

综合孔径成像 原理与应用

ZONGHE KONGJING CHENGXIANG
YUANLI YU YINGYONG

刘丽 江月松 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

综合孔径成像原理与应用

刘丽 江月松 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

综合孔径成像技术是指对多个小口径成像系统进行综合处理,从而等效于一个大口径成像系统的成像性能。目前其研究的工作波段覆盖了从微波到被动辐射的全部波段,通过机载和星载平台,该技术已被广泛应用于遥感与成像,射电天文学,环境、大气和海洋监测等。本书介绍了综合孔径成像技术的发展现状和基本原理,详细阐述了光学综合孔径成像系统和被动毫米波综合孔径成像系统的三个关键问题:阵列设计与优化,相位误差和校正,图像重构和复原等,并给出了相应的实验验证系统。

本书是作者近几年来从事综合孔径成像的相关科研工作的总结和凝练,目的是为在校研究生和从事综合孔径成像技术研究与应用的科研人员提供一本内容详细的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

综合孔径成像原理与应用/刘丽,江月松著. —北京:国防工业出版社,2013.7

ISBN 978-7-118-08826-7

I. ①综... II. ①刘... ②江... III. ①光学-孔径-成像 IV. ①0435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 113251 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 230 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

航天遥感技术是人们获取各种空间信息、发现和识别目标以及各国掌握信息主动权的最重要手段之一,已被广泛应用于对地高分辨率成像、飞行导航、军事侦查、灾害预警、天文观察和深空探测等诸多领域。空间分辨率是评价航天遥感器观测能力的重要技术指标。为了提高空间分辨率势必要增大遥感系统的口径。但是,系统口径的增大受到材料、工艺、制造成本、质量和有效载荷舱体积等诸多因素的限制。因此,人们开始寻求新的理论和方法来解决上述问题,其中综合孔径成像是实现大口径遥感系统的方法之一,其研究将为高分辨率遥感系统的实现开辟新的技术途径。

综合孔径成像技术是指利用多个小口径天线或望远镜排列成一定形式的稀疏孔径阵列,对物体成像,将观测结果进行综合处理,使最终结果等效于一个大口径天线或望远镜对该物体的观测效果。该技术一直是国际研究热点之一,目前其研究的工作波段覆盖了从微波到被动辐射的全部波段。

本书主要介绍光学遥感和微波遥感中具有很大应用前景的光学综合孔径成像技术和被动毫米波综合孔径成像技术。通过这两种技术的详细介绍,使读者对综合孔径概念有全面、深入的了解。

全书共5章,内容安排如下:

第1章介绍综合孔径成像技术的基本概念、分类、国内外发展现状,简要概述了综合孔径成像系统的三个关键技术:阵列优化和设计,相位误差和校正,图像重构和复原。

第2章简述掌握综合孔径成像技术所必备的数学基础,例如,卷积、相关、傅里叶变换等运算,线性系统分析,以及相关的物理基础,例如,非相干成像系统中的点扩散函数和光学传递函数、部分相干成像

理论中著名的范西特—泽尼克定理、被动辐射测量中的热辐射、亮温等概念。

第3章针对光学波段的综合孔径成像系统进行了深入分析,介绍了光学综合孔径直接成像系统的原理,并分别阐述了阵列优化和设计、相位误差校正、图像复原等关键问题,最后给出了实验方法。

第4章针对毫米波段的综合孔径成像系统进行深入分析,重点介绍了被动综合孔径光子成像的原理,以及阵列结构优化、相位误差和校正、重构成像算法等关键问题,并介绍了相关的实验研究结果。

第5章介绍了综合孔径成像系统的最新技术,对未来的发展进行了展望。

本书第1章~第3章由太原理工大学刘丽博士负责,共17万字,第4章~第5章由北京航空航天大学江月松教授负责,共6万字。

本书内容主要源自国家863计划项目——“自适应光学综合孔径遥感器”(编号:2007AA12Z114),航天创新基金——“被动毫米波综合孔径光子成像系统关键技术研究”(编号:06CASC0213-2)、CASI基金——“超分辨率太赫兹波光子成像探测的理论与方法研究”(编号:CAST200706)的创新结果,并在国家自然科学基金科技部主任基金——“干涉式光学综合孔径压缩编码成像的方法研究”(编号:61240017)、山西省青年科技研究基金——“压缩感知的被动毫米波综合孔径成像重构算法研究”(编号:2021011-4)等基金的支持下出版。

