

doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2022.01.001

引用格式:潘时龙,宗柏青,唐震宙,等.面向6G的智能全息无线电[J].无线电通信技术,2022,48(1):1-15.

[PAN Shilong, ZONG Baiqing, TANG Zhenzhou, et al. Intelligent Holographic Radio for 6G[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(1):1-15.]

## 面向6G的智能全息无线电

潘时龙<sup>1</sup>,宗柏青<sup>2</sup>,唐震宙<sup>1</sup>,吕凯林<sup>2</sup>,范忱<sup>2</sup>,官科<sup>3</sup>,谷一英<sup>4</sup>,李杏<sup>5</sup>,  
张俊文<sup>6</sup>,于振明<sup>7</sup>,李晓洲<sup>4</sup>,武震林<sup>4</sup>,赵家宁<sup>1</sup>,朱啸龙<sup>1</sup>,杨悦<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学 电子信息工程学院/集成电路学院,江苏南京 210016;

2.中兴通讯股份有限公司,广东深圳 518057;

3.北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室,北京 100044;

4.大连理工大学 光电工程与仪器科学学院/光子技术研究中心,辽宁大连 116024;

5.上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室/智能微波光波融合创新中心,上海 200240;

6.复旦大学 信息科学与工程学院/电磁场与微波技术教育部重点实验室,上海 200433;

7.北京邮电大学 电子工程学院/信息光子学与光通信国家重点实验室,北京 100876)

**摘要:** 作为6G物理层备选技术,全息无线电具有同时实现射频全息、空间频谱全息和空间波场合成的能力,能够通过空间频谱全息和空间波场合成对全物理空间内的电磁场进行全闭环精准调制和调节,有效提高频谱效率和网络容量,从而支撑全息成像级、超高密度以及像素化的超高分辨率空间复用。该综述全面梳理了面向6G的智能全息无线电的基本概念及国内外研究现状,重点分析了基于智能全息无线电技术的6G通信系统架构,详细阐述了涉及的关键技术和挑战,包括光电二极管和电光调制器紧耦合全息天线阵集成、微波光子前端与光学信号处理的透明融合、RF全息空间的快速重构算法与k空间层析、面向智能全息无线电的空间波场合成技术和算法。

**关键词:** 微波光子学;6G通信;压缩感知;全息超表面;k空间成像;空间谱全息

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1003-3114(2022)01-0001-15



## Intelligent Holographic Radio for 6G

PAN Shilong<sup>1</sup>, ZONG Baiqing<sup>2</sup>, TANG Zhenzhou<sup>1</sup>, LYU Kailin<sup>2</sup>, FAN Chen<sup>2</sup>, GUAN Ke<sup>3</sup>, GU Yiyi<sup>4</sup>, LI Xing<sup>5</sup>,  
ZHANG Junwen<sup>6</sup>, YU Zhenming<sup>7</sup>, LI Xiaozhou<sup>4</sup>, WU Zhenlin<sup>4</sup>, ZHAO Jianing<sup>1</sup>, ZHU Xiaolong<sup>1</sup>, YANG Yue<sup>1</sup>

(1.College of Electronic and Engineering/College of Integrated Circuits,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China;

2.ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

3.State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

4.Photonic Research Center, School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

5.State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Intelligent Microwave Lightwave Integration  
Innovation Center (iMLic), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

6.School of Information Science and Technology, Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE),  
Fudan University, Shanghai 200433, China;

7.School of Electronic Engineering BUPT, State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

收稿日期:2021-11-01

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2201803);国家自然科学基金(62001218,61805032,61901045)

**Foundation Item:** National Key Research and Development Program of China (2018YFB2201803); National Natural Science Foundation of China (62001218, 61805032, 61901045)

**Abstract:** As an alternative technology for the 6G physical layer, holographic radio has the ability to simultaneously realize radio-frequency holography, spatial-spectrum holography, and spatial wave field synthesis. It can use spatial-spectrum holography and spatial wave field synthesis to perform precise modulation of electromagnetic fields in the entire physical space, which can effectively improve the spectrum efficiency and network capacity, thereby enabling holographic imaging level, ultra-high density, and pixelized ultra-high resolution spatial multiplexing. This review comprehensively summarizes the basic concepts of intelligent holographic radio for 6G, and the current research status in this topic. The paper analyzes the 6G communication system architecture based on intelligent holographic radio technology, and focuses on the key technologies and challenges involved, including tightly coupled holographic antenna array, transparent fusion of microwave photonic front-end and optical signal processing, fast reconstruction algorithm of RF holographic space and k space tomography, space wave field synthesis technology and algorithm.

**Keywords:** microwave photonics; 6G communication; compressed sensing; holographic meta surface; k space imaging; spatial spectrum holography

## 0 引言

随着移动通信技术的不断发展,无线电技术朝着全相干和终极相干不断演进。作为6G物理层备选技术之一,智能全息无线电技术具有同时实现射频全息、空间频谱全息和空间波场合成的能力,能够通过空间频谱全息和空间波场合成对全物理空间的电磁场进行全闭环精准调制和调控,从而实现时空、频域的全维相干,大大提高频谱效率和网络容量,使全息成像级、超高密度以及像素化的超高分辨率空间复用成为可能。本文将首先分析6G的需求及使用全息无线电技术的内在逻辑,随后介绍智能全息无线电(Intelligent Holographic Radio, IHR)技术的基本概念及国内外研究现状,最后分析该技术在6G无线通信中的应用前景,包括基于全息无线电技术的6G通信系统架构及其中所涉及的关键技术及挑战等。

## 1 6G需求和全息无线电技术的应用场景

随着5G技术的大规模商用,面向下一代移动通信技术的6G需求已得到来自各行各业的广泛研究,但目前多数仍停留在想象阶段<sup>[1-5]</sup>。因此,6G的驱动力被更多地归结于技术驱动、范式转换和无线技术演进的内在逻辑<sup>[6-9]</sup>。尽管如此,行业和学术界对6G的需求和应用场景仍达成了一定的共识<sup>[10-13]</sup>:

① 随着人口红利和流量红利的递减,未来移动网络将更多地从2C业务转向2B业务。例如,未来智能工厂中智能移动机器人的密集协同、实时控制、复杂操作和无线访问高性能计算资源等需求,要求通信系统具有TB级别的分布式计算能力、100 Gbit/s/m<sup>2</sup>或1~10 Tbit/s/m<sup>3</sup>的超高数据密度和小于10 μs的超低延迟,从而实现机器实体和操作过程的数字孪生以及远程故障排除。

② 5G仍缺乏杀手级应用的主要原因是移动网络尚未突破无线通信这一单一功能。事实上,网络空间可以和电磁空间构成陆海空天之后的“第五维空间”,而一个高分辨率的五维空间信息系统(5D Mapping)被认为是促进未来物理、生物和数字世界融合的关键赋能技术。因此,6G技术有必要在满足无线通信的基本需求外,实现感知和通信融合,以无线感知为基础更好地了解更高维度的物理世界,促成融合通信、感知和计算在内的多功能一体化系统,从而为社会提供更广泛的先进技术服务。

③ 随着人工智能的发展和渗透,移动网络将从5G的万物互联到6G的万物智联。在后5G时代,人工智能技术和物联网感知技术的发展使得万物智联成为了可能,而随着6G时代AI进一步的发展,人与人、人与物、物与物之间都会建立紧密、直接、高效、智能的联接。原生AI的应用与发展,将会为整个6G网络带来更强大的处理能力和更高的处理效率,能够应对更全面的应用场景。

④ 为了适应飞机、轮船和火车的超宽带需求,空间和地面网络将需要互连和整合,从而形成一个泛在移动、超宽带的应用场景。为了应对该应用场景中的海量智能终端,一个多尺度的、能够突破空-天-地-海区域限制的室外大尺度空天地一体化通信网络和室内短距离3D立体网络将成为6G网络架构的备选方案。其中,室外大尺度空天地一体化网络为多层网络,包括由各种轨道卫星组成的天基网络,由飞机、UAV或HAPS组成的空中网络,以及地面网络;而室内短距3D网络以毫米波、太赫兹波或无线光等短距离通信为主。

⑤ 在碳达峰和碳中和的大背景下,移动网络的节能减排将是未来行业创新的重点,发展绿色和可持续发展的移动网络将是一个更加紧迫的需求。

综上所述,6G将是一张具有超高速率、超高数

据密度和超低时延的泛在超宽带绿色移动网络,以满足海量高性能智能超级终端的高效数据交互和计算协同需求。同时,智能驾驶和智能工业革命也对6G提出了核心需求,将催生出包括泛在移动超宽带(ubiquitous Mobile Ultra-Broadband, uMUB)、超宽带低时延(ultra-Broadband with Low Latency, uBLLC)和超高数据密度(ultra-High Data Density, uHDD)等业务类别在内的应用场景。匹配这些服务和场景需要覆盖从微波、毫米波、太赫兹到自由空间光的超谱或全谱移动通信系统,变革性物理层技术,以及通信、感知和计算的端到端协同设计<sup>[7]</sup>。

