

微波光子电子战技术 原理与应用

田中成 靳学明 朱玉鹏 编著



科学出版社

微波光子电子战技术原理与应用

田中成 靳学明 朱玉鹏 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以微波光子学原理为基础,系统地阐述了微波光子电子战技术基本原理、实现方法和有关该技术的最新研究成果,并分析了该技术应用于微波光子雷达对抗系统的性能,比较全面地反映了当前微波光子电子战技术原理与应用的最新研究状况。全书共六章,包括绪论、宽带光控阵列技术、宽带光控阵列电子战系统原理、微波光子雷达对抗系统、微波光子雷达对抗系统信号处理技术、微波光子雷达对抗未来发展。

本书可作为高等院校通信与电子工程及相关专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供从事雷达和电子对抗专业的工程技术人员自学或研究参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波光子电子战技术原理与应用/田中成,靳学明,朱玉鹏编著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-056757-4

I. ①微… II. ①田… ②靳… ③朱… III. ①电子对抗—研究 IV. ①E866

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 047896 号

责任编辑:潘斯斯/责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:302 000

定价:108.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着现代电子战的激烈对抗和雷达对抗技术的迅猛发展,微波光子电子战技术在现代雷达应用和未来的雷达发展中的优势受到越来越多的重视。迫切的军事应用需求极大地推动了该技术及其相关领域的发展。微波光子电子战技术的相关理论和方法日趋系统和成熟。随着电磁环境日益密集、复杂和多变,新理论、新方法也不断涌现,正处于蓬勃发展之中。微波光子电子战系统信号处理方法和军事应用背景很强,相关研究和消息保密十分严格,要想完整、系统与全面地阐述该领域的丰富知识和应用以及反映其最新研究成果,难度很大。但高等院校、科研院所及武器装备生产部门迫切需要一本比较系统地阐述微波光子电子战信息处理理论和技术的著作。为此,我们全面总结了当前微波光子电子战技术原理与应用的相关研究成果,结合我们多年来的理论研究与应用实践,写成此书,相信它能对从事雷达和电子对抗与应用领域的科技工作者及高等院校师生有所帮助。

本书以微波光子学原理为基础,全面阐述了宽带光控阵列电子战系统的基本原理和微波光子雷达对抗系统及其信号处理技术,既注重对微波光子电子战技术基本概念和理论的叙述,又注重介绍其实现方法。全书共六章,其主要内容概括如下。

第1章为绪论,主要介绍光电子技术、微波光子学的概念、国内外微波光子学技术的最新发展动态及其若干应用领域情况,重点介绍光电子技术在光控阵列、电子战系统中的应用。

第2章为宽带光控阵列技术,首先介绍传统相控阵原理及其存在的问题,然后阐述光控阵列的原理及其优势。其中重点内容为建立光控相控线型阵列的数学模型,理论分析光控阵列的瞬时工作带宽特性,提出光控阵列设计中需重点关注的几个问题。这种基于光学手段的宽带多波束形成技术充分发挥了光在宽带、高速、并行和小巧等方面的技术特点,可以很好地解决宽带信号波束形成中波束指向随频率偏斜的问题,实现大带宽、高灵敏度、大空域覆盖范围的信号接收处理能力。

第3章为宽带光控阵列电子战系统原理,主要介绍光控阵列电子战系统的组成,并对系统的各部分作了详细阐述。在综合分析第2章所介绍的各种技术方案基础上,提出了一种基于可变光纤延时线的宽带光控多波束网络系统,用以实现电子战的侦察和干扰功能。

第4章为微波光子雷达对抗系统,主要研究微波光子雷达对抗系统相关的宽带微波光子链路、光学多波束网络实现技术、光学多通道幅相精确控制技术以及基于光学多波束发射系统性能试验等方面的内容。对于宽带微波光子链路,选用了低噪声激光源、电光调制器及光电探测器等器件搭建了微波光子学链路,并重点研究了其优化设计理论与方法;光学多波束网络实现技术作为光控阵列系统的核心,我们重点研究了多种实现方法及比较。为了验证基于光学多波束发射系统原理的功能,我们构建了发射光学多波束

原理样机，完成了性能测试。

第 5 章为微波光子雷达对抗系统信号处理技术，从快速信号截获、复杂信号分选和精确测向等几个方面，研究基于宽带多波束架构的数字信号处理技术，以期为构建工程化、实用化的微波光子学电子战系统找到一些解决途径。基于超宽带高灵敏度实时截获引导技术，介绍了实时信号检测算法及硬件实现方法。基于宽带光控阵列系统，提出了基于时频空联合处理的信号分选处理框架。该框架包括如下几个模块：短时间间隔快速处理模块、中时间间隔处理模块、长时间间隔处理模块、去交错脉冲串存储器、分选综合模块、任务数据模块和辐射源数据库模块。

第 6 章为微波光子雷达对抗未来发展，主要介绍在未来宽带光控阵列需要突破的一些关键性、支撑性的技术或重要发展方向。这些关键技术和方向包括微波光子瞬时测频技术、光子信道化技术、对抗资源调度技术等。一旦在这些技术或方向取得突破，宽带光控阵列将大放异彩。