作者在从事研究和本书的写作过程中得到许多同行的支持和帮助,特别是北京航空航天大学何云涛博士、太原理工大学靳宝全副教授给予了很大帮助,在此深表谢意。本书借鉴了许多国内外学者的科研成果,在参考文献中均予以列出,在此也向他们致以深切的谢意。若有遗漏不全或引用不当,敬请批评指正。由于作者水平及参阅资料有限,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者批评指正!

作 者

2013年3月

目 录

第 1 章 综合孔径成像技术导论	1
1.1 综合孔径成像技术概述	1
1.2 综合孔径成像技术原理	3
1.2.1 光学综合孔径成像原理	3
1.2.2 被动毫米波综合孔径成像原理	7
1.3 综合孔径成像技术发展现状	8
1.3.1 光学综合孔径成像技术发展现状	8
1.3.2 被动毫米波综合孔径成像技术发展现状	16
1.4 综合孔径成像系统关键技术	20
1.4.1 阵列优化和设计	20
1.4.2 相位误差和校正	23
1.4.3 图像重构和图像复原	24
第 2 章 综合孔径成像基础	26
2.1 数学基础	26
2.1.1 卷积和相关	26
2.1.2 傅里叶变换	29
2.1.3 线性系统分析	32
2.2 物理基础	33
2.2.1 非相干光学成像系统	33
2.2.2 范西特—泽尼克定理	35
2.2.3 被动辐射测量基础	39

第3章 光学综合孔径直接成像系统	45
3.1 基本原理	46
3.1.1 等效模型	46
3.1.2 特征指标	50
3.2 阵列优化和设计	58
3.2.1 典型阵列结构	58
3.2.2 多圆周阵列结构	66
3.2.3 多圆周阵列的优化	68
3.3 相位误差和校正	78
3.3.1 光束合成误差分析	78
3.3.2 冗余基线校正方法	93
3.3.3 一维 RSC 阵列的优化	103
3.3.4 圆周 RSC 阵列的优化	106
3.4 图像复原	111
3.4.1 经典图像复原法	112
3.4.2 图像质量评价方法	117
3.4.3 维纳滤波法在光学综合孔径中的应用	120
3.5 实验研究	127
3.5.1 模拟实验系统	127
3.5.2 望远镜光阑实验	132
3.5.3 冗余基线校正模板实验	134
3.5.4 光学综合孔径遥感系统	138
3.6 本章小结	140
第4章 被动毫米波综合孔径成像系统	141
4.1 基本原理	141
4.1.1 被动综合孔径干涉成像原理	141
4.1.2 被动综合孔径光子成像原理	144
4.1.3 光子成像系统主要性能分析	156

4.2	阵列设计和优化	162
4.2.1	引言	162
4.2.2	优化基础	164
4.2.3	优化准则	166
4.2.4	优化算法	167
4.2.5	优化结果	169
4.3	相位误差和校正	183
4.3.1	闭合相位校正	183
4.3.2	载波干涉校正技术	185
4.3.3	基于光子晶体的全息相位校正技术	186
4.4	重构成像算法	188
4.4.1	引言	188
4.4.2	Gridding 算法	190
4.4.3	CLEAN 算法	191
4.5	实验研究	195
4.5.1	基于光纤传输的二元干涉实验	195
4.5.2	基于光纤传输的毫米波探测实验	207
4.6	本章小结	213
第5章	综合孔径成像技术展望	214
5.1	被动综合孔径宽带成像技术	214
5.2	被动毫米波直接电光调制技术	215
5.3	超分辨率处理与多光谱融合技术	216
5.4	复合相位误差测量与校正技术	217
5.5	多孔密瞳光学阵列	218
5.6	压缩感知综合孔径成像技术	220
参考文献		221

