



## 动态可重构智能微波光波融合系统<sup>\*</sup>

纪越峰, 徐 坤, 田慧平, 戴一堂, 王瑞鑫, 申冠生

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室 北京 100876)

**摘 要:** 微波光子技术充分利用光子学低损传输、宽带处理与分布接入的优势来满足宽带微波信号的产生、传输、处理、控制和组网等需求。重点分析了动态可重构微波光波融合系统面临的技术挑战, 通过融合特有的无线蜂窝系统和光纤接入系统, 给出了微波光子传输链路、信号处理、系统建模与构建等方面的研究思路与分析方法, 报道了动态可重构微波光波融合系统的实验研究与分析结果, 展望了未来研究与应用的发展方向。

**关键词:** 微波光子学; 宽带; 动态可重构; 光纤无线融合

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.008

## Dynamic Reconfigurable Intelligent Microwave Photonics Network

Ji Yuefeng, Xu Kun, Tian Huiping, Dai Yitang, Wang Ruixin, Shen Guansheng

(The State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Microwave photonics (MWP) uses the strength of photonic techniques to generate, transfer, process, control and networking for broadband microwave signals. Some notable challenges were analyzed to apply dynamic reconfigurable intelligent microwave photonics network. By integrating specific wireless cellular system with fiber access network, some key technologies such as link transfer, signal processing, system modeling and design, etc were discussed. And some experimental research works of the proposed network were reported, then the experiment results were analyzed. In the end, the future application directions in dynamic reconfigurable intelligent microwave photonics network were pointed out.

**Key words:** microwave photonics, broadband, dynamic reconfigurable, optical wireless convergence

### 1 引言

随着各种新业务、新终端和新需求的不断涌现(如移动高速下载、移动流媒体、无压缩高清视频、数字医疗、射频标识、传感、M2M、虚拟现实等), 信息交互方式日新月异, 宽带信息量增长迅猛, 要求网络能够在任意时刻、任意地点提供任意业务的宽带信息接入服务。因此, 人与物乃至物与物之间随时随地沟通的全新网络环境——宽带泛

在网正在变为现实, 并逐步走进人们的生活。微波光子技术充分利用光子学低损传输、宽带处理与分布接入的优势来满足宽带微波信号的产生、传输、处理、控制和组网等需求, 以此为基础的微波光波融合系统充分发挥了无线灵活接入和光纤宽带传输的各自优势, 可以实现单纯无线技术和光纤技术难以完成甚至无法完成的信息处理与传输组网等功能, 是未来接入网络的重要发展趋势与有效解决途径。

如图 1 所示的智能微波光波融合系统基本结构包括

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No. 2012CB315700)

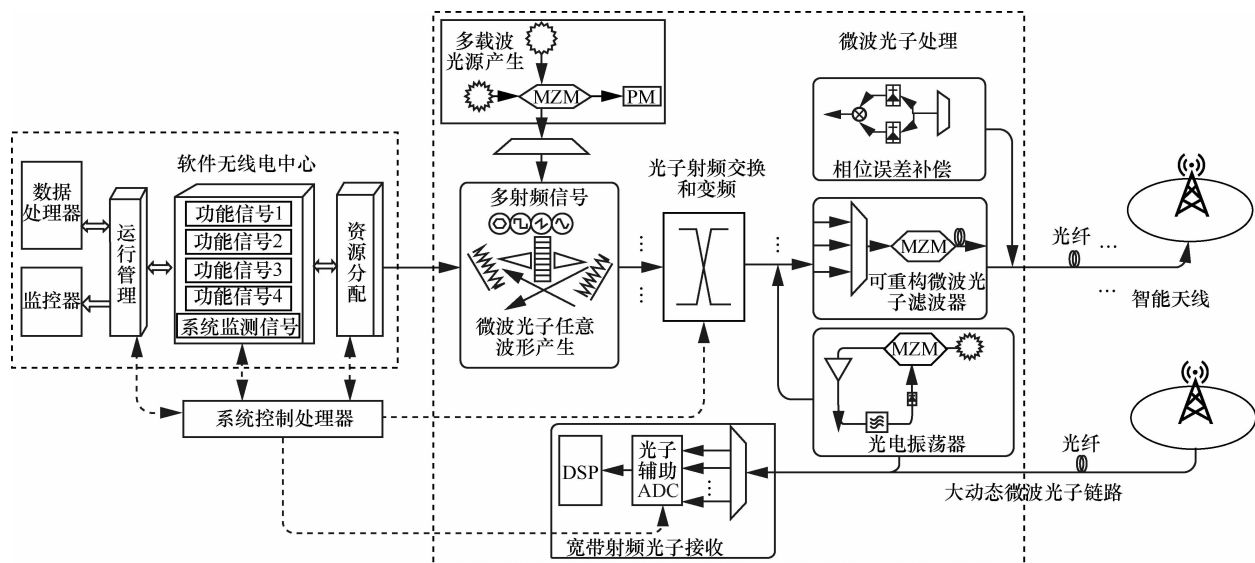


图1 微波光波融合系统概要

软件无线电中心、微波光子处理中心和远端单元。其中,信息源的管理和资源分配在软件无线电控制中心实现;海量信息的分布和感知由微波光子处理系统实现;宽带信息的采集与分发由远端天线单元实现。近年来,基于微波光子技术的微波光波融合系统的性能已有很大的提高,并且逐步在高速宽带的无线接入、卫星通信、电子防务、深空探测等系统中开展应用,展现出巨大的应用前景。但是仍然面临许多挑战,如:微波光波的高线性转换与幅相控制、光域微波信号的高精细处理以及微波光波融合网络的组织行为、资源利用与性能优化等。

通过对国内外研究现状和发展趋势的分析<sup>[1-7]</sup>,可以看出,国内外微波光子系统的研究已经有了一定的成果,但在解决动态可重构的智能微波光波融合系统的基础理论以及光波微波融合技术应用方面尚未实现系统性突破。我国的国家重点基础研究发展计划(以下简称“973”计划)适

时启动了相关研究工作,本项目即按照“973”计划的定位与目标,针对动态可重构微波光波融合系统面临的挑战,重点开展了微波光子传输链路、信号处理、系统建模与构建等方面的研究,所取得的相关研究进展介绍如下。

## 2 微波光子的高性能传输链路

实现承载微波信号的大动态、超宽带、稳相光传输是实现微波光波融合系统的关键技术之一。

### 2.1 大动态微波光子链路技术

通过探索电域与光域、模拟与数字传输和处理的各自内在规律与联系,建立了微波光子链路对多频段多制式无线信号的非线性行为模型,分别提出了基于光域相位操控的线性化、基于记忆多项式的低复杂度多频带数字预失真以及基于相位调制相干检测的数字后补偿等大动态微波光子链路中的非线性抑制技术。

