



专题：6G 智能超表面

RIS 辅助多用户波束跟踪系统与硬件试验

丁陈龙, 许文俊, 张鸿涛

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS, 也称智能超表面) 通过智能调控电磁传播路径, 有效提高了 6G 通信系统的性能。然而, RIS 集成大量反射单元使得多波束调控复杂度高、码本搜索空间大, 导致实时调控能力不足, 难以应用于多用户波束跟踪。为提升 RIS 在多用户移动场景的适用性, 创新基于逆衍射的场源迭代模型, 快速生成近远场多用户调控码本, 设计 RIS 辅助单基站定位方案, 感知用户移动位置实时切换波束。研制 RIS 辅助多用户波束跟踪系统原型, 实现多用户移动过程中快速波束对准。试验结果表明, 毫秒级波束切换可实现移动多用户的实时信息传输。

关键词: 智能超表面; 多波束生成; 波束跟踪; 硬件试验

中图分类号: TP929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024186

RIS-assisted multi-user beam tracking system and hardware experiment

DING Chenlong, XU Wenjun, ZHANG Hongtao

Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) effectively improves the performance of 6G communication systems by intelligently controlling the electromagnetic propagation path. However, the integration of a large number of reflecting elements in RIS increases the complexity of multi-beam control and enlarges the codebook search space, leading to insufficient real-time control capabilities and difficulties in multi-user beam tracking. To enhance the applicability of RIS in multi-user mobile scenarios, an innovative inverse diffraction-based field source iterative model was proposed to rapidly generate near- and far-field multi-user control codebooks. A RIS-assisted single base station positioning scheme was designed to sense the movement of users and switch beams in real-time. A prototype of a RIS-assisted multi-user beam tracking system was developed, enabling fast beam alignment during multi-user mobility. Experimental results show that millisecond-level beam switching can achieve real-time information transmission for mobile multi-users.

收稿日期: 2024-06-23; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271082)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62271082)



Key words: reconfigurable intelligent surface, multi-beam generation, beam tracking, hardware experiment

0 引言

可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS, 也称智能超表面) 技术通过智能调控电磁波的传播路径, 为6G网络提供了一种有效的解决方案^[1-2]。RIS通过构建虚拟视距路径、增强信号聚焦、扩展覆盖范围以及减少干扰, 为6G无线通信网络提供了新的优化维度, 推动通信技术向智能化和高效能方向发展^[3-6]。然而, 在RIS辅助的移动场景中, 需要实现精准的多波束跟踪以适应用户的移动性和环境变化, 提高网络资源利用率, 提升用户体验。

随着对RIS的研究逐步展开, 学术界针对RIS开展了大量原型系统测试。东南大学首先实现毫米波段单用户通信原型系统以及RIS自由空间路径损耗的实测^[7]; 华中科技大学通过设计RIS的单比特相位优化调节算法, 开展了室内穿透、室外远距离单用户静态通信测试^[8]; 英国萨里大学 (University of Surrey) 进一步基于变容二极管实现相位连续调控, 实现室内单用户动态波束切换^[9]。然而, 多个波束生成需要独立的相位和振幅控制, RIS集成大量反射单元使得多波束调控的复杂度显著提升^[10], 同时, 波束跟踪需要具备高度灵敏的感知能力, 能够及时捕捉用户移动的位置变化。因此, 现有原型平台由于缺乏多波束快速调控和实时感知定位能力, 难以开展多用户移动场景下的波束跟踪测试。

目前常见的一种多波束调控方式是通过调节幅度和相位来实现反射场的波前调控^[11-12], 但同时调节幅度和相位对RIS的控制复杂度提出了更高的要求, 并且幅度重新配置导致反射的整体损耗增大, 使辐射效率降低。另一种解决方案是在时域内的用户之间进行切换^[13], 即时分复用。然而, 6G关键性能指标要求RIS在几微秒内完成重

构^[14], 现有的控制装置难以满足。此外, 还可以通过空间划分实现复用^[15], 然而, 这需要一个非常大的阵列孔径才能实现多目标波前设计。因此, RIS依然需要依赖低复杂度的相位优化设计, 实现多波束的高增益灵活调控。

传统基站定位方式, 如基于到达时间差 (time difference of arrival, TDOA) 和接收信号强度 (received signal strength, RSS) 定位的方法, 通常需要部署多个基站或多个天线实现, 存在部署成本大、精度不佳及鲁棒性差等问题^[16]。RIS集成大量低成本的反射单元, 具备智能调控信号的能力, 其较大的孔径能提升空间分辨率, 使单基站单发单收定位成为可能^[17]。然而, 目前利用RIS辅助定位停留在理论分析阶段, 在实际实现中将存在发射天线、RIS、接收天线的时间同步问题和接收信号的及时处理反馈等问题^[18]。因而, 基于RIS辅助定位的硬件实现亟待深入探索, 为多用户移动场景下的动态、及时服务提供可靠支撑。

基于此, 本文研制了RIS辅助多用户波束跟踪系统原型, 实现多波束快速切换。针对多波束优化, 本文提出了基于逆衍射的多目标盖斯贝格-撒克斯通 (Gerchberg-Saxton, GS) 迭代相位调控模型, 实现低复杂度的远场多波束生成和近场多点聚焦, 进一步通过无源RIS辅助单基站定位实现波束实时跟踪, 避免了码本搜索导致的高时延, 最后, 基于该架构进行了RIS辅助多用户移动通信硬件试验。试验结果表明, 通过优化RIS码本实现多波束生成, 覆盖区域接收信号功率提升14.1~23.5 dB, 用户和速率提升2.3倍。高速码本指令切换 (<8 ms) 和实时定位 (厘米级), 实现了对移动多用户的波束跟踪, 可传输稳定的多流视频数据。

