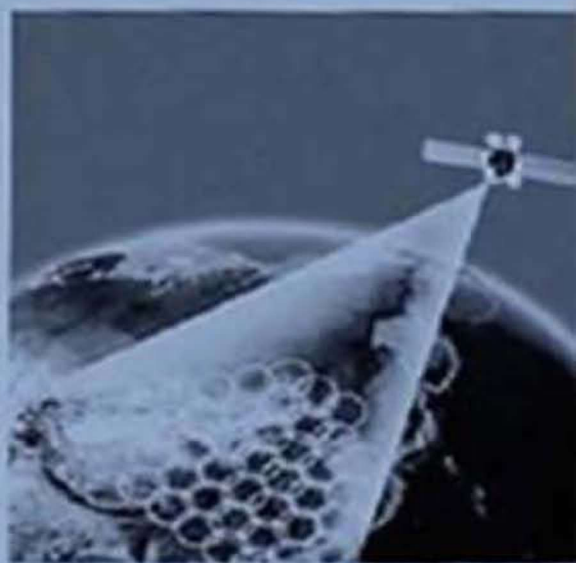




空间电子信息科学与技术系列



微波光子 技术及应用

谭庆贵 蒋 炜 梁 栋 编著
李小军 郭精忠 李 立



上海科学技术出版社
SHANGHAI SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

空间电子信息科学与技术系列

微波光子技术及应用

谭庆贵 蒋 炜 梁 栋 编著
李小军 郭精忠 李 立

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书为空间电子信息科学与技术系列丛书之一,系统介绍了微波光子技术的理论体系、技术内涵和技术应用,并结合空间大容量信息获取、传输和分发应用背景,详细论述了微波光子技术空间信息系统应用背景、关键技术解决方案及典型应用。本书可作为高等院校微波光子专业本科生及研究生的教材或教学参考书,也可供从事空间微波光子技术研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波光子技术及应用 / 谭庆贵等编著. —上海:
上海科学技术出版社,2019.1

ISBN 978-7-5478-4274-4

I. ①微… II. ①谭… III. ①微波理论—光电子学—
高等学校—教材 IV. ①TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 272207 号

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助

微波光子技术及应用

谭庆贵 蒋 炜 梁 栋 编著
李小军 郭精忠 李 立

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17.75

字数 429 千字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-4274-4/TN·23

定价: 98.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

前 言

微波光子学(microwave photonics)是微波技术和光子技术交叉融合形成的新兴学科领域,研究微波信号和光信号的相互作用及其应用。微波光子技术为微波信号的产生、传输、控制和处理提供了新型技术解决方案。近年来微波光子技术在军用和民用领域得到了快速发展,国内众多科研院所和高校都开展了大量的研究工作。我们结合近十年微波光子技术的研究成果,并参考国内外学者公开发表的学术文献,编写此书,希望为从事微波光子技术研究的人员提供一本系统、全面的参考书,并推动我国微波光子技术的发展。

随着空间信息获取、传输和处理技术的发展,空间载荷需要处理的微波信号频段越来越宽、类型越来越多、承载信息量越来越大。传统微波技术受电带宽处理能力的限制,越来越难以满足空间信息系统发展的需求。微波光子技术将微波信号搬移到光域,在光域实现宽带微波信号的窄带化处理、多路微波信号的宽带传输以及大规模阵列信号的并行传输等功能,大大提高了空间载荷的信息获取、传输和处理能力。随着宽带雷达、宽带通信以及电子侦察载荷技术的发展,新一代空间载荷需要将这些载荷功能集成化、一体化,微波光子技术可充分发挥其宽带优势,构建基于微波光子通道综合和软件无线电的宽带空间信息处理载荷;发挥其抗电磁干扰优势,大幅提高空间载荷的抗电磁干扰能力,目前微波光子技术已在雷达测控站、发射塔等信号收发机中得到成功应用。在机载平台中,采用微波光子技术实现微波信号的传输、分发和接收,有效缩减了传输系统体积和重量。在下一代移动通信技术中,微波光子技术也将发挥重要的作用。

本书是空间电子信息科学与技术系列之一。全书充分考虑空间载荷在信号传输、信号处理以及功能综合等方面的发展需求,结合微波光子技术特点及技术优势,共由6章构成,包括3个部分:第一部分包括第1章和第2章,内容包括微波光子技术特点、发展动态和基本原理;第二部包括第3章和第4章,为微波光子信号生成和处理技术;第三部包括第5章和第6章,为微波光子技术空间应用,即空间微波光子传输技术以及星载微波光子处理转发技术。各章内容如下:

第1章内容包括微波光子技术特点、技术优势及应用,国内外发展动态,微波光子技术的空间应用。

第2章内容包括微波光子调制/解调基本原理,微波光子传输信道中的色散及非线性实现过程,微波光子常用的光电子器件及其结构以及 ROF 系统的性能参数等表征因素。

第3章内容包括基于光电振荡器(OEO)、全光变频器以及全光倍频器的微波信号生成技术,OEO 光电振荡器基本原理、实现结构及应用。全光变频器部分主要包括基于数据信号光注入锁定和直流光注入的全光上变频技术。全光倍频技术主要内容为基于注入 DFB 激光器的全光倍频技术方案。