作为6G物理层的关键技术,智能全息无线电被认为是应对上述挑战的关键使能技术之一。例如,在支持5D-Mapping构建方面,全息无线电技术可以采用空间-谱全息技术精确感知复杂电磁环境,实现对电磁空间的全维度实时预测分析,支撑电磁空间智能化。由于可以得到具有极高空间分辨率和极精细谱分辨率的动态无线电地图,一方面可以利用充分探索的射频频谱资源,进一步发展广泛的频谱共享和认知无线网络;另一方面能够同时实现超高分辨率的空间-谱复用,极大地提升通信信道容量,支撑6G的典型应用场景。同时,在未来智能工厂的应用场景中,智能全息无线电的超高分辨率空间和频谱复用能力有望实现一个超高数据密度的并行总线式无线链路,从而应用于面向未来智能制造的微尺度3D网络。此外,智慧城市中的混合接入点部署场景需要同时实现无线信息传输和无线能量传输<sup>[14]</sup>,而智能全息无线电能够精密调控无线电空间及频谱环境,突破传统通信的基本覆盖范围限制,有助于高效地实现超密集海量物联网的数据和能量传输。

## 2 全息无线电技术的国内外研究现状

迄今为止,全息无线电技术在成像和感知等领域已有一定程度的研究。1984年,Kulkarni等人提出了一种利用多个参考波束进行全息复用的技术,利用 $\theta$ 调制和载频多路复用记录全息图。该方法能够方便地测量连续事件的较大相位变化,实现全息干涉测量<sup>[15]</sup>。1994年,Kitayoshi提出了一种无线电全息术,通过遥感分离包含偏振信息的复杂波源发射模式以实现三维成像,并实践验证了缝隙辐射、表面波和不完全屏蔽残像等辐射模式能够在远大于全息图观察平面的区域上成像<sup>[16]</sup>。2002年,Salo和Meltaus等人提出了一种全息元件的合成方法,通过

测试平面波、无线电波涡流和贝塞尔波束等不同波束形状,对比了该合成法与使用幅度相位全息图的准光学全息技术所获得的结果<sup>[17]</sup>。2004年,Andersen利用全息成像技术实现了有效孔径高达100 m的天基成像干涉仪,可应用于激光雷达、光通信或高分辨率成像系统中而无需多光谱检测<sup>[18]</sup>。Holl等人于2017年通过WiFi、蓝牙等无线数据传输系统发射具有精确已知幅度相位的相干电磁波,利用电磁波在空间中的传播和辐射形成全息图,即一个由二维波阵面编码光束穿过目标得到的三维视图<sup>[19]</sup>。同年,Xu B和Qi W等人针对多径效应提出了全息无线电干涉测量方法,通过全息无线电干涉建立移动目标的无线电干涉测量异相全息<sup>[20]</sup>。2021年,Badiey等人利用全息干涉技术在扰动海洋环境中实现通信传播<sup>[21]</sup>。

全息无线电技术的理论和建模通常采用菲涅尔-弗劳恩霍夫干涉、衍射和空间相关模型代替传统的瑞利传播模型。2005年,Rosen等人将全息波形用于包括通信在内各种目的的改进装置和方法,通过多级相位编码方法与数学变换结合使用,进一步增强辐射波形的鲁棒性和安全性<sup>[22]</sup>。2016年,Prather重点介绍了采用光学全息方法对海量多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)天线阵列输出信号进行成像的新技术,解决了模数转换器(Analog Digital Converter, ADC)成本和波束处理方面的许多难题<sup>[23]</sup>。2019年,Marzetta和Pizzo等人通过线性系统理论和傅里叶变换等传统工具深入探讨了全息MIMO的信道模型<sup>[24]</sup>。2020年,Chibiao等人在现有多维合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的框架下,建立了全息SAR的成像系统和信号模型,并提出了初步的成像思路,由此为全息SAR技术的发展提供了初步的理论和技術框架<sup>[25]</sup>。2021年,Khodaei等人提出一种将全息频谱复用(Holographic Spectrum Multiplexing, HSM)作为新型光纤网络中实现MIMO的技术方案,HSM可以利用超短激光脉冲的光谱空间,以二维全息图的形式生成线路码<sup>[26]</sup>。同年,Sanguinetti和D'Amico等人研究了视线全息MIMO通信中的波分复用技术<sup>[27]</sup>。Liao P Y等人提出了一种利用全息相关器在常规阶跃式多模光纤中复用通信信道的空间分割技术<sup>[28]</sup>。

由于全息无线电技术会生成海量数据,因此需要借助通信、计算电磁学、计算全息学中和光学信号处理相关的算法和工具。1995年,Mazurenko等人

介绍了一种并行-串行和串行-并行数据转换的光处理器,采用全息时空频率编码并对其进行了实验演示<sup>[29]</sup>。2000年,Seffler等人介绍了一种多通道射频相关器,它能够同时将接收到的RF信号与存储在光折变晶体中的已知参考波形库进行关联,可以通过集成光学技术产生结构紧凑、鲁棒性好且高效的设备<sup>[30]</sup>。同年,Takasago等人提出了一种基于多路傅里叶全息的空间相位码分多址技术的新型空间变化光互连系统<sup>[31]</sup>。2003年,Schlottau和Wagner等人利用傅里叶平面空间-光谱全息技术和经过频率扫描的可变放大全息读出系统,通过相干光纤远端、光调制、随机间隔的阵列天线,可以形成相位相干的宽带射频图像<sup>[32]</sup>。随后,该团队于2004年提出了一种利用空间-光谱全息技术实现时间积分的新方法,该方法使用适当编程的空间光谱光栅对光学调制时间输入进行空间扫描。通过对声光偏转器发出的行波衍射光与声光调制器发出的时间调制光的图像进行干涉,将扫描操作所需的光栅编程到非均匀加宽介质中,从而记录空间光谱全息副本<sup>[33]</sup>。2007年,Mohan等人利用空间-光谱材料的宽谱响应和精细光谱分辨率(25 kHz)开发出超宽带频谱分析仪,可处理全频谱宽带微波,具有可调节的时间口径(低至100 ms)和快速刷新速率(高达1 kHz)<sup>[34]</sup>。同年,Babbitt和Neifeld等人通过空间-频谱全息材料提出一种宽带光子辅助ADC技术,实践表明利用现有的材料和器件可以实现10 bit量化性能<sup>[35]</sup>。2012年,Sullivan等人介绍了一种用于分析干涉无线电数据的快速全息反卷积方法<sup>[36]</sup>。2016年,Bacot等人引入时间反转的概念并进行实验证明,可以帮助重新审视全息技术,并推进一种新的波形控制方法<sup>[37]</sup>。2017年,Murakowski和Schneider等人使用相干光学处理来同时感测无线电波的到达角和频率,通过将空间RF波相干上变频到光纤中的光载波,利用光纤色散将分布式天线阵列的空间孔径扩展到时间维度,最后通过电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)捕捉光纤发出波束的干扰,从而实现k空间计算重建射频波<sup>[38]</sup>。同年,Schuetz和Ross等人利用相似的原理进行了k空间成像<sup>[39-40]</sup>。Prather等人在此基础上又提出一种利用k空间近实时成像技术对细胞环境进行空间-频谱分析的方法<sup>[41]</sup>; Barber和Harrington等人在文献[19]的基础上继续深入研究了S2材料的光学存储和处理的独特性,展示了利用频谱烧孔技术实现带宽扩展(>32 GHz)、数据速率选择和滤

波的工作,包括处理实时1D数据和2D图像,并讨论了使用S2材料实现大型(106×106)矢量矩阵乘法器的潜在架构<sup>[42]</sup>。2018年,Ryan等人延续了k空间的相关工作<sup>[43]</sup>。同年,Falldorf等人提出了一种基于折射原理的全息波场合成新方案,对衍射全息和折射全息在相空间中产生的光进行比较,通过在空间中生成静态和周期性点图,展示了一个折射全息显示的案例<sup>[44]</sup>。2019年,Pizzo等人提供了一种简单直观的方法来计算全息MIMO信道的自由度<sup>[45]</sup>。同年,Karimipour和Aryanian等人利用全息和卷积定理实现了任意形状波束的电磁波生成,其中无需采用任何优化算法和数学计算,即可对波束方向进行灵活地操纵,实验验证了具有三个独立波束的全息图原型<sup>[46]</sup>。Xu H等人利用深度学习增强型全息技术在复杂的室内环境中实现准确定位射频识别标签,通过创建新的全息算法,可以在横向和径向达到厘米级的精度,另外评估了它在多种丰富路径的应用场景中的性能<sup>[47]</sup>。2020年,Babbitt总结了利用空间谱全息材料进行微波光子处理技术的最新进展<sup>[48]</sup>。同年,Comoretto和Monari等人采用512个台站组成的干涉仪实现了平方公里级别的阵列低频望远镜,通过低频孔径阵列可以组合成相关波束<sup>[49]</sup>。