第1章 综合孔径成像技术导论

1.1 综合孔径成像技术概述

随着科学技术的不断发展,航天遥感技术已经被广泛应用于对地高分辨率成像、飞行导航、军事侦查、灾害预警、天文观察和深空探测等诸多领域,正逐渐成为人们获取各种空间信息、发现和识别目标以及各国掌握信息主动权的最重要手段之一。世界各国投入了大量的人力、物力进行航天遥感技术的研究与开发。从发展水平上看,美国和苏联处于领先地位,法国、德国、意大利、以色列、日本等国家也达到了相当的水平。

航天遥感技术利用装载在航天器上的遥感器收集地物目标辐射或反射的电磁波,以获取并判认大气、陆地或海洋环境信息。感测并收集地物和环境所辐射或反射的电磁波的仪器称为遥感器。航天遥感按所利用的电磁波的光谱段,可分为光学(包括可见光、近红外、短波红外)遥感和微波遥感。微波遥感按是否含有发射源分为主动微波遥感和被动微波遥感。主动(有源)微波遥感包括雷达高度计、散射计和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR),被动(无源)微波遥感器又称为微波辐射计,因其体积小、质量轻、功耗省、成本低、隐蔽性好等优点,被广泛应用于军事侦察、空间定位、全球变化监测、资源开发等领域中。

空间分辨率是评价航天遥感器观测能力的重要技术指标。空间分辨率越高,遥感器对目标细节的分辨能力越强,获取的信息越多。对于光学遥感器和被动微波遥感器,在衍射极限条件下,所取得的观察场景中最小可分辨物体的角分辨率 α 与目标的辐射波长 λ 、天线直径 D 有如下的近似关系:

$$\alpha = 1.22D/\lambda^{[1]}$$

该关系表明:波长越短,天线(或望远镜)直径越大,空间分辨率越高。

对于光学遥感器,目前普遍采用的是单口径光学系统。为了提高空间分辨率势必要增大光学系统的口径。但是,系统口径的增大受到材料、工艺、制造成本、质量和有效载荷舱体积等诸多因素的限制。根据经验和统计规律,望远镜系统的制造成本与孔径的 2.76 次方成正比^[2],而且,口径增大必然导致系统的体积和质量增加,给空基光学系统的发射带来困难,复杂的空间环境也可能导致大口径光学镜面的变形而不能正常工作。美国的哈勃望远镜,主镜直径 2.4m,角分辨率 0.007 弧分,质量 817.2kg,总质量达 11.25t,被认为已经达到了当前系统设计和经济承受的极限^[3]。

对于被动微波遥感器,由于微波波长较长(1mm~1m),空间分辨率普遍低于光学遥感器。例如,对于一个二维视场为 60°的成像系统,直径为 100mm 的红外望远镜工作在 10 μm 波长时,像素点可以达到 1000 个,而一个工作在 0.1mm 波长的太赫兹(THz)波天线,要使像素点达到 1000 个,其天线直径必须达到 1m。为了提高空间分辨率,势必要增大辐射计接收天线的物理口径尺寸。而天线增大必然引起质量和体积的增大以及扫描成像时的困难。此外,直径过大的天线在实际加工中难以实现,对于航天飞机、卫星等载体平台也难以承载。

因此,无论是光学遥感器,还是微波辐射计,传统系统已经难以适应现代遥感的要求,人们开始寻求适合于研制大口径天线或望远镜的新原理和新方法。从 20 世纪 60 年代开始,在射电天文技术中发展起来一种有效稀疏阵列天线的信号处理技术,称为综合孔径射电天文学。1970 年,美国科学家 Meinel 将其引入光学望远镜系统中,提出光学综合孔径概念^[4]。80 年代以来,从事空间对地观测的科学家又将这一技术引入对地观测的微波辐射计中。随后,Boyce、Golay、Goodman、Shack 等人也开始了综合孔径成像系统的理论研究工作,但由于技术条件的限制,直到 20 世纪 80 年代末至 90 年代初,综合孔径成像技术才得到快速的发展。

综合孔径成像技术是指利用多个小口径天线或望远镜排列成一定形式的稀疏孔径阵列,对物体成像,将观测结果进行综合处理,使最

终结果等效于一个大口径天线或望远镜对该物体的观测效果。综合孔径成像技术具有如下特征和优点:①系统分辨率不受单个口径尺寸限制,降低了系统加工难度和制造成本;②体积小,质量轻,有利于降低发射体积和质量,特别适用于航天航空遥感应用;③根据需要,综合孔径的子孔径数目和布局可以不同,系统设计和组装灵活多变。因此,综合孔径成像系统的研究和发展是未来高分辨率成像系统设计和研究的重要思想。