## 首席科学家

**纪越峰** 男,博士,北京邮电大学教授、博士生导师,信息光子学与光通信研究院执行院长,国家重点实验室常务副主任。国家杰出青年科学基金获得者,国家级教学名师,新世纪百千万人才工程国家级人选,国务院学位委员会学科评议组成员,“十二五”国家宽带网重点专项专家组专家,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)首席专家,国家自然科学基金重点项目负责人,国家级教学团队带头人。主要研究方向为光通信与宽带网络,先后获得两项国家技术发明奖、一项国家科学技术进步奖和两项国家级教学成果奖。

在基于光域相位操控的线性化技术<sup>[8]</sup>中,在光域中分析非线性交调失真产生的来源,针对其幅度和相位特性,创新提出一种基于光域载波处理抑制非线性交调的技术,克服以往非线性抑制技术中需要以提高系统复杂度为代价、构造与链路中等量非线性杂波的缺点,系统结构简单、易于实现。与未经光域载波处理的系统相比,三阶交调失真抑制达到 25 dB。

在基于记忆多项式的低复杂度多频带数字预失真技术<sup>[9]</sup>中,数字信号处理的带宽只取决于单个信道基带信号的带宽,而不是整个副载波复用信号的带宽,因此处理带宽和计算量相比传统数字预失真技术可以大大降低。基于记忆多项式模型和间接学习方法的多维非线性补偿机制,能针对多频带多制式链路同时补偿频带内交调失真和频带间交调失真,相比传统单路预失真方法性能大幅增强,在保证信号质量的前提下,将双频段无线信号在微波光子链路上传送功率提升超过一倍,大幅提高了整体链路的功率效率。

在基于相位调制相干检测的数字后补偿技术<sup>[10]</sup>中,补偿了相位接收机的非理想特征(IQ不平衡问题),并解决了输入信号大于半波电压时的“相位混淆”现象,从而大幅度提高链路的动态范围。通过提出的 DSP 技术,输出信号的三阶交调失真抑制比保持在 30 dB 以上,从而实现了无杂散动态范围大于 128.8 dB·Hz<sup>23</sup>的大动态微波光传输。

此外,基于调制器与电放大器非线性失真相互作用研究,项目组提出了基于后向数字失真信息提取的多源非线性共同抑制技术,实现了微波光子系统增益、噪声系数和动态范围多指标的共同提升。在充分利用微波放大器优势的同时,有效抑制由调制器固有非线性传递函数及放大器引入的多源非线性失真,消除微波器件对动态范围带来的限制。

## 2.2 光纤中相位稳定的射频频率传输技术

为了实现射频信号传输中的相位稳定,提出利用不同波长的光载波在光纤中传输经历不同色散时延的方法来补偿光纤链路的时延抖动,实现微波相位的高稳时控制<sup>[11]</sup>。系统方案如图 2 所示,其中光纤既是传输介质,也是补偿器件,并可获得与光纤长度成正比的大动态补偿范围。由于系统补偿的是时延而不只是频率信号的相位,所以系统具有宽带特性,可实现时频同步中大动态补偿范围和宽带传输的统一。

实验中,2.42 GHz 射频信号传递 54 km 后,在不补偿链路抖动的情况下,时延抖动达到 502.3 ps,补偿后时延抖动仅为 0.854 ps。该方案不需要额外的时延或相位校正器件,具有误差时延补偿范围大、射频工作带宽宽等特点。

基于上述系统,本项目组与北京航天飞行控制中心合作,成功地将宽带、多频率稳相传输链路应用于嫦娥三号卫星月球射电观测系统。

## 3 多频段、超宽带微波信号的光域精细处理

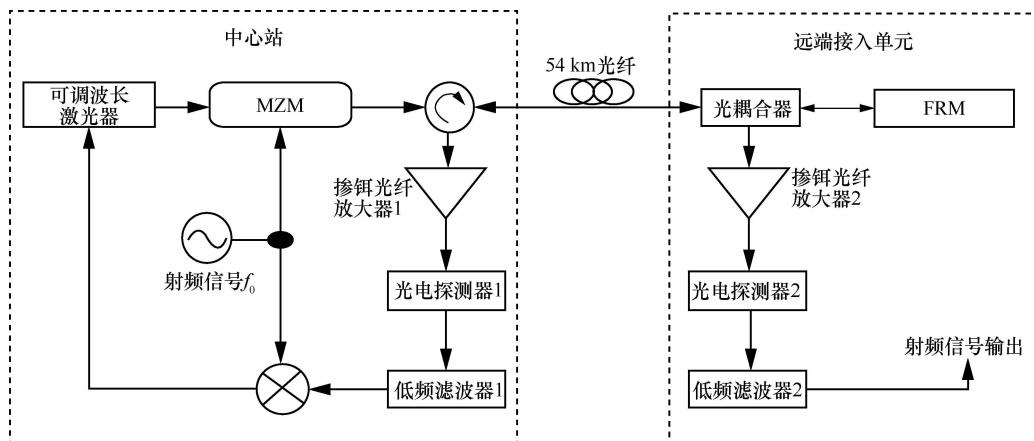
光波频率比微波频率高 3~5 个数量级,通过微波光子技术,电域上“超宽带微波信号处理”将变为“光域上的窄带模拟信号处理”。将信号从电域(宽带)转化和映射到光域(窄带),并进行多频段或超宽带精细处理面临新的挑战。项目组充分利用微波光子技术瞬时宽带处理能力、损耗小和抗电磁干扰等优点,实现了相干信道化多频点测量以及基于光子压缩采样的瞬时多频点频谱感知与分析,给微波信号的频谱分析与感知开辟了新的研究思路。

### 3.1 高精度宽带射频光子信道化系统技术

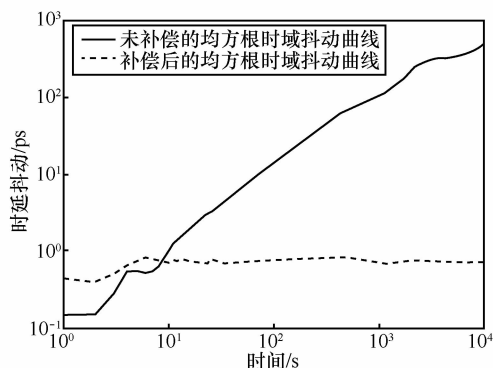
项目组采用一种新型光源——光频率梳,实现超宽带

## 项目简介

随着人一机一物交互与日俱增,各种各样的大流量数据与新型业务无处不在,既宽带又泛在的信息接入已成为面向未来信息社会的国家重大需求,但仅靠目前单一的技术手段难以满足这一需求。基于微波光子学这一交叉学科的相关理论与技术,融合了无线通信和光纤通信的各自技术优势,可完成单一系统中复杂甚至无法完成的功能,从而成为有效的解决途径。为此科技部及时启动了国家重点基础研究发展计划(“973”计划)“面向宽带泛在接入的微波光子器件与集成系统基础研究”项目(2012-2016)。



