

理学硕士学位论文

# 合成孔径雷达光学处理器的小型化研究

邵 德 奇

学科专业： 光 学

研究方向： 信息处理

指导教师： 胡家升研究员

论文提交日期： 1992年1月

论文答辩日期： 1992年3月

答辩委员会主席： 陈星旦 研究员

答辩委员会委员： 董玉兰 付研究员

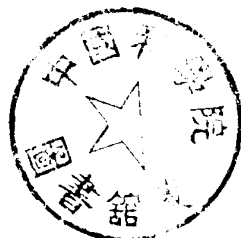
黄廉卿 付研究员

刘伯翔 付研究员

胡家陞 研究员

中国科学院长春光学精密机械研究所

一九九二年二月



N 88647

# 致 谢

本文是在胡家升先生的亲切关怀和悉心指导下完成的。从论文的选题到论文最后的定稿，都倾注着胡家升先生的心血。特别是论文的初稿形成以后，胡家升先生逐字逐句地进行审阅，多次提出修改意见并帮助修改。他严谨的治学态度给我留下了深刻的印象。使我受益非浅，在此特向胡家升先生表示我衷心的感谢。

在论文的形成过程中，始终还得到董玉芝付研究员的热情帮助。从小型化光学处理器参数的制定到具体的设计都得到她的精心指导。论文形成后，她还提出许多宝贵的修改意见并帮助修改。在此深表感谢。

另外，在这两年半的研究生学习和生活期间，研究生部的领导和各位老师给了我很大的帮助，在此一并表示感谢。

# 作者简历

1965年10月出生于安徽全椒

1983年9月-- 1987年7月就读于安徽师范大学物理系

1987年7月-- 1989年7月在安徽师范大学物理系任教

1989年8月-- 1992年3月为长春光机所研究生

## 摘

## 要

为了克服原HG-1型斜平面光学处理器体大笨重和灵活性差这一缺点，我们开展了本文的研究。我们设计的小型化光学处理器是在HG-1型斜平面光学处理器的基础上，根据SAR数据处理的实际需要和系统灵活性的要求，对HG-1型斜平面光学处理器的结构和某些性能做了适当的改进，使小型化光学处理器的体积约为原HG-1型斜平面光学处理器体积的一半。因而具有较强的机动性和灵活性，能够实现现场处理。本文还分析了SAR成像的原理及数据片的特点，设计出小型化处理器的光学系统。该系统的变倍范围是8-20倍，在1:15万的比例尺下，地面分辨率为7米。

# A Study of Small-sized System of Synthetic Aperture Radar (SAR) Optical Processor

## Abstract

This paper describes how to overcome the bulk, unwieldiness and bad flexibility of HG-1 mode title-plane optical processor. Considering the real requirement of SAR data processing and the flexibility of system, the structure and some functions are improved properly on the basis of HG-1 mode title-plane optical processor. The volume of the new small-sized optical processor is about half that of old one. Its mobility and flexibility are better. It can work on the spot. In addition, the principle of SAR image and the feature of data film are analysed and the design of optical system of small-sized processor is completed in this paper. Its vary-power range is 8-20 times. The ground resolution of optical system is 7m on the scale of 1:150000.

