

# 软件定义无线环境:技术、机遇与挑战

罗文宇,许丽,邵霞

(华北水利水电大学物理与电子学院,河南郑州 450046)

**摘要:** 无线环境通常表示能够显著改变电磁波在通信设备之间传播的物体集合. 软件定义无线环境允许针对不同通信设备以最适宜的方式进行电磁传播规律的编程定制,为无线通信的发展提供了一种新的视角. 相比被动抑制无线信道影响的传统通信技术,软件定义无线环境有着更高维度的调控自由度,在新一代移动通信特别是毫米波及太赫兹通信领域具有很大的应用潜力. 本文首先介绍了软件定义无线环境的概念、历史沿革及其研究现状. 然后给出了其基础模型及相对传统手段展现出来的性能优势. 接着总结了软件定义无线环境的系统设计、网络服务支持、网络通信协议等关键技术,并指出软件定义无线环境未来发展所面临的挑战. 最后凝练了几个面向新一代移动通信技术的软件定义无线环境研究方向.

**关键词:** 软件定义无线环境; 可编程超表面; 超贴片; 无线协议

**中图分类号:** TN929、TN29      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)09-1850-10

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.024

## Software-Defined Wireless Environments: Technique, Opportunities and Challenges

LUO Wen-yu, XU Li, SHAO Xia

(School of Physics and Electronics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

**Abstract:** Wireless environments usually represent the collection, which changes electromagnetic waves between communication devices significantly. Software-defined wireless environment allows programming customization of electromagnetic propagation laws in the most appropriate way for different communication devices, providing a new perspective for the development of wireless communications. Compared with the traditional passive communication technology, software-defined wireless environment has a higher degree of freedom, which has great potential in the new generation of mobile communications, especially in the field of millimeter wave and terahertz communications. This paper first introduces the concept, history and research status of software defined wireless environment. Then the basic model is given, and the performance advantages compared with the traditional methods are analyzed and summarized. Then it summarizes the key technologies of software defined wireless environment, such as system design, network service support and network communication protocol design, and points out the challenges faced by the future development of software defined wireless environment. Finally, several new research interests of software defined wireless environment for new generation mobile communication technology are refined.

**Key words:** software-defined wireless environments; programmable metasurface; hypersurface-tile; wireless protocol

### 1 引言

近年来,飞速发展的无线通信技术已经广泛应用到社会的各个领域,为人们的生活提供了巨大的便利. 然而,面对未来无线通信全场景、巨流量、广应用的持续发展需求,即使是新一代移动通信技术仍无法完全满足<sup>[1]</sup>. 在无线通信系统中,电磁波的传输受到多种非可

控因素的影响,例如自由空间损耗,信号吸收以及由遮挡引起的反射、折射和衍射等,不仅限制了通信设备的连接半径,还会引起多径效应导致接收信号剧烈波动,极大影响无线通信的性能. 对于采用毫米波和太赫兹频段的通信系统,无线环境带来的影响变得更大<sup>[2]</sup>,甚至会阻塞 NLOS (Non Line Of Sight, 非视距) 环境下的有效连接并对阴影衰落表现出强烈的敏感性<sup>[3]</sup>. 然而,除

了一些简单的情况外,无线环境对电磁波传播的影响很难计算<sup>[4]</sup>.值得庆幸的是,大气中分子吸收引起的衰减在通常情况下并不起显著作用<sup>[5]</sup>,损失只有  $10^{-5}$  dB/m<sup>[6]</sup>.因此,只要能够在一定程度上控制无线环境对信号的影响,就能够大幅提高无线传输效率.现有降低该影响的方法包括调制<sup>[7]</sup>、编码<sup>[8]</sup>、大规模 MIMO<sup>[9,10]</sup>、波束成形<sup>[11,12]</sup>以及放置在传播空间中的被动/主动反射阵列<sup>[13]</sup>等,以便通信设备能够快速适应时变、不可预测的无线信道.此外,部署在室内环境的中继器,也能够对固定方向接收信号进行重定向、主动放大和重新发送等,以达到对抗无线环境影响的目的<sup>[14]</sup>.这些方法虽然在一定程度上提升了通信质量,但只将无线环境这一通信主体视为通信过程中的不可控因素,无法主动感知正在进行的通信过程,因此并没有从本质上实现对电磁波的完全操控<sup>[15]</sup>.

电磁超表面是基于新型人工电磁材料结构组成的超薄二维阵列平面,是亚波长尺度单元按一定的宏观排列方式形成的人工复合电磁结构.其基本单元和排列方式都可任意设计,以实现负折射、负反射、极化旋转、汇聚成像、传播波向表面波转化等新颖物理效应,进而可对电磁波相位、传播模式等特性灵活调控<sup>[16]</sup>.在电磁超表面研究的早期阶段,为了改变工作频率或调控功能,往往需要重新设计和制造新的单元模块<sup>[17,18]</sup>.由于超表面的特性主要取决于其导电模式,文献<sup>[19]</sup>首次尝试使用可调谐器件来调制电磁波.后来,还采用了更先进的相变介质、石墨烯或液晶等<sup>[20]</sup>.这些技术的主要缺点在于其可重构性仅表现为静态可控,没有实际编程控制能力.2014年,崔铁军教授课题组首次提出“数字编码与可编程超材料”,通过改变数字编码单元“0”和“1”的空间排布来控制电磁波<sup>[21]</sup>,使人们能够从信息科学的角度来理解和探索超材料.Liaskos等人提出了软件定义超材料的思想,并设计了一种可以承载软件操控的超材料硬件平台<sup>[22]</sup>.近年来,东南大学毫米波国家重点实验室程强、崔铁军和金石等人提出时间编码超材料、空时编码超材料的概念<sup>[23]</sup>,可对电磁频谱进行任意调控.

在此基础上,近年来出现了控制无线传播环境的新思想,利用可编程超表面加强透镜效应及其模块单元任意调控反射角的功能减轻路径损耗,以增加电磁波的传输距离和解决非视距传输问题.该思想最早由文献<sup>[22]</sup>提出,即 HyperSurFace,涉及一种内部集成控制模组,能在本地交互并进行全局通信以实现既定的电磁特性.大量超表面涂敷在无线环境中并通过软件加以控制,称为软件定义无线环境<sup>[4,24]</sup>.软件定义无线环境不仅可以减轻路径损耗,还可以对电磁波传播进行精确控制以确保信号沿着更优路径传输而克服多径

现象.此外,可编程超表面对电磁波聚焦反射还可以实时匹配用户的移动速度,大大缓解多普勒现象.