第4章主要内容为微波光子信号处理实现方法。重点讨论光学模数转换和微波光子滤波

技术,分析其技术发展、技术特点和典型实现方法。同时对微波光子频率测量实现方法加以阐述。

第5章介绍空间射频光(ROFSO)通信系统的特点及应用场景。重点讨论空间射频光通信系统的组成和系统性能,并对空间 ROFSO 通信系统的应用前景作了展望。

第6章重点描述星上微波光子处理转发技术。对星上微波光子处理转发中的光本振信号生成、微波光子变频和光交叉互联等关键技术加以分析,并对欧空局星上微波光子处理转发实现方案和研究成果进行讨论。

本书的编写分工为:第1章谭庆贵、李小军,第2章谭庆贵、梁栋,第3章郭精忠、谭庆贵,第4章梁栋、谭庆贵,第5章蒋炜、李小军,第6章李立、蒋炜。编写中陈豪、熊之凡等总师和专家给出了大量修改意见,在此表示感谢。

本书在编写过程中参阅了大量经典著作和学术文献以及互联网资料,大部分都已列在各章参考文献中,在此向这些文献的作者表示感谢。

本书的出版还要感谢中国空间技术研究院神舟学院和神舟学院西安分院的大力支持。书中的不妥之处,敬请广大读者予以批评指正。

编者

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论..... | 1 |
| 1.1 微波光子技术概述 | 1 |
| 1.2 ROF 技术地面应用 | 3 |
| 1.2.1 ROF 系统应用方向 | 3 |
| 1.2.2 ROF 光载无线接入 | 5 |
| 1.3 微波光子技术空间应用 | 8 |
| 1.3.1 微波光子信号传输 | 8 |
| 1.3.2 微波光子交换转发 | 9 |
| 1.4 微波光子技术雷达应用 | 12 |
| 参考文献 | 16 |
| | |
| 第 2 章 微波光子基本原理 | 19 |
| 2.1 微波光子调制/解调基本原理 | 19 |
| 2.1.1 基本原理及结构组成 | 19 |
| 2.1.2 微波/光调制实现原理 | 19 |
| 2.1.3 光/微波解调实现原理 | 24 |
| 2.2 微波光子传输信道特性分析 | 25 |
| 2.2.1 光纤色散 | 25 |
| 2.2.2 光纤非线性效应 | 31 |
| 2.3 常用光电子器件 | 38 |
| 2.3.1 激光器 | 38 |
| 2.3.2 电光调制器 | 43 |
| 2.3.3 光电探测器 | 54 |
| 2.4 光载射频(ROF)系统及主要性能 | 59 |
| 2.4.1 ROF 系统结构..... | 59 |
| 2.4.2 微波光子链路性能参数 | 60 |
| 2.4.3 ROF 系统性能..... | 62 |
| 参考文献 | 68 |