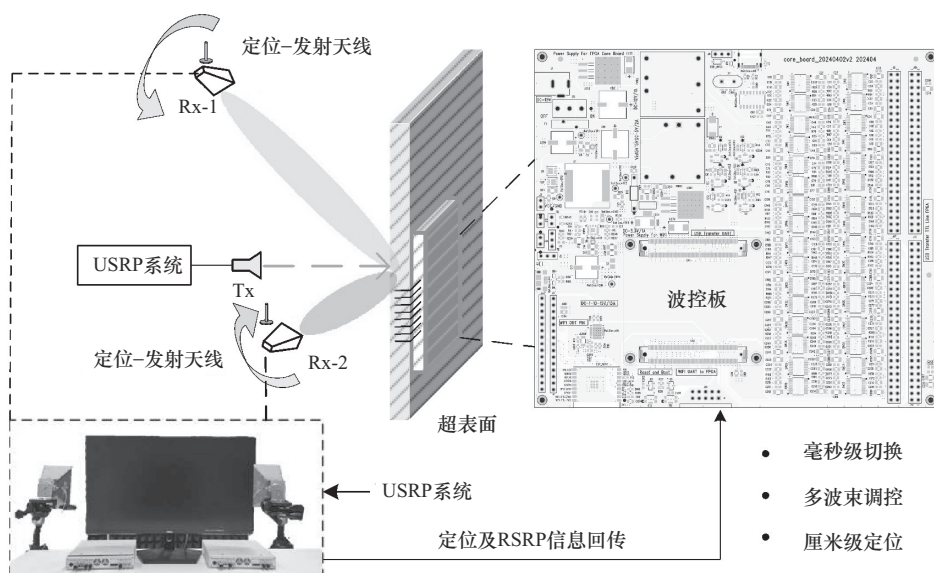


图1 RIS辅助多用户波束跟踪系统架构

1 RIS辅助多用户波束跟踪系统原型

RIS辅助多用户波束跟踪系统架构如图1所示，图1给出了硬件功能组成和运行方案，主要包括多比特调控智能超表面面板、支持多用户的高速波控板及配套的反馈链路和控制算法。

1.1 多比特调控超表面单元

本文所使用的多比特调控超表面基于谐振贴片结构设计，由二维紧密排布的电可控3 bit阵列单元组成，中心工作频率为5.8 GHz。RIS单元的几何结构如图2所示，上层由一个工字形谐振贴片和单元间互相连接的直流偏置线组成，单元由3层介质材料压合，上层与底层分别使用厚度为2.2 mm与2 mm的F4B介质基板，介电常数 $\epsilon_r=2.65$ ，中间使用0.05 mm的Prepreg材料进行黏合，介电常数 $\epsilon_r=2.5$ 。变容二极管（MAVR-000120-1411）将工字形贴片的上下两部分连接起来，贴片的直流偏置线将为变容二极管提供偏置电压。根据所设计的单元结构，本文使用高频结构仿真软件（high frequency simulator structure, HFSS）进行全波仿真。

所设计的基于变容二极管的多比特可调超表

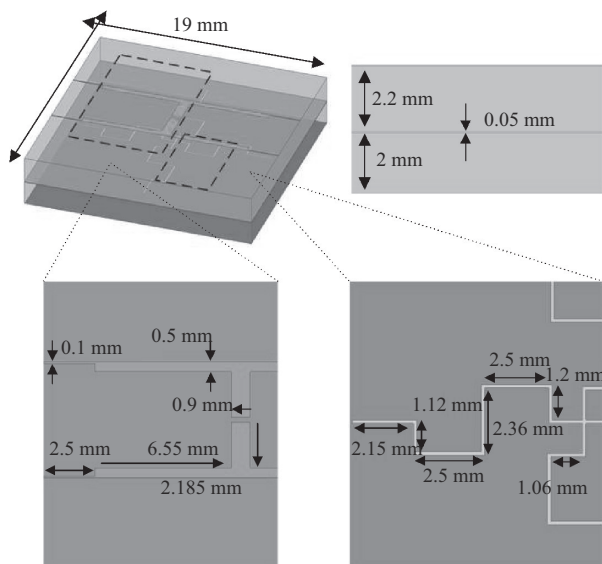


图2 RIS单元的几何结构

面单元，通过控制二极管两极的偏置电压，改变其容值以实现贴片对入射电磁波谐振的相应控制，其电容对应相位响应的仿真结果如图3所示。当电容值在0.15~0.95 pF范围内变化时，多比特调控超表面可以实现315°以上的相位差，覆盖3 bit调控精度的相位范围，并且通过精确控制电容值，可以实现8种相位差为45°的状态，满足3 bit调控要求。

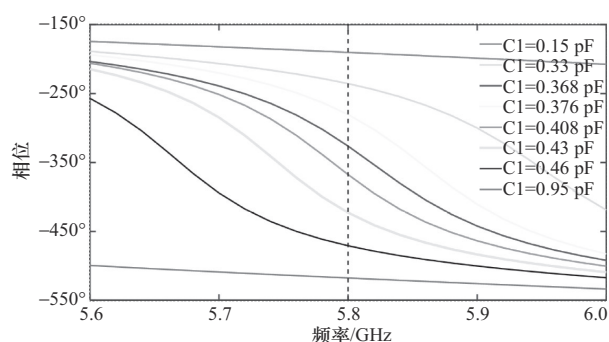


图3 电容对应相位响应的仿真结果

1.2 高速波控系统

为实现用户在移动过程中的实时波束对准，本文进一步设计了支持多用户的高速波控系统，如图4所示，该系统主要包括通用软件无线电外设（universal software radio peripheral, USRP）辅助通信系统、无线反馈链路、高速波控板。其中，USRP系统包括USRP X310和上位机，用于模拟实际通信系统中信号处理过程，发射链路包括射频开关、功率放大器、混频器、锁相环、低通滤波器、数模转换器以及数字变频器，接收链路包括射频开关、低噪功率放大器、混频器、锁相环、低通滤波器、模数转换器以及数字变频器，发射和接收链路模拟信号在实际通信过程中的采样、抽取、调制解调以及信道编码处理过程。

系统工作时，USRP辅助通信系统会模拟实

际通信系统发送视频流信号，首先对传输的通信比特流进行编码，经过基带信号处理映射成通信符号，先后经过信道编码和上变频等处理，通过发射天线将电磁波信号发射至RIS，经过RIS反射至无线空间，接收端则通过接收天线接收该信号并进行解调制、下变频等操作，并将处理后的数据传输给上位机。