关于全息无线电在雷达探测领域的应用研究,2003年,Merkel和Cole等人进行了模拟RF信号处理应用的空间谱相干全息集成处理器的演示,通过相干信号处理,可实现高分辨率多普勒处理<sup>[50]</sup>。2014年,Delfyett通过锁模激光器产生两个相同的光频率梳,使用光谱相位编码的光频率梳进行信号处理<sup>[51]</sup>。2015年,Cao S等人提出了一种新的雷达系统—全息雷达,通过记录电磁波的传输模式进行目标检测或雷达成像<sup>[52]</sup>。2016年,Capineri和Bechtel等人详细论述了超宽带雷达目标扫描器的原型和全息信号处理技术<sup>[53]</sup>。2020年,Melo和Falconi等人首次实现了基于绝缘体上硅光子集成电路(Photonic Integrated Circuit, PIC)的雷达和激光雷达组合系统<sup>[54]</sup>。2021年,Mazur和Suh等人利用孤子微梳进行了高光谱效率相干超通道传输实验<sup>[55]</sup>。近年来微波光子学及其雷达应用的迅速发展也为全息无线电的发展提供了新思路<sup>[56-58]</sup>。

关于面向全息无线电技术的天线形态,2013年,Ebadi和Driscoll等人利用超材料在表面引导模式和设计的辐射孔径分布模式之间的切换,演示了基于调制表面超材料的微波全息波束形成<sup>[59]</sup>。2015年,Mühlenbernd等人通过将多个记录通道集

成到单个设备中,证明了一种基于几何超表面的宽带全息复用的有效方法<sup>[60]</sup>。同年,Gregoire 和 Patel 等人提出一种采用极化控制的电子可控全息天线的设计,该天线由 Ku 波段的电子可控表面波波导人工阻抗表面天线的径向阵列组成<sup>[61]</sup>。2016 年,Smith 采用一种不同的超材料设计理念,提出了一种用于波束形成和成像的全息超表面系统<sup>[62]</sup>。2017 年,Li L 和 Cui T 等人针对超表面在可重构性、高效率以及对散射光的相位和幅度的全面控制上的薄弱点,通过引入基于 1 位编码超表面的可重新编程全息图的概念来应对这一挑战,实验证明了只需一个编码超表面就可以实时地实现多个全息图像<sup>[63]</sup>。2019 年,Black 和 Deutsch 等人公开了使用空间-时间全息的大规模多用户 MIMO 天线系统<sup>[64]</sup>。同年,Lin Z 和 Huang L 等人提出了一种基于非线性超表面的四波混合全息复用技术,将超表面用于实现计算机生成的全息图,具有出色的波前整形能力和超小的尺寸<sup>[65]</sup>。Burch 和 Hunter 等人采用柔性全息超表面贴片仿真和实验展示了在毫米波段工作的反射超表面全息图<sup>[66]</sup>。2020 年,Huang C 和 Hu S 等人针对可重新配置的全息 MIMO 表面及其可用硬件体系结构这一主要特征对全息 MIMO 通信进行概述,并强调了设计支持全息 MIMO 通信的机遇和关键挑战<sup>[67]</sup>。同年,Chen T 和 Li J 等人设计并实现了一系列新颖的可重构超表面,通过使用这些设备,可以更容易地达到先进的超表面全息图效果<sup>[68]</sup>。2021 年,Shang G 和 Wang Z 等人介绍了全息成像和超表面的发展历史,展示了超表面全息在光学领域的应用,并总结了微波领域全息成像的最新进展<sup>[69]</sup>。

### 3 智能全息无线电系统架构

#### 3.1 基于 UTC-PD 耦合天线阵

所谓全息,就是利用电磁波的干涉原理记录空

间电磁场,并通过参考波和信号波干涉所记录的信息实现目标电磁场的重建。由于射频信号和光波都是电磁波,因此,全息无线电具有与光学全息相似的特性。全息无线电采用天线作为传感器,根据惠更斯原理,需要采用连续孔径的天线阵实现信号波连续波前相位的接收和测量。在智能全息无线电的宏站应用场景中,为了实现连续孔径有源天线阵列,一种巧妙的方法是使用基于电流片的超宽带紧密耦合天线阵列(Tightly-Coupled Array, TCA)。通过倒装技术将单行载流子光电探测器(Uni-Travelling-Carrier Photodetector, UTC-PD)与天线振子键合,形成天线振子之间的耦合。同时,将贴片天线振子直接与电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)集成。由于 UTC-PD 输出的电流可直接驱动天线振子,因此整个有源天线阵列具有非常大的带宽(通常大于 40 GHz)<sup>[70-71]</sup>。此外,这种连续孔径的有源天线阵列不需要超密集的 RF 馈电网络,不仅具有很好的可实现性,且具有明显的 SWaP 优势。

基于 UTC-PD 紧耦合的连续孔径天线阵列,可以通过电-光上转换和光-电下转换巧妙地实现从 RF 全息到光学全息的空间映射。由于傅里叶光学和光学全息技术相比射频域更为成熟,且 RF 全息已经映射到了光学全息,因此可以利用光学信号处理手段实现 RF 全息信号的处理(如 FFT 和 IFFT 等),使智能全息无线电完全类似于 RF“光场”全息成像(上行)和 RF“光场”全息投影(下行)。该技术的好处在于:通过将一些信号处理从数字层面转移到电磁层面(光学或超表面),可以在灵活性、低延迟、功耗和复杂性方面获得了很大的收益<sup>[72]</sup>。此外,为了保证信号的高保真传输,光域的信号处理可以在站点进行,而电域的信号处理可以放在云端。

基于全息无线电技术的通信系统架构如图 1 所示。

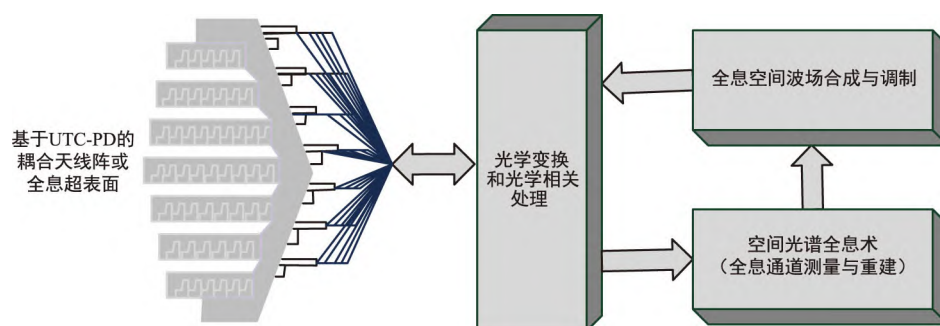


图 1 基于 UTC-PD 耦合天线阵的智能全息无线电架构

Fig.1 Structure of the intelligent holographic radio based on UTC-PD coupled antenna array

在上行链路中,通过空间-频谱全息技术对 3D 频谱空间进行实时的动态重构,一方面对大量密集的移动终端发送的信号进行空间和频谱的解复用,另一方面可获得动态的三维 RF“相频空间”,为下行链路的空间波场合成 (Spatial Wave Field Synthesis, SWFS) 提供精确的反馈和控制参数。下行信号根据这些参数进行预编码,从而实现近似连续的全息空间-频谱复用和极高的数据吞吐量。

在下行链路中,空间波场合成根据上行链路中的空间频谱全息建立的三维射频全息空间进行空时

预编码,实现电磁波场在目标空间的复杂和精准分布。整个信号处理部分包括信号模拟器、信道模拟器和波场合成模块。最后,由信号处理各模块生成控制信号,控制 UTC-PD 耦合天线阵列发射特定调制编码的 RF 信号。