(a) 射频频率标准传输系统方案



(b) 补偿和不补偿时远端信号的时延抖动

图2 系统方案

射频信道化处理 and 接收。与传统思路不同,利用高相干性的双光频梳融合光子和电子带宽,实现了无缝信道化分解超宽带、并行相干接收以及高精度窄带数字化感知的统一<sup>[12]</sup>。

基于上述方法,项目组将多频点测量精度从 GHz 提高到小于 125 kHz,成功解决了在光域实现精细滤波和精确频率准直这两个长久存在的难题,实现了宽且粗粒的光子带宽和窄且精细的电子带宽之间的调控与高效互联。原理

方案如图3所示(其中PBS表示偏振控制器,BPD指均衡光电探测器),首先通过马赫-曾德尔调制器(MZM)对种子光源进行调制产生两个一阶边带,随后可编程光逻辑器分别滤出两个边带,作为产生两个光频梳的相干种子光。其中上路产生的光频梳作为本振光,下路产生的光频梳作为信号光,通过MZM将待测的射频信号加载到信号光频梳上,实现待测射频信号的多路广播。最后通过解复用器将上下两路光频梳相对应的信道滤出来,从而在光域上实现

## 项目简介

项目的总体目标是:面向宽带泛在信息接入的国家重大需求,以科学目标为导向,以微波光子学为基础,在针对“宽带泛在接入”的新型微波光子器件与集成系统的机制、机理、方法、设计与研制等方面取得创新理论成果和关键技术突破,揭示微波和光波高效线性转换与高性能集成器件的形成机理,掌握基于光子技术的微波信号传输与精细灵活的调控方法,构建分布式环境下微波光波协同的系统模型,自主研制核心微波光子转换器件与信息处理模块,实现新型“智能光载无线(I-RoF)”的系统原型,同时带动高水平研究基地和研究队伍的建设,为推动我国在该领域的创新发展奠定相关基础,为提升我国在该领域的国际影响力做出贡献。

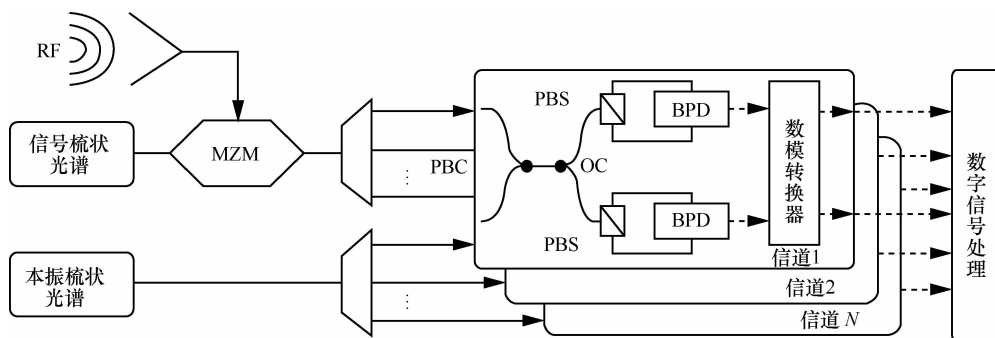


图 3 相干信道化多频点测量原理

对宽带射频信号的一级信道化滤波。随后对一级信道化滤波后的本振光和信号光进行 I/Q 解调,通过模数转换和后续的数字信号处理实现在微波域上对信号的二次滤波。

### 3.2 基于微波光子的多频点频谱压缩采样系统技术

项目组融合压缩采样和微波光子信号处理技术,实现了超宽带微波信号在多载波条件下的精确频率定位。通过采用单信道低速 ADC,可极大降低后续数字信号处理的难度和功耗。实验中利用微波信号在频谱上高度稀疏的特性,通过低速 ADC(低于 100 MHz)实现了宽带射频频率范围的多频测量,同时使数字信号处理部分的计算复杂度大大降低,测试精度达到 2 kHz。

原理方案如图 4 所示,通过将多载波宽带射频信号调制到被编码的光载波上,进行光域编码,光电转换之后再再进行电域数字信号处理,实现宽带多载波射频信号频率测量<sup>[13]</sup>。具体过程如下:首先码型发生器产生高速伪随机序列,通过马赫-曾德尔强度调制器调制到光载波上,形成编码光载波。然后通过级联一个双输出强度调制器和平衡探测器来实现编码光载波与待测射频信号的时域乘法(即对待测射频信号进行编码)。平衡探测器的使用不仅实现了

光电转换,同时其共模抑制的特性可以消除编码光载波所引入的杂波。通过上述编码过程,宽带射频信号的频谱信息就会被压缩到一个带宽大为缩小的基带内,通过低通滤波器提取并由 ADC 采集,使之成为数字信号。最后,数字化的基带信号在数字信号处理单元,通过计算伪随机码和基带信号的频谱互相关函数计算出多载波射频信号各频点的位置。

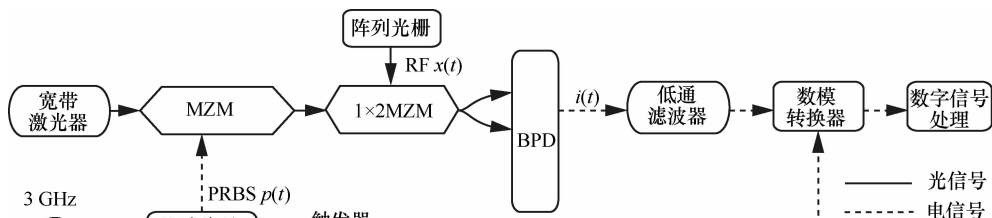
研究表明:采用低速 ADC 实现了宽带多载波射频信号的频率测量(同时测量的频点多达 40 个),精度达 2 kHz。实验装置只用一条光链路,结构简单,后续数字信号处理算法复杂度低,在软硬件上均降低了成本,实现了多频点、高精度的频谱感知,能够满足未来宽带多载波射频信号的泛在感知。