上位机进一步通过TCP/UDP将数据从无线反馈链路传输到高速波控板，控制板操控Wi-Fi模块的ESP32芯片接收反馈信号，软件测试数据传输一组信号的时间为2 ms，Wi-Fi模块通过UART接口以115 200 baud的波特率与现场可编程门阵列（field-programmable gate array, FPGA）控制板进行通信，FPGA核心板根据反馈的定位信息和用户接收信号功率切换对应的码本，通过数模转换器（digital to analog converter, DAC）模块输出模拟电压调控超表面单元的反射系数（包括幅度和相位）。FPGA的仿真结果显示，UART传输一组码本的时间为5.794 1 ms，因此，从接收端数据反馈到完成码本切换总耗时为7.794 1 ms，能够实现用户移动时的高速码本切换。

2 移动多目标调控关键技术

目前，基于RIS的多波束调控方式主要集中

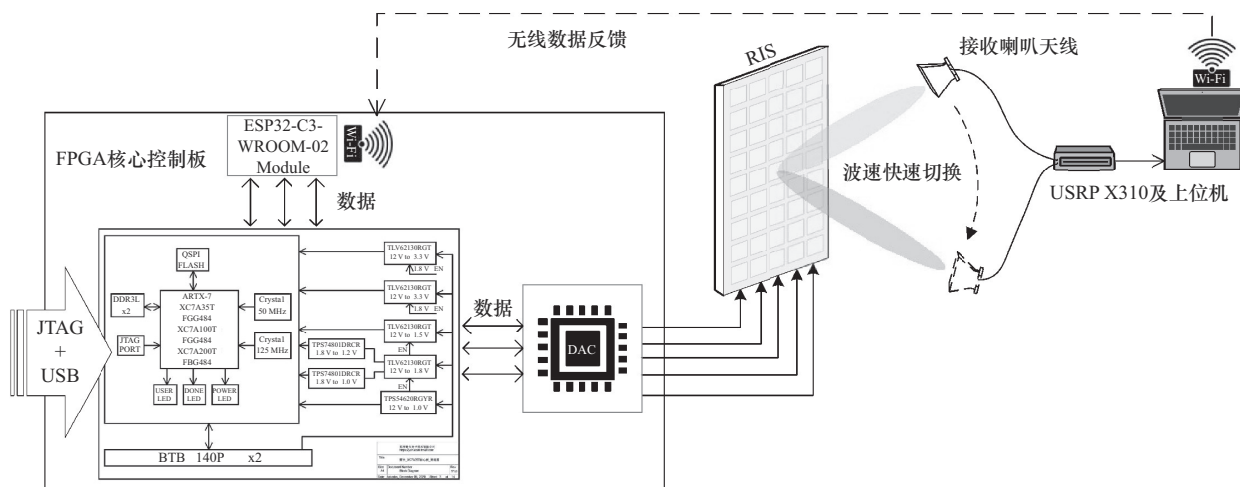


图4 高速波控系统

在幅度相位联调或仅相位调控优化算法上, 调控效率低, 且多目标辐射能量分配不可控, 导致近场用户和远场用户无法统一联调。同时, 为了感知移动用户的位置, 现有方式多基于额外的感知模块, 如雷达成像或视觉提取, 这增加了系统的复杂度。因此, 本文从衍射传播的角度提出一种基于逆衍射的多目标辐射调控模型, 利用 GS 迭代优化实现近场多点聚焦和远场多波束成形, 极大地降低了多目标调控的复杂度, 并且结合无源 RIS 辅助单基站定位算法, 该模型能够实现多目标的实时波束跟踪。

2.1 基于逆衍射的多目标辐射调控

基于电磁超材料理论^[19], RIS 可以被视为由电小谐振散射体组成的表面分布, 由于散射单元之间的亚波长间距以及可忽略不计的电厚度, 可以利用均质化模型描述 RIS 的电磁边界性质。当电介质置于外电场中时, 其分子会获得电偶极矩, 导致电介质产生极化。极化程度通过电极化密度来描述, 反映了材料如何响应外加电场。通俗来说, RIS 可以被广泛地定义为一组极化单元, 它们能够在表面两侧诱导电场和磁场的不连续。这种不连续的差异可以由广义薄片过渡条件 (generalized sheet transition condition, GSTC) 描

述^[20], GSTC 本构关系不仅提供了 RIS 的宏观描述, 还从微观角度解释了单元之间的相互耦合。

因此, 假设三维空间中有一个由厚度为零的矩形平面 S 、一个发射端 (Tx) 和 k 个接收端 (Rx) 组成的系统, 其中, S 为由 $M \times N$ 个亚波长可重构散射体组成的 RIS, 尺寸为 $L_x \times L_y$ 。假设接收端只接收平面 S 的散射波, 不考虑直射链路。平面 S 处于 xy 平面, 矩形中心位于原点, 满足条件 $S = \{s = x\hat{x} + y\hat{y} : |x| \leq \frac{L_x}{2}, |y| \leq \frac{L_y}{2}\}$, Tx 位于 $r_{tx,0} = x_{tx,0}\hat{x} + y_{tx,0}\hat{y} + z_{tx,0}\hat{z}$, Rx 位于 $r_{rx,i} = x_{rx,i}\hat{x} + y_{rx,i}\hat{y} + z_{rx,i}\hat{z}$, $i \in [1, k]$, $z_{tx,0} > 0$ 且 $z_{rx,i} > 0, i \in [1, k]$, 不同的接收端可能处于平面 S 的辐射近场或远场。在近场区域, 考虑不同的接收端可能处于平行于 S 的相同平面或不同平面, 在远场区域, 假设多个用户处于横轴为俯仰角 θ 、纵轴为方位角 ϕ 组成的平面, 所有的接收端一共组成 K 个平面, 每个平面根据接收端的分布所形成的辐射场分布幅值为 T_i , $i \in [1, K]$, 与超表面 S 的垂直距离为 z_i , $i \in [1, K]$ 。所构建的近远场多目标辐射调控模型如图 5 所示。