因此,在当前不可编程的无线环境中,电磁波能量只是不可控制地耗散在整个无线空间,快速衰减,不仅造成设备之间的干扰,还容易被窃听.相比之下,在软件定义无线环境中,墙体、门、家具以及其他有可能和信号发生作用的任何物体均可通过涂敷电磁超材料的方式实现无线环境的可编程性.与有线网络中路由器和防火墙的思想类似,这些具备涂覆层的物体,能够传递或者阻挡电磁波,并根据不同用户的特定指令,将用户需求 and 全局策略作为输入,计算与之匹配的无线传播路径,极大地提高了无线通信的性能.此外,软件定义无线环境不仅很好地解决了路径损耗、衰落、干扰和非视距问题,还能促进系统安全性和隐私性的显著提升.

本文针对软件定义无线环境这一最新理念,综述其概念、发展历史沿革及其研究现状,并对其系统模型、关键技术进行了剖析,最后分析了软件定义无线环境发展所面临的挑战以及后续研究方向,以期本文对相关方向的研究有所借鉴.

## 2 软件定义无线环境概述

### 2.1 软件定义无线环境的基本思想

与传统的反射器<sup>[25]</sup>相比,可编程超表面的优点在于具有极高的空间分辨率以及网络化结构带来的柔性控制,其基本单元称为超贴片.在结合网络化的硬件控制元件和良好设计的编程接口之后,具有平面矩形结构的超贴片可以接收外部命令并设置其控制单元的状态来匹配期望的电磁特性.超贴片之间除了可以中继传输编程命令外,还具有环境感测和报告能力,从而有助于发现环境内的通信设备,如图1所示.

因此,软件定义无线环境的基本思想是在无线传输中用新型的可编程超表面来覆盖环境中影响电磁辐射的物体,并可以接收软件控制指令从而改变环境与电磁波的相互作用,一定程度上控制无线环境中衍射、反射、散射带来的影响,从而降低信号衰减、消除多径衰

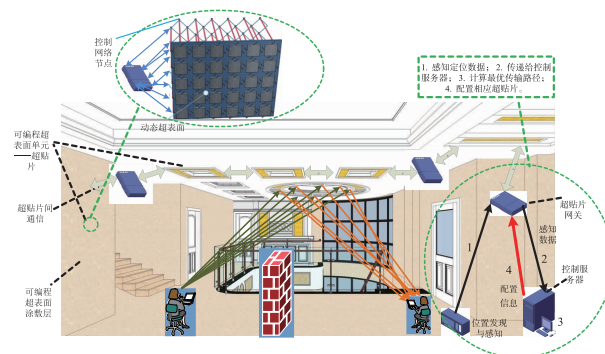


图1 软件定义无线环境模型

落,提高无线传输能量效率等.软件定义无线环境将物理世界和数字世界结合,从通信工程的角度重新审视可编程超表面的建模、分析和设计,是一个涉及物理学、材料科学、电子工程和信息科学等学科高度交叉融合的研究方向.

## 2.2 软件定义无线环境功能

软件定义无线环境的关键在于可复用软件模块中对电磁波功能的描述,以使用户发送预设指令轻松改变超表面的电磁特性.为了传输、解析和应用这些指令,软件定义无线环境需要在超表面结构中集成微型控制器网络,并具备以下功能<sup>[26,27]</sup>:

- (1) 将给定到达角的电磁波,完全反射到一个自定义的方向;
- (2) 通过超表面对电磁波透射、反射和折射,覆盖整个 Snell 定律得出的方向;
- (3) 波的吸收,即针对入射波确保反射和折射的功率最小;
- (4) 波的极化,即改变电波的电场和磁场震荡方向.

这些功能不仅适用于无线通信,还能够应用在如高效能量采集、热光伏、超高分辨率医学成像、传感、量

子光学和军事应用等场合<sup>[28,29]</sup>.相比传统的相控天线和反射阵列,软件定义无线环境具备更多的功能,更高精度的电磁波控制能力以及更明显的可扩展性.

## 2.3 软件定义无线环境应用场景

如图 2 所示,软件定义无线环境具有广泛的应用场景,如信息最佳接收、无线能量传输、安全防窃听、阻止非认证接入、非配合定位等,具体如表 1 所示.

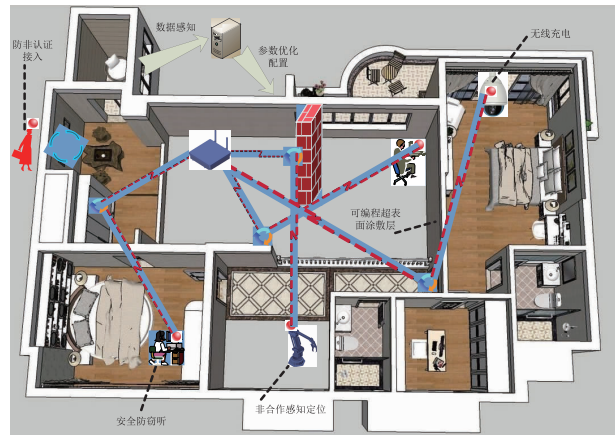


图2 软件定义无线环境使用场景

表 1 不同应用场景方法对比

用户类型	目标	传统方法	存在问题	新方法
A	最佳连接质量	波束成形 <sup>[11,30]</sup>	电磁波不可控地散射到物体上,能量急剧下降,导致效率低下、干扰以及安全问题	软件定义形成类似透镜的形式聚焦电磁波和避免相互干扰 <sup>[1,2,4,38]</sup>
B	无线能量传输	波束成形 <sup>[31,32]</sup>		软件定义超表面形成波导和聚焦的组合来最大化无线能量传输 <sup>[26]</sup>
C	安全防窃听	加密 <sup>[33]</sup> 、物理层安全 <sup>[34]</sup>		软件定义形式建立“私密传输路径”,避开其他所有用户减少被窃听的风险 <sup>[39,40]</sup>
D	阻止非认证接入	认证 <sup>[35]</sup> 、物理层认证 <sup>[36]</sup>		软件定义实现非认证接入路径全吸收接收的功率,从而阻断非认证接入 <sup>[39,40]</sup>
E	定位	配合 <sup>[37]</sup>	定位精度低、需要配合	非配合 <sup>[41,42]</sup>

## 3 软件定义无线环境关键技术

软件定义无线环境利用设备位置发现和访问控制 SDN 应用程序建立调控机制,获取设备位置、用户目标和全局策略并作为输入计算合适的无线传输路径,不断适应安全策略和用户设备位置更新,为无线通信的发展提供了一种新的视角.以下对软件定义无线环境所涉及的系统设计、网络服务支持、网络通信协议等关键技术进行论述.

