结构如图 1 所示。馈源连接到 RHS 表面边缘或嵌入 RHS 底部,向 RHS 注入携带发射信号的电磁波(也被称为参考波)。在参考波携带信号沿 RHS 表面各辐射单元传播的过程中,超材料辐射单元受到参考波激励,将参考波转化为漏波(也被称为目标波),从而将信号发射至自由空间,传递至接收机处。超材料辐射单元由人造复合材料制

成,各单元的电磁响应可独立控制。具体而言,各单元可通过独立设置的偏置电压,改变可调节材料的状态,实现单元表面电流分布控制,从而影响各单元的辐射电磁波的幅值。最终,各单元辐射的漏波叠加产生发送至各卫星的目标波束^[13]。

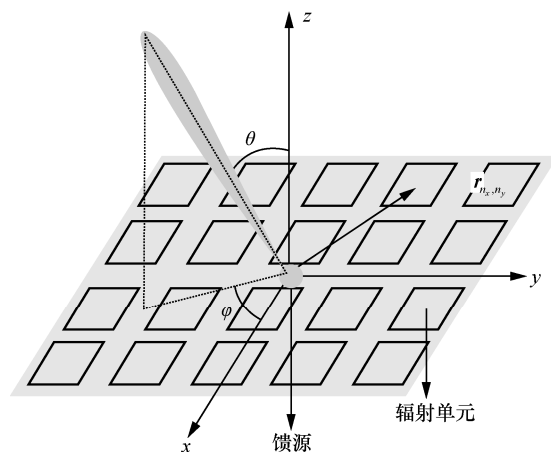


图 1 RHS 硬件结构

值得关注的是,随着超表面技术的不断发展,另一种可用于无线通信增强技术的可重构智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)受到了广泛关注^[14]。RIS 也是一种超薄可重构表面,具有多个电磁特性可控的超材料单元。RIS 可以反射入射信号并通过控制反射电磁波的相位产生指向接收器的定向波束。尽管 RHS 和 RIS 均能实现波束成形,但它们在以下 3 个方面有所不同。

- 物理结构: 由于 RIS 的反射特性, RIS 的射频前端位于超表面的外侧,与发射器之间需要额外的链路连接。相反, RHS 的馈源可以集成在印制电路板(printed-circuit board, PCB)中, RHS 可直接作为发射/接收天线集成在收发器上,无须外置链路。因此 RHS 的硬件结构相比 RIS 具有更高的集成度。
- 电磁响应机制: RIS 作为反射天线,采用并行馈电的方法使所有辐射单元同步受到入射信号激励,产生响应; RHS 采用串行馈电的方式,馈源入射的参考波在 RHS 表

面传播, 逐个激励辐射单元, 向自由空间辐射能量。

- 应用场景: 由于硬件结构和电磁响应的不同, RHS 和 RIS 分别适用于不同的场景。RIS 的典型应用是作为无源中继, 例如, 部署在小区边缘, 用于扩大小区覆盖范围和提高小区边缘用户的性能。由于 RHS 具有高度集成和超薄结构, 其更可能作为集成的发射/接收天线安装在可移动平台上, 例如 RHS 更适合在卫星通行系统中提供高吞吐量连接服务。同时, RHS 还可以与雷达收发器集成, 用于定位或成像。

1.2 全息波束成形原理

通过把目标波束方向映射为全息图案实现全息波束成形, 其中全息图案是根据全息干涉原理记录的携带传输信号的参考波与目标波束之间的干涉信息^[15]。利用全息图案, RHS 可以控制各个辐射单元辐射漏波的幅度, 生成目标方向的波束。下面进一步阐述全息波束成形原理。

考虑具有一个馈源和 $N_x \times N_y$ 个辐射单元的 RHS。从馈源注入携带传输信号的参考波 ψ_{ref} 和沿着 (θ, φ) 方向传播最终将信号传递至接收器的目标波束 ψ_{obj} 可以分别表示为:

$$\psi_{\text{ref}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y}) = e^{-j\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_{n_x, n_y}} \quad (1)$$

$$\psi_{\text{obj}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta, \varphi) = e^{-j\mathbf{k}_f(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{r}_{n_x, n_y}} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{k}_s$ 为参考波的传播矢量, $\mathbf{k}_f(\theta, \varphi)$ 自由空间中传播矢量, $\mathbf{r}_{n_x, n_y}$ 是 (n_x, n_y) 单元的位置向量, 同时因为馈源位置和坐标系原点相同, $\mathbf{r}_{n_x, n_y}$ 也是从馈源指向 (n_x, n_y) 单元的距离向量。根据全息干涉原理, 参考波和目标波束的干涉可以表示为^[16]:

$$\psi_{\text{intf}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta, \varphi) = \psi_{\text{obj}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta, \varphi) \overline{\psi_{\text{ref}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y})} \quad (3)$$