在均质化 RIS 模型中, S 的每个单元中位置相关的感应电流和磁流被表面平均有效参数所取代。因此, 对由有限大小 (或离散) 单元组成的超

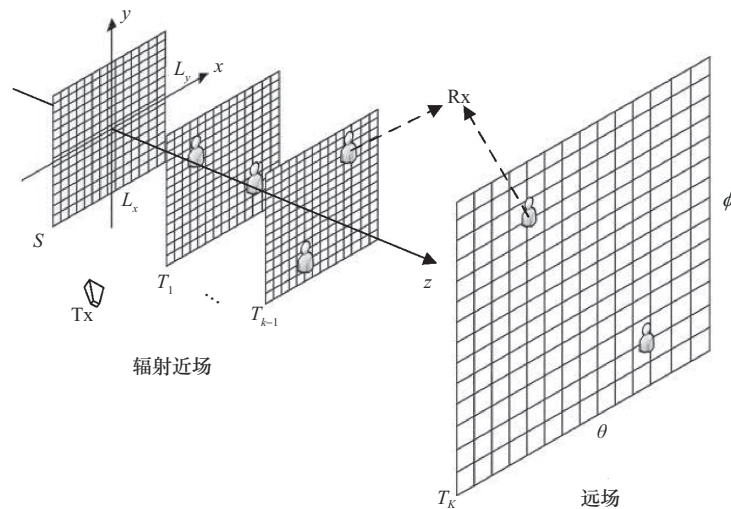


图5 近远场多目标辐射调控模型



表面散射的建模, 可以转化为对等效连续的电流和磁流散射的分析, 进而可以通过改变等效感应电流来实现对超表面的宏观控制^[21]。当入射波到达超表面时, 在平面 S 上形成一个等效的二次源。因此, 本文考虑一个包含二维源的模型, 这些二维源分布在平面 S 上, 并辐射一个由以各个源点 $\mathbf{r}_0 = (x_0 \hat{\mathbf{x}}, y_0 \hat{\mathbf{y}}) \in S$ 为中心的出射球形波的叠加组成的场:

$$E(\mathbf{r}) = \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \left[Q_s(\mathbf{r}_0) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) - Q_d(\mathbf{r}_0) \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{\partial n} \right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

其中, $\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}}$ 为空间中任意位置, $\partial/\partial n$ 的偏导数是从 z^- 指向 z^+ , $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$ 为格林函数, 源分量 $Q_s(\mathbf{r}_0)$ 被称为“单重态”分量, 这是因为其辐射的是简单的单极子球形波 $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$, 而 $Q_d(\mathbf{r}_0)$ 被称为“双重态”分量, 这是因为其辐射的是偶极子 $(\frac{\partial}{\partial n})G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$ 。当两个源分量使得 $E(\mathbf{r})$ 在整个区域内满足亥姆霍兹恒等式时, 式 (1) 中的场可以简化为基尔霍夫-亥姆霍兹表示:

$$\lim_{\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}_0} E(\mathbf{r}) = Q_d(\mathbf{r}_0) \quad (2)$$

$$\lim_{\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}_0} \frac{\partial}{\partial n} E(\mathbf{r}) = Q_s(\mathbf{r}_0) \quad (3)$$

因此, 在这种情况下, 式 (1) 中场 $E(\mathbf{r})$ 可以表示为由表面源 $Q_s(\mathbf{r}_0) = \partial U(\mathbf{r}_0)/\partial n$ 和 $Q_d(\mathbf{r}_0) = U(\mathbf{r}_0)$ 在空间任意位置的辐射场, 称为由入射波 $E^{\text{in}}(\mathbf{r}_0)$ 诱导的“二次源”。根据 GSTC 条件的宏观模型, 可得:

$$E(\mathbf{r}_0) = \mathcal{T}(\mathbf{r}_0) E^{\text{in}}(\mathbf{r}_0) \quad (4)$$

其中, $\mathcal{T}(\mathbf{r}_0)$ 取决于表面孔径材料和几何形状的调控系数。因此, 计算空间中任意一点 $\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}}$ 处的散射场为:

$$E(\mathbf{r}) = \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \left[\frac{\partial(\mathcal{T}(\mathbf{r}_0) E^{\text{in}}(\mathbf{r}_0))}{\partial n} G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) - \mathcal{T}(\mathbf{r}_0) E^{\text{in}}(\mathbf{r}_0) \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{\partial n} \right] dx_0 dy_0 \quad (5)$$

根据瑞利-索末菲衍射近似, 式 (5) 可进一步简化为:

$$E(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \mathcal{T}(x_0, y_0) E^{\text{in}}(x_0, y_0) \frac{z}{R} \frac{e^{jkR}}{R} dx_0 dy_0 \quad (6)$$

其中, $R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2}$ 。从式 (6) 中的散射场计算式可以观察到 RIS 表面辐射区域的整个半空间。通过菲涅耳近似和弗劳恩霍夫近似, 辐射近场和远场的表达式被分别考虑。利用对基尔霍夫衍射场的菲涅耳近似, 可以得到近场散射情况下的结果:

$$E^{\text{Near}}(x, y, z) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \mathcal{T}(x_0, y_0) E^{\text{in}}(x_0, y_0) e^{jk \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z}} dx_0 dy_0 \quad (7)$$

弗劳恩霍夫近似是菲涅耳近似的进一步简化, $\exp(\frac{jk(x_0^2 + y_0^2)}{2z}) \approx 1$, 因此, 可以得到远场的散射场结果:

$$E^{\text{Far}}(x, y, z) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{jk \frac{x^2 + y^2}{2z}} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \mathcal{T}(x_0, y_0) E^{\text{in}}(x_0, y_0) e^{-jk(x_0 x + y_0 y)} dx_0 dy_0 \quad (8)$$

式 (8) 进一步简化成球坐标系形式, 可得:

$$E^{\text{far}}(\theta, \varphi) \approx \frac{1}{j\lambda R} e^{-jkR} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \mathcal{T}(x_0, y_0) E^{\text{in}}(x_0, y_0) e^{-jk(x_0 \sin \theta \cos \varphi + y_0 \sin \theta \sin \varphi)} dx_0 dy_0 \quad (9)$$

