

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.001

# 智能反射面定位发展现状及其在非视距定位中的应用

尹露, 江羽辰, 王子阳, 亓丽梅, 李世楠

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

**摘要:**在未来的通信网络中,复杂的信道环境是制约定位性能的主要因素之一。智能反射面是近年提出的一种具有特殊电磁特性的人工二维表面,可以控制电磁波的吸收、反射与折射特性,从而实现了对信道的调控,具有广阔的应用前景。首先介绍了该技术的发展现状,从智能反射面的电磁特性及其在通信定位中的应用等方面归纳分析了其现阶段的研究成果,然后针对非视距应用提出了一种基于智能反射面的定位方法。通过仿真验证了该方法的有效性,在不同的发射功率下均实现了定位误差降低50%以上,并且提高了定位鲁棒性,实现了对波束盲区的覆盖。最后,从新型定位场景、通信技术结合、资源分配和人工智能应用4个角度,对智能反射面定位技术的研究进行了展望。

**关键词:**智能反射面定位;压缩感知;非视距;通信导航一体化

**中图分类号:**TN820.5;V241.62 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)01-0001-11

## The Development Status of Intelligent Reflecting Surface and Its Application in NLOS Positioning

YIN Lu, JIANG Yuchen, WANG Ziyang, QI Limei, LI Shinan

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In the future communication network, the complex channel environment is one of the main factors limiting the positioning performance. Intelligent reflecting surface is an artificial two-dimensional surface with special electromagnetic characteristics proposed in recent years, which can control the absorption, reflection and refraction characteristics of electromagnetic waves to achieve the regulation of the channel and has broad application prospects. This paper firstly introduces the development status of this technology, summarizes and analyzes the current research results in terms of the electromagnetic characteristics of the intelligent reflecting surface and its application in communication positioning, and then proposes a positioning method based on the intelligent reflecting surface for non-line of sight applications. The effectiveness of the method is verified by simulation, the positioning error is reduced by more than 50% with different transmitting power, the positioning robustness is improved, and the blind area of the beam is covered. Finally, the research on intelligent reflecting surface positioning technology is prospected in four aspects of new positioning scenarios, communication technology combination, resource allocation and artificial intelligence application.

**Key words:** Intelligent reflecting surface positioning; Compressed sensing; Non-line of sight; Communication-positioning integration

收稿日期: 2022-12-02; 修订日期: 2023-01-01

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2601801)

作者简介: 尹露(1987-), 男, 副教授, 主要从事无线定位技术方面的研究。

## 0 引言

随着移动通信技术的快速发展,以5G、物联网及可穿戴设备为核心的应用场景将实现真正的“万物互联”。精确的位置信息作为“物”的重要属性之一,在未来网络中将会越来越重要。为了提高位置服务能力,基于5G、超宽带、蓝牙等技术的新型定位手段层出不穷。虽然不同定位系统定位精度的影响因素各不相同,但它们都受到多径效应的影响——直射径与反射、折射径的相互混叠,会使信号相关峰严重畸变,导致测距精度明显下降;来自不同方向的多径信号也会使角度测量产生巨大误差,从而严重影响定位准确性。传统方法只能通过天线设计、接收机基带信号处理、滤波技术、空间信息补偿等手段尽量减小多径的影响<sup>[1-4]</sup>,这些方法不仅会消耗大量的计算资源,多径消除效果也不够理想。

智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS),也称为可重构智能表面或超表面,近几年得到了广泛关注。它是一种极薄的人造平面阵列,一般由亚波长尺寸的周期阵列单元构成。通过改变周期单元的结构与尺寸,智能反射面能够实现许多不同于自然界中常规材料的超常物理特性<sup>[5]</sup>,如图1所示。例如,通过控制智能反射面结构可以改变电磁波的反射/折射方向,即令电磁波的传播不再符合自然界中的斯涅尔定律。这样,通过控制智能反射面的结构特性或材料属性,电磁波在空间中的传播便是可控的。

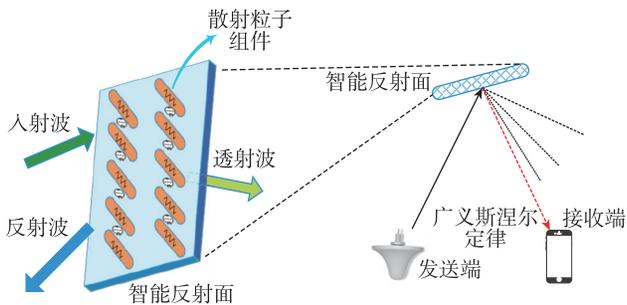


图1 智能反射面工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the working principle of intelligent reflecting surface

因此,利用智能反射面不仅可以通过控制电磁波的传播路径降低未知多径的影响,还可以利用多径,通过让信号绕过障碍物或增强直射径信号来提高定位性能。图2给出了运用智能反射面抑制甚至利用多径的例子。在传统定位场景中,信号3、4会

被墙壁遮挡,导致终端无法收到足够数量的信号,因此无法定位。另一方面,如信号2所示的多径信号也会对终端的测距精度带来严重影响,即使在能收到足够数量信号的情况下也无法得到高精度的定位结果。利用智能反射面,类似信号2的无用多径信号可被智能反射面吸收,从而消除多径对测距精度的影响;而天线2、3发出的信号也可通过智能反射面控制反射方向,到达接收机。因此,可通过智能反射面优化入射与反射波的路径,并利用适当的定位模型实现高精度定位。

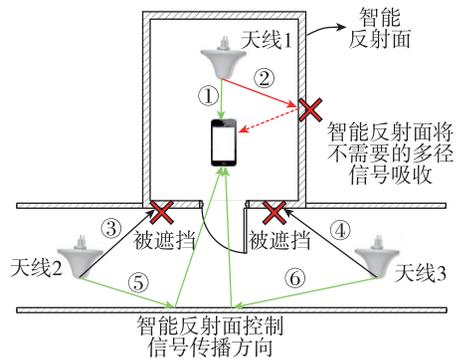


图2 使用智能反射面定位示意图

Fig.2 Schematic diagram of positioning using intelligent reflecting surfaces

本文首先介绍了智能反射面定位的发展现状,然后给出了一种非视距下智能反射面的定位方法并分析了其性能,最后对智能反射面定位技术进行了展望。

## 1 智能反射面定位发展现状

### 1.1 智能反射面研究进展

智能反射表面是由亚波长反射单元组成的可操纵电磁波的设备,可在表面边界提供相位变化。通过操纵振幅和相位的响应,智能反射表面可以以不同方式调制电磁波。智能反射表面的电磁特性,以及小尺寸、无源性和低成本的优势,使其在移动通信领域存在巨大潜力。由于具有主动控制电磁波的能力,智能反射面被认为是构建未来无线电环境的关键技术,在《6G 宽带连接白皮书》中被列为6G 通信物理层的关键技术<sup>[6]</sup>。