### 3.3 射频信号多频率变频系统技术

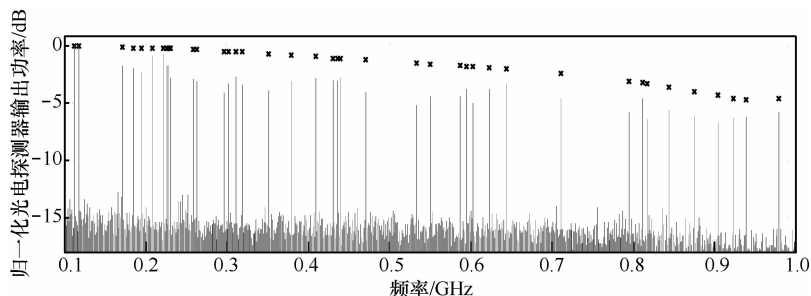
随着综合一体化射频系统逐渐向宽带、高频、多频段的方向发展,传统的射频接收机和发射机在处理多频段信号时出现带宽窄、并行处理难、信道间串扰严重等问题。针对多频段转发这一应用,提出基于双光频梳的多频段变频技术<sup>[14]</sup>。其基本原理如图 5 所示,首先将输入射频信号调

## 项目简介

项目组研究 3 个关键科学问题。(1)高效转换机理:微波和光波高效线性转换与高性能集成器件的形成机理;(2)精细调控方法:非线性条件下光域微波信号的超精细调控方法;(3)分布协同模型:分布式环境下微波光波协同与可重组组网的系统模型。为深入认识上述 3 个科学问题的本质特征及相互关系,按照科学研究的主线,项目组分别从机理、方法、模型 3 个层面着手,系统性地探索“高效转换机理、高效转换器件、精细信号处理、信号可控传输、融合系统建模”5 个方面的研究内容。

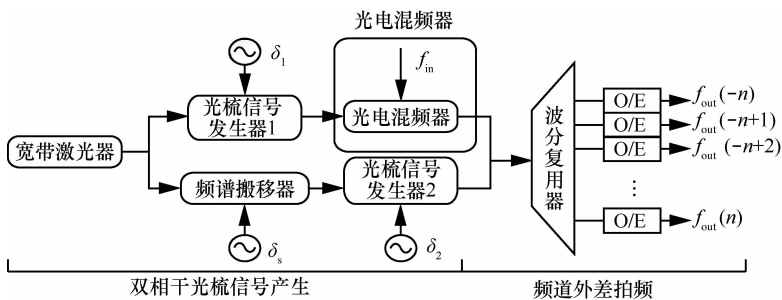


(a) 光子频谱压缩的多频点微波频率测量实验原理

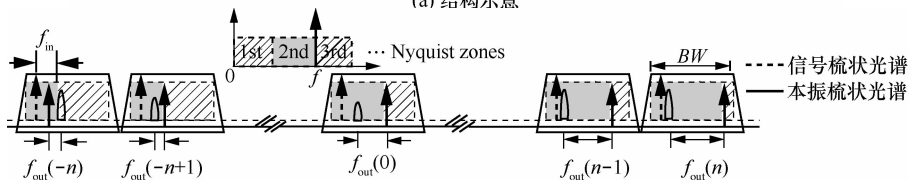


(b) 40个频率的射频信号恢复结果

图4 实验原理及结果



(a) 结构示意图



(b) 频谱示意

图5 基于双光频梳的多频率变换

## 学术团队

“973”计划“面向宽带泛在接入的微波光子器件与集成系统基础研究”由北京邮电大学牵头,主要承担单位有:北京邮电大学、湖南大学、中国科学院半导体研究所、清华大学、西南交通大学、电子科技大学、浙江大学、天津大学、中山大学、南京航空航天大学。项目包含5个课题。

课题一:高频宽带微波与光波相互高效转换机理研究。承担单位为湖南大学和电子科技大学,主要研究内容和目标:半导体有源器件中载流子动态输运过程;应用于微波光子领域的超常材料的电磁特性及其调谐机理;超常材料增强和调控微波光波相互作用的基本原理等。

制在第一路光频梳上,实现信号的多播,从而构成信号光频梳,信号光频梳与另一路相干的本振光频梳耦合后,经信道化滤波滤出对应信道的信号梳齿和本振梳齿,再通过分离的外差探测后,即可得到多个频段的变频信号。该多频率变频系统的优势包括:采用光学调制器作为混频器实现接收射频频率与本振频率的混频,可实现超过 40 GHz 的变频带宽;采用双光频梳结合光学滤波的结构,可实现各信道在物理上分离的变频输出。另外,这种多频率变频技术可以用于频率广播应用和多频段卫星转发器中。

基于上述原理和结构,本项目实现了 C 频段 6.1 GHz 输入射频信号同时到 4.1 GHz、3.9 GHz、11.9 GHz、19.9 GHz 和 27.9 GHz 的多个频段的频率变换,如图 6 所示,各通道变频输出的幅度不平坦度小于 2.3 dB, EVM 相比背靠背情况恶化 9.3%,满足相关传输标准。

## 4 分布式动态可重构微波光波系统构建

利用点对点、大动态、相位稳定的微波光子链路,可以构建中心管控点到多点的分布式天线网络,实现宽带、泛在的无线接入或者高精度航天测控。

### 4.1 资源高效分配和动态管控的分布式天线系统

项目组建立了高移动性、低功耗和大容量分布协同光纤无线融合网络模型,提出了能耗受限情况下的光纤无线融合网络设计、高速移动多变环境下的切换以及分布式环境下资源竞争不公平性的解决方法。

#### 4.1.1 分布式天线系统模型

项目组建立了无线局域网(WLAN)MAC 层 DCF 协议性能评估模型,提出一种考虑光纤时延差的改进 PCF 协议<sup>[15]</sup>。实验原理如图 7 所示。本模型对 IEEE 801.11 DCF 下基础接入模式和 RTS/CTS 接入模式分别进行了验证,结果表明