本书内容是在田中成及其团队经过多年探索研究和试验实践的基础上总结归纳出来的，西安电子科技大学刘聪峰教授对全书的结构及内容提出了宝贵的建议，在试验研究和书稿撰写方面，中国电子科技集团公司第二十九、第三十八等研究所提供了很多帮助，科学出版社潘斯斯在图书编辑方面付出了辛勤劳动，在此一并表示感谢。

由于电子战的理论研究和技術更新极为迅速，加上作者水平有限，书中难免存在不足之处，希望广大读者批评指正。

田中成

2018 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微波光子学的概念内涵	1
1.2 微波光子学关键技术研究进展	2
1.2.1 微波信号的光学生成技术	2
1.2.2 光学模数转换技术	3
1.2.3 微波光子学信号处理技术	5
1.2.4 微波光子学链路技术	9
1.3 微波光子学的主要应用方向	11
1.3.1 雷达领域	12
1.3.2 通信领域	20
1.3.3 电子战领域	22
1.3.4 其他领域	24
第 2 章 宽带光控阵列技术	27
2.1 相控阵原理与性能分析	27
2.1.1 相控阵基本原理	28
2.1.2 相控阵带宽特性	29
2.1.3 相控阵的几个主要问题	31
2.2 光控阵列原理	33
2.2.1 光控阵列基本原理	33
2.2.2 光控阵列的几个主要问题	35
第 3 章 宽带光控阵列电子战系统原理	38
3.1 电子战系统基本组成	38
3.2 光控阵列电子战系统架构	38
3.3 光控阵列电子战系统组成	40
3.3.1 光学前端通道	40
3.3.2 信号分配网络	41
3.3.3 延时加权网络	42
3.3.4 幅度加权网络	43
3.3.5 网络校正单元	45
3.3.6 网络控制单元	47
3.3.7 超高速信号处理接收机	47
第 4 章 微波光子雷达对抗系统	49
4.1 宽带微波光子学链路	49

4.1.1	微波光子学链路基本构成	50
4.1.2	色散延时网络原理	52
4.1.3	长度延时网络原理	52
4.1.4	几个主要性能指标	53
4.1.5	微波光子学链路优化设计	68
4.1.6	微波光子学链路测量与分析	77
4.1.7	应用前景	89
4.2	光学多波束网络实现技术	90
4.2.1	电信号的光学合成机理	91
4.2.2	光学波束形成网络的宽带特性	92
4.2.3	几种光学多波束网络的实现方法及比较	93
4.2.4	综合分析	102
4.3	光学多通道幅相精确控制技术	103
4.3.1	延时精度对波束形成性能的影响分析	103
4.3.2	光学多波束网络的延时容差分析	105
4.3.3	提高延时精度的技术途径	107
4.4	基于光学多波束发射系统性能试验	110
4.4.1	测试系统组成	110
4.4.2	光学发射波束形成试验	111
4.4.3	同频多波束试验	114
4.4.4	异频多波束试验	115
第 5 章	微波光子雷达对抗系统信号处理技术	125
5.1	实时信号检测	125
5.1.1	实时信号检测算法	125
5.1.2	实时截获算法的硬件实现	129
5.2	基于时空频联合的信号分选	131
5.2.1	信号分选的任务及面临的困难	131
5.2.2	信号分选研究现状	132
5.2.3	宽带光控阵列中的信号分选	134
5.2.4	总结与展望	160
5.3	基于光控多波束精确测向	161
5.3.1	改进的多波束比幅方法	162
5.3.2	测向精度影响因素分析	164
第 6 章	微波光子雷达对抗未来发展	169
6.1	全光模数转换技术	169
6.1.1	光学模数转换	169
6.1.2	光电混合 ADC	170
6.1.3	全光模数转换	172

6.1.4	总结与讨论	176
6.2	微波光子瞬时测频技术	178
6.2.1	基于色散介质的频率测量方案	178
6.2.2	基于干涉器件的测频方式	181
6.2.3	基于频率-光功率映射的测频研究	182
6.2.4	多信号频率测频方案	183
6.2.5	基于光频梳和波分复用的信道化测频方案	184
6.2.6	总结与讨论	185
6.3	光子信道化技术	186
6.3.1	微波光子信道化原理	187
6.3.2	信道化接收机的关键技术指标实现	189
6.3.3	总结与讨论	191
6.4	自适应技术	192
6.4.1	自适应技术发展历程	192
6.4.2	全自适应雷达	194
6.4.3	机器学习	195
6.5	对抗资源调度技术	197
6.5.1	小规模分配决策	197
6.5.2	大规模分配决策	199
6.5.3	多任务整合	201
	参考文献	203

第1章 绪论

本章主要介绍光电子技术、微波光子学的概念内涵、国内外微波光子学技术的最新发展动态及其若干应用领域情况，重点介绍光电子技术在光控阵列、电子战系统中的应用情况。

1.1 微波光子学的概念内涵

微波光子学从一定意义上讲是光纤技术与微波技术融合发展的一个重要方向和领域，主要研究采用光电器件和光电系统处理微波信号，实现微波/光调制解调、微波信号光域传输和处理等功能。微波光子技术是伴随着半导体激光器、集成光学、光纤波导光学和微波单片集成电路的发展而产生的一种新兴技术，是微波技术和光子技术结合的产物，它在微波信号的产生、传输和处理等方面具有潜在的应用前景。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。