智能反射面的概念于2010年被提出<sup>[7]</sup>,随后,Yu等完成了广义斯涅尔定律的推导,并基于广义斯涅尔定律提出了利用V形智能反射面结构,在界面反射点/折射点处改变智能反射面的相位梯度,

以实现电磁波反射或折射方向的主动控制<sup>[8]</sup>。复旦大学周磊教授团队利用广义斯涅尔定律,提出了一种基于渐变型的相位突变结构,实现了平面波向表面波的转化<sup>[9]</sup>。这些研究在电磁理论研究的基础上建立了智能反射面的电磁理论架构,但尚未考虑智能反射面本身的生产制造和电路控制。东南大学崔铁军教授团队提出了名为数字超材料的可编码智能反射面概念<sup>[10]</sup>,集能量辐射和信息调制功能于一体,在多维度域内同时调控电磁波和数字信息。具体来说,设计了分别具有“0”和“ $\pi$ ”相位响应的两种单元来模拟“0”和“1”数字态,并且结合数字控制技术使用外部控制器,如现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)对智能反射面进行不同的编码以实现实时调控<sup>[11-12]</sup>。因此,智能反射面从电磁理论到可应用于通信的空间编码理论已经被创立,并且对于智能反射面本身还有很多天线设计方面的创新和应用;Kang M. 等设计了一种新型的智能反射面阵元排列模式,可以改变入射波的极化方式,同时实现了投射功能与反射波方向的控制<sup>[13]</sup>;Ding X. M. 等设计了一种单层旋转型智能天线阵元结构,可以实现对圆极化入射波的透射相位调控<sup>[14]</sup>;Zhu B. O. 等提出了一种利用加载有源器件,改变智能反射面阵元的反射、透射相位以及反射、透射系数的大小,实现对发射相位的 $360^\circ$ 调控,从而增强了波束赋形能力<sup>[15]</sup>;Wang Z. B. 等设计了以金属圆环为基本结构的智能反射面,金属圆环不同的内径大小会改变阵元的电磁特性,从而改变投射波的相位,进而实现对透射电磁波波束方向的调控<sup>[16]</sup>;R. A. Tasci 等提出了由有源元件组成的智能反射面硬件结构,包括用于反射放大的可变增益放大器,以应对倍增的路径损耗问题,并讨论了有源设计与无源设计相比的主要优势<sup>[17]</sup>;Lv W. 等提出了一种智能反射面辅助的多天线物理层传输方案,研究表明有源智能反射面能够有效抵抗双衰落效应的影响<sup>[18]</sup>;P. Bhalekar 等从天线设计的角度,设计了使用智能反射面构型和腔体谐振器的宽带间隙耦合微带天线,提高了天线的效率和带宽,提供小于 2dB 的驻波比和大于 75% 的天线效率<sup>[19]</sup>。

总的来说,目前国内外学者针对智能反射面,从电磁控制、天线设计、通信传输效率等方向进行了有效且开创性的研究,智能反射面这一概念已经被完整地构建,为智能反射面在通信与定位等领域的应用奠定了基础。

## 1.2 利用智能反射面进行定位的研究进展

随着移动通信技术的快速发展,万物互联是未来发展的重要方向。定位问题伴随通信系统也一并发展成熟,取得了一定程度的突破。目前,高精度定位技术主要基于全球卫星导航系统,在开阔地段有着极为成熟的应用和较高的精度。但对于有遮挡或室内环境,传统定位系统仍受到多径效应的制约,若利用智能反射面这一新型技术,将定位信号进行反射、透射,可实现对盲区的覆盖并减小多径影响。具体来说,由于智能反射面由大量周期阵列单元构成,定位终端可利用其信道在空间域的稀疏性对不同路径的信号进行识别和参数估计,同时通过智能反射面进行波束赋形可以有效集中信号能量,极大地降低多径分量的功率,减小多径对直达径的影响,如图 3 所示。但现阶段智能反射面的研究主要集中在通信领域,有关智能反射面定位的研究成果仍然有限。

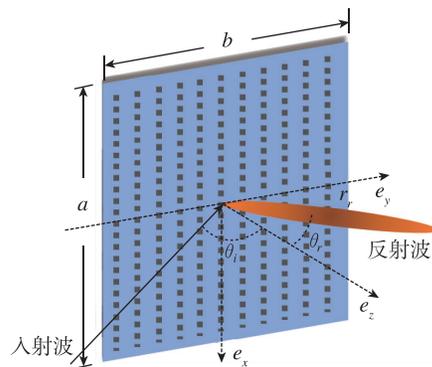


图 3 入射波经智能反射面传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of incident wave propagation through the intelligent reflecting surface

### (1) 智能反射面定位模型研究

现有研究对于简单的智能反射面辅助定位模型已做了详细的理论研究和定性定量分析。文献<sup>[20]</sup>首次建立了面向智能反射面的定位模型,假设信号垂直入射到一块无穷大的反射面,分析了用户在各个方向时的定位精度;文献<sup>[21]</sup>推导了智能反射面辅助下定位误差的克拉美罗下界,分析指出智能反射面定位精度在相同条件下比传统散射模型提高了超过 70%;另外,文献<sup>[22]</sup>推导了相应的费雪信息矩阵和位置误差界表达式,提出了一种新的定位优化相位轮廓设计,该方法基于用户设备位置的先验信息,使其性能优于传统的随机和定向波束码本设计。上述研究基于理论仿真,为智能反射面应用于定位研究提供了方法论,并给出了理论性能最优解。