当该干涉被参考波激励时, 激励响应满足 $\psi_{\text{intf}} \psi_{\text{ref}} \propto |\psi_{\text{obj}}|^2$, 从而生成沿着 (θ, φ) 方向传播的目标波束, 因此 ψ_{intf} 也被称为全息图案^[17]。

RHS 可通过控制各个单元辐射参考波能量的方式记录全息图案, 实现振幅控制的波束成形。具体来说, 对于每个单元, 当参考波传播到该单元的相位与目标波束相位相差较大时, 该单元辐射出少量参考波能量; 当参考波传播到该单元的相位与目标波束相位相近时, 该单元辐射出大量参考波能量。将各单元辐射的电磁波叠加生成目标波束, 参考波携带的信号随辐射出的目标波束传送至接收天线。需要注意的是, 全息图案 $\psi_{\text{intf}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta, \varphi)$ 的实部, 即 $\cos(\mathbf{k}_f(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{r}_{n_x, n_y} - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_{n_x, n_y})$, 会随着参考波和目标波之间相位差的增大而减小。这点恰好满足了振幅控制的要求, 因此 $\text{Re}[\psi_{\text{intf}}]$ 可以表示各单元的辐射幅值。为了避免产生负值, 对 $\text{Re}[\psi_{\text{intf}}]$ 进行归一化处理。各辐射单元处归一化后生成的沿 (θ, φ) 方向传播的目标波束的辐射幅值可以表示为:

$$m(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta, \varphi) = \frac{1 + \text{Re}[\psi_{\text{intf}}(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta, \varphi)]}{2} \quad (4)$$

基于式 (4), RHS 可以生成方向为 (θ, φ) 的单波束。进一步地, RHS 可以通过叠加全息图案生成多方向波束^[18]。于是, 可生成指向 $\{(\theta_l, \varphi_l) | l=1, 2, \dots, L\}$ 这 L 个方向的各辐射单元的归一化辐射幅度, 其可以表示为:

$$m_{n_x, n_y} = \sum_{l=1}^L a_l \cdot m(\mathbf{r}_{n_x, n_y}, \theta_l, \varphi_l) \quad (5)$$

其中, 为了确保每个单元辐射能量不大于每个单元的接收能量, m_{n_x, n_y} 应位于 $[0, 1]$, 即叠加系数 $\{a_l\}$ 为非负实数且满足 $\sum_{l=1}^L a_l = 1$ 。叠加系数 $\{a_l\}$ 可作为全息波束成形的优化变量, 按照需求改变 $\{a_l\}$ 可实现 RHS 辅助通信系统的性能优化。

2 RHS 辅助卫星通信系统

本节首先描述卫星通信场景, 总体概况包含卫星追踪和数据传输的 RHS 辅助多卫星通信方案。紧接着, 详细介绍卫星追踪方案、卫星通信



传输模型和全息波束成形矩阵。根据卫星通信中信号传输的建模,提出了 RHS 辅助通信系统中最大化和速率的优化算法。结合卫星追踪与和速率最大化算法,RHS 辅助多卫星通信方案可以实现稳定高效的卫星通信。

2.1 RHS 辅助卫星通信场景及多卫星通信方案

考虑一个上行链路 RHS 辅助 LEO 卫星通信系统,其中配备 RHS 的地面用户终端在 Ka 波段频谱上上传数据到 L 颗 LEO 卫星,RHS 辅助多卫星通信系统如图 2 所示。为了方便,假设每颗卫星单天线接收信号。RHS 可通过全息原理实现动态波束成形,以应对卫星的移动性。同样也因为低轨卫星的高移动性,卫星的位置沿轨道随时间变化。这会影响 RHS 和卫星之间的信道以及全息波束成形方案。为了支持地面用户终端和多颗卫星连续通信,提出了一种 RHS 辅助多卫星通信方案。该方案将通信时间分为多个小时隙,在每个小时隙中,首先通过卫星追踪方案确定 L 颗卫星的位置,并假设在划分的时隙中卫星的位置保持不变。然后依据确定的卫星位置,用户根据数据传输模型实现数据传输。在数据传输过程中,可利用和速率最大化算法优化全息波束成形矩阵以获得最优和速率。具体的卫星追踪方案、卫星通信传输模型与和速率最大化算法会在后文分别介绍。

