

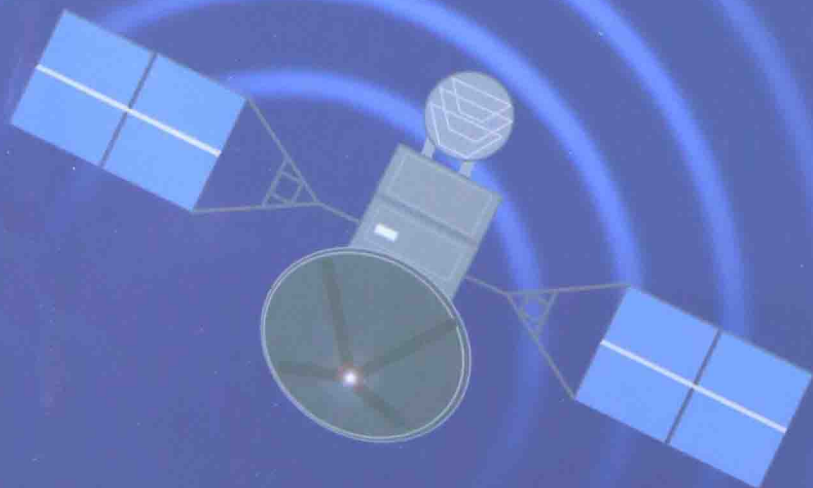


通信与导航系列规划教材

# 卫星微波光子通信系统 原理与技术

Principle and Technology of Satellite Microwave  
Photonic Communication System

◎ 赵尚弘 朱子行 李 轩 李勇军 楚兴春 著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 卫星微波光子通信系统

## 原理与技术

赵尚弘 朱子行 李轩 李勇军 楚兴春 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

微波光子技术融合了微波和激光技术的优点,在光域实现微波信号的产生、传输和处理,具有带宽大、速率高、体积小、重量轻、功耗低,以及高保密性和抗电磁干扰等优势,被认为是构建未来卫星信息系统的理想方案,在预警探测、导航定位、深空探测以及全球通信等军事和民用领域具有广泛的应用前景。

本书内容丰富、新颖,理论讲解与技术实现相结合,是国内首部卫星微波光子通信领域的专著。全书首先介绍了微波光子学的基本理论,并引出了卫星微波光子通信系统的概念,比较了卫星微波光子通信系统与地面光载无线系统、自由空间光无线系统和卫星数字光通信系统的异同;然后重点介绍了卫星微波光子通信系统全光微波信号产生和频率变换、频率测量、调制、偏置点优化及控制、非线性抑制、信号传输与接收等关键技术;最后总结了星上微波光子技术的应用研究进展。

本书可作为空间光通信专业研究生、本科高年级学生的教材,也可供从事空间信息网络以及微波光子技术研究的科研人员 and 高等院校师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

卫星微波光子通信系统原理与技术 / 赵尚弘等著. —北京: 电子工业出版社, 2015. 4  
ISBN 978-7-121-25815-2

I. ①卫… II. ①赵… III. ①卫星通信系统—微波通信系统—研究 IV. ①TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 068858 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 11.5 字数: 325 千字

版 次: 2015 年 4 月第 1 版

印 次: 2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 序

结合星间激光链路和卫星微波链路构建混合链路卫星网络,将是空间信息网络的一个重要发展趋势。在这种激光与微波混合链路组网体系中,面临如何将多频段的微波信号在光学领域处理分发,提高空间信息网络内的信息转发能力。对此问题,近年来发展起来的微波光子技术提供了一个思路——将微波光子技术应用到星上,实现多个频段微波信号调制到光域,可以实现远距离星间传输,大大扩展空间信息网络的信息传输能力。

赵尚弘教授的研究团队多年来一直致力于卫星光通信网络相关研究工作,课题组针对卫星激光链路和微波链路混合组网问题,结合微波光子技术的发展,在多频段微波信号同步调制、非线性效应抑制技术和星间微波光子链路特性等方面做了不少有意义的探索研究。

最近,我拜读了他们的学术著作《卫星微波光子通信系统原理与技术》,书中全面介绍了微波光子的基本理论,构建了卫星微波光子通信的基本框架,同时收集评述了国内外在该领域的一些重要研究进展。虽然从目前来看,星上微波光子技术依然处在起步阶段,很多理论研究和应用有待深入和拓展,该书只是一个阶段性的研究总结。但是,作为开拓性的研究探索,此书应该能够对激发国内同行开展该领域的研究起到积极的推进作用。

本书基础理论详细,研究思路灵活,是一本学术价值较高的专著,很多方法既可以供研究生进入该领域时直接采用,也适合初次进入星上微波光子领域的研究人员和教师参考,希望关注和从事空间信息网络的研究者通过阅读此书有较好的收获,并在此基础上不断创造新的研究成果。