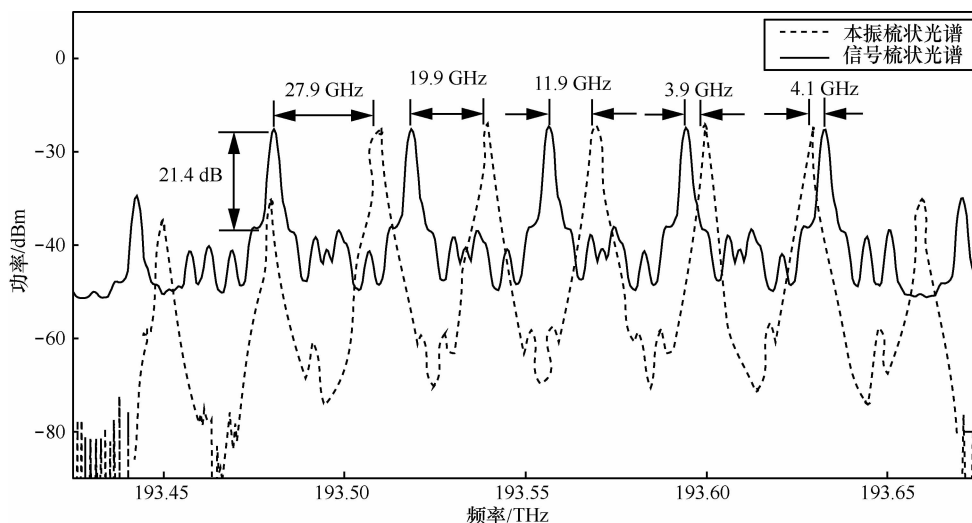


图 6 基于双光频梳的多频率变换频谱

## 学术团队

课题二:微波与光波大功率超宽带高效转换器件研究。承担单位为中国科学院半导体研究所、中山大学和电子科技大学,主要研究内容和目标为:微波和光波相互作用时载流子输运过程;半导体材料和器件结构与微波光波能量传递的内在关联规律及高速线性响应机制等。

课题三:多波段可调谐高精密度微波光子信号处理研究。承担单位为清华大学、浙江大学和中国科学院半导体研究所,主要研究内容和目标为:光域微波模拟信号处理的系统理论与模型;基于硅基光子技术的高精密度可调谐光域微波信号处理单元;具有高线性度的多波段可调谐的微波光子前端子系统等。

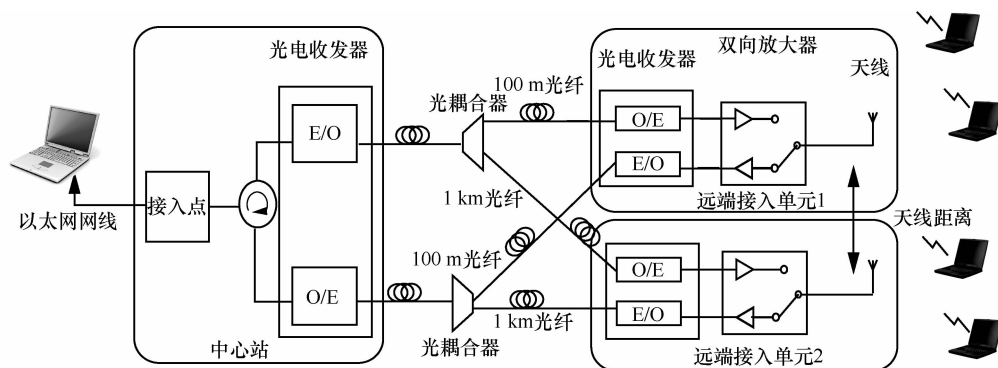


图7 WLAN-over-fiber 两个RAU不同光纤长度下实验框图

模型与实际仿真和实验结果吻合。如图8所示,基础模式下,随着两个RAU间光纤长度差异的不断增大,两个RAU吞吐量的差距也在不断增加,这会使得长光纤连接的

RAU的站点拥有更少的机会接入信道,造成吞吐量分布不均。而由于RTS/CTS是一种预约信道的模式,在牺牲一部分最大吞吐量的前提下,可有效避免隐藏节点问题,并

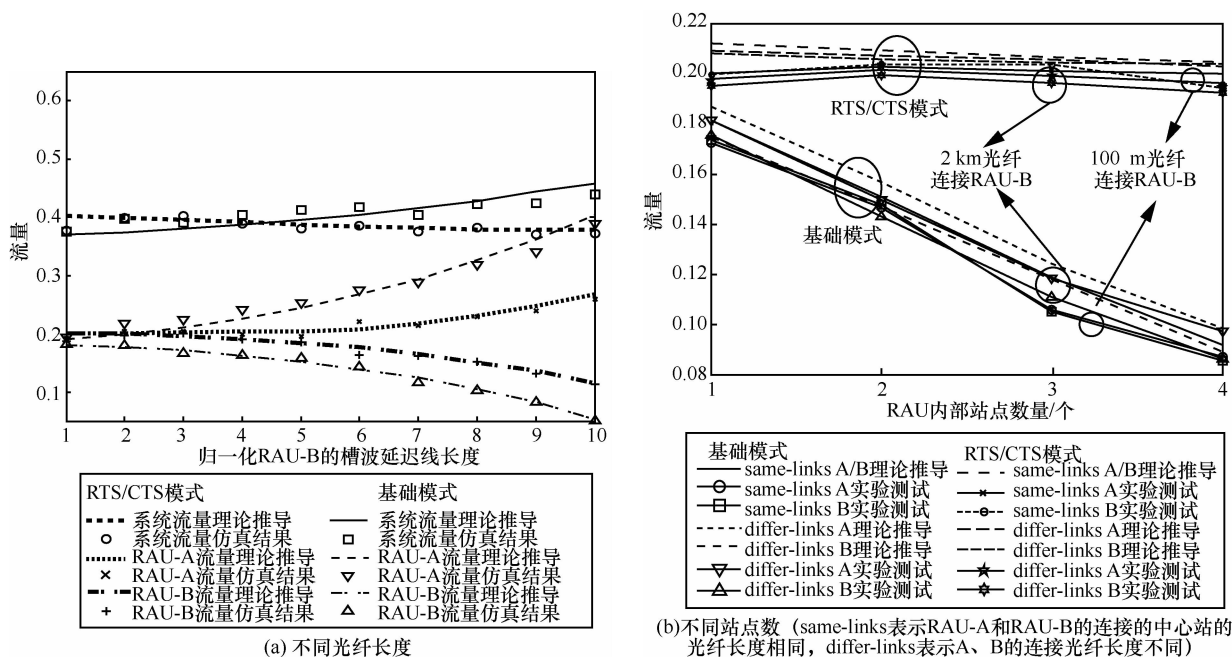


图8 不同光纤长度和不同站点数对吞吐量的影响

## 学术团队

课题四:非线性链路宽带微波光子信号可调控传输研究。承担单位为西南交通大学和天津大学,主要研究内容和目标为:实际非线性链路理论传输极限与链路和关键器件参数之间的关系;面向动态重构和泛在接入的高精细链路频谱操控方法;在线性能监测与自适应补偿的链路优化技术等。