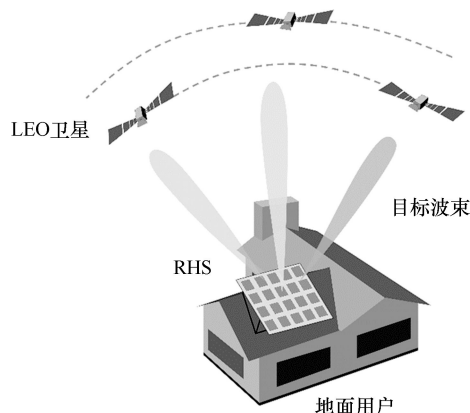


图 2 RHS 辅助多卫星通信系统

2.2 卫星追踪方案

卫星追踪方案的主要思想是利用卫星位置随时间的变化规律确定卫星的方位,从而避免频繁的卫星定位。

不失一般性,假设 LEO 卫星在轨道上做匀速圆周运动^[19],LEO 卫星运动轨迹如图 3 所示。将通信时间划分为 T 个时隙,在每个时隙中,卫星 l 的位置 $(\theta_l^{(i)}, \varphi_l^{(i)})$ 保持不变。由于卫星做匀速圆周运动,给定两个相邻时隙中的位置,卫星运动角速度可计算得到,并据此可以预测卫星在下一个时隙中的位置^[20]。基于上述卫星位置随时间变化的规律,RHS 辅助多卫星通信方案中的卫星追踪方案可以总结如下。在前两个时隙(即时隙 $t-1$ 和时隙 $t-2$)中,卫星的两个初始位置 $(\theta_l^{(t-1)}, \varphi_l^{(t-1)})$

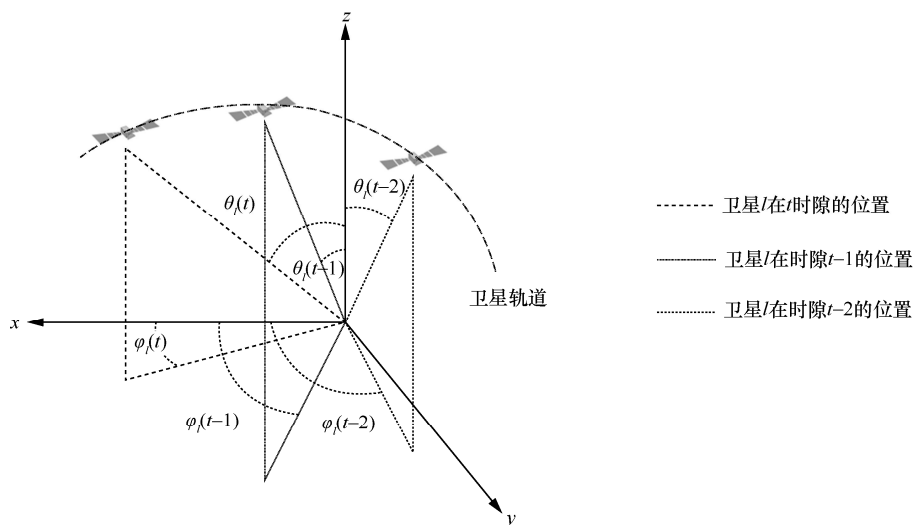


图 3 LEO 卫星运动轨迹

和 $(\theta_l^{(t-2)}, \varphi_l^{(t-2)})$ 可通过传统技术利用接收信号强度获得。在时隙 t 及以后, 用户终端根据两个初始位置及卫星位置随时间变化的规律能够追踪低轨卫星的位置, 并更新相应的全息波束成形方案。需要注意的是, 卫星运动中会受到各种扰动 (如大气阻力等) 的影响, 这会导致卫星追踪出现累计误差。为了避免误差累计, 每个卫星每间隔 τ 个时隙会向用户终端回传接收信号强度。如果接收信号强度小于阈值, 在接下来的两个时隙中, 卫星位置将被重新捕获, 接着地面用户终端利用新捕获的位置信息进行追踪。