2015年1月

# 前 言

目前,成熟的卫星通信以微波链路为主,但是着眼未来天基信息系统高速、大容量、可靠传输的需求,基于微波链路的卫星通信存在着带宽不足、星上载荷信息处理能力有限、抗干扰能力弱等方面的问题。近年来,基于激光链路的大容量卫星光通信技术和工程试验均得到了迅速发展。激光链路具有大带宽、宽连通性、灵活的路由能力以及有效载荷体积尺寸小等特点,在未来宽带卫星通信发展中具有很好的应用潜力。因此,将激光的大容量特性和微波无处不在的接入特性充分结合,建立微波/激光混合卫星通信系统,将是未来宽带卫星通信的发展趋势。与星上信息电处理技术相比,星上光学技术具有几乎无带宽限制、对任何调制/编码格式透明、电磁兼容、利用光纤传输损耗很小等优点。

结合微波和光子优势的微波光子技术概念最早于 1993 年被提出,近年来迅速发展成为一门新兴的交叉学科。微波光子技术的实质是将射频信号调制到光波上实现射频信号的宽带传输。利用微波光子技术所独具的微波频段光域搬移及微波/光混合技术,将不同频段、不同带宽及不同信号格式的微波信号直接调制到光载波上,可望实现星上微波信号的宽带透明传输,有效降低微波信号基带解调和调制带来的复杂度和工程实现难度,由此实现星上微波链路和激光链路的融合。

作者近年来对星上微波光子技术的基本问题进行了深入研究,重点在星上微波信号的光学调制技术和星间链路特性方面开展了研究工作。目前国内对卫星微波光子通信理论研究不断深入,为了给该领域的读者提供一个较为完整的系统介绍,在研究生教学讲义基础上,通过整理评述国内外研究进展和作者课题组研究成果,完成了本书。全书系统介绍了微波光子学的基本理论,以及卫星微波光子通信系统的内涵和关键技术,希望有助于推动我国未来宽带卫星通信系统的新理论和新技术的发展。

全书共分 11 章,第 1 章介绍了微波光子学基本概念;第 2~6 章介绍了星上微波信号的光学调制技术,包括微波光子卫星通信系统组成、频率变换与测量、光学调制中偏置控制等;第 7 章分析了光学调制中的非线性效应抑制问题;第 8 章介绍了卫星振动对星间微波光子链路的影响;第 9、第 10 两章介绍了星上微波光信号的发送、传输和接收;第 11 章介绍了星上微波光子应用研究进展。

在星上微波光子技术的研穿过程中,课题组与中国空间研究院西安分院的么周石研究员、谭庆贵高级工程师课题组进行了深入合作,联合培养了多名研究生,本书的完成得到了他们的大力帮助。与南京航空航天大学潘时龙教授、西安电子科技大学文爱军教授就微波光子技术应用进行了多次有益讨论;总参 61 所杨千里教授多年来对课题组的研究工作给予很多支持和鼓励;于全院士特为本书作序,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者知识水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请广大读者指正。

作者  
2015 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 微波光子学基本概念</b> .....	1
1.1 微波光子学产生的背景 .....	1
1.2 微波光子学关键技术 .....	1
1.2.1 微波信号光学产生技术 .....	1
1.2.2 微波信号光域变频技术 .....	2
1.2.3 微波信号光调制技术 .....	3
1.2.4 光载微波的检测技术 .....	3
1.2.5 其他技术 .....	3
1.3 微波光子学系统的应用 .....	5
参考文献 .....	6
<b>第 2 章 卫星微波光子通信系统</b> .....	8
2.1 卫星微波光子通信系统结构 .....	8
2.1.1 ATP 子系统 .....	8
2.1.2 通信子系统 .....	10
2.2 星间微波光子链路关键器件 .....	12
2.2.1 激光器 .....	12
2.2.2 电光调制器 .....	14
2.2.3 光放大器 .....	16
2.2.4 光学天线 .....	19
2.2.5 光探测器 .....	20
2.3 星间微波光子通信的优点 .....	21
2.4 卫星微波光子通信系统与其他系统比较 .....	22
2.4.1 与 ROF 系统比较 .....	22
2.4.2 与 ROFSO 系统比较 .....	23
2.4.3 与卫星数字光通信系统比较 .....	23
参考文献 .....	24
<b>第 3 章 卫星微波光子通信系统全光微波本振信号产生及频率变换技术</b> .....	26
3.1 卫星微波光子通信系统全光微波本振信号产生技术 .....	26
3.1.1 基于光注入锁定的全光微波本振信号产生 .....	26
3.1.2 基于光锁相环的全光微波本振信号产生 .....	26
3.1.3 基于外部调制器的全光微波本振信号产生 .....	27
3.1.4 基于双波长激光器的全光微波本振信号产生 .....	40
3.2 卫星微波光子通信系统全光微波频率变换技术 .....	42
3.2.1 基于直接调制激光器的全光微波频率变换 .....	42
3.2.2 基于外部调制器的全光微波频率变换 .....	43