### 3.1 超贴片设计

软件定义无线环境的核心是可编程超表面,其基本单元是一个具有三层体系结构的超贴片.该结构包

括一个动态超表面层,一组用以控制该超表面开关元件的小型化、网络化控制器和提供超贴片间以及超贴片与外部连接的网关<sup>[4]</sup>.动态超表面层包括具有亚波长尺寸的有序结构,其宏观电磁相互作用完全由有序结构的形状和配置状态决定,并根据电磁波功能需求进行调整.控制器是一种小型的、可寻址的电子装置,可以监测和修改至少一个超表面配置元件的状态.控制器网络通过网关广播其当前状态并接收命令以改变配置元件的状态,使得超表面产生整体所需的电磁功能<sup>[15]</sup>.超贴片网关处于控制器网络和外部环境之间,通常位于产生最小电磁互扰的位置.此外,超贴片网关还充当超贴片的供电桥并具有电磁波 DoA 感测能力.

在软件定义无线环境中,一个或多个超贴片作为出口/入口点,用于稳健且及时的数据传递<sup>[43]</sup>.如图1所示,网关连接到环境控制服务器,环境控制服务器综合感测数据并在超贴片网络中传递电磁激活指令.基于此,超贴片以及被涂覆的对象均变成了能够连接到公共网络的设备.

### 3.2 可编程超表面技术

可编程超表面是软件定义无线环境得以实现的基础,其主要思想是将小型控制器网络与电磁超表面结构集成,每个控制器通过本地交互和全局通信实现可编程性,如图3(a)所示.可编程超表面能够以非常高的

空间分辨率控制与其相互作用的电磁波,还可以同时自适应地承载多个功能,以便更好地适应周围环境或增加控制范围.

可编程超表面的调谐方式包括整体调谐和局部调谐,如表2所示.整体调谐包括温度、压力、湿度、电/磁场或光等的外部环境刺激影响整个超表面层时,材料特性将相应地被调谐,从而引起超表面功能的改变.局部调谐方式也有多种,包括改变衬底和结构<sup>[44]</sup>,改变二极管的开关状态<sup>[45]</sup>,利用 CMOS 开关或微机电开关(MEMS)等,它们均可以通过外部偏置改变它们的状态以调整超表面相应位置的电磁特性.

表 2 超表面调谐方式

调控模式	调谐方法	激励控制源	材料	优点	缺点
整体调控	电调谐方法 <sup>[46,47]</sup>	电信号	电敏感材料(向列液晶,石墨烯)	效率高	接触,有延迟
	磁调谐方法 <sup>[48,49]</sup>	磁场	磁场敏感材料(胶体粒子)	非接触,实时响应	精度低
	光调谐方法 <sup>[50]</sup>	光波	光半导体材料(Si, GaAs)	成本低	效率低
	温度调谐方法 <sup>[51,52]</sup>	温度	相变材料(VO2)	成本低	精度低
局部调控	开关二极管 <sup>[53]</sup>	偏置电压	二极管的打开和关闭	控制简单	不连续,每个二极管一个偏置电压
	连续可调变容二极管 <sup>[54,55]</sup>	偏置电压	MEMS	可连续工作	动态能力不强
	集体调谐变容二极管 <sup>[56,57]</sup>	偏置电路网络	二极管阵列	动态能力强,可实现动态全息图	控制复杂

对于局部调控,可以通过查表的方法直接将电磁功能转换为超贴片单元配置,而表的关系由超贴片本身确定.以完成吸收功能为例,令  $\sigma(S)$  表示超贴片所有单元的配置,  $s_{ij} \in S$  表示超贴片第  $i$  行和第  $j$  列对应单元的配置状态(连接或断开).此外,令  $N$  表示超贴片所有可能的配置集合,即  $\sigma(S) \in N$ ,超贴片在  $\sigma(S)$  配置情况下的功率反射图样为  $P_{\sigma(S)}(\phi, \theta)$ ,其中  $\phi, \theta$  分别表示反射的仰角和方位角.当一个波入射到超贴片上,配置  $\sigma(S)$  就会被激活,并通过式(1)找出实现吸收功能的最优配置,  $\sigma_{\text{best}}(S)$ .

$$\sigma_{\text{best}}(S) \leftarrow \underset{\sigma(S) \in N}{\operatorname{argmin}} \{ \max_{\phi, \theta} P_{\sigma}(\phi, \theta) \} \quad (1)$$

可编程超表面与智能控制回路互联,并利用信息技术编程的思想和算法来控制超表面的电磁特性,具备很高的环境适应能力.其中,超原子的尺寸,决定入射电磁波的折射角;控制器和开关规模的大小决定了可成形图案的粒度<sup>[4,39]</sup>.可编程超表面的分层结构如图3(b)所示,具体包括:材料功能层、感知激励层、屏蔽层、计算层以及通信层,各层的功能及特征见表3.