2.3 卫星通信传输模型

第 1.2 节介绍了通过振幅控制实现全息波束成形的 RHS, 本节考虑设计一种将其应用于卫星通信场景的信号传输模型。基于 RHS 的信号传输模型如图 4 所示, 配备有 RHS 的地面用户终端可以通过动态波束成形实现与卫星通信。图 4 中信号的传输过程可以总结如下。射频 (radio frequency, RF) 链首先将发射信号上变频到载波频率, 然后将上变频后的信号发送到 RHS 的馈源处。在馈源的转换下, RF 链中以高频电流的形式传播的信号变为在 RHS 表面传播的电磁波 (在 RHS 中也被称为参考波)。RHS 表面上传播的参考波在辐射幅度可控单元的控制下实现全息波束成形, 即辐射单元把参考波转换为漏波, 将参考波能量辐射至自由空间。各辐射单元处产生的漏波叠加产生指向 L 颗卫星的目标波束, 各波束中包含相同的信息。各卫星处通过单天线接收从地面 RHS 处发出的信号。

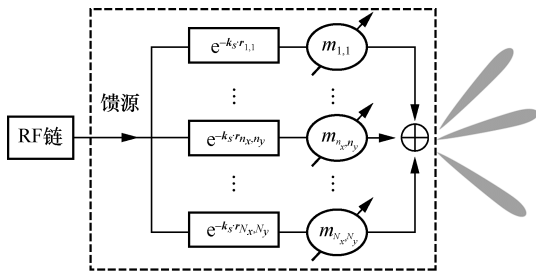


图 4 基于 RHS 的信号传输模型

对以上传输过程进行建模。假设从用户终端发送的信号为 s , 发射总功率为 P_t , $\mathbf{M} \in \mathbb{C}^{N_x N_y \times 1}$ 表示全息波束成形矩阵, 则卫星 l 接收信号可以表示为:

$$y_l = \mathbf{H}_l \mathbf{M} \sqrt{P_t} s + z_l \quad (6)$$

其中, $z_l \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 是加性白高斯噪声, $\mathbf{H}_l \in \mathbb{C}^{1 \times N_x N_y}$ 是从 RHS 到卫星 l 的信道矩阵。考虑到用户终端与卫星之间距离较大, 大尺度衰落对信号强度产生的影响较大, 而小尺度衰落的影响可以忽略不计。因此视距信道主导了用户终端与卫星之间的通信。从 RHS 第 (n_x, n_y) 个单元到卫星 l 的信道可建模为:

$$h_{n_x, n_y}^l = \frac{\lambda \sqrt{G_l} \sqrt{A_l} \cdot e^{-jk_f \cdot d_{n_x, n_y}^l}}{4\pi |d_{n_x, n_y}^l|} \quad (7)$$

其中, A_l 是 RHS 单元的有效口径, 取决于卫星方向, G_l 是卫星接收天线的增益, λ 为信号在自由空间中的波长, d_{n_x, n_y}^l 是从第 (n_x, n_y) 个单元到卫星 l 的距离矢量。

2.4 全息波束成形矩阵

本节将详细介绍全息波束成形矩阵 $\mathbf{M}$ 。根据第 1.2 节中的全息波束成形原理, RHS 可以设置各单元生成辐射振幅为 $m_{n_x, n_y} = \sum_{l=1}^L a_l \cdot m(r_{n_x, n_y}, \theta_l, \varphi_l)$ 并指向 $\{(\theta_l, \varphi_l) | l=1, 2, \dots, L\}$ 这 L 个方向的波束。叠加系数 $\{a_l\}$ 为非负实数且满足 $\sum_{l=1}^L a_l = 1$ 来确保每个单元的辐射能量不大于每个单元的接收能量。同理, 由于能量守恒定理, RHS 辐射的总能量是小于或等于总发射能量的。因此有 $\sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} P_s \cdot m_{n_x, n_y}^2 \leq P_t$, 其中 P_s 是各单元接收功率, P_t 是总发射功率。定义 RHS 单元效率 η 为单元接收功率 P_s 与发射功率 P_t 之比, 则 η 满足 $\sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} \eta \cdot m_{n_x, n_y}^2 \leq 1$ 。需要说明的是, RHS 单元效率 η 是由 RHS 的尺寸和物理结构决定的, 对于具有给定尺寸和物理结构的 RHS, η 为常数。通常为了实现 RHS 的最佳性能, η 在设计时取最大值。



综上, 全息波束成形矩阵 $\mathbf{M} \in \mathbb{C}^{N_x N_y \times 1}$ 中的元素可以表示为:

$$M_{n_x, n_y} = \sqrt{\eta} \cdot m_{n_x, n_y} \cdot e^{-\alpha |r_{n_x, n_y}|} \cdot e^{-j\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_{n_x, n_y}} \quad (8)$$

其中, α 是参考波传播时的衰减常数, $e^{-\alpha |r_{n_x, n_y}|}$ 和 $e^{-j\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_{n_x, n_y}}$ 分别是参考波从馈源传播到第 (n_x, n_y) 个单元的幅度衰减和相位变化。