3.2.3	基于光学器件的非线性效应的全光微波频率变换	45
	参考文献	46
<b>第4章</b>	<b>卫星微波光子通信系统频率测量技术</b>	<b>48</b>
4.1	基于微波功率映射关系的测频技术	48
4.1.1	基于光纤光栅和相位调制器测量微波信号频率的方法	48
4.1.2	基于 sagnac 环的微波频率测量方法	51
4.1.3	基于偏振调制器的微波频率测量方法	53
4.2	基于光功率映射关系的测频技术	54
4.2.1	级联两个 MZM 的微波频率测量方法	54
4.2.2	基于 MZI 的光功率检测频率测量方法	56
	参考文献	57
<b>第5章</b>	<b>卫星微波光子通信系统调制技术</b>	<b>59</b>
5.1	调制器基本类型	59
5.2	直接调制	59
5.2.1	半导体激光器(LD)直接调制原理	59
5.2.2	半导体发光二极管(LED)的调制特性	61
5.2.3	半导体光源的模拟调制	61
5.2.4	半导体光源的脉冲编码数字调制	62
5.3	外调制	62
5.3.1	外调制器分类	62
5.3.2	电光调制物理基础	63
5.3.3	电光相位调制器	65
5.3.4	电光强度调制器	68
5.4	偏振调制	76
	参考文献	77
<b>第6章</b>	<b>卫星微波光子通信系统多频段调制的偏置相位优化</b>	<b>78</b>
6.1	调制器直流偏置相位的优化	78
6.1.1	无二阶非线性失真影响情况	79
6.1.2	有二阶非线性失真影响情况	84
6.2	调制器直流偏置相位漂移的抑制	88
6.2.1	基于输入/输出功率比抑制技术	89
6.2.2	基于射频扰动信号谐波比抑制技术	90
6.2.3	基于射频扰动信号混频抑制技术	91
6.3	适用于任意偏置相位的 DE-MZM 自动偏置控制	94
	参考文献	96
<b>第7章</b>	<b>卫星微波光子通信系统调制非线性失真特性</b>	<b>97</b>
7.1	调制非线性与链路失真	97
7.1.1	单路信号输入	97
7.1.2	双音信号输入	99
7.1.3	多路信号输入	101

7.2	调制非线性的抑制 .....	103
7.2.1	基于光边带去除的非线性抑制技术 .....	103
7.2.2	基于非线性抵消的非线性抑制方法 .....	105
7.3	基于线偏振光偏振方向控制的星间微波光子链路 .....	108
7.3.1	链路实现原理 .....	108
7.3.2	链路性能仿真 .....	112
	参考文献 .....	116
<b>第 8 章</b>	<b>卫星振动对星间微波光子链路的影响</b> .....	<b>118</b>
8.1	卫星振动对星间微波光子链路的影响 .....	118
8.1.1	卫星振动对单路输入星间微波光子链路的影响 .....	118
8.1.2	卫星振动对两路输入星间微波光子链路的影响 .....	125
8.2	抑制卫星振动对星间微波光子链路的影响 .....	130
8.2.1	自适应带宽 .....	130
8.2.2	改变光束宽度 .....	132
8.2.3	功率控制 .....	133
8.2.4	通道分集 .....	134
8.2.5	振动隔离 .....	134
8.2.6	自我调节前反馈 .....	134
	参考文献 .....	135
<b>第 9 章</b>	<b>星上微波光信号的发送与传输</b> .....	<b>136</b>
9.1	高斯光束的特性 .....	136
9.2	高斯光束的发送 .....	139
9.3	高斯光束的空间传播 .....	142
9.4	高斯光束的聚焦与准直 .....	142
9.4.1	高斯光束经透镜后参数的变化 .....	142
9.4.2	高斯光束的准直 .....	144
9.5	高斯光束的接收 .....	145
	参考文献 .....	146
<b>第 10 章</b>	<b>星上微波光信号的接收</b> .....	<b>147</b>
10.1	接收检测原理 .....	147
10.1.1	直接探测 .....	147
10.1.2	外差探测 .....	148
10.2	强度调制直接检测技术 .....	150
10.3	相位调制干涉检测技术 .....	151
10.4	相位调制相干检测技术 .....	157
	参考文献 .....	159
<b>第 11 章</b>	<b>星上微波光子应用研究进展</b> .....	<b>160</b>
11.1	微波光子通信 .....	160
11.1.1	数字通信链路 .....	160
11.1.2	模拟通信链路 .....	163



11.2	微波光子信号处理	163
11.2.1	光学微波本振源	163
11.2.2	光学本振分束	164
11.2.3	光域内频率转换	166
11.2.4	光交换	167
11.2.5	波束形成	167
11.2.6	星上微波光子转发器	167
11.3	微波光子传感	169
11.4	卫星内部光无线链路	172
11.5	空间光学器件的质量标准	173
	参考文献	174

# 第 1 章 微波光子学基本概念

本章对微波光子技术的产生背景及主要研究内容和进展进行简要评述,分析微波光子系统的优势和相关应用前景。

## 1.1 微波光子学产生的背景

信息技术的发展促进了微波通信和光纤通信的迅速发展。微波通信能够在任意方向上发射、易于构建和重构,而且能实现与移动和手持设备的互联。微波通信面临的主要问题在于微波传输介质对于高频微波进行长距离传输时产生很大的损耗,从而导致使用频率向高频扩展时受限。此外,电磁辐射对人体安全的影响也越来越受到人们的关注。而光纤通信的特点是体积小、重量轻;超宽带(大于 40THz)且低损耗;可以实现几十 Gbit/s 的信号传输,在波长、频率、空间上可多路合成;易于多路合成和分解及灵活的网络结构;抗电磁干扰,无有害辐射,光纤通信的主要劣势是移动性不够<sup>[1]</sup>。