| | | |
|-------|------------------------------------|-----|
| 第3章 | 微波/毫米波信号光学产生技术..... | 70 |
| 3.1 | 概述 | 70 |
| 3.1.1 | 上变频信号产生国内外动态 | 70 |
| 3.1.2 | 光电振荡器 | 73 |
| 3.1.3 | UWB 信号产生 | 73 |
| 3.2 | OEO 毫米波信号产生技术..... | 75 |
| 3.2.1 | 光电振荡器基本原理及结构 | 75 |
| 3.2.2 | 光电振荡器实现方式 | 77 |
| 3.2.3 | 光电振荡器的应用 | 81 |
| 3.3 | 全光变频毫米波产生技术 | 84 |
| 3.3.1 | 基于数据信号光注入锁定半导体激光器的全光上变频技术 | 84 |
| 3.3.2 | 基于直流光注入全光上变频技术 | 96 |
| 3.4 | 倍频毫米波产生技术 | 108 |
| 3.4.1 | 马赫-曾德尔调制器原理 | 108 |
| 3.4.2 | SOA 非线性展宽 | 109 |
| 3.4.3 | 注入锁定 | 110 |
| 3.4.4 | 实验与结果分析 | 110 |
| 3.5 | 光载任意波形产生 | 114 |
| 3.5.1 | 基于双波长注入 FP-LD 的 UWB 信号产生 | 114 |
| 3.5.2 | 注入 FP-LD 的基带数据直接产生调制的 UWB 信号 | 118 |
| | 参考文献 | 121 |
| 第4章 | 微波光子信号处理..... | 127 |
| 4.1 | 光模数转换 | 127 |
| 4.1.1 | 光模数转换技术发展 | 127 |
| 4.1.2 | 光模数转换技术特点 | 129 |
| 4.1.3 | 光模数转换实现方法 | 132 |
| 4.2 | 微波光子滤波器 | 143 |
| 4.2.1 | 微波光子滤波器技术发展 | 143 |
| 4.2.2 | 微波光子滤波器技术特点 | 143 |
| 4.2.3 | 微波光子滤波器实现方法 | 147 |
| 4.3 | 微波光子频率测量 | 161 |
| 4.3.1 | 微波光子频率测量技术发展 | 161 |
| 4.3.2 | 微波光子频率测量技术特点 | 162 |
| 4.3.3 | 微波光子频率测量实现方法 | 167 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 参考文献 | 175 |
| 第 5 章 空间微波光子通信系统技术 | 178 |
| 5.1 空间微波光子通信技术概述 | 178 |
| 5.1.1 空间微波光子通信系统特点 | 178 |
| 5.1.2 ROFSO 通信系统组成 | 180 |
| 5.1.3 ROFSO 通信系统关键技术 | 181 |
| 5.2 地面 ROFSO 通信系统技术..... | 184 |
| 5.2.1 大气效应及影响因素分析 | 184 |
| 5.2.2 大气湍流效应 | 186 |
| 5.2.3 ROFSO 试验系统及验证技术 | 190 |
| 5.3 卫星 ROFSO 通信系统技术..... | 198 |
| 5.3.1 卫星 ROFSO 通信系统简介 | 198 |
| 5.3.2 卫星 ROFSO 通信系统关键技术 | 200 |
| 5.3.3 卫星 ROFSO 调制解调理论模型 | 201 |
| 5.4 星间 ROFSO 通信系统技术..... | 204 |
| 5.4.1 星间 ROFSO 通信系统组成及性能参数 | 204 |
| 5.4.2 星间 ROFSO 通信系统理论模型 | 210 |
| 5.4.3 星间 ROFSO 通信系统信号传输性能分析 | 211 |
| 5.5 ROFSO 通信系统应用及展望 | 220 |
| 5.5.1 ROFSO 通信技术应用 | 220 |
| 5.5.2 ROFSO 通信技术展望 | 222 |
| 参考文献 | 222 |
| 第 6 章 星上微波光子处理转发技术 | 225 |
| 6.1 星上微波转发技术 | 225 |
| 6.1.1 透明转发系统 | 225 |
| 6.1.2 处理转发系统 | 226 |
| 6.1.3 卫星通信频段规划 | 226 |
| 6.1.4 星上微波通信转发技术发展趋势 | 227 |
| 6.2 星上微波光子处理转发技术 | 231 |
| 6.2.1 星上微波光子处理转发技术特点 | 231 |
| 6.2.2 星上微波光子处理转发系统组成 | 232 |
| 6.3 光本振信号生成技术 | 234 |
| 6.3.1 光倍频技术 | 234 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 6.3.2 | 谐波生成技术 | 234 |
| 6.3.3 | 光外差技术 | 235 |
| 6.3.4 | 四波混频技术 | 235 |
| 6.3.5 | 光外调制技术 | 236 |
| 6.3.6 | 光电振荡器技术 | 238 |
| 6.4 | 微波光子变频技术 | 239 |
| 6.4.1 | 微波光子变频技术概述 | 239 |
| 6.4.2 | 串行 MZM 微波光子变频技术 | 241 |
| 6.4.3 | DPMZM 和 MZM 级联的微波光子变频技术 | 249 |
| 6.5 | 光交叉互联技术 | 254 |
| 6.5.1 | 光交叉互联技术发展现状及特点 | 254 |
| 6.5.2 | 基于 MEMS 的光交叉互联技术实现 | 262 |
| 6.6 | 光电探测技术 | 264 |
| 6.7 | 星上微波光子处理转发技术实现与验证 | 267 |
| 6.7.1 | 星上微波光子处理转发技术实现 | 267 |
| 6.7.2 | 欧空局星上微波光子技术验证 | 268 |
| | 参考文献 | 272 |
| | 索引 | 274 |

第 1 章 绪 论

1.1 微波光子技术概述

微波技术广泛应用于通信、雷达等电子学领域,随着微波技术应用的不断发展,微波频段的频谱资源日益紧缺。此外需要采用微波技术传输处理的数据容量越来越大,这需要进一步拓展电子频谱的可用频段,充分挖掘微波频段的使用潜力,提升数据传输和处理能力。频谱扩展主要是向高频段频谱扩展,频段已扩展至太赫兹频段和光频段。太赫兹频段由于受频率源和功率放大器等器件能力的制约,在信息传输和处理方面还没有广泛工程应用。20 世纪 60 年代激光技术问世之后,人们就开始探索采用光通信技术实现信息传输。光通信技术具有宽带宽、抗电磁干扰等特点。信息技术的发展推动了微波技术和光子技术的快速发展。20 世纪 90 年代,有学者提出了微波光子技术概念,随后微波光子技术得到了快速发展。

微波光子学(microwave photonics)是微波和光子学融合产生的新兴学科领域,研究微波和光子的相互作用及其应用(见图 1-1)。微波光子技术一方面研究光对微波的作用及应用,即采用光电器件和光电系统处理微波信号,主要应用于微波光子信号产生、微波光子信号传输、微波光子信号处理以及微波光子信号测量等;另一方面研究微波对光的作用及应用。目前微波光子技术主要研究光对微波的作用及应用。

微波光子技术是在光域完成微波信号的传输和处理,可以充分发挥光链路天然的抗电磁干扰特性和光纤的低质量、低损耗等特性,在空间载荷中具有重要的应用前景。具体而言,微波光子技术优势主要包括:

- (1) 微波信号宽带传输。微波信号光域传输几乎无带宽限制,1 550 nm 波段光载波可提供太赫兹的大容量带宽,可以实现多路宽带微波信号的并行传输。
- (2) 微波信号低损耗传输。微波信号调制在光波上,在光纤中以 0.2 dB/km 的低损耗可以实现微波信号的远距离传输。
- (3) 微波信号格式透明传输。微波光子链路是将微波信号直接搬移到光域,对任何调制/编码格式都是透明的。
- (4) 微波信号无电磁干扰(EMI)传输。由于微波信号是调制到光域进行传输,微波信号传输不引入 EMI,因此 EMI 免疫性强,不受外界电磁干扰的影响。
- (5) 光纤链路重量轻、体积小。与传统电缆相比,光纤还具有重量轻、体积小