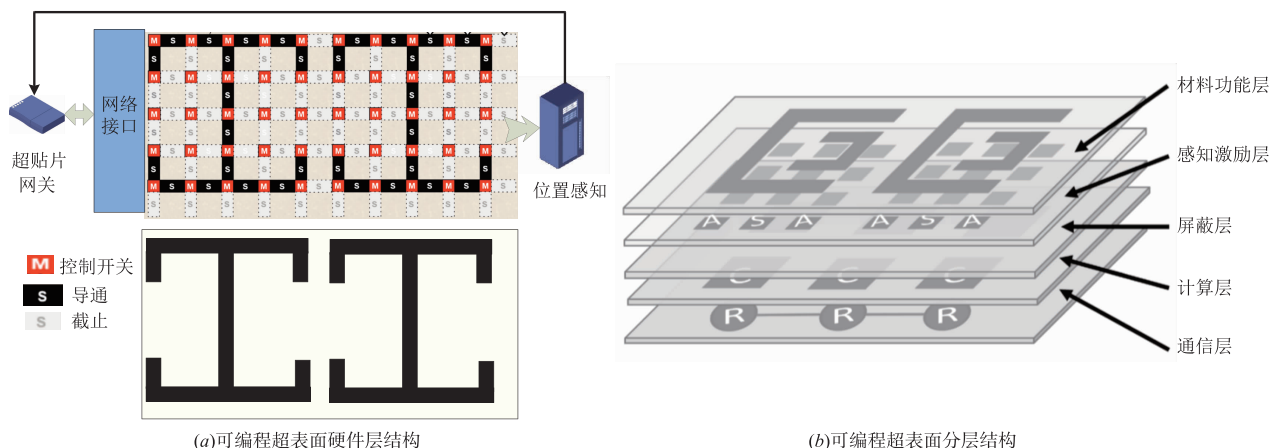


图3 可编程超表面结构

表 3 可编程超表面分层功能描述

分层	功能	关键元件	控制	特点
材料功能层	通过可重新配置得到定制的电磁波特性	CMOS 开关、石墨烯	偏置电压	隐藏了可编程超表面的内部复杂性
感知激励层	根据配置信息激励材料功能层	传感器	感知信息	自治、自适应
屏蔽层	去耦合	屏蔽材料	无	最小化互干扰
计算层	根据外部信息计算结果控制材料功能层	计算单元	外部信息、内部命令	一对多
通信层	超贴片内部以及控制器网络与外部的通信	集成通信单元	外部接口	片上网络、纳米网络

超表面可以采用成熟度和商业化程度都比较高的印刷电路板 (PCBs) 方法制作。然而, PCB 技术最初是为集成电路设计的, 其复杂度和成本远远高于超表面电路。因此, 在超表面的生产工艺方面, 采用导电油墨印刷方法的大面积电子学 (LAE) 更具有灵活性和成本优势<sup>[58-60]</sup>。

### 3.3 位置发现和感知技术

位置发现服务的基本功能是利用专门的位置发现系统探测并报告用户设备的位置, 并将其发送到电磁环境配置服务器。此外, 超贴片也可以利用网关上的传感器感知入射电磁波功率、角度或者位置信息, 并将其报告给位置服务器。位置服务器根据相应算法计算出最优超贴片配置信息。

对于非配合场景, 文献[41]提出的信号散射定位方法也是一种非常有前景的位置发现方式。该方法充分利用无线传输环境的复杂性定位, 不需要被定位物体主动发射训练信号, 通过将宽带测量的时间自由度 (d. o. f.) 替换为由波前整形获得的空间 d. o. f., 一个或者多个物体对环境中介质的散射贡献足以反演出物体的位置<sup>[42]</sup>。

### 3.4 超贴片间控制器无线连接技术

由于同一模块内控制器之间的互联更容易集成, 过去通常采用有线的连接方式。然而, 在大规模应用时, 软件定义无线环境包含大量超贴片, 其控制器之间采用有线连接方式存在复杂的布线问题。此外, 控制器部署过密也会大大增加延迟和功耗。因此, 在大型或密集的可编程超表面中, 超贴片间以无线的方式连接成为一种新的选择。

可编程超表面的分层结构为不同控制器无线连接提供了若干机会, 具体取决于超贴片的横向尺寸和目标波长。实际上, 为了对传入的分组或交换单元变化做出响应, 控制器逻辑上需要从一个状态转换到另一个状态, 具体包括: 数据包处理、节点报告和故障检测过程 (自身或邻居故障) 等<sup>[38]</sup>。文献[61]提出了可编程超表面间利用毫米波进行通信的思想, 分别针对可编程超表面各层之间不同的无线信道, 设计了相应的毫米波收发器, 并对各层之间无线信道度量进行了量化, 研究了复杂性与性能的折中关系, 为可编程超表面技术

在新兴领域的应用迈出了关键的一步。

### 3.5 网络控制及协议

在无线通信环境下, 多用户分布位置不固定, 为了在收发之间建立稳定的通信链路, 可编程超表面需要自适应地选择和优化超贴片特性以保证接收端的实际需求。对于单发单收的情况, 可编程环境可以感知发射端发送的信号, 并根据位置发现系统检测到的相应接收机的位置, 软件控制命令引导无线传输环境变换以建立最优连接路径。对于存在多个用户的情况, 需要优化控制超贴片分布以确保不同用户接收的信号彼此正交, 并由不同的可编程超表面路径转发。

在室内环境中, 超贴片可以覆盖无线环境例如墙壁、天花板、家具等大部分物体, 并提供对电磁波更精确的控制。在室外环境中, 超贴片可以涂敷在诸如建筑立面、公路广告牌等物体上, 用于提高通信效率。图 4 描述了一个完整的可编程超表面工作流程, 控制服务器接收所感测的数据以估计时变的入射方向  $\vec{d}_i$  和入射点  $p'$ 。然而, 由于网络延迟引入了方向误差, 真实的方向为  $\vec{d}_i$  以及真实的入射点为  $p$ 。软件定义无线环境需要利用控制算法降低方向和入射点偏移误差的影响。文献[4]分别针对无线通信和无线物理层安全两个目标, 采用优化的手段在不造成干扰或信号失真的情况下, 将超贴片分配给不同的用户。文献[62]针对多用户多目标的情况, 提出了网络层控制方案, 支持的目标包括在多播或单播设置中服务质量和功率传输优化、窃听和多普勒效应缓解的任何组合。

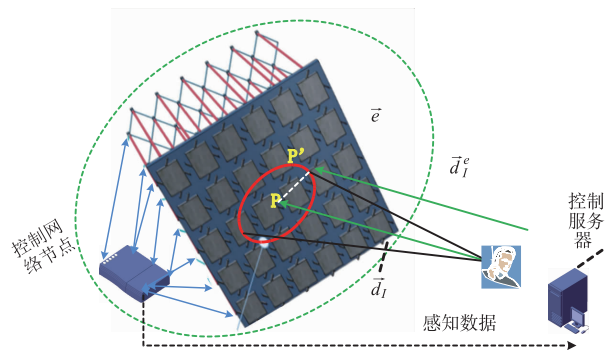


图4 可编程超表面工作流程

总之,基于优化问题,可以根据用户无干扰和信号无失真的条件布置超贴片的位置.此外,软件定义无线环境可以合并现有的网络基础设施中,而不改变它们的工作流程,如软件定义网络(SDNS)<sup>[63]</sup>.由于使用公共IoT设备作为网关,超贴片可以看作具有路由功能的硬件,从而能够利用主流的通信协议,并由SDN控制器支持.图5将可编程无线环境与基于SDN(软件定义网络)的常用网络进行结合<sup>[40]</sup>.如果发现授权设备,通过可编程无线环境向配置服务发布请求来实现特定的目标;如果发现的非授权设备,则可通过全局策略进行处理,从而防止非授权设备接入.