随着进一步的研究,更复杂的定位模型被提出,在文献[23]中,提出了一个具有双智能反射面的定位系统,通过部署智能反射面增加了一条基站与用户间的路径,利用该路径与直射径的信号相关性进行位置解算;无独有偶,文献[24]也提出了一种新型双智能反射面结构,由2个具有相对旋转的反射平面组成,通过两种解耦模式精确地恢复多径参数,基于估计的信道参数实现环境映射和用户定位。针对反射面位置未知时的定位问题(如应急救援时临时放置的反射面、可穿戴反射面等场景),文献[25]建立了一种基于虚拟天线阵列角度估计的定位模型,可实现终端与反射面位置的联合估计。这些定位模型的建立进一步拓宽了智能反射面的应用范围,虽然囿于特定场景,但其对定位性能的增益很有优势。

### (2) 智能反射面对传统定位方法的增强

在室内定位领域中,存在空间不开阔、卫星信号受阻、多径信号复杂、可用设备受限、三维定位解算难度较大等问题而无法达到较高的精度,智能反射面可有效增强传统定位性能。例如,在利用接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)进行定位中,文献[26]在可获取 Wi-Fi 信号强度的环境中部署智能反射面,通过最小化定位损失函数以优化智能反射面每个反射元件的相移;文献[27]利用智能反射面增强室内环境的信道,并通过反射面相移的调整产生易于区分的无线地图,用于无线指纹定位估计,并通过监督学习特征选择方法降低系统复杂性。文献[28]基于一种由分布式智能反射面辅助的室内定位架构,提出了准静态和动态定位模式,在准静态模式中,将预设反射系数并保持恒定以降低使用成本;在动态模式中,使用两步定位法及时更新反射系数,以实现更精确的定位性能,并对该方法的克拉美罗下界进行了推导。文献[29]提出了一种面向智能反射面定位的毫米波信道模型,给出了智能反射面存在时无线传播的物理特性,并从智能反射面有效定位的角度为系统设计者提供了参考方案。可见智能反射面的部署对传统定位方法有较高的兼容性,同时也为传统方法提供了新的可优化的维度,尤其对于传统室内定位方法的瓶颈提供了更多可能。但对于复杂的信道环境,智能反射面如何部署、调控也是定位领域存在的挑战。

### (3) 智能反射面在定位中的应用

现有对智能反射面的研究,很多均基于毫米波信号,但毫米波波长短、频率高的特点,使其近场范围较

大,导致远场假设在智能反射面定位下不再有效。文献[30]考虑了一种近场场景,提出了两种基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的下行定位算法,比较了两种算法在同步不匹配情况下的性能,并考虑了带宽、开销、工作频率和延迟之间的权衡。文献[31]使用基于智能反射面的透镜研究发射机定位方法,将该透镜连接到接收天线,通过费雪信息分析,评估不同透镜配置的影响,并提出了一种两阶段定位算法,在有限的硬件资源下实现高性能定位。智能反射面还可作为一种增强已有信号的辅助设备,如文献[32]中研究了智能反射面能否在到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)测量中替代一个基站,从而实现单基站 TDOA 定位,研究表明直射路径和通过智能反射面的反射路径之间的 TDOA 可以实现良好的定位性能。虽然智能反射面有这些实际应用的潜力,但其现阶段仍存在不够标准化的问题,与现有的通信定位系统缺乏有效的联合优化接口。

### 1.3 基于智能反射面的新型定位架构

智能反射面的应用使电磁波的传播具有可控性,与传统定位系统相比,基于智能反射面的定位系统不再只包括信源和接收机,还应包括电磁环境控制环节。定位过程也从被动式的信号解算变为主动式的环境控制+位置估计。因此,整个定位系统架构发生了较大的变化。为此,本文建立了一种新型层次化环境控制-位置解算联合定位架构,如图4所示。



图4 层次化环境控制-位置解算联合定位架构  
Fig. 4 Hierarchical environmental control-position solving joint positioning architecture

#### (1) 配置层

配置层是指整个定位系统的数据与计算中心,

可将其理解为整个定位系统的“大脑”。配置层可收集定位系统中的各种数据,并通过相关算法给出信源、智能反射面的配置参数,从而实现整个定位系统的最优化运行。

### (2) 控制层

由硬件元件与连线组成的控制层可以对智能反射面中的可重构结构进行编程控制。控制层中的连线可将重构的智能反射面开关与配置层相连,以便对开关进行单独控制。从功能上,控制层接收配置层的指令,完成对智能反射面的结构控制,从而实现对电磁波传播方向的控制。

### (3) 信源层

指定位信号源。一般为位置已知的无线基站或传感器节点。在新型定位架构中,定位信号源不再只播发全向的广播信号,还要向不同定位用户播发定向信号,因此信源层也需接收配置层指令,实现对信号的定向播发。

### (4) 智能反射面层

由智能反射面组成的硬件层,智能反射面的状态受控制以实现需要的电磁功能。智能反射面层包含主动部分和被动部分,即包含传导材料(被动)和开关(主动)。改变开关的状态(传导/绝缘)就可以改变智能反射面的电磁特性。

### (5) 测量层

测量层完成对定位信号的测量,如传播时间、到达角度等信息。测量层将测量的结果传递给解算层。与传统定位信号测量过程不同,智能反射面对信号的反射、折射会导致信号相位的变化,测量模型中还需要考虑智能反射面的影响。

### (6) 解算层

解算层负责将定位网中收集到的所有信息整合,实现对接收机位置的精确估计。与传统定位网络不同,基于智能反射面的定位系统可将接收机位置和信号传播路径进行联合估计。该过程既不同于香农模型,也不同于维纳滤波模型,而是通过定位估计进一步优化环境信道,从而实现环境控制与定位估计的联合解算。

## 2 基于用户位置与 IRS 波束联合优化的非视距定位方法

### 2.1 定位模型

基于上述智能反射面定位架构,建立非视距场景下智能反射面定位模型,如图 5 所示,其中基站

(Base Station, BS)与移动终端(Mobile Terminals, MT)之间的视距路径被完全遮挡,  $\theta_i$  为 BS 发射波束到 IRS 的入射角,  $\theta_r$  为波束通过 IRS 相移之后的反射角,  $\theta_s$  为通过 MT 观测 IRS 的角度,  $l_1$ 、 $l_2$  分别为 BS、MT 与 IRS 的垂直距离。定位信号采用 OFDM 调制,共包含  $N$  个子载波。