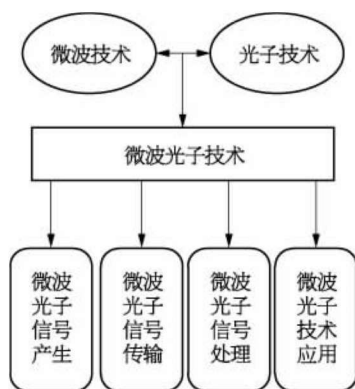


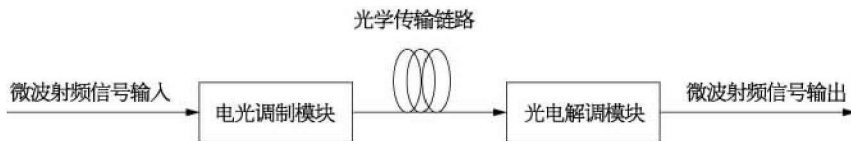
图 1-1 微波光子技术研究内容

体积和质量要求严格的战斗机、卫星等平台,微波光子技术具有更广阔的应用前景。

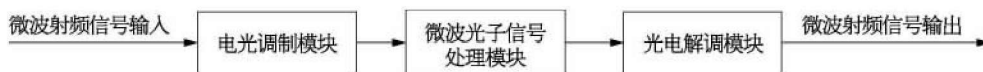
随着光电器件和半导体工艺等技术的发展,微波光子技术近年来发展迅速,微波光子信号传输技术已在地面、舰船以及飞机等平台上得到成功应用。目前国内外在微波光子技术领域主要开展微波光子信号产生、微波光子信号传输、微波光子信号处理以及微波光子技术应用等方面的研究工作。

微波光子信号产生技术是采用光学的方法产生微波信号、毫米波信号以及太赫兹信号。随着多媒体等新型移动宽带业务的发展,急需采用更高频率的载波传输宽带信号。传统电域产生的高频毫米波信号调谐范围窄、幅频特性较差、相位噪声较高,不能很好地满足实际需求,特别是对于超过 100 GHz 的高频信号,目前采用电域产生的方法还难以实现。另一方面,超宽带射频信号在短距离大容量无线通信和传感网络中具有重要的应用价值。当前电处理技术很难产生频谱带宽超过 500 MHz 的 UWB 信号。微波光子信号产生方法充分利用宽带宽、高稳定性、噪声低等特性,可以产生高频、低相噪、可调谐、宽带微波信号。

微波光子信号传输是采用微波光子链路实现微波信号的光域传输(见图 1-2)。微波光子链路主要包括电光调制模块、光纤(或空间)微波光子光传输信道、光电解调模块。微波/光调制模块将微波信号调制到光域,微波光子传输通道实现微波信号的光域传输,微波光子传输信道具有宽带和抗电磁干扰特性,光纤信道还具有低损耗特性。在光纤信道中可以实现微波或更高频段信号的无衰减、无信道间相互干扰的信号传输。光/微波解调模块将光域传输的微波信号恢复出来。根据光信道的不同可将微波光子信号传输技术分为两种类型:微波信号光纤链路传输(radio over fiber, ROF),微波信号空间光传输(radio over free space optical, ROFSO)。



微波光子信号处理是将微波信号搬移到光域,在光域实现微波信号的处理(见图 1-3)。微波信号处理技术主要包括频率变换、微波光子滤波、微波信号相位高精度延时控制以及微波光子模数转换等技术。微波光子信号处理技术实现了宽带微波信号光域窄带处理,推动微波信号处理向更高频段发展,克服电信号处理电路中有限的信号取样和处理速度,可实现高速信号处理、宽带取样及并行操作。微波光子处理系统主要包括微波/光调制模块、微波光子信号处理模块、光/微波解调模块。微波光子信号处理模块在光域完成微波信号的变频、滤波、延时、模数转换等微波信号处理。



1.2 ROF 技术地面应用

目前微波光子技术的地面应用主要是采用 ROF 系统实现微波信号的传输。ROF 具有带宽大、并行处理能力强、体积小、重量轻、抗电磁干扰能力强等优点,利用 ROF 系统对传统微波信号进行传输可以解决现有微波传输系统带宽小、传输损耗大以及抗电磁干扰能力低等技术问题,在海、路、空、天等多个领域具有重要的应用价值。在空天领域,ROF 系统可以应用于光载无线接入、60 GHz 移动通信系统和智能交通系统等民用系统。此外,微波光子技术在遥感、雷达、卫星通信等民用和军事领域都有着广泛的应用前景。

1.2.1 ROF 系统应用方向

ROF 系统在民用领域的应用主要有光载无线接入、移动宽带通信、智能交通通信系统等。光载无线接入是指将 ROF 系统与分布式天线结合,利用光纤通信技术与无线通信技术优点实现无线信号远距离覆盖。