随着大容量信息传输技术需求的高速发展,光纤技术与微波技术相互融合成为一个重要新方向。从理论上讲,微波技术和光纤技术的理论基础都是电磁波波动理论。在光电器件中,当波长足够小时要考虑波动效应,采用电磁波理论来设计和研究光电器件,如波导型或行波型器件。理论基础的统一,使得微波器件和光电子器件可使用相同材料和技术在同一芯片上集成,这极大促进了两个学科的结合,促进了一门新的交叉学科——微波光子学的诞生<sup>[2],[3]</sup>。

微波光子学概念自从在 1991 年被提出<sup>[4]</sup>以来,其研究内容涉及了与微波技术和光纤技术相关的各个领域<sup>[5~7]</sup>。主要集中在两方面:一是解决传统的光纤通信技术向微波频段移植发展中的问题,包括激光器、光调制器、放大器、探测器和光纤传输链路的研究;二是利用光电子器件解决微波信号的产生和控制问题,主要有光生微波源、微波光子滤波器、光域微波放大器、光致微波电信号的合成和控制等。微波可以提供低成本、可移动无线连接方式,而光纤具备低损耗、宽带连接和抗电磁干扰特性。在光纤中可以实现射频波或更高频段信号的低衰减、无信道间相互干扰的带通传输,与传统的微波传输系统比,具有体积小、重量轻、成本低,损耗小,抗电磁干扰,大带宽,低色散、大容量等优势。微波信号的光处理技术能提供更高的微波频率,克服电信号处理电路中有限的信号取样和控制速度。可实现高速信号处理、宽带取样及并行操作,且相对成本低。

## 1.2 微波光子学关键技术

### 1.2.1 微波信号光学产生技术

低相位噪声和频率调谐微波/毫米波源在雷达、无线通信和软件无线电等领域具有十分广泛的应用。传统上,当微波通信向 30~70GHz 高频段的延伸发展时,对传统微波器件提出了

很大的挑战。此时,利用光学技术产生微波信号便展现出很大的吸引力。利用光学技术产生微波信号通常采用光外差法,即通过频率差等于微波信号频率的两列光波在光电探测器拍频后实现。如图 1.1 所示。假设两列光波可以表示为

$$E_1(t) = E_{01} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \tag{1.1}$$

$$E_2(t) = E_{02} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \tag{1.2}$$

式中: $E_{01}$  和  $E_{02}$  为两列光波幅度; $\omega_1$  和  $\omega_2$  为角频率; $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为初相位。

考虑到光电探测器有限的带宽,探测器输出光电流可以表示为

$$I_{RF} = A \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \tag{1.3}$$

其中  $A = RE_{01} E_{02} / 2$ ,  $R$  为探测器响应度。

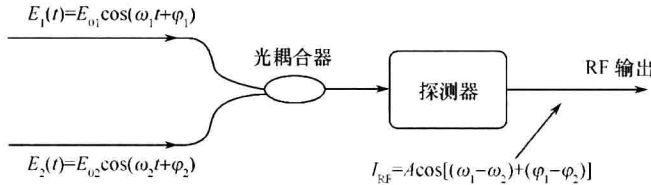


图 1.1 光外差法产生微波信号原理

只要探测器带宽足够大,理论上利用该技术可以产生高达 THz 频率的信号。然而,由于两个自由运转的激光器输出的两列光波相位不是相关的,产生的微波信号相位噪声很大。近年来,人们提出了很多利用两列相位锁定的光波来产生低相位噪声微波信号的方法,主要可以分为 4 类:①光注入锁定;②光锁相环(OPLL);③外调制和④双波长激光器。这些技术将会在第 3 章具体介绍。

### 1.2.2 微波信号光域变频技术

微波频率变换,又称为混频,是许多信息系统的发射机和接收机的基本功能。在通信、雷达、遥感等应用中,需要把接收到的信号降到中低频来进行处理,发射时则需要将中低频信号变频为射频信号。在传统的微波/射频电路中,微波频率的上变频和下变频是通过使用二极管混频器和有源晶体管混频器来实现的,但是要得到较宽的动态范围时需要很高功率的器件,而用光子学的方法来实现微波频率的变换则是另外一种选择。

利用光子技术处理微波信号有其与生俱来的优点,比如非常大的带宽、不受电磁干扰的影响等,而且可以在处理信号的同时实现微波信号的长距离传输。而电光调制器、探测器、半导体光放大器等器件的非线性效应,更是为光子微波频率变换提供了非常丰富的手段。

对于使用很高频率微波或者毫米波の場合,如在光纤无线(ROF)系统中,基站与中心控制站之间通过光纤链路传送信号。基站探测到的微波信号经过下变频到较低的频率后,再调制到光载波上通过光纤传输到中心控制站;中心控制站产生的光信号传输到基站后可能需要上变频到更高频率的微波信号,以提供更高的传输速率和带宽。采用微波光子频率变换技术可以不使用高速的电光调制器和电光探测器,因此可以大大降低系统成本,并能有效地简化基站的设计。