综合孔径成像技术一直是国际研究热点之一,目前其研究的工作波段覆盖了从微波到被动辐射的全部波段^[5-13]。通过航天飞行器载体平台,该技术已被广泛应用于遥感与成像,射电天文学,环境、大气和海洋监测等,发挥了巨大的经济和社会效益,在军事上更是受到广泛和深入的研究和应用,特别是美国和欧空局(ESA)都投入巨资用于研究和建立对地观测和侦察的综合孔径成像系统^[5-7]。此外,该技术已应用到激光传输^[14]、显微成像^[15]、三维成像^[16]等其他成像技术领域中。

1.2 综合孔径成像技术原理

1.2.1 光学综合孔径成像原理

按成像原理的不同,光学综合孔径成像技术可以分为两大类:重构成像(Michelson 瞳面干涉原理)和直接成像(Fizeau 像面干涉原理)。

重构成像,是以天文光干涉技术为基础发展起来的综合孔径成像技术。根据 Van Cittert - Zernike(范西特—泽尼克)定理,当目标本身的线度以及观测区域的线度都远远小于二者间的距离时,观测区域上的复相干度正比于目标强度分布的归一化傅里叶变换^[17]。由两个或几个望远镜构成长基线光干涉阵,每条基线对应理想光干涉成像系统像面上的一组与基线方向垂直的明暗相间的干涉条纹,从条纹中可以提取出复相干度的模和相位,即目标傅里叶振幅和相位。归一化目标傅里叶频谱称为 uv 谱,则一条基线对应一个 uv 频率分量。通过旋转孔径阵或改变子孔径的相对位置,不断变换干涉仪基线的方向和长

度,从而探测到不同 uv 频率分量;当对目标的傅里叶频谱抽样覆盖达到重构图像的要求后,再通过傅里叶逆变换就可实现目标的二维图像重构。这就是重构成像(图 1-1),也称为 Michelson 瞳面干涉法综合孔径成像。由于对频域的抽样覆盖属于离散抽样,所以傅里叶逆变换得到的图像并不清晰,即所谓的“脏”图,需要采用成熟的、经典的算法对图像进行补偿恢复,才能得到更加逼近目标的图像。

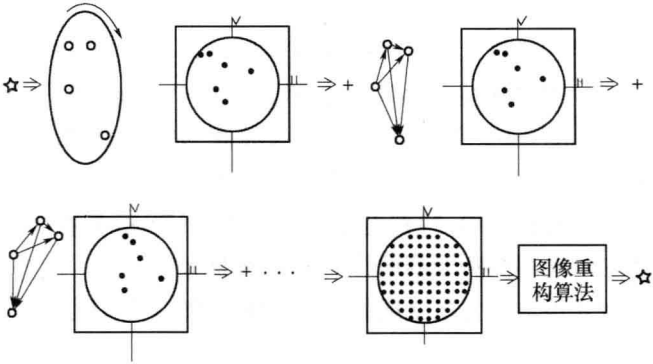


图 1-1 重构成像原理图

直接成像由多个小口径光学成像系统排列而成,这些小口径光学系统可以是单独的镜片,也可以是独立的光学系统。所以又可分为分片式的子镜面拼接主镜(A segmented primary mirror)(图 1-2)以及稀疏望远镜相控阵列(Phased arrays of sparse independent telescopes)(图 1-3)两种结构方式。