1) ROF 系统在 4G,5G 和 WLAN 等无线通信领域的应用

如图 1-4 所示,中心站完成无线信号的本地处理和资源分配等功能,无线信号在光发射机电光变换后,通过光纤分配网络转发给基站和远端天线单元,进而完成与用户终端的无线连接。ROF 系统的大带宽、低损耗等特性使得无线通信的基站覆盖范围和承载话路数量都得到了很大提升。利用分布式天线技术,基于分布式基站的 ROF 系统结构能够大幅度简化基站结构,降低基站复杂度和维护成本。因此 ROF 技术在未来高速光载无线接入中有着广阔的应用前景。

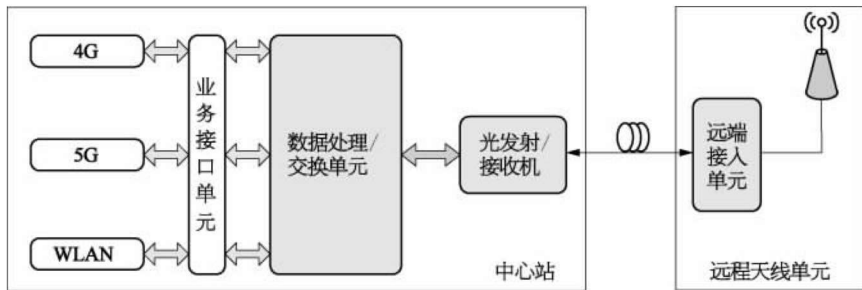


图 1-4 ROF 系统在高速光载无线接入中的应用

在移动宽带通信应用中,利用 ROF 系统建立光载无线通信网络,可以有效解决室内终端设备、室外移动终端设备的无缝覆盖和互通互联难题。基于 ROF 系统的光载无线网络拓扑如图 1-5 所示。不同类型服务器上加载的 Internet 网络数据通过防火墙、路由器、光载无线交换机后,利用 ROF 系统实现网络数据与室内计算机、手持 WiFi 终端以及车辆交通之间的互通互联。

2) 智能交通系统应用

ROF 系统在智能交通通信系统的应用主要体现在智能交通控制、交通通信和交通管理等方面。城市交通拥堵时段,为了监控交通状况、管理交通流量,交通管理中心需要实时理解道

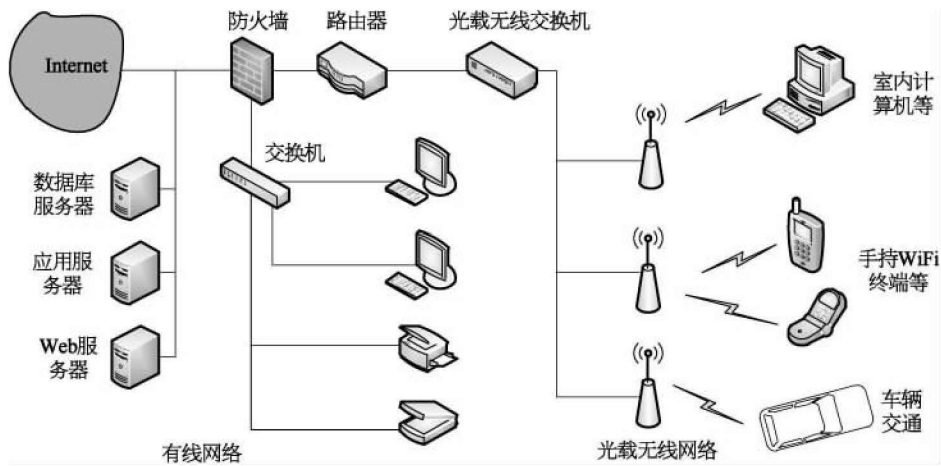


图 1-5 光载无线网络拓扑

路交通状况,并及时调整交通信号,从而引导车辆快速通过拥塞路段,缓解拥塞路段的拥挤状况。这样就要求在道路周围设置大量的射频监控点和监控摄像头,要实现大容量射频信号和视频信号到控制中心的实时传输,就要求有一个庞大的智能交通通信网络。基于分布式基站结构的 ROF 系统使得智能交通通信网络成为可能。应用于智能交通通信的 ROF 系统如图 1-6 所示,路边基站监控道路状况并将接收到的数据发给中心控制局,通过交换网络转发到交通控制中心,之后相关人员便可及时获得道路状况,调整交通信号来疏导交通拥堵。同时,在出现突发事件时,交通控制中心可以及时通知交警车辆,提高突发事件处理时效。应用 ROF 系统的智能交通通信系统能够更好地实现大数据实时传输,监控道路状况和及时处理交通突发事件,ROF 系统在智能交通通信领域将有着重要的应用。

