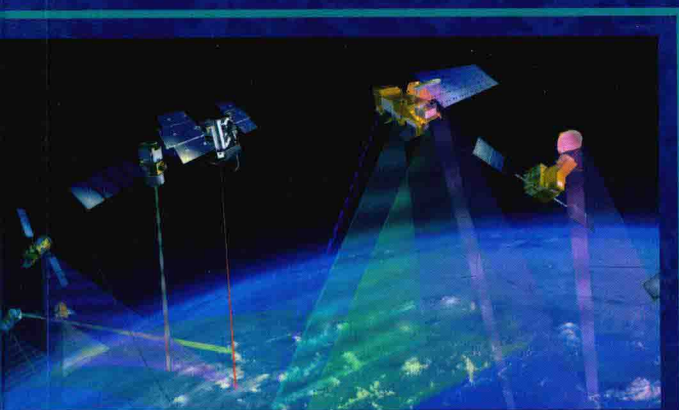


面向对象高可信SAR数据处理（下册） ——系统与应用

张继贤 陈尔学 李 震 李平湘 黄国满 等 著



科学出版社

面向对象高可信 SAR 数据处理(下册) ——系统与应用

张继贤 陈尔学 李 震 李平湘 黄国满 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以国家高技术研究发展计划(863计划)“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”为背景,针对合成孔径雷达数据在地貌地物、森林植被等方面的处理与解译难题,阐述利用多角度、多波段、多极化、极化干涉等多模式航空航天 SAR 数据,建立基于散射机理的地物特性知识库,构建地形辐射校正、极化干涉处理、立体测量、基于知识的地物解译等模型,开发高分辨率机载极化干涉 SAR 数据获取硬件系统与 SAR 影像高性能解译软件系统,实现以精度高、可靠性强、识别类型丰富为特征的 SAR 影像高可信处理与解译的原理、技术与方法,并对成果在测绘、林业等行业的应用示范效果进行了展示和分析。

本书包括上下两册,可供摄影测量、遥感、地形测绘、林业遥感、资源环境遥感监测等领域的科技工作者、高等院校师生和从事相关工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向对象高可信 SAR 数据处理. 下册, 系统与应用 / 张继贤等著.

—北京: 科学出版社, 2018.4

IISBN 978-7-03-057110-6

I. ①面… II. ①张… III. ①合成孔径雷达—图象处理 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 072318 号

责任编辑: 王 哲 霍明亮 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2018 年 4 月第一次印刷 印张: 11 1/2 插页: 6

字数: 227 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 一

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 和光学系统是遥感对地观测系统的左膀右臂, 因此 SAR 是对地观测领域不可或缺的重要组成部分。张继贤多年来带领团队潜心于 SAR 数据获取、处理及解译技术研究, “十一五” 期间研制了我国首套机载多波段多极化干涉 SAR 测图系统, 填补了我国在该领域的空白, 总体达到了国际先进水平, 多项关键技术国际领先。但是, 与光学遥感数据的处理技术和手段相比, SAR 数据理解译技术成熟度仍处于相对较低的水平, 国内外 SAR 处理软件带有明显的专业针对性, 还缺乏通用化的 SAR 数据处理软件, 制约了 SAR 技术的普及与应用。2011 年, 科技部批准了 863 计划“十二五” 主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统” 的立项, 张继贤带领他的团队踏上新的征程, 开展了卓有成效的研究。

经过五年的攻关研究, 项目组突破了 SAR 影像精准处理、高精度三维信息提取与面向对象地物解译等 SAR 影像处理与解译核心技术, 研发了能处理国际国内主流航空航天 SAR 数据、功能全面、性能高效、具有 PB 级影像数据管理和并行处理解译能力的 SAR 影像处理解译系统, 并在高精度信息提取、SAR 影像地物高可信解译、地形测绘及林业等领域具有独特的优势。该系统与我国 SAR 对地观测传感器一起构成了我国航空航天 SAR 数据获取、影像处理、解译与应用的完整技术体系, 对于提高我国地理信息产业的技术水平, 增强我国空间信息产业的国际竞争实力, 提升国家科技自主创新能力, 培育地理信息相关行业新的经济增长点, 将起着非常重要的作用。