**第一章：绪论****第二章：SAR 发展综述**

§ 2.1 国外SAR及其光学处理器的发展情况

§ 2.2 国内SAR及其光学处理器的发展情况

§ 2.3 SAR数据的数字处理技术

**第三章：SAR成像的基本原理及实现SAR数据处理的几种光学处理器**

§ 3.1 SAR的概念

§ 3.2 SAR数据片的形成原理

§ 3.3 SAR数据处理的几种处理器

(一) 锥面透镜--柱面透镜--球面透镜组合的光学处理器

(二) 斜平面光学处理器

**第四章：SAR光学处理器小型化系统的结构考虑和外形尺寸计算**

§ 4.1 小型化的必要性

§ 4.2 小型化的现实可行性

§ 4.3 小型化光学处理器的结构考虑

§ 4.4 小型化光学处理器的外形尺寸计算

(一) SAR的基本参数

(二) 与光学处理器有关参数的计算

(三) 光学处理器的分辨率考虑

(四) 主光路的外形尺寸计算

(五) 主光路上各透镜的通光口径

(六) 扩束器系统的外形尺寸计算

**第五章：小型化处理器光学系统的设计**

§ 5.1 主光路上五透镜结构参数的计算

§ 5.2 扩束器中大小透镜的设计

§ 5.3 小型化处理器光学系统的质量分析

(一) 两维像面的重合情况

(二) 光学系统的像差情况

(三) 光学系统的像差容限

(四) 光学系统成像弥散斑的大小

(五) 光学系统的分辨率对弥散斑大小的要求

## **第六章：系统分析和结论**

§ 6.1 小型化处理器的特点

§ 6.2 小型化处理器的性能

§ 6.3 结论

# 第一章 绪 论

第二次世界大战以来，雷达无论在理论上还是在技术上都得到了飞速的进展，新理论、新技术纷纷出现，其中合成孔径雷达便是突出的进展之一。

合成孔径雷达（简称 SAR）是一种高分辨率的成像雷达。由于它是一种主动式成像设备，不受白天黑夜的限制，可以在很差的气象条件下得到高分辨率的雷达图像，因而它被广泛地应用在军事、灾害监测、资源勘探等领域。它和普通雷达不一样，合成孔径雷达系统是装在运动的载体上，其上的小天线按照时间顺序向被探测的地面重复地发射脉冲信号，同时接收由地面返回的信号。利用斜距维的脉冲压缩和方位维的多普勒频移的累积积分来形成地物的高分辨率图像。

合成孔径雷达成像是分两步进行的。第一步是利用 SAR 系统收集和存储被探测目标的信息；第二步是利用复杂的光学或数字处理系统对 SAR 所收集的信息进行重构和处理，以恢复原目标的清晰图像。

SAR 所收集的信息量非常之大，目前主要采用胶片记录和存储方式，另外还有其它方式，如磁带和光盘记录和存储。对这样大的数据进行处理是一项复杂而又困难的问题。另外，数据胶片在相干准直光的照射下再现图像时，出现分离的斜距维焦面和方位维焦面，并且方位维焦面是倾斜的，而且两维的比例不一致，这就给数据处理带来更大的困难。为此，科学家们付出了巨大的努力，研制出各种各样的数据处理系统。其中斜平面光学处理器是最成功的光学处理系统，它能够很好地解决上述问题，形成清晰的高分辨率



图像。

中国科学院长春光机所从1976年就开始对合成孔径雷达处理器的研究，并于1986年成功地研制出HG-1型斜平面光学处理器。该处理器具有通用性强、分辨率高，成像清晰等优点。但是，该处理器体大笨重，无法适应现代军事、灾害监测等需要快速获取信息的领域对此提出的机动、灵活的要求。为了解决上述矛盾，就必须使之小型化。本文就是顺应这一要求，在HG-1型光学处理器的基础上，提出小型化的具体方案，并且设计出该小型化处理器的光学系统。

本文共分六章。第一章为绪论；第二章是SAR的发展综述。主要论述了国内外SAR成像技术及其数据处理技术的发展情况；第三章是SAR成像的基本原理及实现SAR数据处理的几种光学处理器。本章主要讨论合成孔径雷达的概念及其SAR数据片的形成原理。分析了实现SAR数据处理的锥透镜—柱透镜—球透镜组成的光学处理器和斜平面光学处理器的工作原理；第四章是SAR光学处理器小型化系统的结构考虑和外形尺寸计算。在本章中首先论述了SAR光学处理器小型化的必要性和可行性，进而提出小型化光学处理器的结构方案，最后计算出小型化处理器光学系统的外形尺寸；第五章是小型化处理器光学系统的设计。小型化处理器光学系统由主光路上五透镜处理系统和光束扩展系统两部分组成。我们借助CAD软件，设计出这两部分各透镜的结构参数，并且分析了光学系统的成像质量；第六章是系统分析和结论。本章把小型化光学处理器系统与HG-1型斜平面光学处理器相比较，阐述了小型化光学处理器系统的特点、性能及发展前景。

## 第二章 SAR发展综述

### § 2.1 国外SAR及其光学处理器的发展情况

合成孔径的概念可以追逆到 50 年代, 1951年6月美国的 Good Year公司的Carl Wiley首先提出可以用频率分析的方法获得方位维的高分辨率的思想[10][11]。并且提出了波束锐化的概念。伊利诺斯大学控制系统实验室独立地用非相干雷达做实验, 证实了频率分析方法确实能够改善雷达的角分辨率。以后又用相干雷达做实验, 用 X 波段, 通过回波箱产生相干基准信号, 发射波束宽为 $4.13^\circ$ , 经过孔径合成后波束宽为 $0.4^\circ$ 。从而验证了波束锐化的概念。同年夏天, 美国各地的有关科学家聚集在密执安大学讨论所谓的狼獾 (Wolverine) 计划。在这次会议上, C.Chervin 和 L.J.Cutrona 等人提出了合成天线的思想[12]。他们的想法是: 装在飞机上的天线, 随着飞机的运动, 会形成时间顺序的天线阵列, 对天线接收到的返回信号进行较为复杂的记录和处理, 能够起到一个大天线的的作用。在这种思想的指导下, 1953年秋天开始了密执安计划, 到1954年底, 用于该种雷达的大部分元器件被做出, 并着手研究相干雷达模型。1955年获得了予期的实验室实验结果[4]。