当空间中存在多个用户时, RIS 的散射场相较于单个用户时更为复杂。本文基于逆散射分析,

开发了一种调控系数 $\mathcal{T}(x_0, y_0)$ 迭代优化方法, 该方法由表面的入射场和孔径的衍射场来确定。

基于 GS 迭代的多目标辐射调控模型如图 6 所示, 该模型考虑处于近场或远场的多个用户分布在平行于 RIS 的 K 个平面上, 借助 GS 迭代的基本逻辑^[22], RIS 的初始场分布为 H_1 , 包含一个随机的相位和均匀的幅度 h_0 。由于有 K 个平面的场需要重建, 因此, 需要 K 个循环进行迭代, 每个循环迭代过程为:

$$G_i = g_i \cdot \exp(j\phi_i) = T_{z_i}^\lambda(H_i) \quad (10)$$

$$G_i^{\text{constant}} = T_i \cdot \exp(j\phi_i) \quad (11)$$

$$h_i \cdot \exp(j\phi_i) = IT_{z_i}^\lambda(G_i^{\text{constant}}) \quad (12)$$

$$H_{i+1} = h_0 \cdot \exp(j\phi_i) \quad (13)$$

其中, $T_{z_i}^\lambda$ 和 $IT_{z_i}^\lambda$ 分别表示波长为 λ 、距离为 z_i 的菲涅耳 (或弗劳恩霍夫) 变换和逆变换。在第 i 个循环中, RIS 表面场通过衍射传播为第 i 个平面的场分布, 其中, T_i 替换为第 i 个平面的幅度约束, 继而通过逆变换回推 RIS 表面的场分布, 并设置均匀幅度约束 h_0 确保纯相位调制。当 K 个循环完成后, 所有平面的目标场信息引入 RIS 表面的相位分布。

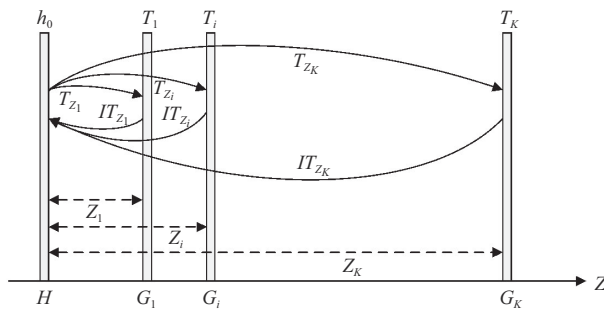


图6 基于GS迭代的多目标辐射调控模型

2.2 RIS辅助移动用户定位

传统定位法通过估计定位信号数据中与位置距离相关的参数来估计用户位置, 包括TDOA、到达角 (angle of arrival, AOA) 以及RSS等。其中, RSS技术可以充分利用现有室内的Wi-Fi和

蓝牙设备, 部署成本低, 但是精度和鲁棒性差; TDOA和AOA均属于交会定位法, 获取定位终端的三维信息, 需要部署至少3个基站, 部署难度大^[23]。近几年, 随着RIS的兴起, 其灵活性和可扩展性得到了广泛的研究, 这为单基站精确定位提供了新的解决思路。

RIS辅助单基站定位方案如图7所示, 本系统算法在给定RIS相位配置信息、传输信号, 以及BS和RIS的位置 p_b, p_r 和相对方向 θ 时, 根据观测接收信号 $\mathbf{Y}$ 估计UE位置及其时钟偏差。

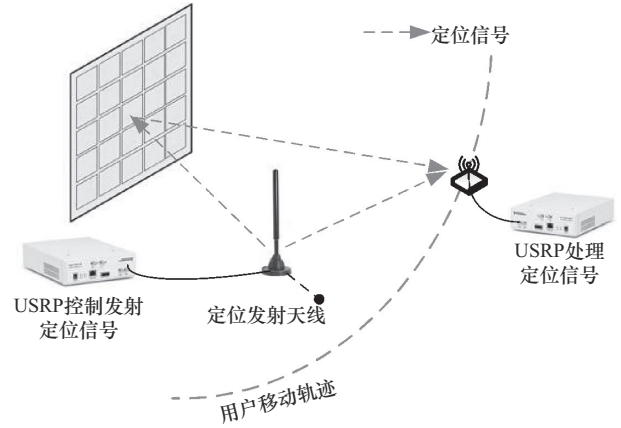


图7 RIS辅助单基站定位方案

对接收信号 $\mathbf{Y}$ 各列进行求和得到 y_c , 计算 y_c 的快速傅里叶逆变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT):

$$\mathbf{F}_{l,m} = (1/N_F) e^{j\pi l m / N_F} \quad (14)$$

其中, N_F 为IFFT矢量的长度, l 和 m 分别表示RIS阵列的第 l 行和第 m 列。再在TOA上进行一维搜索, 估计基站到用户直连信道的时延:

$$\tau_b = l / (N_F \Delta f) \quad (15)$$

其中, Δf 为子载波带宽。

进而估计RIS反射级联信道的时延:

$$\tau_r = \tilde{k} / (N_F \Delta f) \quad (16)$$

$$\tilde{k} = \arg\max \|e_k^T(\mathbf{F}\mathbf{Y}_r)\| \quad (17)$$

其中, $\mathbf{Y}_r$ 为RIS反射到用户的信号, $\|e_k^T(\mathbf{F}\mathbf{Y}_r)\|$ 为从 $\mathbf{Y}_r$ 的IFFT中提取第 k 行。



进一步计算 RIS 相位信息矩阵的 2D IFFT，并在离开角（angle of departure, AOD）上进行二维搜索，估计从 RIS 到用户设备的离开角：

$$\bar{\Gamma}_t = \mathbf{F}_r (\Gamma_t \odot \mathbf{A}(\theta)) \mathbf{F}_c^T \quad (18)$$