纵观微波光子频率变换的研究历史,实现微波光子频率变换的方案有很多种,从总体上来说有两大类:基于调制的方法和基于光学器件的非线性效应。其中基于调制的方法包括直接调制激光器方法和利用外部调制器方法;光子学中的非线性器件主要有半导体光放大器

(SOA),电吸收调制器(EAM)以及非线性光纤等。实现微波光子频率变换所用到的非线性光学效应主要包括:基于 SOA 的交叉增益调制、交叉相位调制,基于 EAM 的交叉吸收调制效应,以及基于非线性光纤的非线性偏振旋转和布里渊散射效应等。这些技术将会在第 4 章具体介绍。

### 1.2.3 微波信号光调制技术

若将激光用作信息传输的载体,就必须解决如何将微波信号加载到激光的问题,这一过程称为调制,完成这一过程的装置称为调制器。其中激光称为载波,起控制作用的微波信号称为调制信号。

根据调制器与激光器的关系,实现微波信号光调制的方法可以分为直接调制和外调制两种。直接调制技术简单,它通过改变半导体激光器注入电流将微波信号直接加载到光波上。直接调制带宽受到激光器谐振频率的限制。采用量子结构能够减小半导体激光器的阈值电流,增加微分增益,提高带宽。为了进一步增加带宽,需要减小光子寿命和增益压缩系数。但是由于增益压缩系数的限制,在室温下直接调制带宽很难超过 30GHz。实际系统中应用更多的是外调制技术。外调制是指在激光器后放置调制器,用调制信号改变调制器的物理性能,当激光通过调制器时,使光波的某个参数受到调制。外调制器的调制频率可以高达上百 GHz,而且外部调制方式还可以避免直接调制激光器时出现的啁啾效应。微波信号光调制按照调制的性质可以分为光强度调制技术、光相位/频率调制技术和光偏振调制技术。这些技术将会在第 5 章具体介绍。

### 1.2.4 光载微波的检测技术

光载微波的检测就是从光信号中检测出微波信号,即实现光/电转换。PIN 光电二极管常用作微波光子链路的光检测器,这种光检测器已经普遍用在传统的数字光纤通信系统中。而另外一种经常用于数字光纤通信系统中的光检测器——雪崩光电二极管(APD)则很少用在微波光子链路中,一方面 APD 的饱和输出功率很小,难以输出足够的微波信号功率,另一方面 APD 需要在较高的偏置电压下工作,不利于微波光子接收设备的简化。

光电二极管是一种平方律器件,数字光纤通信系统中利用了光电二极管可以检测光信号强度的特性,而在微波光子链路中则更多的利用了光载微波信号各频率分量可以在光电二极管上发生差拍的特性。对于工作频率在微波/毫米波段的微波光子链路而言,光检测器需要具备的特性与传统数字光纤通信系统不同,它应当同时具备两种特性:一是高速率,目前,微波光子技术的工作频率已扩展到百 GHz 以上,作为检测 RF 信号的关键器件,光检测器必须具备足够高的响应速度。二是高输出电流,即高的饱和工作点,因为要使检测后的微波信号发射到数百甚至数千米以外,就必须达到一定的发射功率,光检测器输出功率太小时,就需要借助高功率的 RF 放大器以及高增益的天线来弥补发射信号功率上的不足,这无疑会增加微波光子接收设备的复杂程度。而且高频电子器件比较昂贵,会导致系统建设成本急剧增加。根据调制方式的不同,光载微波的检测技术可以分为强度调制直接检测技术、相位调制干涉检测技术和相位调制相干检测技术等。这些检测技术将会在第 10 章具体介绍。

### 1.2.5 其他技术

在微波光子系统中,微波信号的光处理是重要的应用方向,它能够提供更高频率的微波,

克服电信号处理电路中有限精度的信号取样和控制速度,实现宽带取样和并行处理,成本相对较低。其主要研究方向有微波光子滤波、光控 A/D 转换、光子辅助移相和光子频率测量等技术。

微波光子滤波技术就是将输入的射频(RF)信号通过调制器调制到光信号上,RF 信号的处理在光域进行,最后通过光接收器输出滤波后的微波信号。采用这种方法的优点是:低损耗、高带宽、不受电磁干扰、重量轻和支持高采样频率,使用波分复用技术还提供了空间和波长并行处理的可行性。目前该领域的研究集中在设计新型滤波器结构以实现 Q 值更高的频率响应、负抽头系数、可调性、可重构和更大的动态范围等。传统的方法有两种:第一种方法是用电差分的结构,早在 1995 年便实现了此种结构,但此种方法可调性和可重构性很差,而且受电器件带宽限制;第二种方法是利用复杂的光电器件实现全系数的滤波器,但此种方法成本很高。最近,很多新型低成本的结构被报导用来实现具有负系数的微波光子滤波器。其中利用偏振态和外调制器的方法最有吸引力。另一方面,在 ROF 系统中,微波光子滤波功能和其他信号处理功能的结合将会大大降低系统成本和加强功能集中化。