当时人们还认识到: 信号的存储和处理是实现合成孔径原理的关键。为此许多科学家作出了较大努力。美国密执安大学雷达和光学实验室的 L.J.Cutrona, E.N.Leith 等人发现利用光学透镜组能够完成合成孔径要求的信号处理任务[13][14]。他们还研究出雷达回波信号的记录方法。如图2.1 所示。被雷达接收的回波信号经同步解调加到CRT的阴极上, 对亮度进行调制, 照相机将此信号记录运

动到胶片上。胶片沿 X 方向匀速运动，信号便一行行地排列到胶片上。

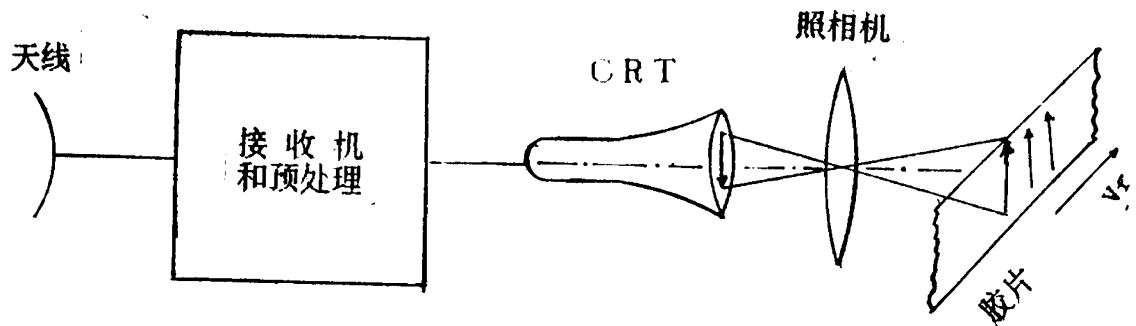


图 2.1 雷达回波信号记录系统示意图

1960年4月19日,世界上第一套合成孔径雷达系统(AN/CPD型)试飞成功,并用锥面透镜——柱面透镜——球面透镜组成的光学处理系统对所获得的数据进行处理,获得了较高分辨率的地面图像[15]。这标志着机载合成孔径雷达时代的开始。自此以后,它一直成为军事侦察的重要手段。美国军方长期控制这一技术,直到1970年,SAR技术才从军事保密中解放出来。该技术一经公开就发挥出巨大的经济效益。特别在地球资源考察方面,显示出得天独厚的威力。1971年首先用SAR完成了对美洲热带雨林的探测并成图。其它如在洪水监测,海水污染,森林普查,探矿等方面均取得了十分明显的经济效益和社会效益[16]。

1972年,合成孔径雷达被装在登月卫星Apollo-17上,它从100 km的高度获得了月球表面图像,其分辨率为3 m。从此进入了星载合成孔径雷达的时代[17]。

1978年6月美国的海洋卫星 Seasat-A 进入地球轨道，内装SAR系统[18]，随后1981年11月的SIR-A（美国航天飞机成像雷达 - A）和1984年10月的 SIR-B（美国航天飞机成像雷达 - B）相继飞入太空，两者均装有SAR的光学记录系统。

目前，西欧的 ESA（西欧空间协会）正准备发射海洋监视卫星（ERS-1），该卫星将装备合成孔径成像雷达。对海洋作全球范围的观察[19]。这样一来，SAR的发展已不再局限于地球上局部地区资源考察和军事侦察了。现在，美国、苏联等国家正在发展用来探测星球的SAR系统。在美国的SDI（星球大战计划）中，也拟采用SAR成像系统。