其中， $\mathbf{A}(\theta)$ 表示 RIS 对入射信号的相位响应， Γ_t 表示 RIS 阵元的相位偏移， $\mathbf{F}_r$ 和 $\mathbf{F}_c$ 分别表示行 r 的 IFFT 和列 c 的 IFFT。

在每一步的最后利用拟牛顿算法改进估计结果，并通过估计两条链路的时延和角度，计算出用户设备位置以及时钟偏差：

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p}_r + \tilde{\mathbf{k}} \mathbf{R}^T \mathbf{k}(\tilde{\phi}) \quad (19)$$

其中， $\mathbf{p}_r$ 为 RIS 中心点坐标， $\tilde{\mathbf{k}} \mathbf{R}^T$ 为相对于 RIS 的距离， $\mathbf{k}(\tilde{\phi})$ 为空间的相位变化率。

为确保该定位系统的实现，本文解决了发射端 USRP 与 RIS、发射端 USRP 与接收端 USRP、

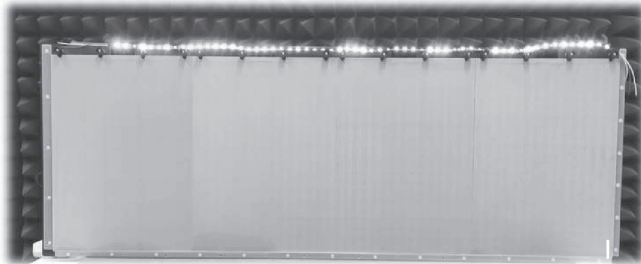
接收端 USRP 与 RIS 之间的时钟同步问题和接收信号处理问题。相比部署多个基站的传统方法，RIS 的灵活性和可扩展性使得单基站精确定位成为可能。同时，在每一步的最后利用拟牛顿算法改进估计结果，进一步提高了定位的精度和鲁棒性。因此，该算法的实现为单基站移动用户定位提供了一种准确度较高的解决方案。

3 试验验证与结果

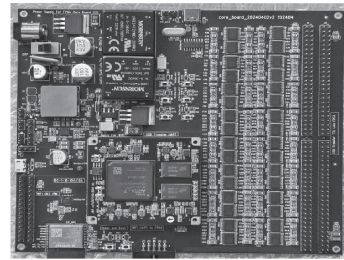
RIS 辅助的多用户波束跟踪实物系统如图 8 所示，基于该系统，进行多用户码本调控和移动通信测试。通过调控 RIS 的 3 bit 码本，系统实现了近远场的多用户波束成形，同时基于单基站定位实时回传用户位置信息，利用控制系统快速切换码本，实现多用户移动过程波束实时对准。



(a) 多用户波束跟踪场景



(b) RIS@5.8 GHz 60×20阵元



(c) 高速波控板

图8 RIS 辅助的多用户波束跟踪实物系统

3.1 RIS多目标调控测试

本文基于所提出的多目标辐射调控方法,分别计算了远场双波束和近场两点聚焦码本,并在微波暗室完成测试,测试结果如图9所示。图9(a)为远场双波束辐射模式,波束分别指向 40° 和 30° ,其中,最大增益归一化为0,3 dB波束宽度分别为 7.2° 和 4.9° 。图9(b)为一维近场两点聚焦测试结果,其在 $x=0$ 和 $x=1$ m分别形成聚焦效果,并且设置 $x=0$ 处的强度为 $x=1$ m处的2倍。

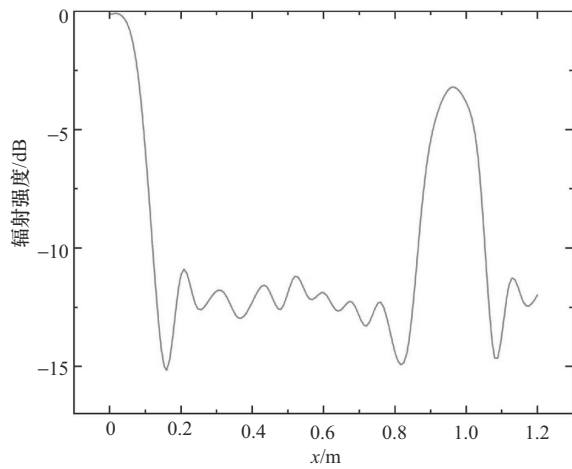
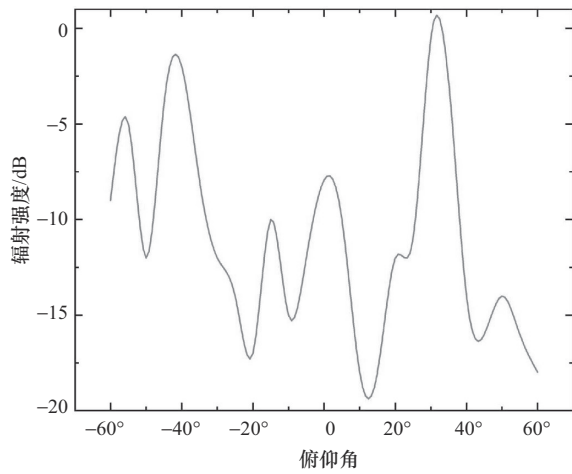


图9 RIS多目标调控测试结果

不同调控比特数下的多用户接收功率如图10所示。由图10可知,用户位置偏角越小(即靠近RIS法线方向),由于镜面反射的存在,调控RIS

对其接收信号功率的提升效果总是小于位置偏角较大的用户,相较于RIS关闭时(断电)多用户接收功率平均提升14.1~23.5 dB。同时,由于1 bit码本导致阵因子的对称性,反射波会在期望波束的另一侧形成栅瓣,随着调控比特数增加至2 bit,阵因子对称性被打破,波束指向性增强,用户接收信号功率有较大提升,随着调控比特数进一步增加到3 bit,用户接收功率提升效果相对降低。