微波光子学概念最早于1993年被提出。其内容涉及与微波技术和光纤技术相关的各个领域，主要集中在两方面：一是解决利用传统的光纤通信技术向微波频段发展中的问题，包括激光器、电光调制器、光纤放大器、光电探测器以及光纤传输链路的研究；二是利用光子器件和光路拓扑结构解决微波信号的产生和处理问题，主要有光电振荡器、微波光子滤波器、光域微波放大器、微波光子变频器、微波光子移相器、微波光子延时器、高速微波光子模数/数模转换等。微波光子器件和系统具有高速、超宽带、低损耗等显著优点，可以很好地克服传统微波系统中的速率和带宽瓶颈，有着广泛的应用前景。

图1-1是一个基本的微波光子链路结构框图。在输入端，模拟微波输入信号通过电光转换被加载到光载波上，被调制的光载波经过光传输介质被传输到接收端，在接收端经过光电转换后得到微波输出信号。与传统的微波系统相比，微波光子系统具备更大的带宽、更低的损耗、更轻的重量，且抗电磁干扰，这使得它可以有效解决电子瓶颈的问题，从而使得很多使用传统微波系统难以实现的功能都可以利用微波光子系统来实现。



图 1-1 微波光子学基本链路

当前，微波光子技术作为一门新兴技术，在理论、器件、系统和应用等众多层面都处于快速发展期。但从目前发展状况来看，微波光子链路和延时网络还存在如下几个亟须解决的问题。

(1) 微波光子链路的损耗大、噪声系数大。

(2) 需要快速可调的延时网络架构, 光学器件调谐起来通常都比较困难, 成本也高。

(3) 光学或光电器件的一致性较差。光学器件的加工精度通常都在纳米量级, 即使是同一批次的器件, 有时也存在较大差异。

(4) 光学系统的环境适应性不强。光学器件受环境(如温度、振动)影响很大, 温度会影响光学材料的折射率, 而振动会改变光波偏振态。通常很多光学器件只能工作在 0°C 以上、非振动的工作状态。

(5) 器件集成度低, 集成困难。现有的光学器件大多是以通信为目的的基于光纤的分立器件, 由众多器件组成的系统会存在大量的光纤尾纤, 使布线困难, 而且会增加额外的插入损耗。

1.2 微波光子学关键技术研究进展

1.2.1 微波信号的光学生成技术

微波信号的光学生成技术主要包括直接强度调制、光外差调制和光外调制。

直接强度调制是最简单、最直接的光生毫米波技术。数据信号首先与射频信号混频, 然后与直流偏置电压一起驱动直接强度调制激光器产生携带数据的双边带信号, 通过驱动电流的变化来改变输出的光载波功率, 实现光信号的强度调制, 从而将数据信息间接地加载到光载波上。

光外差调制产生毫米波的方法是传输两个频率差等于所需要的毫米波频率的窄线宽光波, 其中之一携带了需要传输信息的基带数据。光外差调制通过拍频可产生微波信号, 且产生微波信号的频率和相位不仅由两束光的频率差决定, 也与相位差有关。为保证微波信号相位噪声低及其稳定性, 要求两束光有很高的相干性。为此, 近年来报道了许多用以消除激光器产生相位噪声的新方法, 主要有光注入锁定法和光学锁相环法。但是光注入锁定法的锁定范围很小, 典型值为几百兆赫兹。光学锁相环法要求从激光器要跟得上主激光器的相位变化, 这需要很小的环路延迟。两种方法都需要外加稳定的微波信号源, 这增加了成本, 不利于实用化和产品化。

另一种光生微波方法则利用光外调制, 外调制器为强度调制器或相位调制器, 可产生 2 倍于调制频率的差频信号, 如采用深调制技术, 可产生 4 倍于调制频率的微波信号。利用光外调制的优点是改变微波调制信号的频率能够实现频率的可调谐。与前一种技术相比, 这种技术产生的微波信号的稳定性和相位噪声取决于微波调制信号和调制器, 对器件要求相对较低。2005 年, 加拿大姚建平研究小组提出利用大微波输入功率驱动一个铌酸锂调制器, 再用一个光纤光栅滤波器滤去光载波分量可获得两个光边带, 拍频后获得了 32~50GHz 宽带可调的毫米波信号。2006 年, 清华大学课题组设计了一种新型结构的双波长光纤激光器, 通过拍频可以产生频率范围为 20~60GHz 的微波信号。上海交通大学课题组与佐治亚理工大学 Chang 课题组合作, 提出了利用集成双平行马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)调制器产生光毫米波的方法。2008 年, 湖南大学文双春研究小组利用

单个相位调制器使频率为 20GHz 的信号产生频率为 40GHz 的毫米波。

需要注意的是,由于高频电子器件的进步,目前市场上已有 60GHz 以下商品微波源模块出售,光生微波的方法应向更高频率发展才能体现出自己的优势,目前最高频率的报道是产生了 1000GHz、25 μ W 的拍频输出,进入了太赫兹技术领域。此外,利用半导体光放大器的增益饱和恢复特性及光学偏振调制、色散效应等在光域产生并传输超宽带脉冲信号,仍然是有吸引力的。它能为光载超宽带(UWBOF)通信提供与光纤系统兼容性良好的超宽带(Ultrawideband, UWB)脉冲光源。