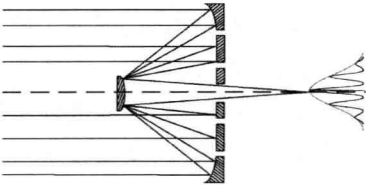


图 1-2 子镜面拼接主镜
直接成像系统

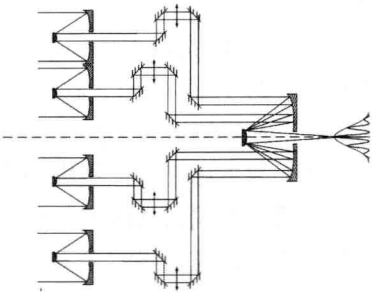


图 1-3 稀疏相控望远镜
阵列直接成像系统

子镜面拼接主镜技术是指光学系统的主镜由一些小型的曲面镜片组成,每个分块子镜可以单独加工,然后按设计的排列方式精确地“拼接”在一起合成一个主镜,共用一个次镜,采用传统的光学方式成像。该技术用于遥感器时,可以做成展开式,即可以折叠起来以适应发射器的要求,发射上天后再展开,并且在固定位置锁定。因此,必须具有可靠的机械设计,有效的展开、排列以及很高的稳定性。因为它采用传统的光学成像原理,所以与相控望远镜阵列相比,系统更简单,更容易实现。每一块子镜可以是六边形、饼式、梯形、弓形等(图1-4)。由于子镜的相位调整、点扩散函数的对称性和杂光抑制等原因,子镜的外形将影响光学系统的性能。

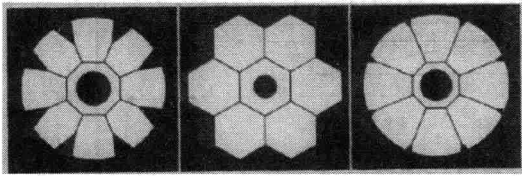


图1-4 子镜面拼接主镜技术的子镜形状

对于可折叠主镜,关键是每一块子镜能相互有效地拼接在一起形成一整块镜子,因此需要一个波前检测和控制系統,确保分块子镜正确排列,波前正确匹配,产生一个衍射极限的系统,而不是将多块子镜产生的图像简单交叠。另外,整个成像系统也采用折叠结构,在发射时折叠为一个可接受尺寸的有效载荷,到达预定轨道后依次展开光学系统主结构、主镜以及其他部件,从而降低质量和体积,节省发射费用。

相控望远镜阵列采用多个独立的小孔径望远镜子系统排成阵列。各个子孔径按照一定的规律排列在一起,通过相位匹配和光路调整,使得通过各个子孔径的光束在共同的焦平面上满足同相位要求,以实现光场的相干叠加,从而达到与其通光口径相当的单一大口径系统的衍射极限分辨率。

不论哪种结构,都只是部分地填充成像系统的孔径,所以又将直接成像的光学综合孔径系统称为稀疏孔径系统。它的成像原理是Fizeau像面干涉原理。当对一个特定区域进行成像时,各个独立的子

系统分别接收到目标信息,经过相位匹配、光路调整、光束合成系统,各子系统的像光束在共同的焦面上满足同相位要求,实现像场的相干叠加从而直接成像。

子镜面拼接主镜与相控望远镜阵列两种孔径综合方式各有优劣:前者可以充分利用现有的望远镜设计,而且比较容易做到较大的视场;但不足的是如果主镜被设计成非球面或更为复杂的高次曲面时,加工若干个离轴子镜面存在诸多困难。后者避免了这一点,并且减少了像差的影响,但却不容易实现较大的视场,因为通常只能调整各个子望远镜焦点仅对一个物点重合,其他物点都会产生离焦和错位,类似于慧差情形,一种解决方法如图 1-3 所示,系统中每个子望远镜的主镜和次镜共焦,从而产生平行光,另外用平面镜对使光束与原光束平行,并进入一个辅助成像望远镜,使光束按比例缩小,这样系统就可以对有限的视场得到调焦校正。

重构成像和直接成像的区别在于:重构成像是用较少的子孔径单元组成综合孔径系统,通过测量目标辐射场的复相干度获得关于目标空间频域的信息,适当地改变基线的长度和方向,以牺牲数据的采集时间为代价获得足够多的目标频域信息(属非即时覆盖),并且要逐点测试傅里叶逆变换所需的目标谱,因此不能直接成像;成像视场很小(受空间相干性限制),只适合于对静止不变的、外形简单的目标进行成像,主要用于天文测定;需要对测量结果进行傅里叶逆变换,沿着基线方向的分辨率只取决于子孔径间的基线长度,增加基线长度就能提高分辨率。直接成像是利用较多独立的小孔径单元组成综合孔径系统,将各子系统测得的目标像在共同的像面上进行相干综合,一次性得到全部 uv 覆盖(属即时覆盖),直接产生目标的像;成像的视场大,理论上可以达到单一子系统的成像视场;可以对不断变化的目标,例如,地面上的目标实时成像;分辨率由子孔径的间距和子孔径的尺寸共同决定。两者的共同点在于基本思想都是用易制造的小孔径系统综合大孔径系统,通过不同的途径增大整个系统对目标空间频率信息的抽样覆盖率,并通过一定的算法对测得的数据进行处理,实现高分辨率成像。