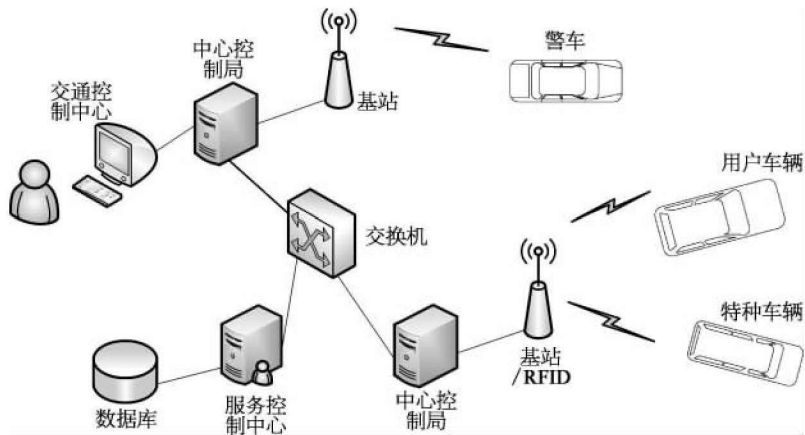


图 1-6 应用 ROF 系统的智能交通通信系统

3) 室内微波信号宽带覆盖网络应用

ROF 系统在室内信号无缝覆盖方面有着潜在的应用价值。在机场、大型超市、展览中心、体育场等一些大型建筑物中,需要高质量的无线信号覆盖。当前,多数室内信号覆盖系统选择同轴电缆实现。由于建筑物内障碍物多,无线信号在建筑物内的衰减很大,很难在建筑物内实

现高质量的信号覆盖。应用 ROF 系统是一种有效的解决方法。建筑物内设置中心基站 (central base station, CBS) 和分布式天线 (distributed antenna system, DAS) 系统, 选取合适位置放置 CBS, 用分布在不同位置的 DAS 天线完成射频信号的分布和发送, 从而提高建筑物内的信号覆盖率。CBS 到各 DAS 的信号传输可采用 ROF 系统实现。利用 ROF 系统低损耗、质量轻和易安装等优点, 将会使其在室内信号无缝覆盖中得到广泛应用。

4) 电子支援与电子对抗系统应用

在军事领域, ROF 系统的应用更加广泛, 且表现出极大的优越性。在电子支援与电子对抗等电子战系统中, 传统方案利用同轴电缆实现射频信号传输, 衰减较大, 限制了信号的传输距离, 电子系统的天线与发射机/接收机相距较近, 导致控制中心很容易暴露在敌方的打击目标范围内。采用 ROF 系统, 在保证信号传输质量的同时可以实现控制中心与天线的远距离隔离。即使发射天线被敌方导弹攻击, 控制中心仍然能够正常工作, 使整个电子支援与对抗系统不至于瘫痪。

1.2.2 ROF 光载无线接入

随着无线应用中诸如网页浏览、视频点播、音频点播等业务的日渐流行, 未来我们在使用上述业务时必将遇到网络严重阻塞的情况。能够随时随地为用户提供视频和音频服务的要求必将给目前的远程通信系统带来极大的挑战。而如何快速有效地传送这些多媒体信号主要取决于如何获得低损耗的物理层传输机制。根据网络设备制造商思科公布的市场调查, 在未来的 5 年内, 由于移动视频和移动网络业务的发展, 移动数据消耗量将呈爆炸性增长。思科系统的市场调查表明, 目前移动数据消耗量将以每月 90 000~3 600 000 TB 的速率增长。在未来 5 年中, 平均超增长速率 40%, 累积年增长率超 100%。但是目前传统的微波传输介质在长距离传输时具有很大损耗, 且受到的电磁干扰影响日益严重, 尤其在高频段, 传输损耗和电磁干扰限制了该技术的发展。未来的无线接入技术所需要的是一个宽带、抗干扰的新型传输技术, 使得用户能在可负担的范围内较容易地实现频率复用。

ROF 系统能将射频信号调制在光载波上, 利用光纤的低损耗、高带宽、抗电磁干扰等特性完成基于光网络的网络分布。将 ROF 系统与分布式天线结合就构成了光载无线接入技术。它结合了光纤通信技术与无线通信技术, 适用于不同的调制方式以及不同的载波频率, 为移动用户提供灵活的接入服务。基于光载无线接入技术构建高速宽带接入网, 可为用户提供高速、宽带、灵活、无处不在的接入, 必将成为接入技术未来的发展方向。ROF 系统与光载无线接入的一个成功商用例子是 Andrew 公司的智能光网络系列的光分布式天线系统, 光分布式天线系统提供均衡的无线覆盖, 能够传输频率从 800~2 500 MHz 的各种射频信号。这个系统曾经被成功地应用在 2000 年的悉尼奥运会和 2006 年的德国世界杯足球赛中。

美国、欧盟、日本、澳大利亚等国家的信息研究机构、大学均在光载无线接入技术上投入了巨资进行研究。比较典型的有: 欧盟委员会于 2007 年 1 月 1 日启动第 7 个科技框架计划 (PF7, 2007—2013), 其中的 FUTON 项目中一个主要方向就是光载无线接入技术。目前, 光载无线接入技术正在由低频应用向高频应用发展, 其载波也逐渐由单体制向多体制、多用户过渡。光载无线接入技术的接口标准也正在由 CPRI 接口向 OBSAI 接口和开放的实际应用的标准接口方向发展。其理论模型的研究也由室外信息模型向室内覆盖模型的方向发展。

随着电信行业全业务运营时代的到来, 电信网络运营商需要承载多种通信网络制式; 实现

全部通信信息业务的新一代“统一的驻地网”。驻地接入网分布于用户的驻地区域范围,位于骨干网络之后,决定着运营商的用户数量和业务收入,并在一定程度上决定着运营商运营信息服务的质量和竞争力。新一代驻地接入网技术在支持语音、数据、视频三类业务的同时,还需要增加移动性的支持,来满足新时期复合业务运营商全业务运营的需求。因此需要实现多业务信息的汇集、传输以及分发,利用同一个物理网络完成区域内所有信息业务,彻底改变“一网,一业务”格局,实现“一网,全业务”的新型驻地接入网。