1.2.2 光学模数转换技术

模数转换(Analog-to-Digital Conversion, ADC)是实现模拟信号向数字信号转换的关键过程。随着现代数字信号处理技术的不断发展,越来越多的模拟功能都采用数字系统来实现,而这反过来又进一步提高了对高精度超高速模数转换技术的要求。但是,由于采样保持电路带宽、比较器弛豫和时钟抖动等因素的影响,传统的电子 ADC 性能受到了极大的限制,已经不能满足对于高采样速率、大带宽的要求。因此,ADC 逐渐成为现代数字信号处理系统中的技术瓶颈,如电子战、卫星通信、射频天文学、传感网络、光信号处理等需要超宽带信号处理的应用领域。近年来采用光子技术实现超宽带高采样率的光学模数转换技术日益受到世界各国科学家的关注。采用光子技术实现模数转换的显著优点在于:①用皮秒或亚皮秒的超短光脉冲进行采样,可以实现大于 100Gsp/s 的高采样率;②锁模光脉冲的时间抖动与电采样脉冲相比可以小两个数量级(达到 200fs 左右)。因此,相比于传统的电子模数转换,光学模数转换可以在实现高速率、超宽带采样的同时,达到高量化精度。

随着光子技术的迅速发展,利用光子技术所具有的潜在超高速信息处理能力突破了电子器件处理能力的瓶颈,已成为该领域技术发展的共识。美国国防部在 2000 年 5 月颁布的《国防科学技术战略》的三个支撑文件之一——《美国国防部国防技术领域计划》(国防信息研究中心译)中提到:“光子技术在高速数据传输和处理领域的巨大潜力正在被开发用于特别的军事用途”。可见,许多国家已经对超高速全光 ADC 的研究给予了高度重视。

在美国,国防高级研究计划局(DARPA)及美国高级研究计划总署(ARPA)于 1997 年就开始正式立项,组织美国国内一些著名大学、工业部门及实验室,如麻省理工学院(MIT)的林肯实验室、加州理工学院(CIT)、HRL 实验室、加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)、海军研究实验室(NRL)和喷气推进实验室(JPL)等,开展高速光电采样 ADC 的技术研究。美国空军也对相应的科研机构(EM Photonic, University of Delaware 等)提供支持。许多公司也对这项技术做了大量的研究和开发工作, Rockwell Collins 公司、朗讯实验室、贝尔实验室、TRW 公司、Boeing 公司、德州仪器、安捷伦科技公司都参与到该项目中来。2010 年, HRL 实验室获得 DARPA 的 RADAR (Remoted Analog-to-Digital Converter with De-serialization and Reconstruction) 部分项目研究高精度宽带的光学 ADC, 目的是实现高精度(ENOB 达到 10bit), 处理带宽达到 10GHz 的光学 ADC。日本在光学 ADC 方面也已经做了很大的努力。日本的 JST (Japan Science and Technology Agency) 和

JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) 2004 年开始立项, 并成立了专门的下一代模数转换器项目组, 支持日本的研究机构, 如大阪大学、AIST 等研究光学 ADC。2009 年, 大阪大学、Trimatiz 公司以及国家高等工业科学与技术研究院提出了 4bit, 采样率为 160Gsp/s 的 ADC, 并论证了向采样率为 Tera-Sample/s, 量化位数为 5bit 的 ADC 的可能性。在欧洲, 瑞典战略研究基金 (SSF) 从 2003 年开始一直支持 Chalmers University of Technology 的光子实验室 (Photonic Laboratory) 进行高速光模数转换研究, 并取得较好的成果。

根据光子技术在模数转换过程中的作用, 现有光学模数转换技术可以分为光电混合模数转换和全光模数转换两大类。其中, 全光模数转换的量化精度等指标距离工程应用还有很大距离。而光电混合模数转换中, 采样在光域上完成而采样后信号的量化在电域上完成, 很好地结合了光子技术和电子技术各自的优势, 在应用领域受到了更多的关注。