在某些模拟系统如雷达和宽带通信系统中,采用数字信号处理方法具有更好性能和快速重构性。电域中模数转换器的弱点随频率的升高逐渐明显,原因在于 CMOS 数字转换器受采样时钟抖动、采样保持电路稳定时间、比较器的处理速度等因素的限制。数字信号处理中可用的 100GHz 抽样的模数转换器很难实现。微波光子学中光控 A/D 转换提出的方法称为光学时间拉伸,抽样频率可达 480GHz,并有 96GHz 的带宽。光学时间拉伸的基本原理是利用光子处理过程减慢电信号速度以改善电域中的模数转换器。光处理过程有步骤:波长-时间转换、波长域处理、波长-时间映射。转换后的慢速电信号可用常规模数转换器(A/D)进行变换。

光子辅助移相是将微波信号加载进光路后在光器件中利用光学技术手段改变相位的方法。光子辅助移相具有带宽相比射频移相高,可调谐性好等诸多优点在相控阵和智能雷达的应用中引起广泛关注。目前已经报道的可用于光子辅助移相的技术主要有:外差混频技术,矢量和技术和非线性效应。使用外差混频的移相器主体部分采用几个调制器组合而成,一部分实现频率调谐功能,另一部分实现相位调谐功能。使用非线性效应的移相器依赖于强光作用下显现的非线性光学现象,如偏振敏感效应,交叉相位调制效应,慢光效应等实现移相功能。基于矢量和的微波光子移相器相较另两种技术而言具有原理结构相对简单,集成性更好以及实验要求较低,容易实现的优点。

在现代电子战环境中,雷达信号形式多种多样并且总是交叠出现,雷达辐射源频带覆盖范围已经扩展到 0.01~40GHz,并且仍有扩大的趋势,给侦察系统完成分析和识别任务增加了极大的难度。传统的雷达瞬时测频系统已经不能满足未来战争的需要。采用电子学方法实现瞬时测频,受到电子器件较窄的宽带瓶颈限制。将微波信号引入光域进行处理即光子频率测量技术是解决以上问题的很有前景的研究方向,利用微波光子技术实现微波信号瞬时测频,能克服电子瓶颈,提供一个宽频带、低损耗、抗干扰、系统小型便携的解决方案,适应复杂的电磁环境,有很好的应用前景。利用微波光子技术实现微波信号瞬时测频有两种方法:一种方法是将微波信号调制到光载波上,通过一定的光路结构,进行信号处理得到一个只与待测频率有关的幅度比较函数,进而获得待测微波信号频率;另一种方法是采用基于异步光取样的频率空间压缩法,对微波信号异步取样,分析取样数据得到微波信号频率。

### 1.3 微波光子学系统的应用

最早的微波光子学应用系统是 20 世纪 70 年代末,在位于美国洛杉矶北面莫哈韦沙漠中的“深空网络”。“深空网络”是一个分布在数十千米范围内的由 10 多个大型碟形天线组成的集群,其中最大天线的直径达 70m。这些天线之间建立了一个光纤传输系统以传递 1.4GHz 超稳定微波参考信号。所有天线单元与这一频率同步,利用相控阵的概念使它们工作得像一个巨大的天线一样,从而能够与外太空的空间飞船保持通信和跟踪。其后在 20 世纪 90 年代,借助微波光子学技术的混合同轴电缆-光纤 CATV 系统也取得了商业上的成功。

近年来微波光子学的重要应用目标是利用光纤进行无线通信的微波载波信号的传输。即研究光纤内射频传输系统——光载无线(ROF)通信系统。ROF 结合了微波和光纤通信的优势,使得微波在光纤中实现了低损耗传输。ROF 可用于实现中心局与各个微蜂窝天线之间的信号传送和分配。其优点在于可将复杂的微波处理单元放置于中心局,而基站部分仅只有光电转换单元和微波发射天线两部分,基站结构简单,可大大降低成本,有利于提高频率复用度和蜂窝密度。ROF 技术对于频率和调制格式完全透明,频率和调制格式变化时不需要改变基站,只需对中心站进行升级,非常有利于无线通信网络的升级换代。

军事方面的应用是微波光子学的重大研究领域。它在相控阵雷达、雷达天线光纤拉远系统等应用中有明显的优点。如光控微波波束形成网络,利用光控实时时延器件以馈线网络分布结构对多信道微波信号进行功率分配、移相、功率合成等处理,实现对微波信号空间分布的控制。光控宽带相控阵雷达具有扫描速度快,分辨率高,抗干扰能力强,能大幅度减小体积和重量,十分适用于机载、舰载雷达系统。微波光子技术在通信中的应用是光控智能天线。智能天线是一种多天线技术,采用天线阵列形成可控的波束,指向并随时跟踪用户。它具有增加通信容量和速率、减少电磁干扰、减少手机和基站发射功率,并具有定位功能的优点;能减少多径衰落影响,获得更多的用户数或更高的数据率。

微波光子学的研究成果也广泛应用到智能交通、高速公路交通通信系统和超高速铁路通信系统中。基于 ROF 的交通通信系统能够支持快速的交接管理和动态带宽分配,在移动通信、车辆通信领域具有强大的竞争力。

将激光的大容量特性和微波无处不在的接入特性充分结合,建立微波/激光混合卫星通信系统,将是未来宽带卫星通信的发展趋势,这也为微波光子技术在星上的应用提出了迫切的需求。