课题五:分布式动态可重构微波光波融合系统的建模与实验研究。承担单位为北京邮电大学、南京航空航天大学大学和西南交通大学,主要研究内容和目标为:分布式环境下微波光波协同与可重构组网的系统模型;光与无线资源的联合调度算法与集中管理技术;光与无线资源的联合调度算法与集中管理技术等。

且由于 RTS 帧长度远小于数据帧,在引入不同光纤长度时,表现出的系统性能也好于基础模式。

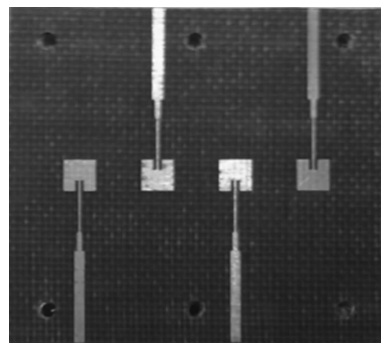
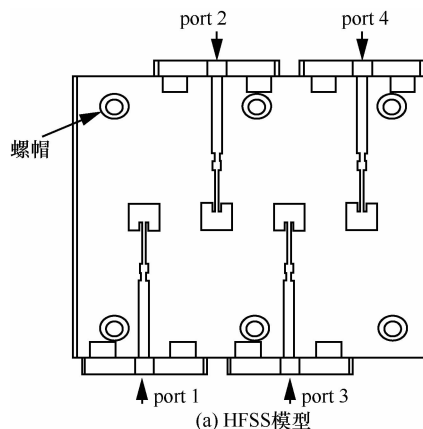
#### 4.1.2 分布接入系统中的智能天线设计

在分布式接入系统中,因为要接入的微波信号具有多频段、多制式的特点,需要使用智能天线合理分配能耗和频谱资源。智能天线的基本原理是通过改变不同天线单元的权重在空间形成方向性波束,主波束对期望用户的信号进行跟踪,在干扰用户的方向形成零陷。从单片天线设计和天线单元组合两个方向出发,设计了两种不同的智能天线。

##### (1) 阵列天线

项目组提出了一种光子辅助的毫米波幅相控制智能天线阵列的设计方法,可在 40 GHz 频段实现通过直接控制光波的幅度和相位来操纵毫米波的幅度和相位。与传统的毫米波幅相控制方法相比,将微波相移  $2\pi$  所需的相对时延量降低到微秒量级;同时降低了光微波幅度和相位的耦合度,亦即控制相位不影响幅度,控制幅度不改变相位。

天线阵列如图 9 所示,基本工作原理为:毫米波信号(即频率差为 40~60 GHz 的两个光波长)进入器件后首先由非对称马赫—曾德尔干涉仪(AMZI)将两光波长分开,分别进入上下两路。AMZI 的时延量为 17~25 ps,相位由半导体制冷器(TEC)控制以精细调节波长分隔效果。进入上路的光波长由第二个 TEC 控制光波的相位,然后进入对称马赫—曾德尔干涉仪(MZI)。通过第三个 TEC 改变 MZI 一臂的相位,从而改变 MZI 的透过率达到控制该光波长幅度的目的,最后将上路的波长和下路的波长重新合并。此光毫米波信号若被光电探测器转化为毫米波信号,对上路所作的相位和幅度操作皆转换成毫米波相位和幅度的变化,从而达到光子型毫米波幅相控制的目的。由于本方法



(b) 实物照片  
图 9 测试天线阵

控制的是光波的相位,相移  $2\pi$  所需的相对时延量只有数微米,且幅度控制引入的相移是已知值,非常容易在算法中进行补偿,因而幅相控制可认为是没有耦合的。

##### (2) 电磁带隙天线增强技术

智能天线的关键在于波束成形,而电磁带隙(EBG)结构由于是周期排列的结构,具有表面波带隙和反射带隙,可用于提高波束的定向性。针对室内 RoF 系统天线,设计了一种能提高 60 GHz 天线增益和辐射效率的准分形 H-型槽型电磁带隙结构<sup>[16]</sup>。该结构针对 EBG 结构垂直方向

## 学术团队

在科技部领导下,在“973”计划专家组的指导下,本项目采用首席科学家/课题负责人/任务研究组等目标责任制,实施有效的组织方式与协调机制,开展学术交流和技術研讨,发挥各单位优势,围绕项目的整体目标开展分工协作,针对未来在宽带泛在接入方面的重大战略需求,瞄准宽带光纤通信与灵活无线通信的发展趋势与融合演进目标,重点围绕 3 个科学问题,通过全体成员的共同努力,目前已在相关的核心机理、关键器件、系统原型等方面已取得了重要进展,为顺利完成 IR6F 项目的预定目标奠定了坚实的基础。



的带隙特性——人工磁导体特性,将此种 EBG 结构用作天线的反射板,可以减小天线的剖面积,增加天线增益和辐射效率等。通过表面开槽改变电流路径,在等效电路中相当于引入了级联电感,一方面有助于实现电磁带隙结构的小型化,另一方面可以通过开槽使电磁带隙结构产生多频带。

EBG 结构的设计和实物如图 10 所示,通过合理设计,EBG 结构能够在阶段电流传播的同时对入射的平面波具有同向反射特性,可显著提高特定方向的波束功率。电磁波在介质基板中不能有效传播,这一方面使能量更加集中地从天线辐射出去,提高了天线的定向性;另一方面,由于表面波被抑制,天线方向图的波纹减小了,这两者都有助于波束成形。

#### 4.2 可重构的微波光波融合系统

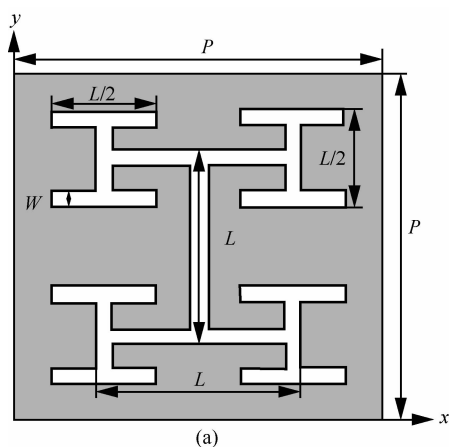
可重构功能是未来绿色智能通信网络的发展趋势,该功能主要是实现业务调配和频谱管控,二者在物理层则分别对应于射频开关和混频器两种器件的操作。然而传统的

基于电子开关的射频交换面临带宽窄、并行处理能力差、交换容量低、串扰严重等挑战,因此,项目组提出光子射频交换的方法,通过利用光开关在光域内实现射频信号切换可以实现宽带、多频段、大容量交换并具有极低的信道串扰。