1.2.2 被动毫米波综合孔径成像原理

传统的被动毫米波综合孔径成像方法将来自各天线通道的中频放大信号经两两复互相关运算,再经离散傅里叶变换后重构出目标的图像^[5,6],如图 1-5 所示。

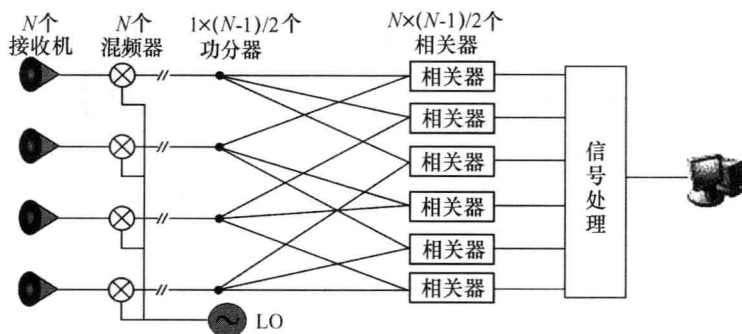


图 1-5 传统的被动毫米波综合孔径成像方法

天线接收到的被动辐射信号,由于其衰减较大,在传输前应调至一更适合传输的频率。选择之一是将其中变频至一中频信号,通过同轴电缆传输;另一种方式为将其上变频至光载波频率,由光纤传输。

由于传统的下变频被动综合孔径成像系统受到硬件的体积、质量、信号处理速度等因素的限制,自 2002 年以来,国际上部分知名学者将目光转向光学信息处理技术,提出被动综合孔径光子成像技术^[18-25],即利用光学信息处理技术来处理天线所接受的辐射信号,通过光学相关计算,可以实现对综合孔径系统的实时成像。完整的被动综合孔径光子成像系统如图 1-6 所示。其基本原理为:通过将接收到的辐射信号经电光调制技术加载到光波上,并利用光载波干涉或冗余基线算法进行光纤系统的相位控制,最终利用调制后的边带光束形成阵列进行光学成像,从而得到目标的温度分布图。光纤传输信号具有高带宽,低衰减和抗电磁干扰等优点。此外,将视场目标的辐射信号加载到光载波上,在光纤末端形成阵列,则可采用光学综合孔径成像技术,在光波频率上直接成像,无需解调出辐射信号;与传统的合成孔径成像系统相比,避免了采用大量的复相关器(其数目随天线数目

的增加呈几何增长),代之以高效的光学系统,使整个设备简单而有效,且成本较低。

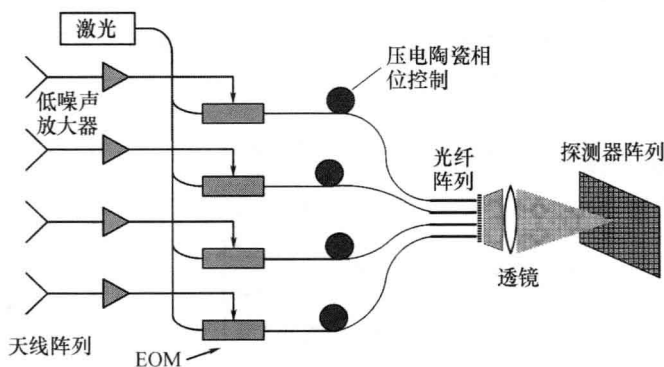


图 1-6 基于电光调制技术的被动毫米波综合孔径成像系统示意图

1.3 综合孔径成像技术发展现状

1.3.1 光学综合孔径成像技术发展现状

1. 国外重构成像系统(长基线干涉仪)