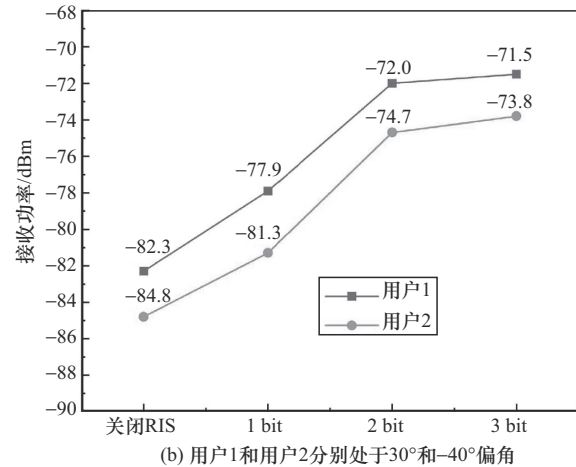
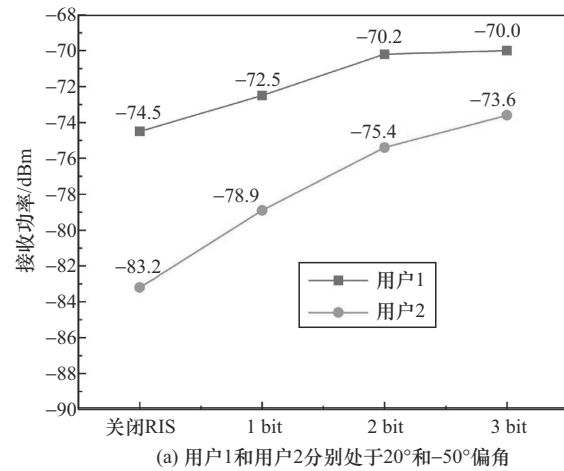


图10 不同调控比特数下的多用户接收功率

RIS辅助下的多用户接收和速率如图11所示,当开启RIS后,信道质量得以提高,多用户的接收和速率明显提升,相较于RIS关闭(断电)时的平均和速率提升约2.3倍。

由上述多目标的试验结果可以看到,相较于

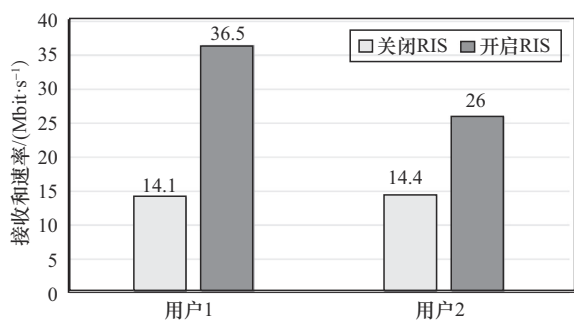


图11 RIS辅助下的多用户接收和速率

现有系统针对单用户^[7]、单比特及单一远场测试^[8]，本试验基于所设计的多目标辐射调控算法和多比特调控RIS，生成远场多波束和近场多点聚焦，并可灵活指定波束能量分配，进一步验证了不同比特调控数下的增益，实现了RIS辅助近远场多用户通信性能的明显提升。

3.2 RIS辅助多用户波束跟踪测试

本文在多目标调控的基础上，结合单基站无源定位方案，进一步开展RIS辅助多用户移动波束跟踪测试。当多个用户在空间自由移动时，用户的位置信息实时反馈到RIS的控制端，控制端进而将计算好的码本下发到RIS端，实现多用户的波束跟踪。由于位置信息反馈和码本下发产生的时延，以及移动过程中可能产生的信号抖动，用户在移动过程中波束对准存在一定的时延或误差。本文分别考虑单用户移动和两个用户同时移动两种情况，移动过程中多用户接收信号功率随时间变化情况如图12所示。

图12(a)为用户1静止、用户2移动的结果，在较短时间范围内，用户1的接收信号功率基本不变，但当用户2移动较远距离时，由于多波束码本在不同用户位置时产生的增益效果不一致，用户1的接收功率会出现浮动，但基本维持在较高的水平(>-75 dBm)。用户2的接收功率随时间抖动较大，会出现信号功率突然降至很低的瞬间，但随着RIS的调控重新恢复至较高水平，平均恢复时间约为15 ms。图12(b)为两个

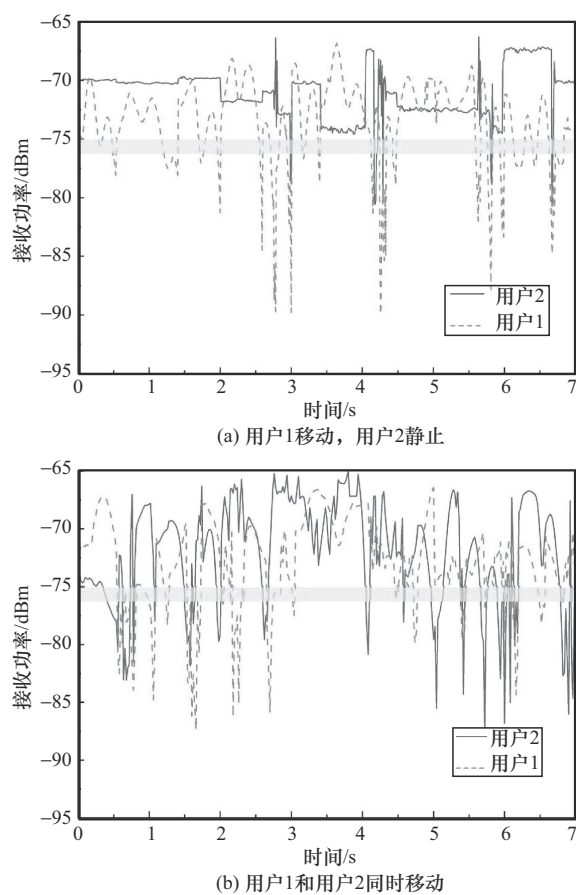


图12 移动过程中多用户接收信号功率随时间变化情况

用户同时移动的结果，两个用户的接收功率均随时间抖动较大，由于多个用户位置信息的回传速度较小，因此平均恢复时间约为26 ms。通过对用户1和用户2分别进行16QAM (quadrature amplitude modulation) 和4QAM编码调制，形成两个信息流，在多用户移动过程中，实现视频流的稳定传输，多用户移动过程中接收端界面如图13所示。