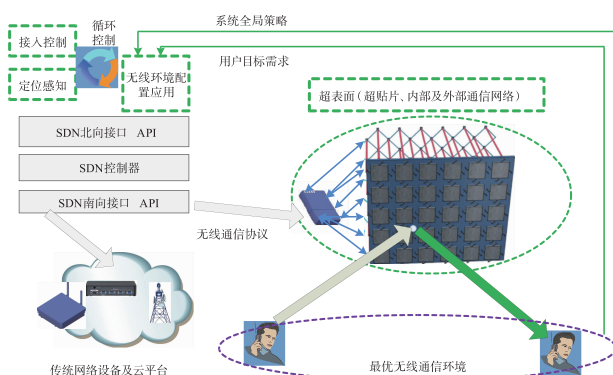


图5 基于SDN的软件定义无线环境工作流程

另一方面,软件定义无线环境中大量超贴片间快速、低成本的重配置需要网络协议提供支撑.文献[64]考虑节点能量、通信延迟和复杂性,利用李亚普诺夫漂移最小化方法解析地提出了超贴片网络协议,涵盖了宏观超表面功能和微观纳米网络行为.

此外,环境控制界面是在配置服务器上存在的应用程序编程接口(API).作为一个强大的抽象层,API隐藏了软件定义无线环境内部的复杂性,提供用户友好和通用的超表面功能以及超表面函数的软件描述,允许程序员通过适当的回调实现超贴片上按需定制、部署或收回,而不需要具备专门的底层硬件和物理知识,如图6所示.在此基础上,通过分析和启发式的优化,能够进一步提升可编程超表面控制软件的复杂性、模块性和接口能力.

## 4 软件定义无线环境面临的挑战

### 4.1 软件定义无线环境低成本硬件实现

软件定义无线环境的实现首先需要开发一个超低成本的硬件系统<sup>[65]</sup>,这个硬件系统能够有效利用应用软件对超表面进行重构,从而提供多种电磁可调功能.然而,由于软件定义无线环境不仅包含感知、交互、控制等一系列系统工程,还涉及大面积涂敷在周围环境的可编程超表面.所以,其硬件成本控制是一个巨大的挑战.

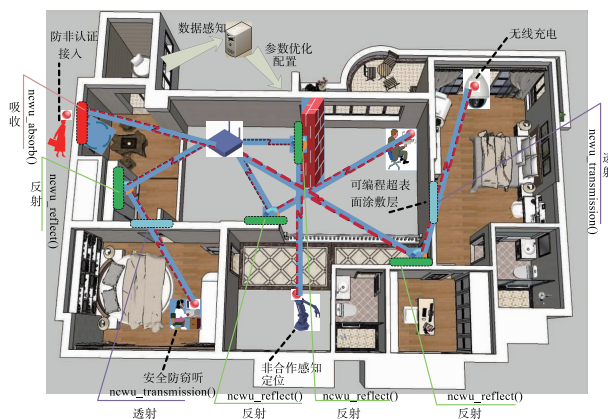


图6 基础应用程序接口

### 4.2 软件定义无线环境的理论分析模型搭建

由于将无线环境视为通信系统的参与主体之一,软件定义无线环境能够感知系统对无线电波(物理世界)的响应,并将其反馈给输入(数字世界),从而基于感测数据,利用软件控制器对输入信号和环境目标对无线电波的响应进行联合优化和配置<sup>[66]</sup>.因此,除了需要将电磁超表面的参数模型、计算模型和电磁兼容模型纳入无线信号模型之外,软件定义无线环境的建模还需要考虑电磁超表面的空间位置分布和对入射波的电磁波操控,以便将智能可重构超表面从根本上纳入无线网络.如果大规模超表面部署在室内环境中,还需要考虑近场传播效应的影响.因此,如何将无线通信理论模型与可重构超表面的电磁理论模型相结合,构建软件定义无线环境的计算分析理论框架是一个重要问题.然而,目前还没有任何理论和算法能够给出这种新兴无线通信手段的最终性能极限,以及达到这些性能极限的具体算法和协议.

### 4.3 软件定义无线环境的仿真与优化

软件定义无线环境与当前无线通信系统之间的根本区别在于定制和优化无线环境所需的感知数据和反馈开销.当电磁超表面引入到通信系统中时,引入了不同的通道属性,例如通道相关性和超表面带来的反射效应等.从物理学的角度来看,仿真优化需要明确材料、尺寸、几何以及工作频段等;而从通信角度出发,需要对节点的工作频率和传输功率、拓扑结构、允许尺寸和材料进行优化,平衡与超材料平面的最小串扰,通信健壮性和整体实用性等<sup>[67]</sup>.因此,可编程超表面多物理联合仿真是设计中的必要步骤.然而,由于这两个学科的不同,物理仿真方面通常采用各种计算资源需求巨大的计算和分析方法(有效介质理论、FDTD、FEM、传递矩阵方法、启发式算法等)来研究超表面的电磁特性.而控制器通信中最常见的是数据分组传输,一般采用离散事件仿真器,利用统计信道模型以简化物理传播介质的仿真.因此,将这两个不同