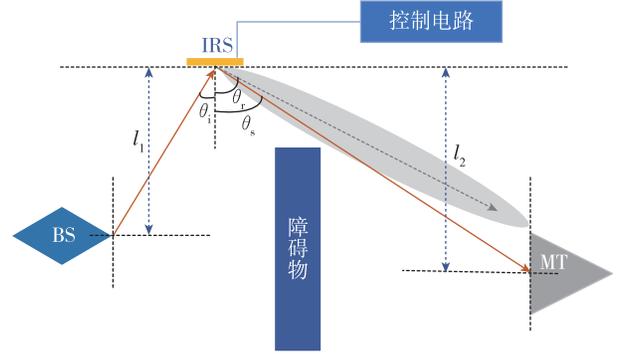


图 5 非视距场景下智能反射面定位

Fig. 5 Intelligent reflecting surface positioning in NLOS scenario

不同于自由空间中的信道衰减,由于 IRS 的加入,定位系统中级联信道的路径损耗需要考虑入射角  $\theta_i$ 、反射角  $\theta_r$  以及观测角  $\theta_s$  的影响。根据电磁波散射场的传播原理,通过 IRS 反射波束的增益还与反射面的面积  $ab$  以及 BS 与 IRS 的距离  $r_i$  有关<sup>[33]</sup>。因此,路径损耗可以表示为

$$L^{-1*}(r_i, r_r, \theta_s) = \left( \frac{ab}{4\pi N_m r_i r_r} \right)^2 G_T G_R \cos^2(\theta_i) \times \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))\right)}{\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))} \right)^2 \quad (1)$$

其中,  $G_T$ 、 $G_R$  分别是 BS 的发射天线增益和 MT 的接收天线增益;  $\lambda$  为电磁波波长;  $a$ 、 $b$  分别为 IRS 尺寸的长和宽;  $r_r$  为 IRS 与 MT 的距离;  $N_m$  为组成 IRS 的反射单元数量。由式(1)可知,当  $\theta_r = \theta_s$  时,路径损耗最小,可以表述为

$$A(r_i, r_r, \theta_s) = (N_m \sqrt{L_p^{-1*}(r_i, r_r, \theta_s)})^2 \quad (2)$$

将 IRS 的相移配置矩阵定义如下

$$\Theta = \sqrt{A} \text{diag}(e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_n}) \quad (3)$$

其中,  $\phi_n \in [-\pi, \pi]$  表示 IRS 中第  $n$  个反射单元的相移。不同观测角下的路径损耗如图 6 所示,可以看出,当  $a$  和  $b$  小于波长时,IRS 像普通反射体一样,并不能提供增益。随着 IRS 尺寸的增大,路径损耗的最大值和一般值都变大,而波束的宽度在

减小。当 $\theta_r = \theta_s$ 时,波束的主瓣对准了接收机 MT,此时得到最大增益。结果表明,IRS 的尺寸增大可以起到提高增益的效果,但是存在边际效应,即增大 IRS 尺寸获得的信号增益提升越来越小。

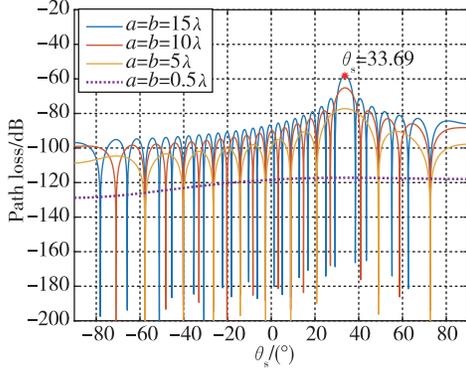


图 6 不同尺寸的 IRS 路径损耗

Fig. 6 Path loss for different sizes of IRS

结合相移配置矩阵,级联信道可以表示为 $\mathbf{H}_2^H \mathbf{O} \mathbf{H}_1$ ,其中 $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N_m \times N_t}$ 、 $\mathbf{H}_2 \in \mathbb{C}^{N_r \times N_m}$ 分别表示 BS-IRS 信道和 IRS-MT 信道。MT 的接收信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_2^H \mathbf{O} \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\omega}_s + \mathbf{z} \quad (4)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}$ 表示 BS 的波束赋形矩阵; $s$ 表示传输符号; $\mathbf{z}$ 是独立同分布的加性高斯白噪声,在接收器处的功率谱密度为 $N_0/2$ 。

类似传统多输入多输出 (Multi Input Multi Output, MIMO) 信道模型<sup>[34-35]</sup>,BS-IRS 之间的信道 $\mathbf{H}_1$ 可表示为

$$\mathbf{H}_1 = t_1 \mathbf{a}_{M,T}(\theta_i) \mathbf{a}_{T,M}^H(\theta_i) \quad (5)$$

其中, $t_1 = e^{-j2\pi(n-1)\tau/(NT_s)}$ 表示信道 $\mathbf{H}_1$ 第 $n$ 个子载波中由传播时间 $\tau$ 产生的相位差, $T_s$ 为信号采样间隔; $\mathbf{a}_{M,T}$ 和 $\mathbf{a}_{T,M}$ 分别代表 IRS 反射单元和 BS 阵列天线的响应矩阵

$$\mathbf{a}_{M,T}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{N_m}} [a_1^r(\theta_i), a_2^r(\theta_i), \dots, a_{N_m}^r(\theta_i)]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_{T,M}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{N_t}} [a_1^t(\theta_i), a_2^t(\theta_i), \dots, a_{N_t}^t(\theta_i)]^T \quad (7)$$

响应矩阵由 IRS 的各个反射单元或 BS 的各个天线的相位响应组成, $\alpha_x^m(\theta_i) = e^{-j2\pi x \frac{d}{\lambda} \sin \theta_i}$ 、 $\alpha_y^m(\theta_i) = e^{-j2\pi y \frac{d}{\lambda} \sin \theta_i}$ 分别代表了 IRS 中第 $x$ 个反射单元和 BS 的第 $y$ 根天线的相位响应。本文天线阵列中天线间距和 IRS 反射单元的间距 $d$ 都设为二分之一波长 $\lambda/2$ 。同理,IRS-MT 部分的信道 $\mathbf{H}_2$ 可通过 IRS 和