2.5 卫星系统和速率最大化算法

在数据传输过程中, 目标是在归一化辐射幅度的约束下, 通过优化叠加系数 $\{a_l\}$ 来优化全息波束成形矩阵, 实现 RHS 辅助卫星通信系统的和速率最大化。因为在全息波束成形矩阵中各单元振幅为各方向对应全息图案叠加之和, 所以叠加系数 $\{a_l\}$ 会共同作用于波束生成, 进而导致和速率表达式中的 $\{a_l\}$ 相互耦合, 系统和速率是关于 $\{a_l\}$ 的非凸函数, 让全息波束成形优化问题变得复杂。具体的和速率最大化问题可建模为:

$$\begin{aligned} \max_{\{a_l\}} R_{\text{sum}} &= \sum_{l=1}^L \text{lb}(1 + \text{SNR}_l) \\ \text{s.t. } \sum_l a_l &= 1, a_l \geq 0, \forall l \end{aligned} \quad (9)$$

其中, R_{sum} 是和速率, SNR_l 是卫星 l 的接收信号的信噪比且具有分子分母均包含 $\{a_l\}$ 的分式形式。

因为式 (9) 中的和速率表达式是 $\{a_l\}$ 的非凸函数, 所以无法用常规方法求解。为了解决全息波束成形优化问题, 应用分式规划的方法将和速率表达式转换为等价的凹函数最大值, 其关键思想是引入两个辅助变量将非凸问题转换为一系列凸优化问题^[21]。具体来说, 主要通过拉格朗日对偶的思想对 R_{sum} 进行转换, 利用分数形式重新表示对数表达式, 再将分数形式转换为线性形式。在分式规划中, 首先通过引入辅助变量 $\{\gamma_l\}$ 将 SNR_l 剥离出对数表达式, 把和速率转换为 SNR_l 的分数表达式, 即式 (9) 等价于:

$$\begin{aligned} \max_{\{a_l\}, \{\gamma_l\}} & \sum_{l=1}^L \text{lb}(1 + \gamma_l) - \gamma_l + \frac{(1 + \gamma_l) \text{SNR}_l}{1 + \text{SNR}_l} \\ \text{s.t. } \sum_l a_l &= 1, a_l \geq 0, \forall l \end{aligned} \quad (10)$$

然后通过辅助变量 $\{\zeta_l\}$ 把从对数表达式中取出的 SNR_l 转换为关于 $\{a_l\}$ 的线性表达式。因为 $\frac{(1 + \gamma_l) \text{SNR}_l}{1 + \text{SNR}_l}$ 可以写为 $\frac{A_l(a_1, \dots, a_L)}{B_l(a_1, \dots, a_L)}$ 的形式, 并且 $\frac{A_l(a_1, \dots, a_L)}{B_l(a_1, \dots, a_L)}$ 的最大值等价于:

$$\max_{\{a_l\}, \{\zeta_l\}} 2\zeta_l \sqrt{A_l(a_1, \dots, a_L)} - \zeta_l^2 B_l(a_1, \dots, a_L) \quad (11)$$

因此, 和速率最大化问题 (式 (9)) 等价于:

$$\begin{aligned} \max_{\{a_l\}, \{\gamma_l\}, \{\zeta_l\}} F &= \sum_{l=1}^L \text{lb}(1 + \gamma_l) - \gamma_l + \\ & 2\zeta_l \sqrt{A_l(a_1, \dots, a_L)} - \zeta_l^2 B_l(a_1, \dots, a_L) \\ \text{s.t. } \sum_l a_l &= 1, a_l \geq 0, \forall l \end{aligned} \quad (12)$$

当和速率表达式转换为与其等价的凹函数最大值 (即式 (12)) 时, 实现和速率最大化的最优全息叠加系数 $\{a_l\}$ 的求解过程可以分为两步。第一步, 固定 $\{a_l\}$, 通过 $\partial F / \partial \gamma_l = 0$ 和 $\partial F / \partial \zeta_l = 0$ 可以得到辅助变量的最优值 $\{\gamma_l^*\}$ 和 $\{\zeta_l^*\}$ 。第二步, 固定辅助变量, 采用拉格朗日对偶松弛归一化辐射幅度约束, 利用 $\partial F / \partial a_l = 0$ 和平稳性条件联合求解得到最优的叠加系数 $\{a_l^*\}$ 。全息波束成形算法可以总结为反复迭代上述两步直至收敛。利用全息波束成形算法, 可以解决全息波束成形优化问题, 实现卫星系统和速率最大化。