现代长基线 Michelson 干涉测量起始于法国的 Laberyie 实验室。他们在 1974 年首次使用两个独立的望远镜 I2T(Interferometre a Deux Telescopes)直接观测到干涉条纹,后来又发展了 GI2T(Grand interferometer a Deux Telescopes),做红外和可见光探测^[26]。美国从 1979 年~1986 年由 Shao M 等完成了相位跟踪和全自动化的 Mark I、Mark II、Mark III 光干涉仪,取得了惊人的结果^[27]。其中,Mark III 光干涉仪在恒星角直径测定、恒星位置测定和双星研究等方面,其观测精度或分辨率都比传统方法高一两个数量级,可以和空间单口径望远镜的观测结果相媲美,为现代空间干涉仪提供了地面样机试验。

目前长基线干涉成像技术已经在地面天文学中得到应用并走向成熟。英国剑桥大学的光综合孔径望远镜系统(Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope, COAST^[28]),由 4 个 0.4m 望远镜组成,基线 100m,分辨率 1mas。1995 年该系统首次利用闭合相位技术和动态条纹调制技术获得天体图像。目前它已发展到 5 个单元,取得了可见光

和红外观测结果。美国的红外光学干涉阵(Infrared-Optical Telescope Array, IOTA), 由 2 个 0.45m (2000 年加到 3 个) 望远镜组成 L 型阵, 最长基线 38m。美国乔治亚州立大学的高分辨率成像阵(The Center for High Angular Resolution Astronomy, CHARA^[29]), 由 6 个 1m 口径望远镜组成 Y 形阵, 最长基线 350m, 分辨率 0.2mas。澳大利亚悉尼大学的光干涉阵(Sydney University Stellar Interferometer, SUSI^[30]), 由 2 个 0.14m 望远镜组成, 最长基线 640m, 是目前地面干涉仪中基线最长的光干涉阵, 目前它已使用 80m 基线 442nm 红端波长得到了干涉结果, 以后将逐渐扩展到最长基线, 并向蓝端发展。美国海军天文台的 NPOI^[31] (Navy Prototype Optical Interferometer), 由 6 个定天镜(0.5m) 放在 Y 形阵的 3 个臂上, 基线长度为 2m ~ 437m, 具有 32 个光谱通道, 波长覆盖 450nm ~ 850nm。目前已经在双星探测上取得了结果。美国国家宇航局(NASA) 支持的 KECK^[32] 光干涉仪由 2 个 10m 的望远镜, 附加 6 个 1.8m 的小望远镜, 合成等效 25m ~ 140m 口径的大望远镜, 分辨率可提高到 30mas。欧洲共体的甚大望远镜干涉仪 VLTI^[33] 用 4 个 8.2m, 附加 4 个可移动的 1.8m 的辅助镜, 最长基线可达 200m。

地面光干涉测量技术已经显示出它的巨大潜力, 但受大气扰动的限制依然存在。空间因免受大气影响, 可以从可见光到远红外的连续波段进行光学观测, 对光干涉测量的发展十分有利。于是几乎在地面光干涉仪实验的同时, 也提出了空间光干涉仪的建议和设想。国际上正在进行的空间光干涉仪计划包括美国以发现地外生命(太阳系外行星) 为目标的 Origins 计划中的空间干涉使命(Space Interferometry Mission, SIM^[34])、空间技术 3(ST3, 后改为 Starlight)、类地行星探索者(Terrestrial Planet Finder, TPF^[35])、行星成像仪 PI 和欧空局的达尔文 DARWIN^[36] 计划等。其中, SIM 项目由 7 个 0.4m 的子望远镜, 放在同一航天器平台上, 最长基线为 20m, 它将是第一个空间光干涉仪; ST3 项目中用相距 1km 的两颗卫星各携带一个望远镜, 在空间实现分布式编队飞行, 它也是为下一代虚拟卫星 TPF 而开展的预研; TPF 由卫星携带 4 架 3.5m 望远镜组成, 彼此间距可在 10m ~ 1000m 变化, 以创造一个“虚拟望远镜”, 其分辨率比 Hubble 望远镜高出百倍以上。这些重大项目都是基于光干涉重构成像的原理, 它们的开展对于人类探索