### 3.2 基于全息超表面和稀疏天线阵或分布式天线

智能全息无线电由于具有渐消逝波特性,因此同样适用于分布式场景中的极近场通信和无线能量传输等应用,基于光纤分布式天线的智能全息无线电架构如图 2 所示。

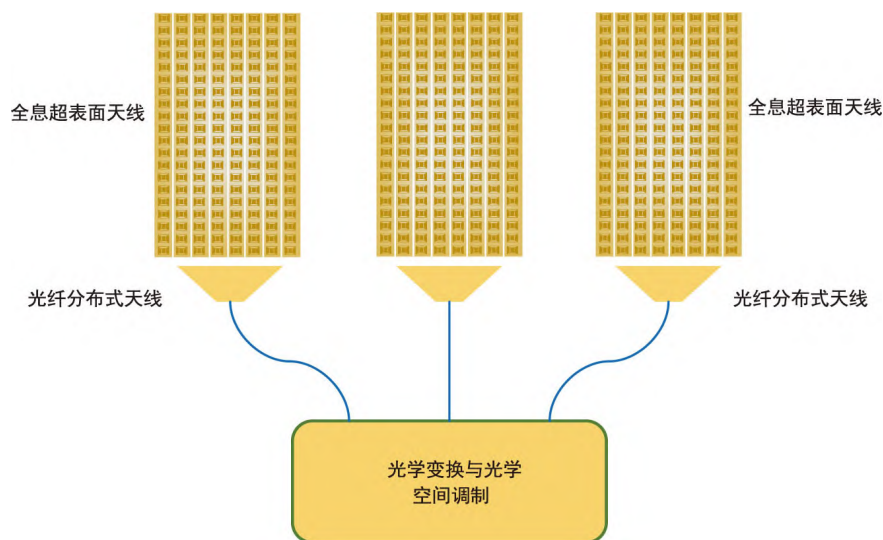


图 2 基于光纤分布式天线的智能全息无线电架构

Fig.2 Structure of the intelligent holographic radio based on fiber distributed antenna

通过部署大量超低成本和低功耗的全息超表面 (例如惠更斯超表面天线) 以及作为信号源的分布式天线系统或稀疏天线阵,可以实现更加灵活的智能无线通信;并且,全息超表面可以同时实现对各种设备的能量传输,通过反射来弥补较远距离传输造成的功率损失,并利用谐振渐消逝波耦合提高无线能量传输效率。因此,在超密集环境下,通过全息超表面和光纤分布式天线协同也可以实现电力传输网络。

需要说明的是,尽管可重配全息超表面可实现对 RF 空间的全息感知和精密调控,但是要精确定义 RF 全息空间与后端数据流之间的一一对应关系仍是很大的挑战。幸运的是,通过光学变换和 RF-光学空间调制的映射关系能够有效解决这一问题。此外,与宏站应用场景不同,分布式架构还需要考虑光学信号的远距离高保真传输,基于光纤的微波光子链路有助于这一需求的实现<sup>[73]</sup>。

## 4 智能全息无线电关键技术

### 4.1 光电二极管和 EOM 紧耦合全息天线阵集成

全息超表面的有源天线系统对射频馈电网络的尺寸、功率和复杂度提出了很高的要求,传统的射频馈电网络在物理上难以实现,一种可行的解决思路是在每个天线元件中直接集成一个光电二极管作为光学馈电网络。紧密间隔的光电二极管能够为紧密排列的天线元件提供接近理想的电流源,免除了对传统射频馈电网络的需求;然而,如何利用光电二极管实现高功率的光输入以及对高频、微米级光电二极管进行鲁棒、高效的校准,且不给系统引入损耗,成为光馈电网络设计的主要难题。

目前,采用光电二极管光学馈电网络面临的最大挑战是天线元件难以实现高射频功率输出。虽然商用光电二极管可达到 50 GHz 甚至 100 GHz 以上的带宽,但它们的输出功率通常被限制在 10 dBm

以下。而 UTC-PD 技术的高功率、高带宽和高转换效率绕开了光电二极管的限制,成为全息有源天线阵的新型理想选择,例如用于大功率应用的封装式改进型 UTC-PD 等。

基于 UTC-PD 和 EOM 紧密耦合的全息天线阵列利用倒装芯片技术将大功率 UTC-PD 与天线元件结合,形成天线元件之间的耦合,其结构如图 3(a) 所示。天线元件采用基于电流片的超宽带紧密耦合天线阵列,这种连续孔径的有源天线阵列不需要超密集的 RF 馈电网络,同时可以实现 >40 GHz 的工

作带宽,不仅具有很好的可实现性,而且可以降低系统的尺寸、成本、功耗等,其等效电路图如图 3(b) 所示。

通过先进的 UTC-PD 紧密耦合天线阵技术形成的空间连续孔径来传输和接收无线电信号,能够实现智能全息无线电技术基于全息超表面的有源天线系统构想,将传统天线阵的有限波束转变为近无限波束的平面波,从而实现近无限的、连续的“波束”空间。

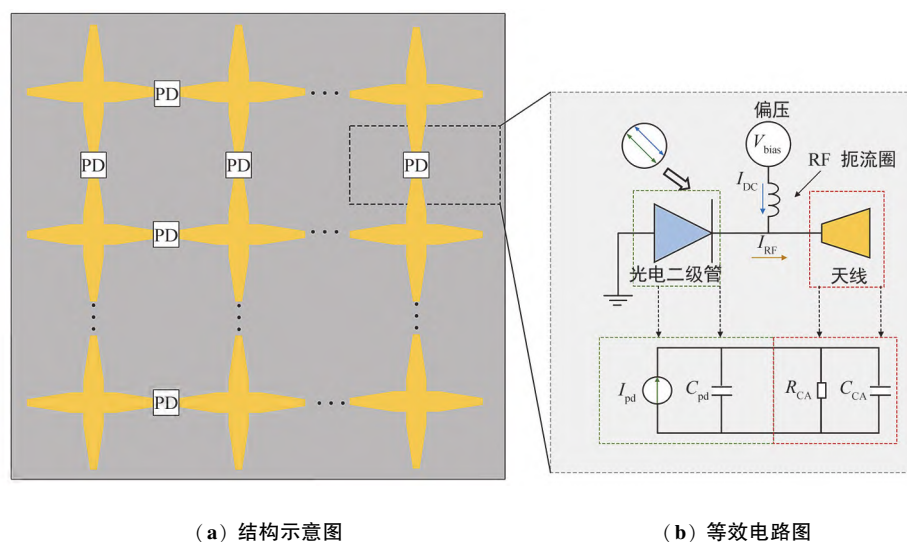


图 3 基于 UTC-PD 和 EOM 紧密耦合的全息天线阵列

Fig.3 Holographic antenna array based on UTC-PD and EOM tightly-coupled array

#### 4.2 微波光子前端与光学信号处理的透明融合

为了实现微波光子前端与后端光学信号处理的无缝集成,必须有效构建从 RF 全息到光学全息的空间映射。一种可行的思路为:首先构建微波阵列与光学阵列的变换关系;随后从光纤阵列输出的光信号经过透镜进行空间傅里叶变换;最后利用在透镜焦平面上的探测器阵列直接探测其光强,从而建立来波方向与光强分布空间位置的映射关系,实现微波波束到光域的映射。

在微波/光波高保真映射变换的实现过程中,微波光域上变频采用高效电光调制将微波信号加载到光载波的边带上,实现微波信号与光学边带信号的高保真映射。同时,还需要突破大动态高效微波光域上变频技术、微波/光学天线线性保真缩放变换等关键技术,实现全孔径微波天线阵元信号的光域线性映射变换(时延、空间、幅度、相位保持一致性),从而保证微波天线接收的目标回波波束被高保真地映射到相应的阵列光学天线输出端口。

在微波光域映射变换中,需要通过相位控制技术确保各路信号光的相位稳定性。但是光纤通常对外界环境(包括温度的变化、微小的振动、气流或者声音的变化)的微小变化敏感,即使光纤弯曲这样的微小变化也能显著改变信号相位,严重降低变换的保真度。为使每个通道具有相同的附加光时延或附加相移,可采用光纤延时(相位)补偿法进行通道间相位的补偿。

图 4 为一个 8 通道的微波光子前端与三维光信息处理验证系统。微波天线阵列接收来自自由空间的微波信号,对微波的信息进行离散采样,通过光纤拉远进行远距离处理。经光学三维信息单元处理后完成大规模的空间傅里叶变换,并最终由阵列光电探测器完成微波波束信号的接收。经 PBS 反射的光与来自激光器的参考光束在线性光电探测器阵列中进行拍频,产生的拍频信号用于跟踪 8 条独立光纤路径中的相位漂移。使用现场可编程门阵列实时计算反馈信号,并将其传送

到相位控制调制器阵列,可实现相位误差探测和自适应补偿。

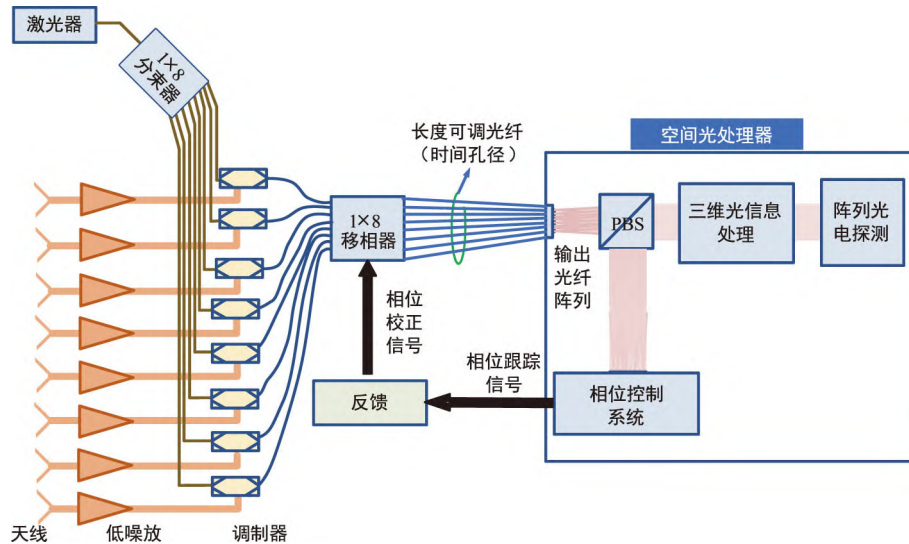


图4 微波光子8通道三维光信息处理验证系统示意图

Fig.4 Illustration of a 8-channel microwave photonic 3D optical signal processing system