使用 MATLAB 软件进行仿真, 应用上述全息波束成形算法, 评估了 RHS 辅助的地面卫星通信系统的性能表现。仿真参数根据文献[12]和 3GPP 标准^[22]进行设置。载波频率 f 设为 30 GHz, 波束在自由空间中的传播矢量满足 $|\mathbf{k}_f| = 2\pi f / c$, 参考波在 RHS 上的传播矢量满足 $|\mathbf{k}_s| = \sqrt{3} |\mathbf{k}_f|$, 其中 c 是光速。不失一般性, 假设 RHS 满足 $N_x = N_y$, 卫星数量 $L=3$, 地面用户终端发射功率为 10 W。RHS 辅助地面卫星通信和速率随 RHS 单元数 N_x 的变化如图 5 所示, 由于 RHS 单元数量增加带来了空间复用增益, 和速率随着 RHS 单元数的增加而增长。优化得到 $\{a_l^*\}$ 的最优系统和速率高于 $\{a_l\}$

随机取值时的系统和速率,这说明了全息波束成形优化算法的有效性。虽然算法中的迭代过程不能提供使 RHS 辅助通信系统和速率最大化的最优叠加系数的 $\{a_i^*\}$ 闭式解,但图 5 表明,得益于卫星通信中卫星与地面端的距离远大于 RHS 的尺寸,当 RHS 包含足够多单元时,无论衰减常数 α 如何取值,全息图案均匀叠加(即 $a_i = 1/L$)都可以实现系统和速率最大化。

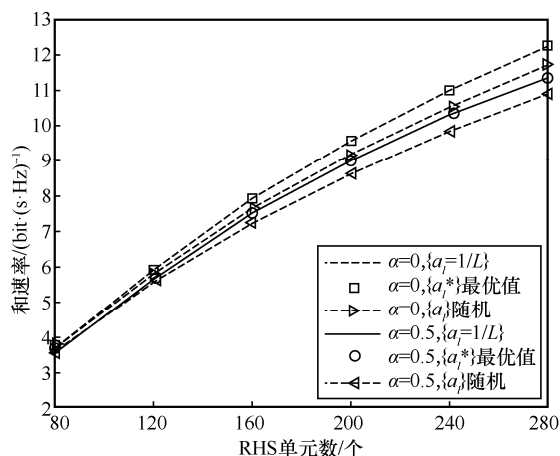


图 5 RHS 辅助地面卫星通信和速率随 RHS 单元数 N_x 的变化

3 RHS 辅助卫星通信系统性能分析

本节通过对比 RHS 辅助卫星通信系统和传统相控阵辅助卫星系统的和速率、功耗和制作成本,评估 RHS 的性能表现。

由于亚波长大小的天线制作困难以及紧密间隔天线之间会相互耦合,相控阵的天线距离通常为半波长。这限制了可以部署在给定尺寸的天线阵列中天线单元的数量,从而导致天线增益不足。RHS 作为一种超材料天线,其独特的单元结构使得相邻 RHS 单元之间的间距可以小于 $1/5$ 波长。因此同等面积下, RHS 包含的单元数至少是相控阵单元数的 6.25 倍,具有更精准的波束成形潜力。

除此之外, RHS 还有功耗低和硬件成本低两大优势。大型传统相控阵的制作需要高价电子元件,如移相等^[23],但制作 RHS 所需的所有组件

(如二极管、PCB 和直流控制电路)都是大批量商用现成零件,因此 RHS 的总体制造和硬件成本较低。具体而言,相控阵的硬件成本通常是具有相同单元数量的 RHS 的硬件成本的 2~10 倍^[11]。同时,相较于相控阵, RHS 内部不依赖于有源放大器和复杂的移相电路^[24],只需要简单的直流偏置电路即可实现波束调控,具有功耗低的优势。RHS 功耗低与硬件成本低的优势会随着天线尺寸的增大而变得明显。相控阵多天线系统受到制作成本约束和功耗约束,难以实现超大规模天线系统的部署。RHS 可利用功耗低与硬件成本低的优势,突破传统相控阵面临的瓶颈,进一步提升数据速率,在未来的 6G 网络中更具发展前景。

通过 MATLAB 仿真,可以直观地看出 RHS 由硬件成本低带来的优势。MATLAB 仿真参数设置与第 2.3 节相同,设置相控阵每个单元的硬件成本是 RHS 的 4 倍。定义成本效率为系统和速率与硬件成本的比值。成本效率与单元数量之间的关系如图 6 所示。从图 6 可以清晰地发现,无论是单卫星场景还是多卫星场景, RHS 的单位成本可实现的和速率超过了相控阵单位成本可实现的和速率^[25]。