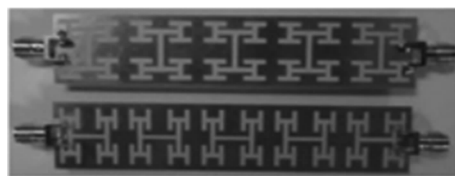
项目组设计了如图 11 所示的多通道分布式可重构天线系统,系统中多个基带信号首先通过窄带、低成本电子开关交换到不同频率的射频本振处并进行混频,产生射频信号。射频信号分别调制到光波上,统一经过预色散补偿、光放大等处理后经光学开关矩阵阵列交换到不同的输出端口,并通过 10 km 光纤将信号路由到不同的远端天线。这样,通过窄带的电子开关矩阵和宽带光学开关矩阵阵列即可实现任意基带信号以不同的载频路由到不同的远端天线,从而实现不同射频在不同分布式天线间的灵活重构。

#### 4.3 宽带灵活的卫星转发系统

卫星转发系统的功能是将卫星通信上行频段的信号



(a)



(b)



(c)

图 10 基于罗杰斯板制作的 UC-EBG 天线反射板实物

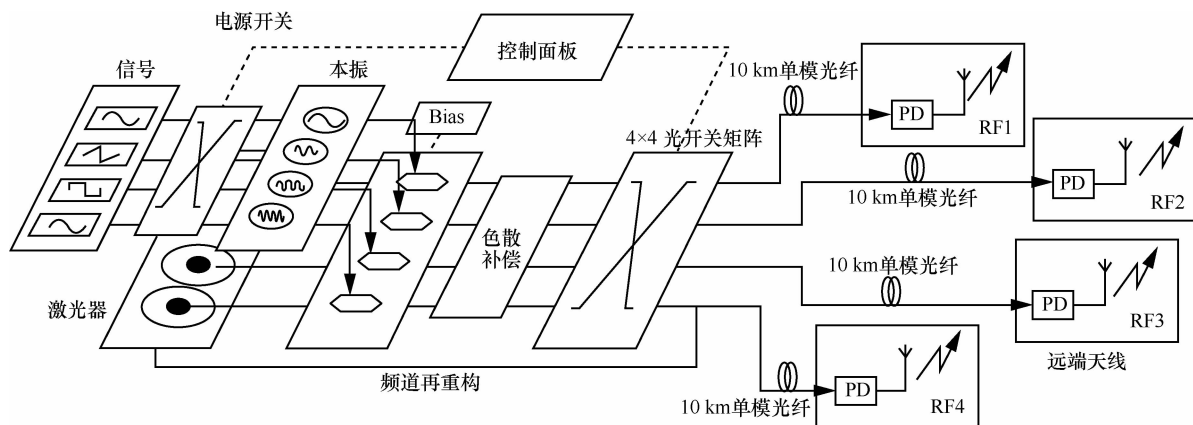


图 11 多通道可重构分布式天线系统

经过变频、放大后,在另一个频段同样频宽的频带上重新发射。在目前多频段、大容量业务的驱使下,传统卫星转发器面临容量、带宽、体积、重量、功耗和电磁干扰等问题,因此,项目组联合中国空间技术研究院联合提出了一种基于微波光子技术的新型卫星转发系统<sup>[1]</sup>,可满足宽带、多波段、并行、灵活、轻型、稳定和电磁兼容等要求。

系统原理如图 12 所示,上行的各个频段的射频信号经低噪放大后首先分别与一路光频梳混频,实现频谱上的多路复制,然后再分别与另一路光频梳耦合。耦合信号通过交叉连接开关矩阵实现各路信号到所需输出端口的通道交换,再经过 WDM 信道化滤波,滤出各对应信道的信号梳齿和本振梳齿,单刀多掷开关用来选择所需转发的频段并在 PD 上进行外差拍频,最后经高功放输出,完成转发功能。

这种转发结构可以支持 C、Ku、Ka 频段内任意上行频段直接变频到任意下行频段,同时能够从任意输出端口输出。

基于微波光子卫星转发系统,项目组搭建了相关实验演示平台。该平台可支持 C、Ku、Ka 3 个频段中任意上行频率到下行频率的转发,经实验证明,引入光子射频交换的转发系统支持大容量交换,并且具有极高的隔离度,而且在插入损耗和切换速度方面也有较好的表现。