SAR的发展与光学处理技术是密切相关的。第一个SAR数据就是用光学处理方法得到的地面图像的。采用的是锥透镜 - 柱透镜 - 球透镜的组合系统。这种系统的成像质量不高，又难以实现图像的跟踪。为了满足高分辨率的成像要求，密执安环境研究所（ERIM）的 A.Kozma 和 E.N.Leith巧妙地利用望远镜系统的特点和 SAR数据片的全息特性，于60年代中期发明了斜平面光学处理器[20]。这种新型的光学处理器不仅大大地提高了 SAR的图像分辨率，而且它的发展也推动了全息技术的发展。E.N.Leith和 J.Upatnieks 在此基础上发明了离轴全息图，大大地改善了 Gabor所发明的同轴全息图，使全息术开始走向实用化。这种斜平面光学处理器几经发展和完善，其斜距维和方位维的动态分辨率均达到或超过60lp/mm，且能适应各种合成孔径雷达的参数要求。

70年代后期，美国Good Year 公司研制成功的UC-3通用型光学处理器[21]，其整个系统的动态分辨率达到60lp/mm。灰度等级大于32，比例尺校正范围（K）为3---80（更换柱面透镜前组镜头），可处理多通道数据。这两类处理器承担着美国大部分 SAR数据的

日常处理。其唯一缺点是不能实现实时化处理。我们知道，斜平面光学处理器的输入是以胶片做记录和存储的数据片，处理后的图像也是胶片记录的。胶片需要显影定影等化学处理，这就难以实现实时化。即使我们采用CCD阵列接收图像，而后在高分辨率监视器上显示出处理后的图像，也只能实现输出的实时化[6]。遗憾的是，目前还难以找到代替胶片的二维图像的实时输入装置。

80年代初期，美国加利福尼亚理工学院的D.Psaltis和K.Wagner等人根据SAR数据的两维可分离特性和信号的时间序列，巧妙地采用了一维空间光调制器作为SAR的输入装置。用声光器件(AOD)和CCD二维阵列器件分别对斜距维和方位维信号进行处理。提出了著名的AOD/CCD光电混合SAR图像处理系统[22][23]。因为一维空间光调制器(如AOD)已发展到相当水平，基本上可满足SAR数据的要求。这里所用的CCD是一种具有位移累加功能的二维阵列探测器件，目前达到的水平是 $1024 \times 128$ 或 $2048 \times 96$ 象元。这为光/电实时处理提供了基础。最近M.Haney和D.Psaltis又提出一种可编程的AOD/CCD光电混合处理结构[24]。用这种结构不但可以实时处理，而且还可以实时校正SAR的各种误差(如运动误差、斜距走步)，适应于雷达/目标之间的几何关系的实时改变。成为一种与SAR一起可机载或星载的图像处理系统。

## § 2.2 国内SAR及其光学处理器的发展情况

自从60年代初美国开始报导合成孔径雷达以来，在我国雷达界引起了很大的兴趣，经过酝酿和准备，自70年代初，国内已有科研单位开始调研和准备研制合成孔径侧视雷达[10]。但是，由于种种原因，这项工作未能连续开展下去。

中国科学院北京电子所和长春光机所自1976年起开始合成孔径

成像雷达理论和技术的研究工作。电子所负责机载SAR的研制,长春光机所负责光学处理器的研制。于1979年9月研制出原理样机在陕西进行飞行实验在多云有雨的气象条件下,获得了我国第一批合成孔径雷达图像。1981年11月研制成功性能样机,并进行第二次飞行实验,所获得的雷达图像分辨率较上次有明显提高。1983年3月又研制成功了单测绘通道、单极化的合成孔径成像雷达。并进行飞行实验,首次实现连续大面积成像。雷达的质量也有了明显的提高。随后,结合农、林、水、矿、铁路建设和地图测绘等应用,进行了SAR首次应用飞行,获得了一大批有应用价值的雷达图像。1988年4月北京电子所又研制出“多条带、多极化合成孔径成像雷达系统”。

随着合成孔径雷达在我国的发展和应用,合成孔径雷达处理器的研制显得十分重要。中国科学院长春光机所自从1976以来就一直进行着合成孔径雷达处理器的研制工作,并于1981年研制成功了合成孔径雷达光学处理器的实验室模拟样机,分辨率为10米。1986年,又成功地研制出了合成孔径雷达五透镜式斜平面光学处理器。在1:10万的比例尺下,地面分辨率可达1.7米,整个指标达到美国近期生产的UC-3型SAR光学处理器水平。该处理器在接收面上附加了CCD线阵接收器件,可以把图像连续地显示在彩色监视器上,减慢了冲洗胶片的程序,大大地提高了处理速度。这同北京电子所研制的“多条带、多极化合成孔径成像雷达系统”一起,形成了一套完整的合成孔径雷达及其处理系统。