目前主要有两种光电混合的光学模数转换方法: 一种是基于时域展宽的光模数转换方案, 该方案将输入的高速信号调制在线性啁啾的光信号上, 然后利用光纤色散对调制后的信号进行时域扩展, 降低其速率, 再利用低速的电模数转换器量化输入信号; 另一种是基于复用技术的光模数转换方案, 首先将输入的高速信号调制在光脉冲上, 然后利用波分复用技术或者时分复用技术将调制后的光脉冲分为若干路重复频率相对较低的脉冲序列, 转换为电信号后利用相对低速的电模数转换器进行量化。其中, 基于时域展宽的光模数转换方案需要使用线性啁啾光源, 光源啁啾量无法精确控制, 这样也就无法得到输入信号的精确时域波形, 同时该方案对输入信号进行了时域展宽, 因此无法实现对输入信号的实时连续处理。基于时域展宽的光模数转换方案适用于对超高速瞬态信号的处理。而基于复用技术的光模数转换方案的优点主要在于利用现有的电模数转换器件, 避免了在光域进行量化编码的难题, 同时利用复用技术可以实现对输入信号的实时连续取样。基于复用技术的高速光电采样方案的系统实现如图 1-2 所示, N 个重复频率为 f_0 的光脉冲通过时分复用技术或波分复用技术复用成重复频率为 Nf_0 的取样光脉冲串 (其中 N 为通道数, f_0 为单通道脉冲重复频率), 脉冲串通过电光强度调制器对待测电信号进行取样, 调制器偏置在 $V\pi/2$ ($V\pi$ 为调制器的半波电压), 待测电信号的幅度被直接调制到取样脉冲的幅度上, 然后利用时分解复用器或波分解复用器将光脉冲串重新解复用为 N 个通道, 每个通道速率降低为 f_0 , 将接收到的光脉冲转化成电信号后用电模数转换器进行量化, 重构 N 个通道量化后的数字信号可以得到采样频率为 Nf_0 的高速数字信号。

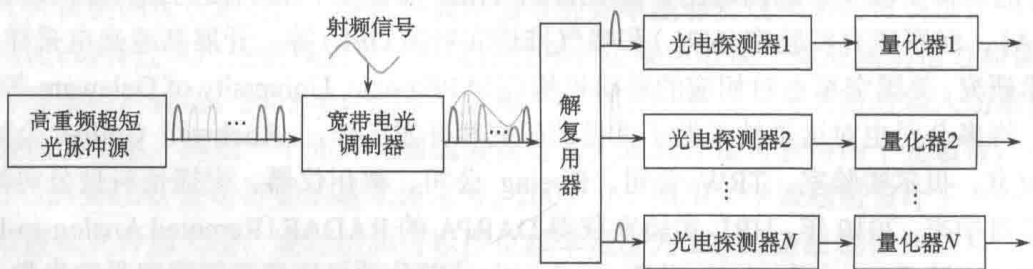


图 1-2 光电混合模数转换原理框图

1.2.3 微波光子学信号处理技术

1. 光子学微波滤波技术

由于微波光子滤波器的基本原理与电滤波器相同,已经较为成熟,目前针对微波光子滤波器的研究主要集中于新的滤波器结构的设计,以实现负的滤波系数,带通的可调以及频谱响应形状的可重构等。

微波光子滤波器的可调性是指频率响应的通带位置可以通过系统参数的改变来调节,使得微波光子滤波更具有灵活性。对于频谱响应上具有周期性的滤波器,可以通过改变采样时间来改变系统的自由光谱区(Free Spectral Range, FSR),从而改变通带位置,具体的调节方案可因不同系统而异。可重构性通常指滤波器频谱响应的形状改变。微波光子滤波器的可重构性可以通过改变滤波器的抽头数量及其相关系数来实现。滤波器的窗口函数、各个抽头的权重等是影响滤波器频率响应的很重要的因素。

正系数微波光子滤波器在基带具有响应,基本上是基于非相干操作的原理,所以只能处理光信号的强度,而无法消除滤波器的基带响应。很多研究者提出了在非相干的操作基础上得到负系数微波光子滤波器,消除基带响应,这种滤波器更接近于带通滤波器或高通滤波器,具有重要的实际意义。

目前,国内研究微波光子滤波器的单位主要有浙江大学、华中科技大学、北京邮电大学、西安电子科技大学等。浙江大学在微波光子滤波器方面做了比较系统和深入的研究,具有很强的代表性,胡颖等对利用各种光学器件实现微波光子滤波的性能进行了较为系统的研究,并深入研究了多光源微波光子滤波器在光纤无线通信中的应用,对基于独立激光器阵列的多光源微波光子滤波器、基于调制器产生多波长的微波光子滤波器和基于宽带光谱光源分割技术的多光源微波光子滤波器进行了详细分析;陈斌等对采用相位调制器实现微波光子滤波器进行了系统研究,实验得到了3dB通带为3.3~10.6GHz的线性相位滤波器。华中科技大学的徐恩明等对基于半导体光放大器的微波光子滤波器进行了研究,采用级联方式实现了负系数和高 Q 值的滤波器。北京邮电大学的李建强等对基于铌酸锂相位调制器的微波光子滤波器进行了研究。

在新型的微波光子滤波器结构方面,天津理工大学的杨秀峰等提出了一种基于多波长光纤激光器的可调谐的带通微波光子滤波器。它以可调谐多波长光纤激光器作为光源,将相位调制器和色散器件相结合,通过在普通单模光纤中相位调制到强度调制的转换效应消除了低频谐振峰,实现了带通微波光子滤波器。其由3部分组成,原理结构如图1-3所示。

图1-3(a)为基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器结构图,用来产生多波长激光信号。其中,掺铒光纤(EDF)作为增益介质,保偏光纤(PMF)通过调节偏振控制器PC3来改变腔内的有效双折射强度,单模光纤SMF1用来增加光纤的非线性偏振旋转效应,两个偏振控制器(PC1和PC2)和一个偏振相关隔离器用来改变激光腔内的偏振态并保证激光单向运转。通过调节偏振控制器可实现波长间隔和波长范围的调节。图1-3(b)是由保偏光纤、偏振控制器以及3dB耦合器所组成的双折射光纤环境。通过调节偏振控