光载无线接入借助于 ROF 系统原理,能够很好地应用于新一代驻地用户信息接入网系统。基于光载无线接入的新型驻地接入网系统能够降低基站的安装复杂性(便于基站扩容)、降低手持终端的功耗,并且该系统能够提供宽带网络通信和实时移动画面传输等,使得用户拥有更大的可用带宽。因此,光载无线接入适用于新型驻地接入网系统的实现,满足宽带化和移动化的发展要求。基于光载无线接入的新型驻地接入网系统主要由业务汇接单元、传输扩展单元和用户接入单元组成,如图 1-7 所示。

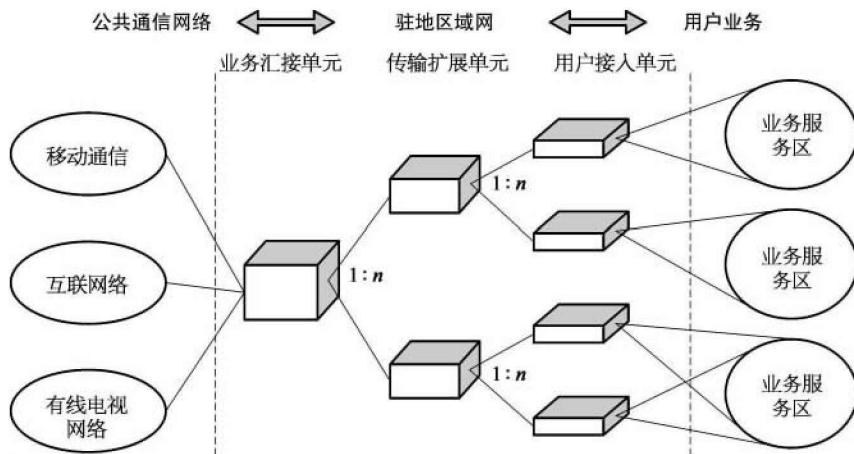


图 1-7 新型驻地接入网系统

业务汇接单元完成多个业务的接收与调配、信源输入功率控制、多信号调制解调以及合路传输;传输扩展单元完成信号分发、功率补偿和长距离传输;用户接入单元完成业务的接入适配与恢复、功率放大和信号的调制解调。光载无线接入网络协议栈通过统一的 ROF 物理承载层,实现对多种类型业务中射频信号分合路传输,为系统提供业务扩展、扩容和灵活组网的便利性。

基于光载无线接入的新型驻地接入网系统由多制式业务信源汇接、光无线通信融合传输以及射频信号恢复三个关键环节组成,其原理如图 1-8 所示。

(1) 多制式业务信源汇接。实现多种移动通信全制式、宽带 IP、有线电视网络集中接入;支持 0~10 dBm 小功率输入;支持多种安装方式,几乎不需要额外机房;可将信息集中存储,提高基站容量及其利用率;节省移动通信基站的功率成本,大大减少容量与覆盖的相关性。

(2) 光无线通信融合传输。采用光纤作为无线信号分布传输的信道传输媒质,利用副载波调制将所有业务信号调制在光载波上传输;能够进行宽带传输,可整合多种业务;光纤线缆施工简单,布线方便。

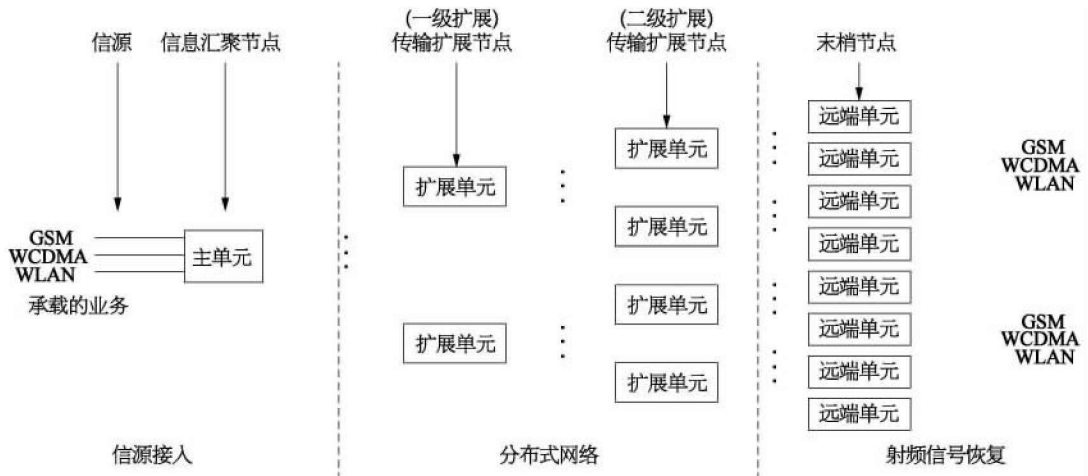


图 1-8 基于光载无线接入技术的新型驻地接入网原理图

(3) 射频信号恢复。支持多业务、多制式覆盖,组网灵活;在光信号送达目标覆盖区域之后,再恢复为原有射频信号,然后根据各被覆盖目标区域大小,采用不同的微小射频功率进行覆盖。