由上述波束跟踪的试验结果可知，通过对多用户相对位置信息的反馈，实现波束的实时精准指向，相较于单用户波束训练的测试结果^[9]，其调控灵活度更高，时延更低，可实现多个用户的快速动态波束跟踪。

4 结束语

本文设计了RIS辅助多用户波束快速跟踪系统原



图13 多用户移动过程中接收端界面

型,包括多比特调控超表面阵列、可支持多用户的高速波束切换系统,其中,实验室自研的高速波控板完成一次完整的码本切换时间小于8 ms。针对RIS辅助的多目标波束优化,本文从衍射传播的角度提出一种基于逆衍射的多目标辐射调控模型,利用GS迭代优化实现近场多点聚焦和远场多波束成形,极大地降低了多目标调控的复杂度,进一步通过RIS辅助的单基站定位实现多用户波束实时跟踪。硬件试验结果表明,优化RIS码本实现多波束生成,覆盖区域接收信号功率提升14.1~23.5 dB,多用户接收和速率提升2.3倍。通过对用户的实时定位和高速码本指令切换,本系统可实现对多用户的实时波束跟踪,可传输稳定的多流视频数据。

通过提升RIS的调控精度和响应速度,本系统有望实现更高效的多目标实时波束跟踪,进一步结合人工智能和机器学习算法,更智能地预测用户位置和需求,实现自适应波束成形和动态频谱管理,从而推动6G网络在智能城市、物联网、增强现实、虚拟现实等领域的广泛应用,显著提高通信网络的覆盖范围、传输速率和服务质量。

参考文献:

- [1] IMT-2030 (6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. White paper for the overall

vision and potential key technologies of 6G[R]. 2021.

- [2] IMT-2030(6G)推进组. 智能超表面技术研究报告[R]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. Study report for reconfigurable intelligent surface[R]. 2021.
- [3] GUO B Y, DENG L, ZHANG H T. Light-controllable energy-saving and control overhead-saving metasurface based on photoresistor[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2024, 66(1): e33938.
- [4] LIU Y, ZHANG H T, DENG L. Meta-atom design and communication prototype for wideband reconfigurable intelligent surface[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2024, 66(3).
- [5] GUO B Y, DENG L, ZHANG H T. Non-local generative machine learning-based inverse design for scattering properties[J]. Optics Express, 2023, 31(13): 20872-20886.
- [6] WEI H Y, ZHANG H T. An equivalent model for handover probability analysis of IRS-aided networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10): 13770-13774.
- [7] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 421-439.
- [8] PEI X L, YIN H F, TAN L, et al. RIS-aided wireless communications: prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8627-8640.
- [9] ARAGHI A, KHALILY M, SAFAEI M, et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) in the sub-6 GHz band: design, implementation, and real-world demonstration[J]. IEEE Access, 2022, (10): 2646-2655.
- [10] BAO L, WU R Y, FU X J, et al. Multi-beam forming and con-



- trols by metasurface with phase and amplitude modulations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(10): 6680-6685.
- [11] ASHOOR A Z, GUPTA S. Metasurface reflector with real-time independent magnitude and phase control[J]. 2020.
- [12] BAGHERI A, SAFAEI M, ARAGHI A, et al. Mathematical model and real-world demonstration of multi-beam and wide-beam reconfigurable intelligent surface[J]. IEEE Access, 2023 (11): 19613-19621.
- [13] SEDEH H B, SALARY M M, MOSALLAEI H. Adaptive multichannel terahertz communication by space-time shared aperture metasurfaces[J]. IEEE Access, 2020(8): 185919-185937.
- [14] TAGHVAAE H, JAIN A, ABADAL S, et al. On the enabling of multi-receiver communications with reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2022(21): 413-423.
- [15] NAJAFI M, JAMALI V, SCHOBBER R, et al. Physics-based modeling and scalable optimization of large intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2673-2691.
- [16] MA T, XIAO Y, LEI X, et al. Distributed reconfigurable intelligent surfaces assisted indoor positioning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(1): 47-58.
- [17] 李斌亮, 赵明敏, 雷鸣, 等. 基于可移动单元的智能反射面辅助近场定位技术[J]. 移动通信, 2024, 48(4): 41-46.
- LI B L, ZHAO M M, LEI M, et al. Near-field positioning technology assisted by intelligent reflector based on movable unit[J]. Mobile Communications, 2024, 48(4): 41-46.
- [18] KEYKHOSRAVI K, KESKIN M F, SECO-GRANADOS G, et al. SISO RIS-enabled joint 3D downlink localization and synchronization[C]//Proceedings of the ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [19] ENGHETA N. Surface electromagnetics: with applications in antennas, microwave, and optical engineering[book review[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2020, 62(4): 138-139.
- [20] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38 (11): 2450-2525.
- [21] DANUFANE F H, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. On the path-loss of reconfigurable intelligent surfaces: an approach based on Green's theorem applied to vector fields[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(8): 5573-5592.
- [22] MENG X M, YOUNG R, NEKOVEE M. Modified gerchberg-saxton iterative algorithm for reflectarray metasurface multi-beam pattern synthesis[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [23] 夏得校, 史琰, 李龙. 基于圆形可重构智能超表面阵列的单基站定位方法[J]. 移动通信, 2024, 48(4): 35-40.
- XIA D X, SHI Y, LI L. Single base station positioning method based on circular reconfigurable intelligent hypersurface array[J]. Mobile Communications, 2024, 48(4): 35-40.

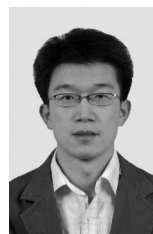
[作者简介]



丁陈龙 (2000-), 男, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室博士生, 主要研究方向为智能超表面、电磁单元设计和基于智能超表面的无线通信系统。



许文俊 (1982-), 男, 博士, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为无线大数据、无人机通信及网络、5G 通信网络、智慧物联网等。



张鸿涛 (1980-), 男, 博士, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为宽带移动通信系统、网络融合、智能超表面系统等。