ESA 在 SAT-NLIGHT 计划中最早提出了基于微波光子技术的卫星转发器概念,将上述星上微波光子技术各功能模块有效结合起来。基于微波光子技术的星上转发器可以实现天线接入信道的交叉连接和频带互换。与传统的微波载荷相比,微波光子载荷可以在完成相同功能的基础上节省大量体积和空间,还可以进行连接容量升级(至数十波束),其优势还体现在对射频信号传输透明、完全电隔离、电磁兼容、抗电磁干扰、设计—集成周期短等。波分复用(WDM)技术也可以应用于上述载荷中,进一步提高灵活的交叉连接能力,使载荷通信容量和性能更优于传统微波载荷。ESA 设计了光—微波可重构交叉互连转发器概念演示验证系统,用来评估微波光子转发器性能。

在数字载荷中,随着数字处理器处理能力的提高,PCB 之间的连接器件面临着体积、质量、复杂度、可靠性以及串扰等技术瓶颈,成为星上载荷小型化和高处理速率的一个限制因素。

星上载荷 PCB 之间的连接用光纤实现,可带来宽带宽、低传输损耗、高密度互连、完全电隔离、电磁兼容、高吞吐量(Tbit)高速率(每条链路速率>1Gbps)数据传输、节省体积、背板易于标准化以及缩短设计—集成—测试周期等优势。CNES 和 Alcatel Space 进行了背板间光学互联实验,实验通过一个数字透明处理器(DTP)来测试光学互连部件性能。光发射和接收模块之间用 12 根速率可达 2.5Gbps 的光纤进行连接。可变光路用来进行背板之间的信号路由,光纤与多信道发射器和接收器的连接采用标准 MT 卡套光纤跳线连接器。平均光连接损耗为 0.25dB。可变光路的插入并没有引起传输性能恶化,BER 没有受到影响。实验测得 BER 值低于  $10^{-14}$ 。

卫星上数据处理单元具有多种类型的数据总线,占据了大量空间,且自身重量较大。为了实现设备和载荷的小型化,减轻载荷重量,需要在保证数据传输可靠性前提下,尽量减少星上线束数量。微波光子技术可以很好地满足上述要求。星上微波光子链路(OWLS)最早由法国 TAS 于 1991 年提出,随后该方案被各国研究机构采纳。2003 年,ESA 在 GSP 项目中使用 OWLS,实现了 80 路模拟信号和 49 路控制信号的光无线传输。2007 年,ESA 的 TRP 项目中又一次对 OWLS 进行了实验,实验在“Venus Express”上进行,可以完全代表 OWLS 在飞行器上的应用;卫星轨道上 OWLS 实验最早在小卫星 NANOSAT-01 上进行,该卫星由西班牙国家航宇技术研究所(INTA)研制,2004 年发射升空,该实验持续时间 4 年;2007 年 9 月 FOTON-M3 卫星发射,ESA 在卫星内部进行了 OWLS 实验,实验持续 2 周;2010 年 INTA 发射了 OPTOS 卫星,该卫星上所有器件之间的数据传输都由光无线链路来实现。

## 参 考 文 献

- [1] 周波,张汉一,郑小平,陈锐. 微波光子学发展动态[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 81-84.
- [2] 谢世钟,陈明华,陈宏伟. 微波光子学研究的进展[J]. 中兴通讯技术, 2009, 15(3): 6-10.
- [3] 李海鸥,李思敏,陈明,陈辉. 微波光子技术的研究进展[J]. 光通信技术, 2011, (8): 24-28.
- [4] D. Jäger. Traveling-Wave Optoelectronic Devices for Microwave and Optical Applications[C]. Proc. of Progress in Electromagnetic Research Symposium, 1991, 327-329.
- [5] Jianping Yao. Microwave Photonics[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [6] D. Jäger. Microwave Photonics in Optical Information Technology[M]. S. D. Smith and R. F. Neale [Eds.], Springer Press, 1993, 328-333.
- [7] J. Capmany, D. Novak. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics. 2007, (6): 319-330.
- [8] Zihang Zhu, Shanghong Zhao, Qinggui Tan, Wei Jiang, Yongjun Li, Xuan Li, A Linearized Optical Single-Sideband Modulation Analog Microwave Photonic Link Using Dual Parallel Interferometers[J]. IEEE photonics journal, 2013, 5(5): 5501712-5501725.
- [9] Zihang Zhu, Shanghong Zhao, Yongjun Li, Xingchun Chu, Xiang Wang, Guhao Zhao. A Radio-over-Fiber system with frequency 12-tupling optical millimeter-wave generation to overcome chromatic dispersion[J]. IEEE journal of quantum electronics, 2013, 49(11): 919-922.
- [10] Zihang Zhu, Shanghong Zhao, Zhoushi Yao, Qinggui Tan, Yongjun Li, Xingchun Chu, Lei Shi, Xi Zhang. Optical millimeter-wave signal generation by frequency quadrupling using one dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. Optics communications, 2012, 285(13-14): 3021-3026.
- [11] Zihang Zhu, Shanghong Zhao, Zhoushi Yao, Qinggui Tan, Yongjun Li, Xingchun Chu, Lei Shi, Rui Hou, A novel OCS millimeter-wave generation scheme with data carried only by one sideband and