《面向对象高可信 SAR 数据处理 (上册) ——理论与方法》和《面向对象高可信 SAR 数据处理 (下册) ——系统与应用》是项目组近五年来在 SAR 数据高可信处理与解译方面的理论研究、技术攻关、软件开发和示范应用等系列成果的结晶。相信本书的出版, 对于进一步提高我国 SAR 数据理解译水平、推动 SAR 技术服务于国民经济建设和人民生活, 能够起到积极作用。

中国科学院院士
中国工程院院士



序 二

SAR 在高精度地形测绘、地表形变监测、全天候资源环境监测等领域具有独特的优势。在传感器方面,我国已研发多套极化/干涉/极化干涉 SAR,实现了 SAR 传感器载荷与飞行平台的集成,掌握了航空航天 SAR 遥感数据获取关键技术。但是在 SAR 数据处理方面发展严重滞后,仍存在多项技术不足,例如,没有形成具有竞争力的产品化高可信 SAR 处理系统,数据处理自动化、集成化程度还较低;高性能计算和专用处理设备等快速实时处理技术应用于 SAR 数据还处于起步阶段;SAR 影像地物解译存在许多问题,尤其在复杂地形条件下,地物分类解译精度较低,亟须在定量分析的基础上建立针对多模态 SAR 的面向对象解译方法;SAR 目标检测与识别技术有待进一步提高。

先进的 SAR 处理技术是目前国际上科技竞争的战略制高点,是国家核心竞争力的重要组成部分。生态文明建设、资源可持续利用、“一带一路”建设等国家重大战略对精确、快速和高可信的 SAR 处理技术也提出了迫切需求。在国外涌现出新一代高分辨率、高性能 SAR 获取与处理系统的背景下,大力发展我国 SAR 数据高可信处理核心技术,开展 SAR 遥感数据高可信处理关键技术攻关与平台研制,是提升我国应急响应水平、实现可持续发展的重要技术保障。因此,以突破高端 SAR 关键技术、提升国家核心竞争力为目标开展相关研究具有紧迫性和必要性。863 对地观测与导航领域战略规划将 SAR 地物解译技术与系统研究列为“十二五”重点任务,并优先启动了“面向对象的高可信 SAR 处理系统”重点项目。

项目组深入开展 SAR 数据处理和地物解译的理论研究和关键技术攻关,通过近五年的努力,构建了具有自主知识产权的高性能 SAR 地物解译系统与平台,打破了 SAR 处理系统长期依赖国外进口的局面。《面向对象高可信 SAR 数据处理(上册)——理论与方法》和《面向对象高可信 SAR 数据处理(下册)——系统与应用》系统阐述了项目组近五年在 SAR 高可信处理与解译的理论研究、关键技术攻关和软件研制方面的科研成果,是作者多年来辛勤工作的结晶。希望本书的出版能够有力促进我国遥感与地理信息战略性新兴产业的发展和繁荣。

中国工程院院士

张祖勋

前 言

当前,高空间分辨率、高时间分辨率、多波段、多极化及多角度的多模态航空航天 SAR 数据获取已经成为国际遥感领域的主流发展方向,大量丰富的 SAR 数据的出现为对地观测领域提供了重要数据源。由于缺乏对 SAR 成像机理的深刻认识,缺乏定量化的处理手段,缺乏快速并行处理系统,简单借用光学影像处理的思路处理 SAR 影像等原因, SAR 影像处理与解译几何精度低、可判别的类别少、解译可信度低、处理效率低, SAR 影像数据的应用受到极大限制。在此背景下,2010 年起,中国测绘科学研究院联合中国林业科学研究院资源信息研究所、武汉大学、中国科学院对地观测与数字地球科学中心、中国科学院电子学研究所、中国电子科技集团公司第三十八研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所、上海交通大学、北京大学等科研院所和高校,开展了国家高技术研究发展计划(863 计划)“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”研究。

通过五年的协作攻关,针对 SAR 数据在地形地物、森林植被等方面的处理与解译难题,利用多角度、多波段、多极化、极化干涉等多模式航空航天 SAR 数据,建立了基于散射机理的地物特性知识库,突破了地形辐射校正、极化干涉处理、立体测量、基于知识的解译等核心技术;形成了多项创新性成果,如稀少控制点 SAR 影像严密定位通用模型、复杂地形条件下的全极化 SAR 地形辐射校正方法、基于多源知识的复杂电磁散射模型优化方法、模型和知识库支持下的高可信地物解译技术、大范围低相干地区的高精度地形反演技术、X 波段 InSAR 植被垂直结构信息提取技术、大容量 SAR 数据快速处理等关键技术;形成了双天线多模式全极化干涉 SAR 数据获取硬件系统、面向对象的高可信解译软件系统等重要成果;实现了以精度高、可靠性强、识别类型丰富为特征的 SAR 影像高可信处理与解译,构建了行业重大应用示范系统,在地形测绘、植被覆盖监测等领域得到示范应用。