#### 4.4 智能、动态可控的下一代无线信息系统

项目组提出了基于软件无线电和微波光子系统结合的智能、动态可控的下一代无线信息系统,如图 13 所示。

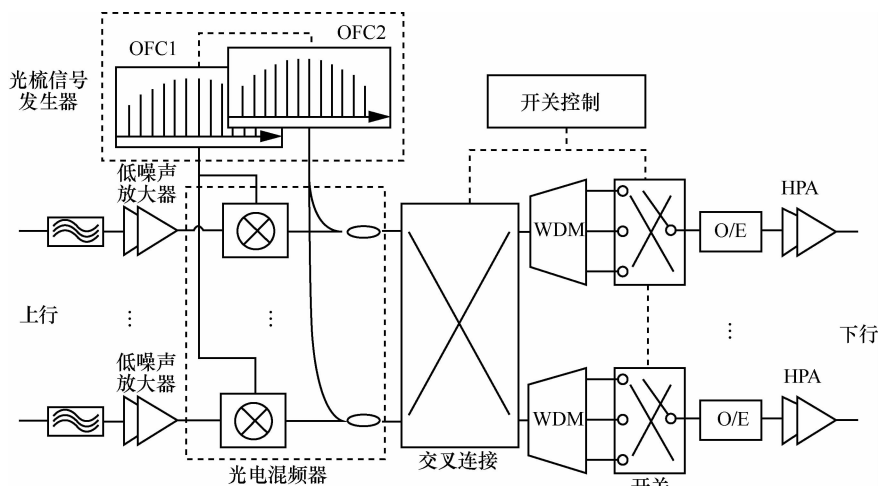


图 12 微波光子卫星转发系统

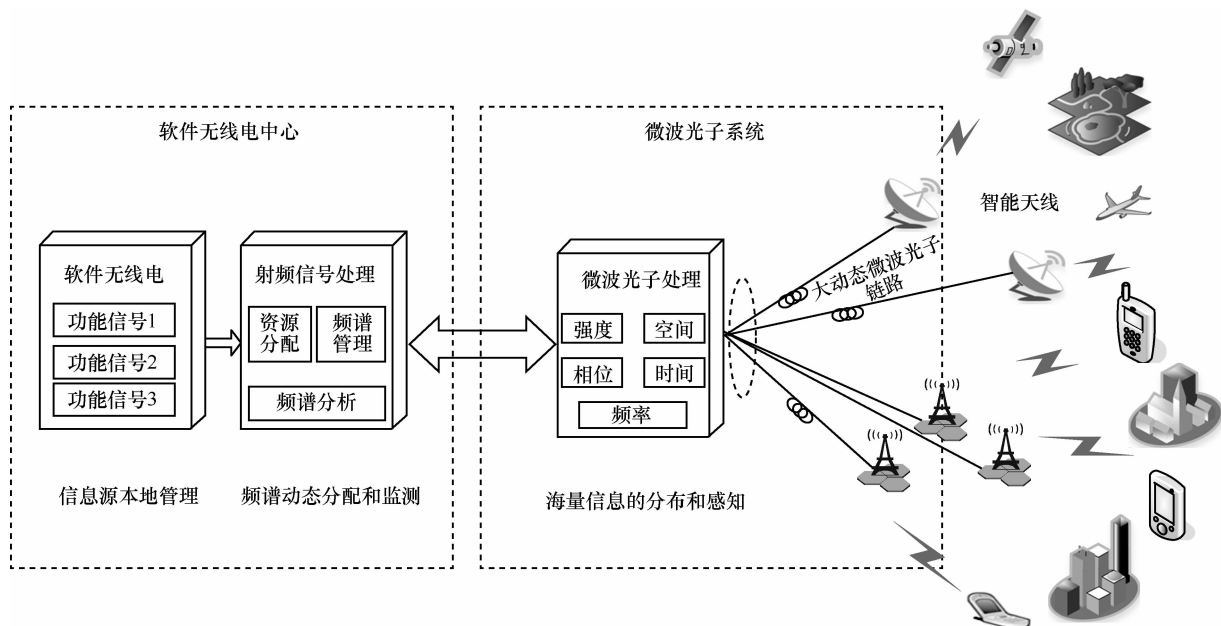


图 13 软件可编程、泛在接入的智能光纤无线通信系统



系统主要包括软件无线电控制中心、微波光子处理系统和远端天线单元 3 个部分。其中,软件无线电控制中心实现信息源的本地管理和频谱资源的动态分配与检测,微波光子处理系统实现海量信息的分布和感知,远端天线单元实现宽带信息的采集与分发功能。该系统充分发挥微波精细灵活和光波宽带低损的各自优势,可以实现单纯靠微波技术或光子技术难以完成甚至无法实现的宽带信息处理与传输组网等功能。

## 5 研究进展

面对由目前单一微波光子传输向未来具有分布式、动态可重构、低耗的智能微波光波融合系统演进时所显现的新特点与新挑战,在“973”计划的支持下,项目组开展了相关关键技术和系统应用方面的研究工作,在系统与网络层面取得了以下主要研究进展:

- 进行了长距离、大动态微波光子传输链路的建模、理论分析以及动态范围提升等关键技术研究,实现了无杂散范围  $128.8 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$  的大动态射频光传输;
- 实现了多模式、多频点射频信号的传输和信道化接收,可对 20 GHz 以内任意 3.5 GHz 带宽射频信号进行接收处理,其中射频感知精度达 125 kHz;
- 完成了光子射频幅相控制芯片的设计技术及测试方案和光子辅助的阵列信号传输与处理技术,所设计测试天线工作频率大于 40 GHz,瞬时带宽大于 2.5 GHz,可实现远场波束偏转范围大于  $60^\circ$ ;
- 构建了可支持多路射频交换和载频频率重构的分布式天线系统,可实现多路基带信号到最高 20 GHz 频段的上变频以及到任意远端天线的路由交换和系统重构。

除了本文中介绍的一些关键技术外,项目组还首次从实验中发现了石墨烯在微波和太赫兹波段具有非线性饱和吸收特性,开辟了微波和太赫兹波段实现微波与光波宽带高效作用的新途径;合作完成了基于倒梯形模拟直调激光器芯片的蝶型封装模块,达到国际先进性能指标水平等;研发了微波光子链路仿真软件平台等,目前相关工作正在继续进行。

## 6 结束语

本项目针对未来在宽带泛在接入方面的重大战略需

求,瞄准宽带光纤通信与灵活无线通信的发展趋势与融合演进目标,拟解决面向宽带泛在接入系统中若干基础性、普遍性和先导性的重要科学问题和关键技术问题,构建分布式环境下微波光波协同与可重构组网的系统模型,实现智能光载无线 I-RoF 系统原型,完成功能验证,为下一步基于微波光子的智能、动态可控微波光波融合系统研究与应用奠定坚实基础。

## 参考文献

- 1 Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 2007, 6(1): 319~330
- 2 Kim J, Cox A J, Chen J, *et al.* Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 733~736
- 3 Yao P J. Microwave photonics: arbitrary waveform generation. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 79~80
- 4 Capmany J, Li G F, Lim C, *et al.* Microwave photonics: current challenges towards widespread application. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22862~22867
- 5 Capmany J, Domenech D, Muñoz P. Silicon graphene waveguide tunable broadband microwave photonics phase shifter. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8094~8100
- 6 Dezfouliyan A, Weiner M A. Microwave photonics for space-time compression of ultrabroadband signals through multipath wireless channels. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 4946~4949
- 7 Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, *et al.* A fully photonics-based coherent radar system. *Nature*, 2014(3): 341~345
- 8 Cui Y, Dai Y, Yin F, *et al.* Intermodulation distortion suppression for intensity-modulated analog fiber-optic link incorporating optical carrier band processing. *Optics Express*, 2013(7)
- 9 Chen H, Li J, Xu K, *et al.* Experimental investigation on multi-dimensional digital predistortion for multi-band radio-over-fiber systems. *Optics Express*, 2013, 22(4): 4649~4661
- 10 Pei Y, Yao J, Xu K, *et al.* Advanced DSP technique for dynamic range improvement of a phase-modulation and coherent-detection microwave photonics link. *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) 2013*, Alexandria, VA, USA, 2013
- 11 Zhang A, Dai Y, Yin F, *et al.* Stable radio-frequency delivery by  $\lambda$  dispersion-induced optical tunable delay. *Optical Letter*, 2014(38): 2419~2421
- 12 Xie X, Dai Y, Xu K, *et al.* Broadband photonic RF channelization based on coherent optical frequency combs and I/Q demodulators. *Photonics Journal, IEEE*, 2012, 4(4): 1196~1202
- 13 Yin F, Gao Y, Dai Y, *et al.* Multifrequency radio frequency



~~~~~

## 59