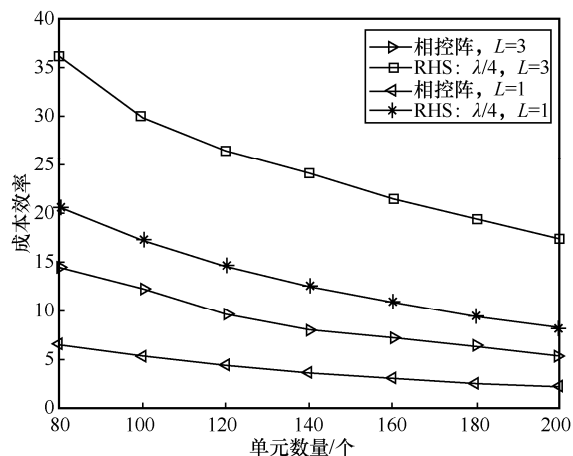


图 6 成本效率与单元数量之间的关系

4 RHS 未来研究方向

由于 RHS 拥有轻薄、硬件成本低、功耗低等一系列优势, RHS 在各类通信场景中具有极大的



发展潜力和应用价值，这同时为 RHS 的关键技术研发带来了一系列挑战。

4.1 关键技术

作为通信系统中的集成天线，RHS 需要满足高辐射效率和高天线增益的要求，这对 RHS 的尺寸设计和单元间距设计提出了挑战。在设计 RHS 辅助通信系统的传输方案时，也需要考虑信道估计、资源管理等问题。

- **RHS 尺寸设计：**尽管随着 RHS 尺寸的增大，RHS 具有更高的天线增益，可以实现更高的和速率，但天线尺寸变大也会提高控制电路设计复杂度。并且随着 RHS 尺寸的增大，参考波的能量随传播距离的增加逐步下降。当 RHS 尺寸过大时，参考波传播到 RHS 边缘时能量变弱，这导致 RHS 边缘的辐射元件冗余。因此 RHS 的尺寸设计需要兼顾系统性能、制作难度及成本，综合考虑各单元的辐射效率与电磁波介质中的传播衰减，避免辐射单元冗余。
- **RHS 单元间距设计：**理论上，具有较小单元间距的 RHS 可以生成更窄、更精确的定向波束。但在实际工程中，单元之间的耦合效应会随间距变小而变得更强。这会影响到 RHS 单元原有的辐射特性，从而影响通信性能。因此，RHS 单元间距与耦合效应之间需要更准确的建模，并且单元间距带来的耦合效应对全息波束成形方案的影响也不能忽视。
- **信道估计：**因为 RHS 包含许多密集的辐射单元，所以基于导频训练和信道信息反馈的信道估计会产生巨大的开销。为了减少导频训练开销并实现快速准确的信道估计，需要设计与 RHS 辅助传输的信道特性相结合的导频波束模式，实现快速准确的信道估计。
- **资源管理：**在 RHS 辅助通信中有众多资源，

如制作成本、发射功率、信道等。克服变量之间的耦合，联合优化全息图案、发射功率、信道等有限的资源，设计合理的数据传输方案可实现 RHS 辅助通信性能指标最优。

4.2 应用场景

RHS 不仅可以应用于本文主要讨论的 LEO 卫星通信，还适用于许多其他场景。下面将宽带通信和室内通信作为典型应用场景进行介绍。

- **宽带通信：**正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）频谱效率高，是宽带通信中的主要技术。但当 OFDM 用于高频系统时，处于载波频率的波束会遇到严重的波束分裂问题，从而降低数据速率。不同于使用昂贵延迟移相器的传统波束分裂抑制方法，RHS 可利用全息波束成形抑制波束分裂^[26]。具体来说，RHS 可以通过参考波在不同子信道上传播，自然地将频率相关分量引入全息波束成形矩阵，因此，通过优化各波束方向对应全息图案的叠加系数可以有效消除由波束分裂引起的旁瓣，从而提升 OFDM 通信系统的性能。
- **室内通信：**得益于紧凑结构和体积小的优势，RHS 可以部署在室内小型基站处，实现 RHS 辅助室内通信。在室内场景中，通过联合优化基于 RHS 的波束成形方案和位置估计函数，能够精确定位移动用户的位置。根据准确的用户位置，可设计指向不同用户的窄波束来降低多用户之间的干扰。同时，通过联合优化 RHS 的部署位置和全息波束成形方案，可以达到扩大室内通信覆盖范围并提高用户的服务质量的目的。