的仿真方法结合到一个统一的模拟器是软件定义无线环境发展的另一个挑战。

此外,软件定义无线环境是一个非常复杂的系统,无线环境不仅仅是优化端点,还需要动态可配置,以协助设备之间的信息传输和处理。当用户位置变化时,通常需要从嵌入到电磁超表面的传感器中获取大量传感数据,涉及到大量参数的优化,传统的网络优化和资源分配方案很难直接应用。因此,当一个系统中部署了大量电磁超表面时,他们如何相互协作以实现全局最优是一个非常重要但尚未解决的问题。

## 5 软件定义无线环境研究方向的凝练

### 5.1 基于软件定义无线环境的室内非配合定位技术

无线电波在室内四处反射和相互干涉的复杂过程,创造了一种特殊的指纹,哪怕是室内物体发生轻微的运动,该指纹就会发生变化。该现象可以用于室内物体的非配合定位,其挑战在于找到最有效的途径将物体从一开始就与指纹建立联系。软件定义无线环境可以动态操控室内无线电波,从而随意控制指纹的形态,很容易建立物体与指纹的对应关系。不仅针对单用户,基于软件定义无线环境的室内非配合定位技术还能够对多个用户进行定位并对无线环境进行优化。此外,该技术还能够进行运动感知,计算室内的人数,区分个体位置和检测呼吸模式等,有望带来安全、保健和游戏等众多潜在应用<sup>[41]</sup>。

### 5.2 基于软件定义无线环境的新一代移动通信技术

软件定义无线环境所具有的高度灵活性以及对电磁波的超强调控能力使得该技术能够应用到许多领域,例如 mmWave、D2D 和第五代(5G)移动通信系统<sup>[68,69]</sup>等。涂敷可编程超表面的周围环境不仅能够控制电磁波辐射和信号检测,而且能够控制无线传播信道,从而实现移动通信系统的完全可操控。在超大规模 MIMO 系统中,涂敷可编程超表面的外部环境与发射机大量天线相结合,通过联合优化天线波束成形和超贴片的配置,可以实现整体的操作和控制获得最大的系统增益。

### 5.3 纳米全集成软件定义无线环境

电子学的最新进展已经打开了新一代纳米电子组件的大门,如纳米电池,纳米能量系统,纳米存储器,纳米逻辑电路,甚至纳米天线等<sup>[70]</sup>。在通信领域,纳米电磁通信有两个预期应用场景<sup>[71]</sup>,第一是利用纳米无线电接收和解调电磁波,即电力学共振碳纳米管解码调制波的振幅和频率;第二是石墨烯为基的纳米天线用作太赫兹范围的电磁发射器。

软件定义无线环境的可控性主要依赖于超表面结

构中的小型控制器。小型控制器接收程序指令,并对超表面结构做出相应的改动,以调整其电磁行为。在空间受限或超密集的场景中,将纳米网络引入可编程电磁超表面,可以得到纳米全集成软件定义无线环境。纳米全集成软件定义无线环境是一个包括无线纳米尺寸电子控制器的网络,每个电子控制器负责一个有源超原子。纳米网络能够促进电磁超表面内控制元件的无缝集成,同时也可以使具有嵌入式智能的材料能够自动调整它们的电磁功能。嵌入在可编程超表面内的纳米网络充当超贴片控制器,将感知的信息传递到外部,同样也能将对超表面配置命令从外部传递回来。

### 5.4 基于人工智能的软件定义无线环境

软件定义无线环境中,为了迅速建立稳定的通信链路,需要针对超贴片的分布和控制进行实时和低复杂度的优化。然而,由于效用函数的复杂性以及存在大量的变量,优化这样的模型非常具有挑战性<sup>[62]</sup>。人工智能普遍被认为是解决多个复杂问题的有效解决方案<sup>[72]</sup>,基于人工智能理念的未來无线网络发展进一步被最近批准的“ITU-T Y. 3172 未来网络(包括 IMT-2020)中机器学习的体系结构框架”项目<sup>[73]</sup>所推进。在软件定义无线环境中,需要利用电磁超表面感知数据,并反馈给系统网络控制器,以便能够配置和优化无线环境。在数据感知方面,基于人工智能的方法能够大幅度降低系统优化对先验信息的需求<sup>[74]</sup>。此外,还可以将超贴片间的功率流分别映射到神经网络节点和链路上优化,能够在保证系统性能的同时,明显降低需要激活的超贴片总数<sup>[75]</sup>。

## 6 结束语

无线通信技术正在迅速往一个基于软件可定义的方向发展。软件定义无线环境通过对电磁波传输的无线路径进行主动干预,从而减轻路径损耗和多径衰落等影响,为电磁波的高效无线传播开辟了一条尚待探索的研究新领域。本文从基本模型和方法着手,详细阐述了软件定义无线环境涉及的关键技术,并讨论了其现阶段发展所面临的挑战。最后,本文凝练了几个软件定义无线环境未来发展方向。总之,软件定义无线环境在学术界刚刚被提出和研究,后续的发展将大有可为。

### 参考文献

- [1] C Liaskos, A Tsioliaridou, et al. Using any surface to realize a new paradigm for wireless communications [J]. *Communications of the ACM*, 2018, 61 (11): 30 - 33.
- [2] I F Akyildiz, C Han, S Nie. Combating the distance problem in the millimeter wave and terahertz frequency bands [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56 (6): 102 - 108.