MT 的响应矩阵以及距离产生的相移来表示。

## 2.2 改进的压缩感知信号恢复算法

首先,由于智能反射面信道在空间信号中的稀疏性,提出了一种在波束空间域的信道表示

$$\mathbf{H}_v = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{H}_2^H \mathbf{O} \mathbf{H}_1 \tilde{\mathbf{A}}_I \quad (8)$$

其中,满秩的 $\tilde{\mathbf{A}}_R$ 和 $\tilde{\mathbf{A}}_I$ 为波束域中的响应矩阵; $\tilde{N}_r$ 和 $\tilde{N}_t$ 分别为波束域中入射角与反射角的分辨率

$$\tilde{\mathbf{A}}_R = [\alpha_R(\tilde{\theta}_{r,-\tilde{N}_r}), \dots, \alpha_R(\tilde{\theta}_{r,\tilde{N}_r})] \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_I = [\alpha_I(\tilde{\theta}_{i,-\tilde{N}_t}), \dots, \alpha_I(\tilde{\theta}_{i,\tilde{N}_t})] \quad (10)$$

该表示下的信道 $\mathbf{H}_v$ 是稀疏的,如图 7 所示,并且图中的峰值位置包含了定位解算所需的 $\theta_i$ 和 $\theta_s$ 信息。

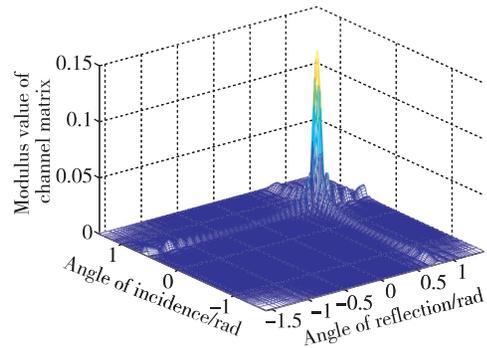


图 7 智能反射面定位信道的稀疏表示

Fig. 7 Sparse representation of the intelligent reflecting surface positioning channel

因此,可由式(4)和式(8)推导出 MT 接收到 $L$ 个波束信号的表达式为

$$\mathbf{y}_v = \boldsymbol{\Omega} \mathbf{h}_v + \mathbf{z} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{h}_v = \text{vec}(\mathbf{H}_v)$ 、 $\boldsymbol{\Omega} = [\boldsymbol{\Omega}_{(1)}, \dots, \boldsymbol{\Omega}_{(L)}]^T$ 、 $\boldsymbol{\Omega}_{(l)} = (\tilde{\mathbf{A}}_R \boldsymbol{\omega}_s)^T \otimes \tilde{\mathbf{A}}_I$ 。鉴于 $\mathbf{h}_v$ 的稀疏性,在接收信号 $\mathbf{y}_v$ 和传感矩阵 $\boldsymbol{\Omega}$ 已知的条件下,可通过压缩感知技术来估计 $\mathbf{h}_v$ 。由于信道的角度信息可由支撑集的索引获得,图 7 中的峰值即为迭代中内积最大的传感矩阵的列,通过这一列的索引,可以获得其对应的信道角度信息。而信道的距离信息则包含在峰值位置对应的相位中,通过不同子载波的相位差解算得到。因此,最终所需的输出只需要支撑集对应的传感矩阵的索引以及信道矩阵中模值最大元素的相位,无需恢复信道矩阵中的所有元素。

在传统的正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 算法中,存在最小二乘法矩阵求逆不准确的问题,本文提出的算法将支撑集也进行正交

化,使得整个迭代过程完全在正交域中,避免了这一问题。因此,算法的输入包括传感矩阵  $\mathbf{\Omega}$  和接收信号  $\mathbf{y}_v$ 。初始化迭代计数器  $l=1$ , 正交系数向量  $\mathbf{x}_n=0$ , 支撑集  $r$  为空集, 残差向量  $\mathbf{r}_{n,0}=\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{r}_{n,l}=\mathbf{y}_v$ 。  $\mathbf{\epsilon}_{n,i}$  是  $\mathbf{\Omega}$  的第  $i$  列。通过优化下式的问题, 求取每个信号的残差在观测矩阵中每一列的投影, 并取最大值作为支撑集的新索引, 加入支撑集中, 本质上就是求最相关的列向量

$$\mathbf{n}_l = \operatorname{argmax}_{i=1,\dots,N_t N_r} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|\langle \mathbf{r}_{n,l-1}, \mathbf{\epsilon}_{n,i} \rangle|}{\|\mathbf{\epsilon}_{n,i}\|_2} \quad (12)$$

然后, 对支撑集新引入的列向量进行正交化

$$\boldsymbol{\sigma}_{n,l} = \mathbf{\epsilon}_{n,\mathbf{n}_l} - \sum_{i=0}^{l-1} \frac{\langle \mathbf{\epsilon}_{n,\mathbf{n}_l}, \boldsymbol{\sigma}_{n,i} \rangle}{\|\boldsymbol{\sigma}_{n,i}\|_2^2} \boldsymbol{\sigma}_{n,i} \quad (13)$$

更新中间变量  $\hat{\mathbf{x}}_n$  (作为最后求解  $\mathbf{h}_v$  的参数) 和残差向量

$$\hat{\mathbf{x}}_n = \frac{\langle \mathbf{r}_{n,l-1}, \boldsymbol{\sigma}_{n,l} \rangle}{\|\boldsymbol{\sigma}_{n,l}\|_2^2} \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_{n,l} = \mathbf{r}_{n,l-1} - \hat{\mathbf{x}}_n \boldsymbol{\sigma}_{n,l} \quad (15)$$