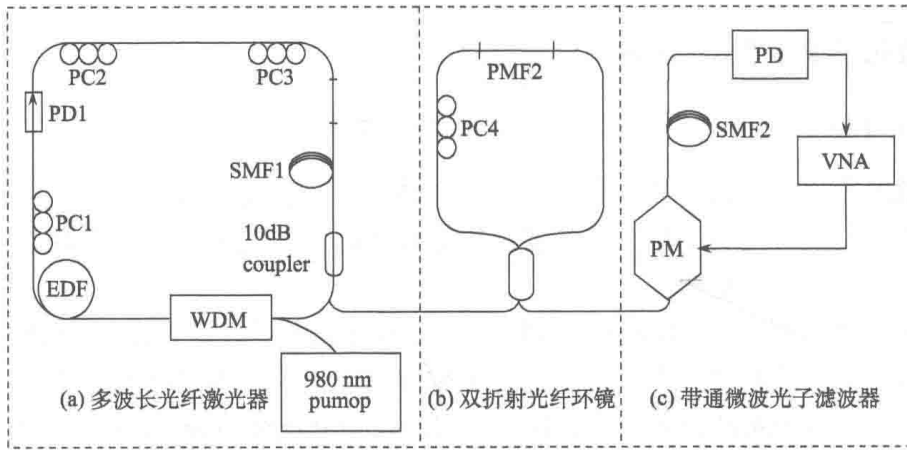
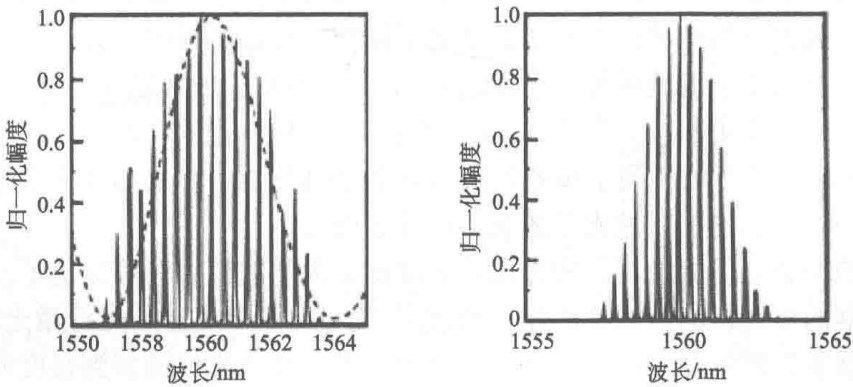


图 1-3 基于多波长光纤激光器的可调谐微波光子带通滤波器结构示意图

WDM: 波分复用; PMF: 偏振保持光纤; coupler: 光纤耦合器; SMF: 单模光纤; VNA: 矢量网络分析仪;
 PD: 光电二极管; EDF: 掺铒光纤; PM: 光电倍增管; PC: 光电导探测器

制器 PC4 可以控制传输函数的左右移动, 从而实现与多波长激光器输出的匹配。当双折射光纤环境与多波长光纤激光器波长相匹配时, 相当于双折射光纤环境对多波长激光信号进行了加窗, 如图 1-4 所示。经加窗后的多波长激光信号被送入图 1-3 (c) 中的相位调制器, 经过射频信号调制后被送入单模光纤, 实现相位调制到强度调制的转换, 然后经过光电探测器得到射频信号。滤波器的自由频谱范围可通过改变多波长激光器的波长间隔实现连续调谐, 通过对多波长激光信号进行切趾提高了滤波器的边瓣抑制比(MSR), 通过 PM-IM 转换实现了带通滤波。相对于利用激光器阵列作为光源的微波光子滤波器, 大大降低了成本, 具有很高的实际应用价值。



(a) 归一化的多波长激光器输出光谱及双折射光纤环境传输函数 (b) 加窗后的激光信号

图 1-4 归一化的多波长激光器输出光谱(实线)及双折射光纤环境传输函数(虚线)加窗后的激光信号

2. 光子学微波移相技术

20 世纪 80 年代初, 日本学者 Izutsu 等首次采用 Ti 扩散 LiNbO₃ 波导制备出集成光子学单边带调制器/移频器, 该器件实现了对光波的单边带调制或移频。虽然该器件主要以相干光通信与光谱学领域中的应用为背景, 但是其器件的结构形式、理论分析方法及制备工艺等都可以运用于集成光子学微波移相器的研制。因此, 西方学者大多将这一工