基于全孔径光域下变频技术和阵列光电探测器的平方率检测特性,经由多通道天线系统采样的微波信号会在探测器光敏面位置实现相干加强,将微波信号上携带的基带信息完好地恢复出来。初步实验结果表明,在输入射频信号功率为-15 dBm时,1 Mbit/s的QPSK调制格式信号经过全孔径光域下变频解调输出的信号矢量误差幅度(EVM)值约为8%,验证了全孔径多波束微波光域下变频接收的可行性。

#### 4.3 RF 全息空间的快速重构算法以及 k 空间层析

为了实现 RF 全息空间电磁信息感知和波矢空间的快速重构,需要研究基于微波光子学的三维信息处理机制,开展微波空间阵列接收和信息处理反演理论研究;重点研究 RF 全息空间信息线性变换、快速重构算法理论模型、算法优化和分辨率提升优化、反演算法时效性优化、k 空间可视化解析等关键技术。以下将重点介绍最具有代表性的 k 空间层析技术。

作为寻常空间在傅里叶转换下的对偶空间, k 空间与傅里叶变换有着密切的关系。其中,为人所熟知的一维傅里叶变换将强度-时间关系映射为强度-频率关系,从而实现频谱分析。而对于具有矢量性的信号频率,如二维空间信号  $(x, y)$ ,通过二维傅里叶变换后形成的二维空间频率矩阵,即为二维 k 空间。基于 k 空间理论,k 空间层析利用相关光学方法,将 RF 信号转换为光信号,并利用光相位调制和光纤的色散特性对入射 RF 波场的 k 矢量进行编码,从而确定 RF 信号的频率及入射角。其具

体架构和编码过程如图 5 所示。

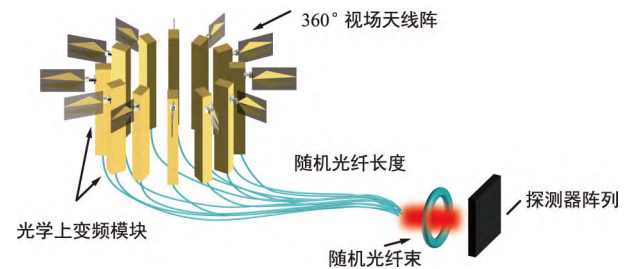


图5 k 空间层析成像系统模型

Fig.5 System model of the k-space tomography

由于二维 k 空间中的每一点对应一个具有一定空间频率的信号,通过 k 矢量  $(k_x, k_y)$  可以分别表示为  $k_x = (2\pi/\Lambda_l)/(u/z_l)$ ,  $k_y = (2\pi/\Lambda_l)/(v/z_l)$ 。k 空间层析成像系统首先通过覆盖 360°空间探测区域的天线阵列接收 RF 信号,然后利用电光调制器对接收的 RF 信号进行相位调制实现光学上变频转换,从而将每个射频源的频率  $f_i$  转换成光频率  $\nu_i$ ,同时也对每个信号附加相位。调制后的光信号通过多路随机长度的光纤引入不同延迟,并在  $n$  个离散探测器构成的探测阵列处实现光电转换。因此,每个探测器都会输出与所在位置处测得的场辐照度成正比的电信号,该过程可以表示为矩阵形式:

$$P_n = \sum_k A_{nk} S_k = A_n \cdot S, \quad (1)$$

其中,  $P_n$  为第  $n$  个探测器探测到的光功率,  $S_k$  为天线阵接收到的第  $k$  个平面波的功率,矩阵  $S$  表示 k 空间中射频信号的功率分布。  $A_n$  为第  $n$  个探测器分别对



应的权值矩阵,  $A_{nk}$  为第  $k$  个平面波对第  $n$  个探测器探测到的光功率的贡献。相位调制和不同长度光纤引入的色散对 RF 信号编码的同时, 为系统的设计提供了自由度。由于每个探测器处的测量提供了  $k$  空间体积的一个透视图, 组合  $n$  个透视图生成的断层扫描图像, 能够为 RF 场景提供更可靠的估计。为了进一步实现 RF 全息空间的快速重构, 可以采用压缩  $k$  空间层析、Kalman 滤波等方法实现加速建模。

#### 4.3.1 压缩 $k$ 空间层析

相比于传统的无线通信系统, 全息无线电的超大带宽全谱无线通信特性将带来更大的数据量。紧耦合连续孔径天线阵将使无线信道数据及相应的处理数据量成百上千倍的增加。利用稀疏采样和压缩感知的信号处理方法能够提取信号中固有的稀疏性, 以低于奈奎斯特速率的采样率实现对信号的低损耗高精度采样重构。由于 RF 信号的空间与谱分布在电磁环境中本质上是稀疏的, 因此, 可以利用压缩感知技术加速建模。压缩  $k$  空间层析技术, 即将压缩感知应用于  $k$  空间层析成像, 对于足够稀疏的 RF 场景, 可以在不丢失信息的情况下减少处理数据和处理时间。

压缩感知的测量过程用数学模型可以表示为  $y = \phi x = \phi W \theta$ , 其中  $x$  为长度为  $N$  的输入信号,  $y$  是维数为  $M \times 1$  的观测值结果,  $\phi$  是维数为  $M \times N$  ( $M \ll N$ ) 的观测矩阵,  $W$  是根据信号特征选取的维度为  $N \times M$  的不相干正交基,  $x$  可被  $W$  稀疏表示为  $x = W \times \theta$ , 其中  $\theta$  是维数为  $M \times 1$  的向量, 表示  $x$  在变换域  $W$  上的稀疏系数。如果  $\theta$  中至多有  $k$  个非零项, 则  $x$  可以被称为  $k$ -稀疏信号。当矩阵乘积  $\phi W$  满足约束等距性时, 观测结果中包含了足够的信息来恢复信号。稀疏信号的恢复过程可以通过求解一个凸优化问题完成。

对于  $k$  空间层析成像探测公式的矩阵形式  $P = AS$ ,  $P$  和  $A$  分别对应探测得到的光强度值和已知的探测器权值参数, 因此通过求解线性方程可以计算 RF 场景矢量  $S$ 。传统情况下, 大阶数权重矩阵  $A$  在公式反演时效率低下。为了解决这一问题, 可以结合压缩感知技术, 利用复振幅加权分布的稀疏性质来解决数据冗余的问题。在  $P = AS$  的左右两侧各乘上一个  $M \times N$  的测量矩阵  $\Phi$ , 则矩阵可表示为:

$$\Phi_{M \times N} P_{N \times 1} = \Phi_{M \times N} A_{N \times K} S_{K \times 1} \quad (2)$$

简化该公式, 则  $M < N$  的测量矩阵与权重矩阵及

光强度矢量  $P$  的乘积可简写为:

$$P_{C_{M \times 1}} = A_{C_{M \times K}} S_{K \times 1}, \quad (3)$$

式中,  $A$  和  $P$  中的像素矢量长度按压缩比  $M/N$  成比例地减小, 因此能够实现信号的压缩测量。为了满足压缩感知技术的有限等距条件, 即  $\Phi$  同  $A$  和  $P$  中干涉图编码的像素向量不相干, 测量矩阵  $\Phi$  需要采用伪随机矩阵。随后可以使用 Kaczmarz 方法求解此压缩线性矩阵方程, 以重建信号矢量  $S$ 。

#### 4.3.2 Kalman 滤波加速 Kaczmarz 算法收敛

$k$  空间层析成像系统常采用随机长度的光纤对信号进行随机时延, 并通过多个离散探测器构成的分布孔径相控阵进行空间相干变换, 以便同时检测信号的到达角和频率。然而, 随机的光纤长度会导致信号的空间相关性紊乱, 产生混乱的干涉图像, 因此, 如何从乱序的干涉图像中恢复 RF 信号是  $k$  空间层析成像需要解决的关键难题。Kaczmarz 方法是一种可适用于  $k$  空间层析系统的优化算法, 通过算法的层层迭代, 能够从干涉图中恢复 RF 场景的空间谱。为了加速 Kaczmarz 方法的收敛, 需要正确选择初始的输入信号, 因此需要对  $k$  空间中 RF 源进行动态精确建模。