- wavelength reuse for uplink connection[J]. *Optics&Laser Technology*, 2012, 44(8): 2366-2370.
- [12] Shanghong Zhao, Zihang Zhu, Yongjun Li, Xingchun Chu, Xuan Li, Optical millimeter-wave generation with modified frequency quadrupling scheme[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 116109-1-116109-7.
- [13] 朱子行, 赵尚弘, 么周石, 谭庆贵, 李勇军, 楚兴春, 赵卫虎, 王翔, 赵顾颢. 一种改进的载波抑制调制光毫米波信号产生方案[J]. *光电子激光*, 2012, 23(4): 681-686.
- [14] ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, YAO Zhou-shi, TAN Qing-gui, LI Yong-jun, dong Yi, ZHAO Wei-hu. Influence of phase shift and beams-splitted ratio on 80GHz optical mm-wave generation, *optoelectronics letters*[J]. 2012, 8(4): 0301-0306.
- [15] 朱子行, 赵尚弘, 么周石, 谭庆贵, 李勇军, 董毅, 赵卫虎. 相位偏移和分束比对八倍频光毫米波产生的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, 32(8): 52-57.
- [16] 朱子行, 赵尚弘, 张辉, 李勇军, 楚兴春, 侯睿, 王翔, 赵顾颢. 双音调制星间微波光子链路信号噪声失真比优化[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 0482-0486.
- [17] ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, YAO Zhou-shi, TAN Qing-gui, LI Yong-jun, CHU Xing-chun, WANG Xiang, ZHAO Gu-hao. Nonlinearity Modelling of On-board Microwave Photonics System Using Mach-Zehnder Modulator[J]. *optoelectronics letters*, 2012, 8(6): 0441-0446.
- [18] 赵尚弘, 李勇军, 朱子行, 李轩. 星上微波光子技术应用研究进展[J]. *空间电子技术*, 2012, (4): 14-27.
- [19] 徐坤, 李建强. 面向宽带无线接入的光载无线系统[M]. 北京: 电子工业出版社. 2005.



## 第 2 章 卫星微波光子通信系统

卫星微波光子通信系统包括星内微波信号的光学处理和星间微波信号的激光通信链路，本章主要介绍卫星微波光子通信系统的基本构成。

### 2.1 卫星微波光子通信系统结构

在卫星微波光子通信系统中，星上的信号调制过程是对微波信号直接进行模拟电光调制，这是与传统星间数字信号光通信系统的本质区别。但是，卫星微波光子通信系统与一般的卫星光通信系统组成相同，主要包括通信子系统(通信链路)和空间光束的捕获、跟踪和瞄准(acquisition, tracking and pointing, ATP)子系统。图 2.1 所示为一个采用外调制方式的卫星微波光子通信系统。

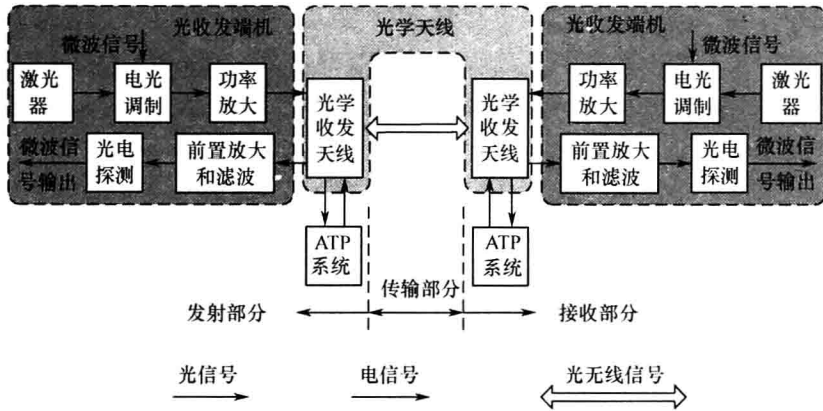


图 2.1 卫星微波光子通信系统框图

#### 2.1.1 ATP 子系统

与卫星光通信系统一样，卫星微波光子通信系统进行信号传输之前，首先需要建立星间光链路，确保接收端能够高效接收来自发射端的光功率。要实现这一功能，就需要用到星间光通信的重要系统——ATP 系统，其主要作用是实现发射和接收天线之间的瞄准、捕获和跟踪，建立有效的星间光链路以实现微波光信号的星间传输，同时克服卫星平台的自身扰动，保持跟踪状态，保证光链路不受外界环境干扰。ATP 系统性能和跟踪精度对通信的成功与否有着至关重要的影响，是实现空间光通信需要首先突破和解决的关键技术。

##### 1. ATP 系统结构

卫星光通信中的 ATP 系统一般采用复合控制系统结构，它可分为以下几个部分：粗瞄准机构、精瞄准机构、预瞄准机构、捕获及跟踪传感器、控制及传感器电子学系统，如图 2.2 所示。ATP 中的瞄准控制器可利用当前的高速、通用的数字信号处理(DSP)芯片(如 TMS320C40)，作为专用处理器来完成。