作视为微波移相器的开拓性成果。借鉴该研究成果,有关光子学波束形成网络的研究不断涌现,特别是有关集成光子学微波移相器的研究有较大进展。其间,提出了多种器件结构形式,尽管这些方案不断简化并且可实现波束的大角度扫描,但是不能对每一阵元的相移量进行独立的调控,给系统的调整带来不便,使该器件的应用受到一定的影响。90年代初,美国 Lockheed 导弹与空间公司的 Coward 等提出了一种新型的光子学微波移相器,即 IQ 移相器。该器件可应用于相控阵天线波束成形,具有高的相移精度和幅度稳定度,并利用分离的集成光学部件进行了验证实验,其工作原理如图 1-5 所示。由图 1-5 可见,来自两激光器的光功率分别注入两只马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)调制器,微波信号由 90° 功分器分成两路,即分为同相分量(I)与正交分量(Q),分别通过两只 Mach-Zehnder 电光调制器对光波进行调制,合路的光波经探测器实现微波信号的提取。实验表明:通过光功率 I_1 、 I_2 或调制器偏置电压的调整,微波信号可以在 360° 范围内实现相移,其相移精度为 1° ,幅度波动优于 0.25dB ,而温度稳定性在 25°C 以上时优于 2° ;若利用 Mach-Zehnder 调制器的偏置电压来控制相移量,相移量关于电压的线性度较好,这对于相移量的精确控制至关重要。

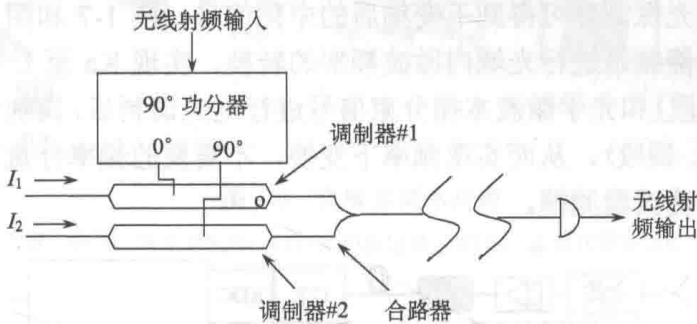


图 1-5 同相-正交移相器原理框图

2002 年, Han 等利用聚合物新材料 CPW1/APC 及其相关的制备工艺研制出具有独立多输出端口的光子学微波移相器。测试表明,在 20GHz 线性移相范围达 150° 左右,但是在 360° 范围内,相移特性呈非线性,特别是微波信号时功率波动达 15dB ,又经过一年多的努力, Han 等在单片上集成了移相器单元与 4 路相移控制单元,测量结果显示 4 路输出相互独立,在 20GHz 线性移相范围超过 360° 并且线性度与微波功率波动等性能大为提高,其原理结构如图 1-6 所示。

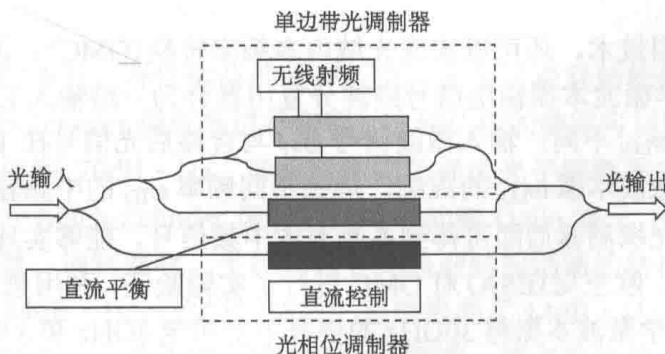


图 1-6 带平衡电极的移相器

3. 光子学微波放大技术

微波信号经过远距离传输后，传输损耗非常大，利用掺铒光纤放大器的增益和光与微波的相互作用可在光域对微波信号进行放大。由外腔激光器输出的直流光在强度调制器中被输入的微波信号调制。调制器的直流偏置点稳定在半波电压附近，输出的光信号经掺铒光纤放大器放大后被光带通滤波器滤除自发辐射噪声，最后输入光接收机恢复出放大后的微波信号。实验结果表明，在微波频率恒定为 4GHz 的情况下，随着输入微波信号的增大，微波增益始终稳定在 17dB 左右，显示出很好的稳定性，而输出微波信号的信噪比则会随之提高。

4. 光域内频率转换技术

利用光学方法实现微波频率转换是微波光子技术的另一个重要功能模块。电光调制器可以看作一个光学混频器。一般电光混频器(EOM)选取 Mach-Zehnder 强度调制器，其输入光信号为光学微波本振信号，输入的微波信号在 EOM 上对该光信号进行电光强度调制，输出端经光探测器可得到下变频后的中频信号。图 1-7 和图 1-8 中，天线微波光子前端的整体功能就是进行光域内微波频率的转换，实现 Ka 至 L 频段的下变频。输入微波信号(Ka 频段)和光学微波本振分束信号进行电光调制后，调制器输出端光信号包含中频分量(C 或 L 频段)，从而实现频率下变换，不需要的频率分量可以通过光链路输出端探测器后面的滤波器滤掉。