5 结束语

本文考虑了可应用于未来 6G 通信网络的 RHS。RHS 可通过全息原理实现精准的波束控制，集成

在地面用户终端上用于卫星通信。本文介绍了 RHS 的硬件结构及其基本工作原理,同时,研究了 RHS 辅助卫星通信系统中的关键技术,即基于卫星位置随时间变化规律的卫星追踪技术与最大化和速率的全息波束成形优化算法。仿真结果验证了算法的有效性,同时表明,相较于传统的相控阵天线,RHS 提供了一种成本效益更高的方式来支持卫星通信。除此之外,本文还围绕 RHS 的未来应用方向,比如 RHS 辅助下的宽带通信和室内通信,以及相应的关键技术进行了探讨。

参考文献:

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [2] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 62-69.
- [3] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Ultra-dense LEO satellite constellations: how many LEO satellites do we need? [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4843-4857.
- [4] PIZZO A, MARZETTA T L, SANGUINETTI L. Spatially-stationary model for holographic MIMO small-scale fading[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(9): 1964-1979.
- [5] WAN Z W, GAO Z, GAO F F, et al. Terahertz massive MIMO with holographic reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7): 4732-4750.
- [6] BADAWE M E, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. A true metasurface antenna[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19268.
- [7] HWANG R B. Binary meta-hologram for a reconfigurable holographic metamaterial antenna[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8586.
- [8] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Reconfigurable holographic surface: holographic beamforming for metasurface-aided wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 6255-6259.
- [9] SLEASMAN T, IMANI M F, XU W R, et al. Waveguide-fed tunable metamaterial element for dynamic apertures[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 606-609.
- [10] JOHNSON M C, BRUNTON S L, KUNDTZ N B, et al. Extremum-seeking control of the beam pattern of a reconfigurable holographic metamaterial antenna[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2016, 33(1): 59-68.
- [11] Pivotal Commware. Holographic beamforming and phased arrays[EB]. 2019.
- [12] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Holographic MIMO for LEO satellite communications aided by reconfigurable holographic surfaces[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(10): 3071-3085.
- [13] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Reconfigurable holographic surfaces for future wireless communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(6): 126-131.
- [14] DI B Y, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: achievable rates with limited discrete phase shifts[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1809-1822.
- [15] ZHANG H B, ZHANG H L, DI B Y, et al. Holographic integrated sensing and communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2114-2130.
- [16] HU X Y, DENG R Q, DI B Y, et al. Holographic beamforming for ultra massive MIMO with limited radiation amplitudes: how many quantized bits do we need? [J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(6): 1403-1407.
- [17] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Reconfigurable holographic surface-enabled multi-user wireless communications: amplitude-controlled holographic beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(8): 6003-6017.
- [18] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. HDMA: holographic-pattern division multiple access[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(4): 1317-1332.
- [19] SIDIBEH K, VLADIMIROVA T. Wireless communication in LEO satellite formations[C]//*Proceedings of 2008 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*. Piscataway: IEEE Press, : 255-262.
- [20] GAO X Y, DAI L L, ZHANG Y, et al. Fast channel tracking for terahertz beamspace massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5689-5696.
- [21] SHEN K M, YU W. Load and interference aware joint cell association and user scheduling in uplink cellular networks[C]//*Proceedings of 2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [22] 3GPP. 3rd generation partnership project; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (release 16): TR 38.901 V16.1.0[S]. 2020.
- [23] ZHELUDEV N I. Applied physics. The road ahead for metamaterials[J]. *Science*, 2010, 328(5978): 582-583.
- [24] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.



- [25] SOHRABI F, YU W. Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 501-513.
- [26] DI B Y. Reconfigurable holographic metasurface aided wide-band OFDM communications against beam squint[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5): 5099-5103.



邱博雅（1992- ），女，博士，北京大学电子学院助理教授，主要研究方向为无线通信、边缘计算、车载网络、智能反射面和非正交多址接入等。

[作者简介]



胡馨元（2000- ），女，北京大学电子学院博士生，主要研究方向为可重构全息超表面。



张泓亮（1992- ），男，博士，北京大学电子学院助理教授，主要研究方向为可重构智能表面、空中接入网络、优化理论和博弈论等。



邓若琪（1997- ），女，北京大学电子学院博士生，主要研究方向为可重构全息超表面及卫星网络等。



宋令阳（1979- ），男，博士，北京大学电子学院教授，主要研究方向为无线通信和网络、MIMO、OFDMA 以及信号处理和机器学习等。