- [3] I F Akyildiz, et al. 5G roadmap: 10 key enabling technologies[J]. *Computer Networks*, 2016, 106(4): 17–48.
- [4] C Liaskos, S Nie, A Tsioliaridou, A Pitsillides, S Ioannidis, I Akyildiz. A novel communication paradigm for high capacity and security via programmable indoor wireless environments in next generation wireless systems[J]. *Elsevier Ad Hoc Networks*, 2019, 87(4): 1–16.
- [5] J Chen, D Steinmetzer, et al. Pseudo lateration: millimeter-wave localization using a single RF chain[A]. *Wireless Communications and Networking Conference [C]* San Francisco, CA: IEEE, 2017. 1–6.
- [6] Z Pi, J Choi, R Heath. Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5G: fixed access and backhaul[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(4): 138–144.
- [7] 胡国兵, 吴珊珊, 杨忠, 杨莉, 赵婧姣, 宋军. LFM/BPSK 混合调制信号盲处理结果可信性评估: 一种简化的似然比算法[J]. *电子学报*, 2019, 47(9): 1891–1897.  
HU Guo-bing, WU Shan-shan, YANG Zhong, YANG Li, ZHAO Pin-jiao, SONG Jun. Credibility evaluation for blind processing results of LFM/BPSK hybrid modulation signals: A simple likelihood ratio based approach[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(9): 1891–1897. (in Chinese)
- [8] J Matamoros, C Anton-Haro. Optimal network size and encoding rate for wireless sensor network-based decentralized estimation under power and bandwidth constraints[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(4): 1121–1131.
- [9] 雷维嘉, 王娟兵, 谢显中. 大规模 MIMO 中继系统中多用户物理层安全传输方案[J]. *电子学报*, 2018, 46(12): 2878–2887.  
LEI Wei-jia, WANG Juan-bing, XIE Xian-zhong. Security transmission scheme on physical layer for multi-user in massive MIMO relay system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(12): 2878–2887. (in Chinese)
- [10] W Ma, C Qi. Channel estimation for 3-D lens millimeter wave massive MIMO system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(9): 2045–2048.
- [11] 季中恒, 季新生, 黄开枝, 陈亚军. 基于多天线波束赋形的 CRN 分布式上行功率控制算法[J]. *电子学报*, 2019, 47(12): 2472–2479.  
JI Zhong-heng, JI Xin-sheng, HUANG Kai-zhi, CHEN Ya-jun. CRN distributed uplink power control algorithm with multi-antenna beamforming[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(12): 2472–2479. (in Chinese)
- [12] A S Ameen, D Berraki, A Doufexi, A R Nix. LTE-Advanced network inter-cell interference analysis and mitigation using 3D analogue beamforming[J]. *IET Communications*, 2018, 12(13): 1563–1572.
- [13] H Chou, Z Yan. Parallel-plate luneburg lens antenna for broadband multibeam radiation at millimeter-wave frequencies with design optimization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 5794–5804.
- [14] D V Q Rodrigues, D Rodriguez, J Wang, C Li. Smaller and with more bars: a relay transceiver for IoT/5G applications[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2020, 21(1): 96–100.
- [15] H Yang, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(5): 356–362.
- [16] B Zhu, Y Feng, J Zhao, et al. Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(5): 51–56.
- [17] B Banerjee. *An Introduction to Metamaterials and Waves in Composites*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2011.
- [18] Hsiao H, Cheng H C, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 160–171.
- [19] T Hand, S Cummer. Characterization of tunable metamaterial elements using MEMS switches[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6(4): 401–404.
- [20] X He. Tunable terahertz graphene metamaterials[J]. *Carbon*, 2015, 82(2): 229–237.
- [21] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): 218–227.
- [22] C Liaskos, et al. Design and development of software defined metamaterials for nanonetworks[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2015, 15(4): 12–25.
- [23] Zhao J, Yang X, Dai J Y, et al. Controlling spectral energies of all harmonics in programmable way using time-domain digital coding metasurface[J]. *Computing Research Repository*, 2018, 6(2): 231–238.
- [24] Abadal S, Liaskos C, Tsioliaridou A, et al. Computing and communications for the software-defined metamaterial paradigm: a context analysis[J]. *IEEE Access*, 2017, 5(3): 6225–6235.
- [25] A O Diallo, R Czarny, B Loiseaux, S Holé. Comparison between a thin lens antenna made of structured dielectric material and conventional lens antennas, in Q-Band in a compact volume[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2): 307–310.
- [26] A C Tasolamprou, A Ptilakis, et al. The software-defined metasurfaces concept and electromagnetic aspects[A]. *10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META19)*[C]. Lisbon: WikiCFP, 2019. 23–26.
- [27] A E Minovich, A E Miroshnichenko, et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces: Optical metasurfaces[J].

- Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(2): 195 – 213.
- [28] S Lucyszyn, Advanced RF MEMS, ser. The Cambridge RF and Microwave Engineering Series [M]. NY: Cambridge University Press, 2010.
- [29] K Iwaszczuk, et al. Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies [J]. Optics Express, 2012, 20(1): 635 – 61.
- [30] C Zhang, W Xu, M Chen. Hybrid zero-forcing beamforming/orthogonal beamforming with user selection for MIMO broadcast channels [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(1): 10 – 12.
- [31] B Choi, B Park, J Lee. Near-field beamforming loop array for selective wireless power transfer [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(11): 748 – 750.
- [32] J Xu, Z Zhong, B Ai. Wireless powered sensor networks: collaborative energy beamforming considering sensing and circuit power consumption [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 4(8): 344 – 347.
- [33] T V X Phuong, G Yang, W Susilo. Hidden ciphertext policy attribute-based encryption under standard assumptions [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016, 11(1): 35 – 45.
- [34] J Lee. Full-duplex relay for enhancing physical layer security in multi-hop relaying systems [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(4): 525 – 528.
- [35] J Hajny, L Malina, V Zeman. Practical anonymous authentication-designing anonymous authentication for everyday use [A]. Proceedings of the International Conference on Security and Cryptography [C]. Seville: IEEE, 2011. 405 – 408.
- [36] X Qiu, T Jiang, S Wu, M Hayes. Physical layer authentication enhancement using a gaussian mixture model [J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 53583 – 53592.
- [37] M Raspopoulos. Multidevice map-constrained fingerprint-based indoor positioning using 3-D ray tracing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(2): 466 – 476.
- [38] A C Tasolamprou et al. Intercell wireless communication in software-defined metasurfaces [A] 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) [C]. Florence, Italy: IEEE, 2018. 1 – 5
- [39] J Chen, Y Liang, Y Pei, H Guo. Intelligent reflecting surface: A programmable wireless environment for physical layer security [J]. IEEE Access, 2019, 7(5): 82599 – 82612.
- [40] C Liaskos, S Nie, A Tsiolaridou, A Pitsillides, S Ioannidis, I Akyildiz. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 162 – 169.
- [41] Hougne P D, Imani M F, Fink M, et al. Precise localization of multiple noncooperative objects in a disordered cavity by wave front shaping [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(6): 63 – 65.
- [42] Del H P, M F I, Sleasman T, et al. Dynamic metasurface aperture as smart around-the-corner motion detector [J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 889 – 895.
- [43] S Dash, C Liaskos, I F Akyildiz, A Pitsillides. Wideband-perfect absorption polarization insensitive reconfigurable graphene metasurface for THz wireless environment [A]. IEEE Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communication (MTTW'19) [C]. Riga, Latvia: IEEE, 2019. 36 – 40.
- [44] F Zhang, Q Zhao, W Zhang et al. Voltage tunable short wire-pair type of metamaterial infiltrated by nematic liquid crystal [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(13): 134 – 136.
- [45] B Zhu, Y Feng, J Zhao et al. Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(5): 51 – 55.
- [46] M Decker, C Kremers, A Minovich, et al. Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8879 – 8885.
- [47] J Y Ou, E Plum, J Zhang, N Zheludev. An electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared [J]. Nat Nanotechnol, 2013, 8(4): 252 – 255.
- [48] S Liu, Y Long, et al. Bioinspired adaptive microplate arrays for magnetically tuned optics [J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(3): 160 – 167.
- [49] F Bourquin, G Caruso, M Peigney, D Siegert. Magnetically tuned mass dampers for optimal vibration damping of large structures [J]. Smart Mater Struct, 2014, 23(8): 850 – 859.
- [50] I Chatzakos, L Luo, J Wang, et al. Reversible modulation and ultrafast dynamics of terahertz resonances in strongly photoexcited metamaterials [J]. Physical Review Letters, 2012, 86(12): 125 – 132.
- [51] T Driscoll, S Palit, M M Qazilbash, et al. Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(1): 241 – 245.
- [52] T Driscoll, H-T. Kim, B-G. Chae, et al. Memory metamaterials [J]. Science, 2009, 325(5947): 1518 – 1521.
- [53] D Wang, L Zhang, Y Gong, et al. Multiband switchable terahertz quarter-wave plates via phase-change metasurfaces [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 550 – 558.
- [54] J Zhao, Q Cheng, J Chen, et al. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes [J]. New Journal of Physics, 2013, 15(4): 430 – 439.