### § 2.3 SAR数据的数字处理技术

合成孔径雷达信号的数字处理技术近年来发展十分迅速,并且已开始实用化。在光学处理已成功应用并且获得大面积、高分辨率图像的同时,人们还以极大的兴趣发展数字处理技术,这是因为数

字处理有许多优点，特别是它有很大的灵活性，精度高，能够比较方便地适应不同场合的要求，目前，机载合成孔径雷达数字处理机已经成型。在星载合成孔径雷达中，数字处理的优越性显得更为突出，因为星载合成孔径雷达回波多普勒信号离正规的线性调频较远，换句话说，其运动补偿、距离位移校正等问题十分突出。用光学处理就难以实时地做到这一点。目前用数字处理方法，处理海洋卫星和哥伦比亚号航天飞机合成孔径雷达数据，获得分辨率为 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 的雷达图像。

对合成孔径雷达数据进行数字处理的主要困难是大的信息存储量和高运算速度。解决这一矛盾当然要靠提高数字计算机或计算机部件的运算速度和寻找大容量的存储器。为此，人们付出了很大的努力，并且获得了一定的成功。目前，对合成孔径雷达的数字信号处理已形成一套典型的步骤和程序。如图2.2所示。这一思想广泛地应用于各种类型的合成孔径雷达数字处理器。

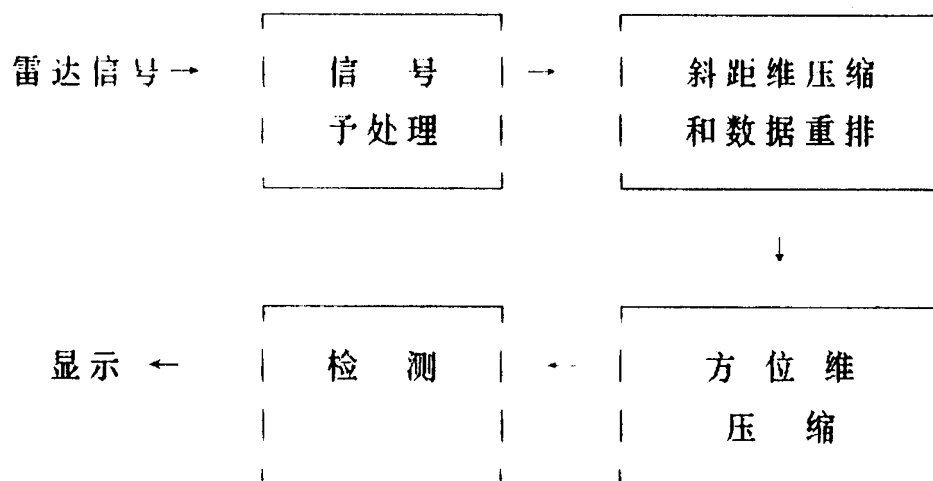


图1.2 SAR数字信号处理简要方框图

和光学处理相比，数字信号处理的主要优点是灵活，能方便地改变运算以满足不同的信号处理要求。特别是快速付里叶变换算法的出现，大大地缩短了运算时间，使数字信号处理的速度提高和灵活性增加。许多在时域很复杂的运算，变换到频域可以很方便地完成。为了进一步减少信号处理时间，加快运算速度，人们应用沃尔什变换和数论变换等线性变换。它们有快速付里叶变换的许多优点，并且避免了复数乘法，因而比付里叶变换的速度更快，应用起来灵活性也很大。除此之外，数字信号处理精度高，一般不受环境因素或时间因素的影响。

数字处理的主要缺点是存储信息的能力和运算的速度是有限的，而且设备复杂，成本昂贵。因此，尽管光学信息处理由于其不灵活性，还未能像数字处理那样在一般的信号处理中发挥作用，但是对合成孔径雷达而言，在成本和设备的复杂性方面，数字信号处理仍然不如光学处理。至少在目前，在合成孔径雷达信号处理这一特定的方面，光学处理的这些优势这要保持一段时间。

当然，从长远的观点来看，数字信号处理的优势也是无可置疑的。这是因为：(1) 随着合成孔径雷达分辨率的提高，作用距离的加大，并且其运载工具发展到空间飞行器，许多因素（主要是运动不规则和距离位移等）将使回波多普勒信号偏离正规的线性调频波形。这样，光学处理必须先将信号加以复杂的校正方能得到满意的结果，这对光学处理来说是相当困难的，而数字处理则比较容易实现。(2) 从数字技术本身的发展而言，存储量的加大，运算速度的成倍增长，设备趋于简单化，价格的便宜等都是必然的趋势。因而数字处理技术有着广阔的发展前景。