首先, 在笛卡尔 2D 坐标系中将 RF 源建模为:

$$x(t) = x_0 + vt + \frac{1}{2}at^2, \quad (4)$$

$$y(t) = y_0. \quad (5)$$

式(4)~式(5)假设 RF 源在  $x$  方向上具有恒定的加速度, 即与孔径平面相切, 并在  $y$  方向上保持恒定的位置, 即垂直于孔径平面。由于  $k$  空间成像关注信号的到达角与频率, 可将上述公式转化为极坐标形式。同时假定源在远场处, 忽略径向分量的变化, 且角度的变化与  $x$  分量中的速度和加速度成比例, 即

$$v_\varphi \approx (v + at) \cos \varphi, \quad (6)$$

$$a_\varphi \approx -a \sin \varphi, \quad (7)$$

式中,  $v_\varphi$  和  $a_\varphi$  分别为方位角速度和加速度。由于源可任意改变发射频率, 因此在建立动态模型中可仅预测空间坐标下的到达角。在 Kaczmarz 算法收敛中引入初始输入的影响时发现, 在使用  $k$  空间中的单个静态源进行模拟时, 正确的源位置作为初始输入会导致 Kaczmarz 算法瞬时收敛, 收敛时间会降低到单个源场景标准处理时间的 3% 左右, 并从 30 次迭代次数减少到单次迭代。因此, 初始输入能够一定程度上改进收敛速率, 但是多种因素会对这种方法的有效性产生影响。首先是初始输入中 RF

源的空间和频谱精度,初始输入需要包含重建源的精确位置、角度和频率分辨率。如果初始输入源的位置不在此分辨率范围内,则算法的收敛速度将受到限制。其次是 RF 场景的复杂性,与单个固定源相比,复杂的场景需要更多的迭代才能收敛。据观察,加速重建对初始输入的最低要求是正确预测场景中至少 40% 的源。为了改进算法的收敛性,可以将 Kalman 滤波器与 Kaczmarz 算法结合,预测静态和动态空间环境的状态空间。

Kalman 滤波器能够通过精确的动态系统和噪声模型估计移动系统的未来位置,并且找到 Kaczmarz 方法的最佳初始输入,常用于雷达目标追踪、动态定位、导航系统等。其数学基础概述为:

$$\mathbf{X}_{K+1} = \Phi \mathbf{X}_K + \mathbf{W}_K, \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{X}_{K+1}$  为状态向量,包括源的位置、速度等有关源的动态信息,  $\Phi$  为状态转移矩阵,在时间为  $K+1$  时能够将信号的方位向加速度与角速度等状态参数结果应用于系统状态。  $\mathbf{W}_K$  为过程噪声矢量,假定其具有协方差为  $Q$  的零均值正态分布。对状态向量  $\mathbf{X}_K$  的测量过程可以表示为:

$$\mathbf{Z}_K = \mathbf{H} \mathbf{X}_K + \mathbf{V}_K, \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{H}$  为观测矩阵,  $\mathbf{V}_K$  为包含测量噪声的矢量。假设  $\mathbf{V}_K$  为协方差为  $R$  的零均值高斯白噪声。利用上述方程可以得到 Kalman 滤波器的预测阶段:

$$\hat{\mathbf{X}}_{K+1}^- = \Phi \hat{\mathbf{X}}_K, \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{K+1}^- = \Phi \mathbf{P}_K \Phi^T + Q. \quad (11)$$

式(10)为先验状态估计,是时间  $K+1$  之前状态的最佳估计,用于制定系统的初始输入。式(11)中的  $\mathbf{P}$  为相关误差协方差矩阵。这些关系为重建过程中的初始输入奠定了基础。Kalman 滤波器的测量更新阶段定义如下:

$$\mathbf{K}_{K+1} = \mathbf{P}_{K+1}^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{K+1}^- \mathbf{H}^T + R)^{-1}, \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{K+1} = \hat{\mathbf{X}}_{K+1}^- + \mathbf{K}_{K+1} (\mathbf{Z}_{K+1} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{K+1}^-), \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{K+1} = \mathbf{P}_{K+1}^- - \mathbf{K}_{K+1} \mathbf{H} \mathbf{P}_{K+1}^-. \quad (14)$$

首先计算 Kalman 增益  $\mathbf{K}$ , 然后将其应用于先验状态和协方差估计能够获得更优化的估计,即后验估计  $\hat{\mathbf{X}}_{K+1}$ 。

从上述表达式可以看出,通过精确的 RF 源动态建模, Kalman 滤波器能够预测估计系统的未来状态。将对 RF 源运动的预测作为 Kaczmarz 算法的初始输入,则能够加速  $k$  空间层析图像重建的收敛过程。研究表明,当应用于有 4 个射频源的场景时,采用该方法对  $k$  空间层析算法进行加速,可以使得重

建场景的计算时间减少 90%。

#### 4.4 面向智能全息无线电的空间波场合成技术和算法

空间波场合成,是在根据空间 RF 频谱全息建立的三维射频全息空间以及空时预编码的基础上,对电磁波场在目标空间分布的进一步精确描述。应用 Fresnel-Kirchoff 积分描述  $k$  空间层析成像系统中 RF 波场的空间相关传输模型。Fresnel-Kirchoff 积分定义了入射波  $U$  在半径为  $R$  的球面空间  $P'$  点的复标量波扰动  $U'$ , 可以表示成:

$$U'(P') = - (i/2\lambda) \left[ \exp(ikR)/R \iint_A U(Q) [\exp(iks)/s] \times (1 + \cos\alpha) dA \right], \quad (15)$$

式中,  $Q$  是参考平面上的任意一点,  $s$  是  $Q$  到  $P'$  的距离,球面上的晶格可以近似用矩形晶格表示。通过离散化与傅里叶变换处理,可以计算出扰动  $U'$ 。然而,离散化与晶格近似的过程中会引入误差。采用基于光纤的空间波场合成技术,假设探测目标由  $L$  个点源构成,在三维空间的坐标为  $(x_l, y_l, z_l)$ , 并且发射频率为  $f_l = c/\lambda_l$ , 其中  $c$  是光速,  $\lambda_l$  为点源的波长。若点源幅度为  $S_l$ , 则目标可以表示为:

$$O_{\text{RF}}(x; y; z; t) = \sum_{l=1}^L S_l \delta(x - x_l, y - y_l, z - z_l) \exp(j2\pi f_l t). \quad (16)$$

假设目标的点源分布满足近轴条件(傍轴光线与光轴之间形成的入射角为  $\theta$ ,  $\theta \approx 0^\circ$ ,  $\sin\theta \approx \theta$ ,  $\cos\theta \approx 1$ ), 用  $M$  个离散分布的光圈探测到的  $(u, v)$  目标可以表示为:

$$\tilde{O}_{\text{in}}(x; y; u; v; t) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M S_l \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda_l z_l} (x_l u_m + y_l v_m) \right] \cdot \delta(u - u_m, v - v_m) \exp(j2\pi f_l t). \quad (17)$$

式(17)忽略了路径损耗,因为不影响各个点源的相对幅度大小。由 RF 全息空间重构理论可知,任意两根天线之间进行复相关得到的可视度函数与视场的亮温形成了一对傅里叶变换。经过上变频光电调制后的光信号沿光纤传输引入时延,傅里叶变换后表示形式如下:

$$I_d(x; y; t) = \sum_{l=1}^L S_l \exp \left[ j2\pi \left( v_l - \frac{d_0}{\lambda_l} \right) \right] \cdot \sum_{m=1}^M \exp(j\theta_m) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda_l z_l} \left[ (x - x_l) u_m + (y - y_l) v_m + z_l \Delta d_m \right] \right\}, \quad (18)$$

式中,  $\Delta d = d_m - d_0$ , 其中  $d_0$  是最短光纤长度。

当采用  $N$  个离散探测器构成的阵列对波场进行采样时,每个探测器输出的电信号与在探测器所在位置测量的场辐照度成正比,可以表示为:

$$P(x_n, y_n) = \sum_{l=1}^L |S_l|^2 \cdot \left| \sum_{m=1}^M \exp[j\theta_m] \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda z_l} \begin{bmatrix} (x-x_l)u_m + \\ (y-y_l)v_m + \\ z_l \Delta d_m \end{bmatrix} \right\} \right|^2 = \sum_{l=1}^L a_{nl} |S_l|^2. \quad (19)$$