- [55] C Mias, J H Yap. A varactor-tunable high impedance surface with a resistive-lumped-element biasing grid [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 55 (7): 1955 – 1962.
- [56] H-X Xu, S Tang, S Ma, et al. Tunable microwave metasurfaces for high-performance operations: Dispersion compensation and dynamical switch [J]. Scientific Reports, 2016, 6 (5): 1825 – 1832.
- [57] D Chicherin, S Dudorov, M. Sterner, et al. Micro-fabricated high impedance surface for millimeter wave beam steering applications [A]. 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves [C]. New Jersey: IEEE, 2008. 1 – 3.
- [58] M Caironi. Large Area and Flexible Electronics [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [59] M A U Karim, S Chung, E Alon, V Subramanian. Fully inkjet-printed stress-tolerant microelectromechanical reed relays for large-area electronics [J]. Advanced Electronic Materials, 2016, 2 (5): 285 – 293.
- [60] R Parashkov, E Becker, T Riedl, H-H Johannes, W Kowalsky. Large area electronics using printing methods [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93 (7): 1321 – 1329.
- [61] A C Tasolamprou, et al. Exploration of intercell wireless millimeter-wave communication in the landscape of intelligent metasurfaces [J]. IEEE Access, 2019, 7 (1): 122931 – 122948.
- [62] C Liaskos, A Tsioliariidou, S Nie, A Pitsillides, S Ioannidis, I F Akyildiz. On the network-layer modeling and configuration of programmable wireless environments [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019, 27 (4): 1696 – 1713.
- [63] J Cui, Q Lu, H Zhong, M Tian, L Liu. A load-balancing mechanism for distributed SDN control plane using response time [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 15 (4): 1197 – 1206.
- [64] Tsioliariidou A, Liaskos C, Pitsillides A, et al. A novel protocol for network-controlled metasurfaces [A]. ACM International Conference on Nanoscale Computing & Communication [C]. New York, NY: ACM, 2017. 347 – 351.
- [65] O Tsilipakos, A Pitolakis, et al. Software-defined metasurfaces: the VISORSURF project approach [A]. 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena [C]. Rome: Royal Society of Chemistry, 2019. 1024 – 1027.
- [66] M Di Renzo, et al. Smart radio environments empowered by ai reconfigurable meta-surfaces: An idea whose time has come [J]. EURASIP J. Wireless Communication and Networking, 2019, 129 (3): 338 – 346.
- [67] Letourneux F, Lostanlen Y, Corre Y. 3D simulation software platform for 5G channel modeling and analysis [A]. IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling & Design of Communication Links & Networks [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 897 – 890.
- [68] A Nordrum. The internet of fewer things [news] [J]. IEEE Spectrum, 2016, 53 (10): 12 – 13.
- [69] Q Wu, R Zhang. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58 (1): 106 – 112.
- [70] I F Akyildiz, et al. Nanonetworks: A new communication paradigm [J]. Computer Networks, 2008, 52 (12): 2260 – 2279.
- [71] C Liaskos, et al. Design and development of software defined metamaterials for nanonetworks [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2015, 15 (4): 12 – 25.
- [72] Zappone, M di Renzo, M Debbah. Wireless networks design in the era of deep learning: Model-based, AI-based, or both? [J]. IEEE Transactions on Communications, 67 (10): 7331 – 7376.
- [73] ITU-T. Y. 3172 architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020, ITU-T SG13 plenary. [EB/OL] <https://www.itu.int/md/T17-SG13-190304-TD-PLN/en>, Mar. 2019.
- [74] A Taha, M Alrabeiah, A Alkhateeb. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning. Apr. 2019, [EB/OL] <http://arxiv.org/abs/1904.10136>.
- [75] C Liaskos, A Tsioliariidou, S Nie, A Pitsillides, S Ioannidis, I Akyildiz. An interpretable neural network for configuring programmable wireless environments [A]. 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC) [C]. Cannes, France: IEEE, 2019. 1 – 5.

#### 作者简介



罗文字 男, 1982 出生, 河南正阳人, 博士, 华北水利水电大学副教授, 主要研究方向为电磁超表面、无线能量传输、智能无线环境。

许丽 女, 1978 出生, 河南驻马店人, 博士, 华北水利水电大学副教授, 主要研究方向为计算机视觉、模式识别、机器学习等。

邵霞 女, 1970 出生, 河南郑州人, 硕士, 华北水利水电大学副教授, 主要研究方向为通信与信息安全。