迭代上述步骤直到  $l \leq P$ , 满足输入的稀疏度, 即找到最相关的  $P$  个列向量, 从而恢复出稀疏度为  $P$  的稀疏矩阵。再进行矩阵的 QR 分解, 将矩阵分解为正交矩阵和上三角矩阵相乘的形式, 对于支撑集对应的原始列向量集合  $\mathbf{\Omega}_{P_1} = [\mathbf{\epsilon}_{n,\mathbf{n}_1}, \dots, \mathbf{\epsilon}_{n,\mathbf{n}_P}]$  和正交化之后的列向量集合  $\mathbf{A}_n = [\boldsymbol{\sigma}_{n,1}, \dots, \boldsymbol{\sigma}_{n,P}]$ , 可以将其表示为  $\mathbf{\Omega}_{P_1} = \mathbf{A}_n \mathbf{R}_n$ , 从而求出上三角矩阵  $\mathbf{R}_n$ , 进而有  $\mathbf{y}_v = \mathbf{A}_n \mathbf{R}_n \hat{\mathbf{h}}_v$ , 并且由于  $\mathbf{y}_v = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}}_n$ , 所以可以计算得到  $\mathbf{h}_v$  的估计值

$$\hat{\mathbf{h}}_v = \mathbf{R}_n^{-1} \hat{\mathbf{x}}_n \quad (16)$$

然后计算定位参数, 首先通过迭代结果得到支撑集的索引  $n_{i,1}$  和  $n_{r,1}$  求出的信道表示中  $\theta_i, \theta_s$  对应的角度的估计值

$$\hat{\theta}_{i,l} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} \frac{n_{i,l} - \tilde{N}_t}{\tilde{N}_t}\right) \quad (17)$$

$$\hat{\theta}_{r,l} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} \frac{n_{r,l} - \tilde{N}_r}{\tilde{N}_r}\right) \quad (18)$$

最后, 根据相邻子载波的相位差得到定位参数到达时间, 从而求得 BS-IRS-MT 反射路径的总距离  $r$ 。

### 2.3 用户位置与 IRS 波束联合优化

当定位过程完成后, 移动终端将解算出的位置信息、信道信息传送给基站, 基站根据解算结果对基站以及智能反射面的波束进行优化。移动终端

接收到的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 表达式为

$$\rho = \frac{|\mathbf{H}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\omega}|^2}{\sigma^2} \quad (19)$$

为了达到最高的定位精度, 需要对智能天线的配置矩阵  $\boldsymbol{\Theta}$  以及基站的波束赋形矩阵  $\boldsymbol{\omega}$  进行优化, 使信噪比  $\rho$  最高, 由此可以得到以下的优化问题

$$\text{P1: } \max_{\boldsymbol{\Theta}, \boldsymbol{\omega}} |\mathbf{H}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\omega}|^2 \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \|\boldsymbol{\omega}\|^2 \leq P_{\text{Tmax}}$$

$$0 \leq \phi_n \leq 2\pi, \forall n=1, \dots, N_m \quad (21)$$

其中,  $P_{\text{Tmax}}$  为基站的发射功率。基于交替优化的原则, 将最大比例传输 (Maximum Ratio Transmission, MRT) 对应的波束赋形矩阵

$$\boldsymbol{\omega}^* = \sqrt{\frac{P_{\text{Tmax}}}{P_{\text{T}}}} \frac{(\mathbf{H}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1)^H}{\|\mathbf{H}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1\|} \quad (22)$$

作为最优波束赋形矢量代入 P1, 此时优化问题 P1 可以简化为优化问题 P2

$$\text{P2: } \max_{\phi_i} \|\mathbf{H}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1\|^2 \quad (23)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \phi_i \leq 2\pi, \forall i=1, \dots, N_m \quad (24)$$

因此, 智能反射面第  $i$  个元件的相移可以通过式 (25) 获得

$$\phi_i^* = \operatorname{argmax}_{\phi_i} \|\mathbf{H}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1\|^2 \quad (25)$$

### 2.4 性能分析

本文通过仿真对比了所提出的联合优化定位方法与未优化的定位结果均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE), 以验证提出方法的可行性和定位性能的提升。除特别说明外, 仿真中的主要参数取值为: 载频  $f_c = 3\text{GHz}$ , 信道带宽  $B = 10\text{MHz}$ , 光速  $c = 299792458\text{m/s}$ , 收发天线数  $N_t = N_r = 31$ , 子载波数  $N = 10$ , 系统噪声功率  $0\text{dBm}$ 。BS 和 MT 的位置分别设为  $\text{pos}_{\text{BS}} = [0, 0]$  和  $\text{pos}_{\text{MT}} = [40\text{m}, -10\text{m}]$ 。IRS 的位置为  $[20\text{m}, 20\text{m}]$ 。天线系统的增益为  $G_T = G_R = 10\text{dB}$ 。IRS 的尺寸为  $a = b = 10\lambda$ , 发射波束的数量为  $L = 40$ 。在每一个条件下进行 100 次蒙特卡罗实验。

定位均方根误差如图 8 所示。结果表明, 在发射功率较低条件下, 提出的 IRS 优化方法能保持定位误差处于较低的水平, 当  $P_T$  从  $-10\text{dBW}$  到  $0\text{dBW}$  时, 定位误差从  $1.5\text{m}$  降到了  $0.2\text{m}$ 。然而对于未优化的情况, 定位误差普遍高于优化后的 2 倍以上, 尤其当信号功率过低时, 会出现解算失败的情况。

图 9 和图 10 分别给出了估计得到的观测角和

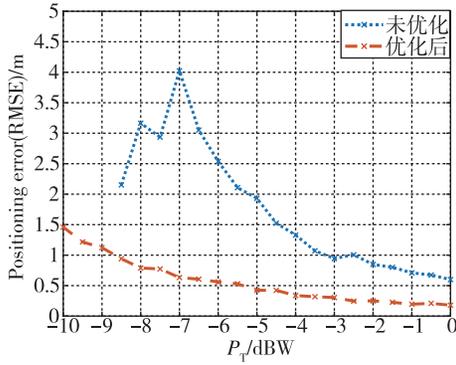


图 8 优化前后的定位误差对比

Fig. 8 Comparison of positioning error before and after optimization

距离的均方根误差曲线,发现在发射功率较低的条件,观测角和测距误差共同影响定位结果的准确性,而随着发射功率的提高,最终定位误差收敛的结果取决于测距误差的影响。并且观测角的误差下限由信道虚拟表示的分辨率决定,而测距误差则主要取决于估计得到的  $\hat{h}_v$  相位的准确性。因此,结果也表明了  $h_v$  的峰值决定了观测角的估计结果,不同子载波的  $h_v$  的相位差则决定了测距结果。