而基于光纤搭建的系统模型中,采用 k-sapce 层析技术的角分辨率为:

$$\theta = \frac{\lambda}{D}, \quad (20)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $D$  为数值孔径的尺寸。当数值孔径为 60 cm, 频率为 26~40 GHz, 则角分辨率的程度约为  $0.71^\circ \sim 1.10^\circ$ 。系统的频率分辨率与光纤的长度相关, 可以表示为:

$$f = \frac{c}{n(l_{\max} - l_{\min})}. \quad (21)$$

当光纤长度的最大差值达到 40 cm 时, 系统的频率分辨率能够达到 500 MHz。

## 5 结束语

本文阐述了面向 6G 的智能全息无线电技术, 重点介绍了该技术的基本原理、通信系统架构及涉及的关键技术。智能全息无线电技术通过射频空间全息和全息空间波场合成技术实现超高分辨率空间复用, 可满足超高频谱效率、超高数据密度和超高容量需求。由于智能全息无线电技术具有超高分辨率的空间和频谱复用能力, 其应用场景包括超高容量和超低时延无线接入、智能工厂环境下超高流量密度无线工业总线、海量物联网设备的高精度定位和精准无线供电以及数据传输等。此外, 通过成像、感知和无线通信的融合, 全息无线电技术可精确感知复杂电磁环境, 支撑未来电磁空间的智能化。

### 参考文献

- [1] LIU G, HUANG Y, LI N, et al. Vision, Requirements and Network Architecture of 6G Mobile Network beyond 2030 [J]. China Communications, 2020, 17(9): 90-104.
- [2] LEE Y L, QIN D, WANG L C, et al. 6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2020, 2: 54-66.
- [3] YOU X, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G Wireless Communication Networks: Vision, Enabling Technologies, and New Paradigm Shifts[J]. Science China Information Sciences, 2021, 64(1): 1-74.
- [4] YUAN Y, ZHAO Y, ZONG B, et al. Potential Key Technologies for 6G Mobile Communications [J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(8): 213-231.
- [5] BAJPAI A, BALODI A. Role of 6G Networks: Use Cases and Research Directions [C] // 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC). Vijayapur: IEEE, 2020: 1-5.
- [6] ZONG B, ZHANG X, LI X, et al. Photonics Defined Radio-A New Paradigm for Future Mobile Communication of B5G/6G [C] // The 6th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. Funchal: Photonics, 2018: 155-159.
- [7] ZONG B, FAN C, WANG X, et al. 6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 18-27.
- [8] BJÖRNSON E. The Role of Academia in Beyond-5G Wireless Research [J/OL]. IEEE CTN, 2020. [2021-09-22]. <https://www.comsoc.org/publications/ctn/role-academia-beyond-5g-wireless-research>.
- [9] ZONG B, DUAN X, FAN C, et al. 6G Technologies-Opportunities and Challenges [C] // 2020 IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications (ICTA). Nanjing: IEEE, 2020: 171-173.
- [10] ZHAO Y, ZHAI W, ZHAO J, et al. A Comprehensive Survey of 6G Wireless Communications [J/OL]. arXiv: 2101.03889, 2020. [2021-09-22]. <https://arxiv.org/abs/2101.03889>.
- [11] BHAT J R, ALQAHTANI S A. 6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective [J]. IEEE Access, 2021, 9: 43134-43167.
- [12] DE ALWIS C, KALLA A, PHAM Q V, et al. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2: 836-886.
- [13] RAJATHEVA N, ATZENI I, BICAIS S, et al. Scoring the Terabit/s Goal: Broadband Connectivity in 6G [J/OL]. arXiv: 2008.07220, 2020. [2021-09-22]. <https://arxiv.org/abs/2008.07220v1>.
- [14] ZHAO Y, WANG D, HU J, et al. H-AP Deployment for Joint Wireless Information and Energy Transfer in Smart Cities [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 5888-5900.

- 2018, 67(8):7485-7496.
- [15] KULKARNI V G, PUNTAMBEKAR P N. Holographic Multiplexing Using Multiple Reference Beams [J]. *Optica Acta; International Journal of Optics*, 1981, 28(12): 1611-1617.
- [16] KITAYOSHI H. Holographic Radio Imaging for EMC [C]// *Conference Proceedings. 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No. 94CH3424-9)*. Hamamatsu: IEEE, 1994: 17-20.
- [17] SALO J, MELTAUS J, NOPONEN E, et al. Holograms for Shaping Radio-wave Fields [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(5): S161-S167.
- [18] ANDERSEN G P. Holographic Sparse-aperture Telescopes for Space [C]// *Optical, Infrared, and Millimeter Space Telescopes*. Glasgow: International Society for Optics and Photonics, 2004, 5487: 1129-1136.
- [19] HOLL P M, REINHARD F. Holography of Wi-Fi Radiation [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(18): 183901.
- [20] XU B, QI W, ZHAO Y, et al. Holographic Radio Interferometry for Target Tracking in Dense Multipath Indoor Environments [C]// *2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Nanjing: IEEE, 2017: 1-6.
- [21] KUZ'KIN V M, BADIYEV M, PERESELKOV S A, et al. Using Holographic Interferometry to Transmit Information through a Perturbed Ocean Environment [J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, 85(2): 201-205.
- [22] ROSEN L, GAZDZINSKI R F. Holographic Communications Using Multiple Code Stages [J/OL]. [2021-08-21]. <https://www.freepatentsonline.com/20050084031.pdf>.
- [23] PRATHER D W. Toward Holographic RF Systems for Wireless Communications and Networks [J]. *IEEE ComSoc Technology News*, 2016.
- [24] PIZZO A, MARZETTA T L, SANGUINETTI L. Spatial Characterization of Holographic MIMO Channels [J/OL]. <https://arxiv.org/abs/1911.04853>, 2019.
- [25] CHIBIAO D, XIAOLAN Q I U, YIRONG W U. Concept, System, and Method of Holographic Synthetic Aperture Radar [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 399-408.
- [26] KHODAEI A, DEOGUN J. Optical MIMO Communication Using Holographic Spectral Multiplexing of Pulsed Ultrashort Laser [J/OL]. arXiv: 2106.13986. [2021-06-25]. <https://arxiv.org/abs/2106.13986>.
- [27] SANGUINETTI L, D'AMICO A A, DEBBAH M. Wavenumber-Division Multiplexing in Line-of-Sight Holographic MIMO Communications [J/OL]. arXiv: 2106.12531. [2021-06-21]. <https://arxiv.org/abs/2106.12531>.
- [28] LIAO P Y, CHEN Z F, MARINOVA V, et al. Space Division Multiplexing of Communication Channels in a Multimode Fiber Using Holographic Correlator Method [C]// *Holography: Advances and Modern Trends VII*. Prague: International Society for Optics and Photonics, 2021, 8776: 11774-27.
- [29] SUN P C, MAZURENKO Y T, CHANG W S C, et al. All-optical Parallel-to-serial Conversion by Holographic Spatial-to-temporal Frequency Encoding [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1728-1730.
- [30] SEFLER G A, MA J, CHANG T Y, et al. Holographic Multichannel Radio-frequency Correlator [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 260-266.
- [31] TAKASAGO K, TAKEKAWA M, SHIRAKAWA A, et al. Spatial-phase Code-division Multiple-access System with Multiplexed Fourier Holography Switching for Reconfigurable Optical Interconnection [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(14): 2278-2286.
- [32] SCHLOTTAU F, WAGNER K H, BREGMAN J, et al. Sparse Antenna Array Multiple Beamforming and Spectral Analysis Using Spatial-spectral Holography [C]// *MWP 2003 Proceedings. International Topical Meeting on Microwave Photonics*. Budapest: IEEE, 2003: 355-358.
- [33] SCHLOTTAU F, WAGNER K H. Demonstration of a Continuous Scanner and Time-integrating Correlator Using Spatial-spectral Holography [J]. *Journal of Luminescence*, 2004, 107(1-4): 90-102.
- [34] MOHAN R K, CHANG T, TIAN M, et al. Ultra-wideband Spectral Analysis Using S2 Technology [J]. *Journal of Luminescence*, 2007, 127(1): 116-128.
- [35] BABBITT W R, NEIFELD M A, MERKEL K D. Broadband Analog to Digital Conversion with Spatial-spectral Holography [J]. *Journal of Luminescence*, 2007, 127(1): 152-157.
- [36] SULLIVAN I S, MORALES M F, HAZELTON B J, et al. Fast Holographic Deconvolution: A New Technique for Precision Radio Interferometry [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 759(1): 17.1-17.6.
- [37] BACOT V, LABOUSSE M, EDDI A, et al. Time Reversal and Holography with Spacetime Transformations [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(10): 972-977.
- [38] MURAKOWSKI J, SCHNEIDER G J, SHI S, et al. Photonic Probing of Radio Waves for  $k$ -space Tomography [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15746-15759.
- [39] MURAKOWSKI J, SCHNEIDER G, SHI S, et al. RF  $k$ -space Tomography [C]// *Computational Optical Sensing and Imaging*. San Francisco: Optical Society of America,