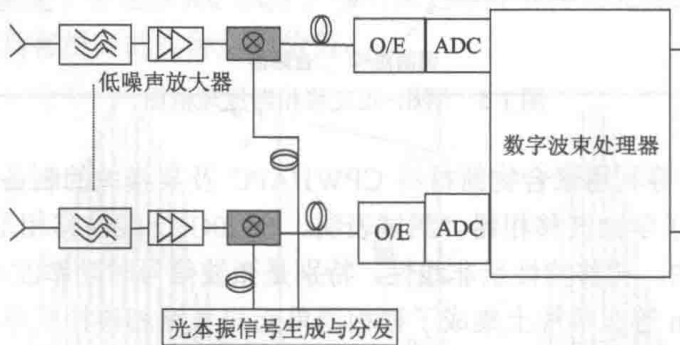


图 1-7 先进多波束天线框
O/E: 光电接收机; ADC: 模数转换器

结合光波分复用技术，还可以实现光域内多频率转换(OMC)，原理如图 1-9 所示。不同波长的 n 路光学微波本振输出信号经波分复用器合为一路输入 EOM，各波长光信号上的微波本振频率 ω_{LOi} 不同。输入微波信号 ω_{RF} 与合路后光信号在 EOM 上进行电光调制，同时完成与各微波本振 ω_{LOi} 的混频，得到不同频率 ω_{IFi} 的中频输出信号。输出端经过波分解复用器和光探测器后即可得到各频率的中频信号。能够实现将 Ka 频段信号下变频至 C 或 L 频段。欧空局(ESA)对 OMC 进行了实验验证，利用频率分别为 26GHz 和 26.04GHz 的两个光学微波本振将 30GHz 的信号下变频至 4GHz 和 3.96GHz 的中频信号，两中频信号隔离度大于 70dB，并且没有其余频率成分产生。

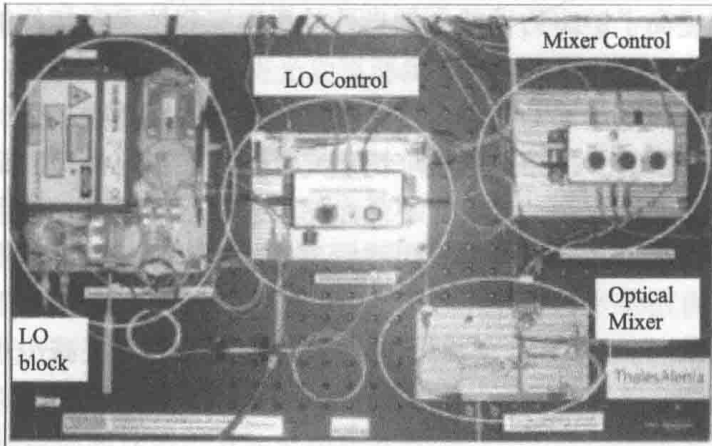


图 1-8 天线微波光子前端演示系统

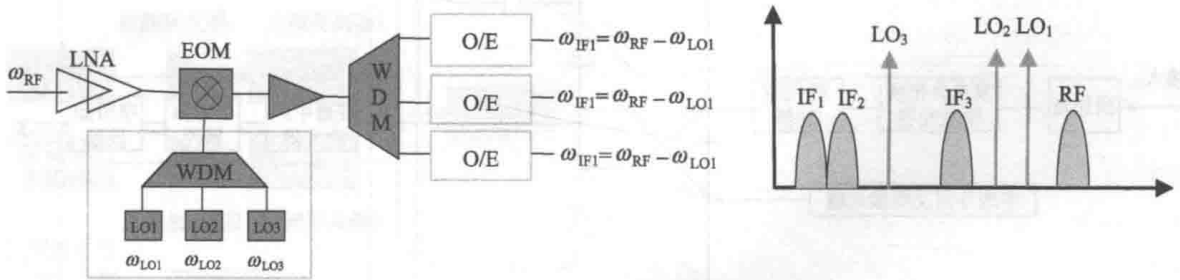


图 1-9 光域多频率转换

LNA: 低噪声放大器; EOM: 电光混频器; LO: 本机振荡器; WDM: 波分多路复用器; O/E: 光电接收机

1.2.4 微波光子学链路技术

在上述单项技术的微波光子链路优化设计是构建微波光子学系统的关键环节。1987年, Stephens 等提出了简单的直接调制链路, 这种链路是把要传送的信息转变为电流信号注入直调激光器, 从而获得相应的光信号, 所以采用的是强度调制(AM)方式, 相应的解调方式也是用相对简单的直接检测。

直接调制链路虽然具有简单、易实现等优点, 但是对普通半导体激光器进行直接调制时, 激光器的动态谱线增宽, 结果使单模光纤的色散增加, 从而限制了光纤的传输容量。为了消除激光器动态谱线增宽对链路性能的影响, Charles 等于 1989 年提出了高性能的外调制链路。

为了提高链路的增益, 降低链路的噪声系数, 出现了级联结构的微波光链路, 该链路使用了两个 Mach-Zehnder 调制器进行级联, 这种结构的链路可以提高转换效率, 其动态范围在当时可以达到 $70\text{dB} \cdot \text{Hz}$ 。继级联结构的微波光子链路被提出之后, 用来提高链路动态范围的平行 Mach-Zehnder 调制器链路结构被 Gallo 等于 1997 年提出。当用相同的激光器、探测器、调制器时, 平行结构要比级联结构链路的转换效率更高, 并且其动态范围可以达到 $84\text{dB} \cdot \text{Hz}$, 比级联结构的链路提高了 $14\text{dB} \cdot \text{Hz}$ 。

近年来, 随着对微波光链路性能要求的不断提高, 更多的新技术与新方法被应用到