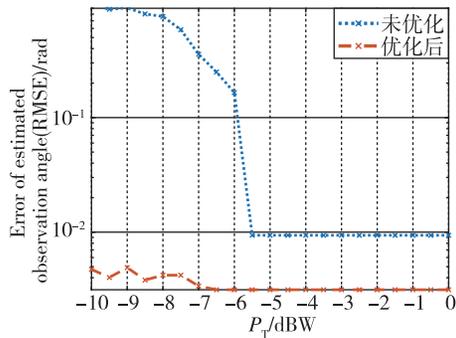


图 9 优化前后估计观测角的误差对比

Fig. 9 Comparison of the error of estimated observation angle before and after optimization

为了验证 IRS 辅助定位的有效性和可靠性,对比了优化前后在 MT 处于不同位置时的定位误差,如图 11 和图 12 所示。在未优化的情况下存在一些特定角度范围的盲区,这是因为普通方法无法使反射角对准 MT,从而导致有些角度的损耗位于图 6 中的一些极小值,而本文的优化定位方法具有良好的鲁棒性,可以在比较大的范围保持较低的定位误差。

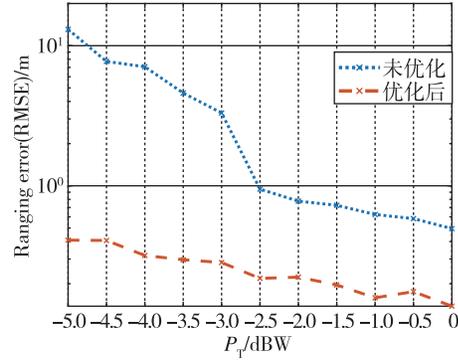


图 10 优化前后的测距误差对比

Fig. 10 Comparison of the ranging error before and after optimization

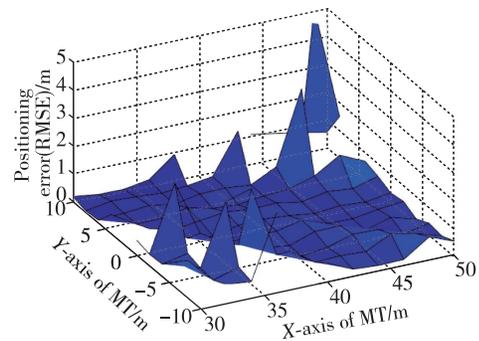


图 11 不同 MT 位置未优化的定位误差

Fig. 11 Unoptimized positioning errors for different MT positions

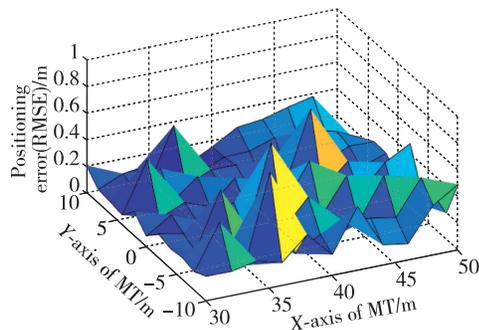


图 12 不同 MT 位置优化后的定位误差

Fig. 12 Positioning error after optimization of different MT positions

### 3 智能反射面定位技术研究展望

定位与智能反射面技术分属 2 个不同学科,虽然目前国内外分别对二者进行了大量研究,但是将智能反射面用于定位的研究仍处于起步阶段。由

于智能反射面对电磁波的控制特性,其定位模型和算法将与传统定位方式有很大不同,并可极大地提高定位性能。

### 3.1 智能反射面衍生新型定位场景

智能反射面体积小、功耗低、质量小,易于布设在楼宇、房间等位置,也可将其与柔性材料相结合,制作成可穿戴设备,从而在全空间实现对电磁环境的控制。利用无处不在的智能反射面,可实现精准的波束控制及超大规模的协同定位,同时也会大幅提高定位系统的复杂性,使定位过程不再是被动地接收定位信号,而需要定位环节的各个部分实现系统化的协同控制。

### 3.2 智能反射面定位与通信技术的结合

部署 IRS 的通信系统可有效地提高系统吞吐量并降低能耗<sup>[36]</sup>,其在通信系统中有着更广泛的应用。实际场景中,考虑到系统建设成本及通信与导航的集成使用需求,智能反射面定位通常要在通信系统上实现,因此如何将智能反射面定位与通信技术相结合,实现面向智能反射面的通信导航一体化也是发展方向之一。

### 3.3 智能反射面定位中的资源分配

传统定位信号多以广播形式播发,并不区分用户,智能反射面由于其方向性,需要给不同用户播发不同的波束,合理分配波束资源是智能反射面定位的基础。由此还会带来类似于通信系统的用户容量问题,如何实现高并发定位也是智能反射面定位需要解决的问题之一。另一方面,面对不同用户的差异化定位需求(例如无人设备与行人对定位精度和定位可靠性的需求明显不同),如何给不同用户合理地分配带宽、功率、波束等有限的物理资源,也是未来智能反射面定位的发展方向之一。

### 3.4 人工智能在智能反射面定位中的应用

近几年,人工智能与定位技术的结合得到了广泛研究,大量研究成果表明,人工智能对定位性能具有显著提升。在更复杂的智能反射面定位中,利用人工智能实现对定位性能的增强<sup>[37]</sup>也是未来的发展方向之一。

## 4 结论

本文首先介绍了近几年得到广泛关注的智能反射面研究进展,并分析了利用智能反射面定位的研究现状。根据智能反射面对电磁波的控制特性,

给出了基于智能反射面的新型定位架构,建立了基于智能反射面的非视距定位模型。在该模型基础上提出了一种改进的压缩感知信号恢复算法,通过对定位参数的求解而非完整信道矩阵的重构,避免了传统 OMP 算法中存在的大维度稀疏矩阵无法求逆的问题。通过对用户位置与 IRS 波束进行联合优化,实现了基于智能反射面的非视距定位。仿真结果表明,智能反射面相位优化后使定位误差降低 50% 以上。最后,对智能反射面定位技术进行了展望,供研究人员参考。