- 2017;CW3B.5.
- [40] ROSS D D, MURAKOWSKI J, SCHNEIDER G J, et al. RF Imaging Receiver Based on  $k$ -space Tomography [ C ] // 2017 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference ( AVFOP ). New Orleans; IEEE, 2017: 9–10.
- [41] PRATHER D W, MURAKOWSKI J, SCHNEIDER G J, et al.  $k$ -Space Tomography for Spatial-Spectral Monitoring in Cellular Networks [ C ] // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium ( IMS ). Honolulu; IEEE, 2017: 1162–1164.
- [42] BARBER Z W, HARRINGTON C, RUPAVATHARAM K, et al. Spatial-Spectral Materials for High Performance Optical Processing [ C ] // 2017 IEEE International Conference on Rebooting Computing ( ICRC ). Washington; IEEE, 2017: 1–4.
- [43] RYAN C J, ROSS D D, MURAKOWSKI J, et al.  $k$ -Space Tomography for Spatial-Spectral Mapping [ C ] // 2018 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference ( RAPID ). Miramar Beach; IEEE, 2018: 1–4.
- [44] FALLDORF C, BERGMANN R B. Holographic Wave Field Synthesis Using Refractive Elements [ C ] // 2018 17th Workshop on Information Optics ( WIO ). Quebec; IEEE, 2018: 1–4.
- [45] PIZZO A, MARZETTA T L, SANGUINETTI L. Degrees of Freedom of Holographic MIMO Channels [ C ] // 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications ( SPAWC ). Atlanta; IEEE, 2020: 1–5.
- [46] KARIMIPOUR M, KOMJANI N, ARYANIAN I. Shaping Electromagnetic Waves with Flexible and Continuous Control of the Beam Directions Using Holography and Convolution Theorem [ J ]. Scientific Reports, 2019, 9 ( 1 ) : 11825.
- [47] XU H, WANG D, ZHAO R, et al. FaHo: Deep Learning Enhanced Holographic Localization for RFID Tags [ C ] // the 17th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York; Association for Computing Machinery, 2019: 351–363.
- [48] BABBITT W R. Microwave Photonic Processing with Spatial-spectral Holographic Materials [ C ] // Optical, Opto-Atomic, and Entanglement-Enhanced Precision Metrology II. San Francisco; International Society for Optics and Photonics, 2020, 11296: 112963L.
- [49] COMORETTO G, MONARI J, BELLI C, et al. The Signal Processing Chain of the Low Frequency Aperture Array [ C ] // Ground-based and Airborne Telescopes VIII. (online) International Society for Optics and Photonics, 2020, 11445: 1144571.
- [50] MERKEL K D, COLE Z, MOHAN R K, et al. Demonstration of the Spatial-Spectral Coherent Holographic Integrating Processor ( S2-CHIP ) for Analog RF Signal Processing Applications [ J/OL ]. <https://static1.squarespace.com/static/55818d1fe4b03e6b0a2683ba/t/5592d384e4b08b3bd0fbbe8c/1435685764936/p11.pdf>.
- [51] DELFYETT P J. Signal Processing Using Spectrally Phase Encoded Optical Frequency Combs; U. S. Patent 8, 805, 197 [ P ]. 2014–8–12.
- [52] CAO S, ZHENG Y F, EWING R L. From Phased Array to Holographic Radar [ C ] // 2015 National Aerospace and Electronics Conference ( NAECON ). Dayton; IEEE, 2015: 207–212.
- [53] CAPINERI L, BECHTEL T, FALORNI P, et al. Prototype UWB Radar Object Scanner and Holographic Signal Processing [ M ] // MATTESI M D. Advanced Ultrawideband Radar. Boca Raton; CRC Press, 2017.
- [54] MELO S, FALCONI F, SCOTTI F, et al. A Combined Radar & Lidar System Based on Integrated Photonics in Silicon-on-Insulator [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39 ( 1 ) : 17–23.
- [55] MAZUR M, SUH M G, FULOP A, et al. High Spectral Efficiency Coherent Superchannel Transmission with Soliton Microcombs [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39 ( 13 ) : 4367–4373.
- [56] PAN S, ZHANG Y. Microwave Photonic Radars [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38 ( 19 ) : 5450–5484.
- [57] ZHU D, PAN S. Broadband Cognitive Radio Enabled by Photonics [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38 ( 12 ) : 3076–3088.
- [58] PAN S, YE X, ZHANG Y, et al. Microwave Photonic Array Radars [ J ]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1 ( 1 ) : 176–190.
- [59] EBADI S, DRISCOLL T, SMITH D. Visual Illustrations of Microwave Holographic Beamforming Using a Modulated Surface-impedance Metamaterial [ C ] // 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium ( APSURSI ). Orlando; IEEE, 2013: 2343–2344.
- [60] HUANG L, MÜHLENBERND H, LI X, et al. Broadband Hybrid Holographic Multiplexing with Geometric Metasurfaces [ J ]. Advanced Materials, 2015, 27 ( 41 ) : 6444–6449.
- [61] GREGOIRE D J, PATEL A, QUARFOTH R. A Design for an Electronically-steerable Holographic Antenna with Polarization Control [ C ] // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI

- National Radio Science Meeting. Vancouver: IEEE, 2015: 2203-2204.
- [62] SMITH D R. Holographic Metasurface Systems for Beamforming and Imaging (Conference Presentation) [C] // Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2016. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2016, 9918: 99181L.
- [63] LI L, CUI T J, JI W, et al. Electromagnetic Reprogrammable Coding-metasurface Holograms [J]. Nature communications, 2017, 8(1): 1-7.
- [64] BLACK E J, DEUTSCH B M, KATKO A R, et al. Massively Multi-user MIMO Using Space Time Holography: U.S. Patent 10,447,392 [P]. 2019-10-15.
- [65] LIN Z, HUANG L, XU Z T, et al. Four-Wave Mixing Holographic Multiplexing Based on Nonlinear Metasurfaces [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(21): 1900782.
- [66] BURCH J, MA J, HUNTER R I, et al. Flexible Patches for mm-Wave Holography [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(2): 021104.
- [67] HUANG C, HU S, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends [J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 118-125.
- [68] CHEN T, LI J, CAI T, et al. Design of a Reconfigurable Broadband Greyscale Multiplexed Metasurface Hologram [J]. Applied Optics, 2020, 59(12): 3660-3665.
- [69] SHANG G, WANG Z, LI H, et al. Metasurface Holography in the Microwave Regime [J]. Photonics, 2021, 8(5): 135.
- [70] KONKOL M R, ROSS D D, SHI S, et al. High-power Photodiode-integrated-connected Array Antenna [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 2010-2016.
- [71] MURATA H, KOHMU N, WIJAYANTO Y N, et al. Integration of Patch Antenna on Optical Modulators [J]. IEEE Photonic Society Newsletter, 2014, 28(2): 4-7.
- [72] DARDARI D, DECARLI N. Holographic Communication Using Intelligent Surfaces [J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(6): 35-41.
- [73] TANG Z, ZHANG F, PAN S. 60-GHz RoF System for Dispersion-free Transmission of HD and Multi-band 16QAM [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(14): 1305-1308.

作者简介:



**潘时龙** 南京航空航天大学电子信息工程学院常务副院长, 教授, 博士生导师, 美国光学学会会士 (OSA Fellow)、国际光学工程学会会士 (SPIE Fellow)。主要研究方向: 微波光子学基础理论及应用。荣获江苏省

科学技术奖一等奖、中国专利奖优秀奖、中国青年科技奖等。



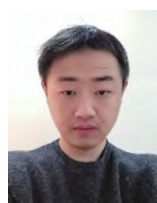
**宗柏青** 教授级高工。主要研究方向: 6G 与先进光子系统。



**唐震宙** 副研究员。主要研究方向: 微波光子通信。



**吕凯林** 硕士。主要研究方向: 微波光子技术相关方面的预研。



**范忱** 博士。主要研究方向: 微波光子技术以及 6G 技术开发和探索。



**官科** 教授。主要研究方向: 电波传播与无线信道测量、仿真与建模。



**谷一英** 教授。主要研究方向: 微波光子学。



**李杏** 博士, 副研究员。主要研究方向: 超快激光基础及微波光子应用。



**张俊文** 博士,研究员。主要研究方向:高速光传输、光无线融合和光接入网。



**赵家宁** 博士研究生。主要研究方向:微波光子信号处理、计算光学成像。



**于振明** 副教授。主要研究方向:宽带融合通信、高速光通信、通信感知融合。



**朱啸龙** 学士。主要研究方向:全息无线电。



**李晓洲** 副教授。主要研究方向:超快光信息处理、微波光子学。



**杨悦** 博士研究生。主要研究方向:微波光子成像雷达、微波光子宽带阵列。



**武震林** 副教授。主要研究方向:集成光子学。