基于光载无线接入技术的驻地接入网系统采用树形网络拓扑实现分层扩展、灵活组网功能。

(1) 业务优势。可承载多制式和全业务服务,涵盖语音、数据、视频以及泛在信息化业务(配套控制设备信息、安全监控、楼宇控制等)。

(2) 网络优势。利用其可扩展结构特性,能够组建不同规模的驻地分布接入系统,工程设计和实施简单快捷。相比同轴馈线,光纤传输损耗很低,可以实现更大范围覆盖和更远距离传输;由于用户接入设备接近用户终端,降低了链路损耗,改善了上行噪声性能,降低了干扰,也降低了空间的电磁波辐射。

(3) 性能优势。系统容量大、能够实现微功率分布式系统;覆盖范围广、扩容方便;信号质量好,不同制式系统间干扰较小;所有网络节点具有等流量特点,可共享信源容量,降低了覆盖与容量的相关性。

(4) 实施优势。规划设计简单,全光缆网络,设备统一标准,相同传输介质,方便工程管理与实施;对工程项目建设所需要的机房、塔位、用电等建设环境的要求低。

可承载全信息业务的驻地接入网的实现对于电信接入网的发展具有重要意义。首先该技术解决运营商多业务运营中的投入问题。基于光载无线接入技术的驻地接入网采用“一网,全业务”的接入网建网模式,能够大幅降低运营商的建网投资;便于运营商提供从三网合一(triple-play)到任意模式(any-play)的业务扩展。能够根据用户的需求,快速灵活开展业务,解决多业务运营中网络建设投入激增,而用户业务增长缓慢的难题。其次,多业务驻地网便于运营商快速开展新业务覆盖,提高建网速度,强化竞争优势;增加新业务时,只需要增加相应的业务远端接入单元。最后,利用该技术还能够创建绿色环保、低电磁干扰、低能耗的全光纤网络;相对于传统的接入方式,实现全网低功率传输,避免了传统的单一网络建网方式,大幅降低能源和资源的消耗。

基于光载无线接入技术的驻地接入网系统可以满足全业务运营商快速部署全业务运营的要求,并便于部署实施扩展业务的战略,是一种非常有前景的新时期驻地接入网的建设技术手段。

1.3 微波光子技术空间应用

微波光子技术可以广泛应用于微波通信、微波遥感和电子侦察等空间信息系统中,实现空间信息的获取、处理、传输及转发。具体而言,微波光子技术主要实现微波光子信号传输、微波光子信号处理、微波光子信号生成三个方面。微波光子信号传输主要实现星间多频段、多格式微波信号、星上宽带微波信号传输以及星上阵列信号传输。微波光子信号处理主要实现微波光子变频、微波光子滤波、微波光子交换转发、微波光子信道化、微波光子模数转换。微波光子信号生成主要为微波光子提供微波本振信号及实现本振信号的馈送。

在空间载荷中采用微波光子技术具有很多技术优势:大的带宽、宽的连通性、灵活的路由能力;器件体积重量小,节省载荷所占空间和质量;结构简单,降低系统复杂度,缩短设计-集成-测试周期;对射频信号传输透明、完全电隔离、电磁兼容、抗电磁干扰等。将光学技术引入到星上载荷,与传统的微波技术相结合,成为未来宽带卫星通信的发展趋势。光子学技术在星上的应用主要有微波信号的光域传输、处理和路由,即星上微波光子技术应用、背板间高速率光纤互联、星内光无线链路等。此外,光学技术在模数转换中快速采样、天线子系统中信号振幅和相位控制、有源天线中光学波束形成网络等方面也具有广泛的应用潜力。

1.3.1 微波光子信号传输

微波光子信号传输技术是最易实现工程应用的技术,目前已在海、陆、空、天等多个领域得到成功应用。具体应用包括空间微波光子宽带通信、星上微波光子宽带信号传输、星上微波光子本振信号传输与分发等多个方面。

1) 空间微波光子宽带通信

微波空间光传输(radio over free space optical, ROFSO)技术是将微波信号调制到光域,通过空间光传输系统传输微波信号。ROFSO系统实现了微波信号和空间光信号之间的转换,可以充分利用微波通信和空间光通信技术的优势,实现两者之间的优势互补。在卫星通信中采用ROFSO技术,建立卫星ROFSO通信系统,可以很好地提高通信系统的数据传输速率、信息处理能力,降低卫星载荷的功耗、体积和重量。

2) 星上微波光子宽带信号传输

随着精度和分辨率的不断提高,遥感载荷需要传输的数据速率越来越高,基于电缆的传统数据传输方式越来越难以实现宽带信号传输,宽带信号的并行传输增加了连接器件的体积、质量、复杂度以及串扰等难题,成为星上载荷小型化和高处理速率的一个限制因素。星上数据模块之间采用微波光子链路,实现宽带宽、低传输损耗、完全电隔离、电磁兼容性好、高速率(每条链路速率 >2 Gb/s)数据传输,大大降低了体积和重量。同时插入可变光路进行灵活的路由选择。

3) 星上微波光子本振信号传输与分发

目前卫星主要采用电缆实现本振信号的分发和馈送。随着微波光子技术的发展,未来