## 参考文献

- [1] Suzuki T, Matsuo K, Amano Y. Rotating GNSS antennas: simultaneous LOS and NLOS multipath mitigation[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 86.
- [2] Lu R, Chen W, Dong D, et al. Multipath mitigation in GNSS precise point positioning based on trend-surface analysis and multipath hemispherical map[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(3): 119.
- [3] 方亮, 万显荣, 易建新, 等. 外辐射源雷达扩展相消批处理杂波抑制算法的调制补偿[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(1): 209-214.  
Fang Liang, Wan Xianrong, Yi Jianxin, et al. Modulation compensation of extended phase canceling batch clutter suppression algorithm for external radiation source radar[J]. *Journal of Electronics and Information*, 2014, 36(1): 209-214(in Chinese).
- [4] 崔冰波, 陈熙源. 基于一种改进 EMD 算法的 GPS 多径效应抑制方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(3): 346-351.  
Cui Bingbo, Chen Xiyuan. A GPS multipath effect suppression method based on an improved EMD algorithm[J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2014, 22(3): 346-351(in Chinese).
- [5] 张检发, 袁晓东, 秦石乔. 可调太赫兹与光学超材料[J]. *中国光学*, 2016, 7(3): 349-364.  
Zhang Jianfa, Yuan Xiaodong, Qin Shiqiao. Tunable terahertz and optical metamaterials[J]. *China Optics*, 2016, 7(3): 349-364(in Chinese).
- [6] Rajatheva N, Atzeni I, Bjornson E, et al. White Paper on Broadband Connectivity in 6G[P]. 2020.
- [7] Zheludev N I. The road ahead for metamaterials[J]. *Science*, 2010, 328(5978): 582-583.
- [8] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.

- [9] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [10] 张磊, 崔铁军. 时空编码数字超材料和超表面研究进展[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(5): 694-700.  
Zhang Lei, Cui Tiejun. Advances in the research of space-time encoded digital metamaterials and hyper-surfaces[J]. *China Science Foundation*, 2021, 35(5): 694-700(in Chinese).
- [11] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 1-12.  
Zhang Lei, Liu Shuo, Cui Tiejun. Theory and application of electromagnetically encoded metamaterials[J]. *China Optics*, 2017, 10(1): 1-12(in Chinese).
- [12] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): 27-35.
- [13] Kang M, Feng T, Wang H T, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15882-15890.
- [14] Ding X M, Monticone F, Zhang K, et al. Ultrathin pancharatanam-berry metasurface with maximal cross-polarization efficiency[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(7): 1195-1200.
- [15] Zhu B O, Zhao J, Feng Y. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3059.
- [16] Wang Z, Shi J, Chen J. High-efficiency electromagnetic wave controlling with all-dielectric Huygens' metasurfaces[J]. *International Journal of Antennas & Propagation*, 2015:1-7.
- [17] Tasci R A, Kilinc F, Basar E, et al. A new RIS architecture with a single power amplifier: energy efficiency and error performance analysis[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 44804-44815.
- [18] Lv W, Bai J, Yan Q, et al. RIS-assisted green secure communications: active RIS or passive RIS? [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022.
- [19] Bhalekar P, Raghav L K, Gupta R. Wideband gap coupled microstrip antenna using RIS and RIS cavity resonator[C]// *Proceedings of 2017 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. IEEE, 2017: 1291-1295.
- [20] Hu S, Rusek F, Edfors O. Beyond massive MIMO; the potential of positioning with large intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(7): 1761-1774.
- [21] Wymeersch H, Denis B. Beyond 5G wireless localization with reconfigurable intelligent surfaces [C]// *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020: 1-6.
- [22] Rahal M, Denis B, Keykhosravi K, et al. Constrained RIS phase profile optimization and time sharing for near-field localization[C]// *Proceedings of 2022 IEEE 95<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring)*, 2022: 1-6.
- [23] Zhang J, Zheng Z, Fei Z, et al. Positioning with dual reconfigurable intelligent surfaces in millimeter-wave MIMO systems[C]// *Proceedings of 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. IEEE, 2020.
- [24] Lin Y, Jin S, Matthaiou M, et al. Channel estimation and user localization for IRS-assisted MIMO-OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(4): 2320-2335.
- [25] 王子阳. 基于智能天线的灾区环境搜救定位方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.  
Wang Ziyang. Research on search and rescue localization method based on smart antenna in disaster area environment[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021(in Chinese).
- [26] Zhang H, Zhang H, Di B, et al. MetaLocalization: reconfigurable intelligent surface aided multi-user wireless indoor localization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 7743-7757.
- [27] Nguyen C L, Georgiou O, Gradoni G, et al. Wireless fingerprinting localization in smart environments using reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 135526-135541.
- [28] Ma T, Xiao Y, Lei X, et al. Distributed reconfigurable intelligent surfaces assisted indoor positioning[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022.
- [29] Basar E, Yildirim I, Kilinc F. Indoor and outdoor physical channel modeling and efficient positioning for reconfigurable intelligent surfaces in mmWave bands [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(12): 8600-8611.
- [30] Dardari D, Decarli N, Guerra A, et al. LOS/NLOS near-field localization with a large reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(6): 4282-4294.
- [31] Abu-Shaban Z, Keykhosravi K, Keskin M F, et al. Near-field localization with a reconfigurable intelligent

- surface acting as lens[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2021: 1-6.
- [32] Ammous M, Valaee S. Positioning and tracking using reconfigurable intelligent surfaces and extended Kalman filter[C]// Proceedings of 2022 IEEE 95<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference(VTC2022-Spring), 2022: 1-6.
- [33] Özdogan Ö, Björnson E, Larsson E G. Intelligent reflecting surfaces: physics, propagation, and pathloss modeling[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2019,9(5):581-585.
- [34] Tse D, Viswanath P. Fundamentals of wireless communication[M]. Cambridge University Press, 2005.
- [35] Heath R W, Gonzalez-Prelcic N, Rangan S, et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 436-453.
- [36] Guo H, Liang Y, Chen J, et al. Weighted sum rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(5): 3064-3076.
- [37] Taha A, Alrabeiah M, Alkhateeb A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning[J]. IEEE Access, 2021 9: 44304-44321.

(编辑:黄利华)