本书以该项目的研究内容为基础,对相关成果进行了较系统的阐述。

高分辨率 SAR 影像精确处理技术:包括全极化 SAR 数据幅度相位地形补偿技术, SAR 影像自适应相位保持滤波与高精度配准方法, SAR 影像高精度定位技术。

高精度三维信息提取技术:包括多模式 SAR 干涉提取 DEM (Digital Elevation Model) 技术,大范围地表低相干地区的 DInSAR 形变反演技术, SAR 立体及立体、干涉联合提取三维信息技术,森林垂直结构参数反演模型和方法。

地物散射模型与知识库:包括典型地物目标散射机理和模型库;典型地物类别后向散射特性测量规范,典型目标后向散射实测库;典型地物目标航空航天 SAR 影像特征库;基于模型的目标特性扩展技术,典型地物综合判别工具。

面向对象 SAR 影像地物高可信解译技术：包括基于知识的 SAR 影像地物高可信解译技术，SAR 影像高精度土地覆盖分类与森林类型识别方法，SAR 影像地物高可信变化检测技术。

SAR 影像高性能处理解译系统：包括 SAR 影像处理算法加速单元及系统运行平台开发技术，系统集成技术，SAR 影像高性能处理解译系统构建技术。

SAR 遥感综合试验与应用示范：包括航空极化干涉 SAR 数据获取集成系统构建；综合试验区航空航天 SAR 数据获取，对以上模型、方法和系统的精度、性能验证，高精度地形测绘、土地利用与植被覆盖信息提取应用示范。

本书包括《面向对象高可信 SAR 数据处理（上册）——理论与方法》和《面向对象高可信 SAR 数据处理（下册）——系统与应用》，全书由张继贤拟定大纲，组织撰写。各章主要执笔人为：第 1 章张继贤、黄国满、王志勇、范洪冬、王开志等；第 2 章张继贤、黄国满、张永红、赵争、杨书成、卢丽君、吴宏安；第 3 章张继贤、黄国满、杨书成、程春泉；第 4 章李震、陈权、陈尔学；第 5 章杨杰、吴涛、郭明、王超、陈尔学；第 6 章吴涛、王超、杨杰、李平湘；第 7 章李平湘、杨杰、陈尔学；第 8 章张继贤、黄国满、王亚超、赵争；第 9 章张继贤、黄国满、卢丽君、杨景辉、赵争、韩颜顺；第 10 章陈尔学、李平湘、李震、焦健；第 11 章张继贤、黄国满、程春泉、杨书成、赵争、王萍；第 12 章陈尔学、李震、李平湘。全书由张继贤、黄国满、程春泉统稿，由张继贤审定。

本书由国家高技术研究发展计划（863 计划）“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”（2011AA120400）资助。项目开展期间得到了国内相关单位和同行的无私帮助，作者在此表示衷心感谢。由于水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者提出宝贵意见。

作 者

2017 年 7 月

目 录

序一

序二

前言

第 8 章	高分辨率机载极化干涉 SAR 数据获取系统	1
8.1	X-SAR 传感器子系统	1
8.2	P-SAR 传感器子系统	4
8.3	飞控导航子系统	6
第 9 章	SAR 影像高性能处理解译系统	9
9.1	基于高速网络的集群 SAR 处理	9
9.1.1	系统设计	9
9.1.2	平台构建	11
9.1.3	算法集成	16
9.2	基于 GPU 加速单元的快速处理	18
9.2.1	GPU 与 CUDA 计算环境	18
9.2.2	GPU 支持的 SAR 影像加速处理方法	19
9.2.3	计算平台与实验数据	21
9.2.4	加速处理实验结果	22
9.3	系统概况	24
9.3.1	SAR 影像高性能处理解译系统设计	24
9.3.2	可扩展可伸缩的 SAR 影像高性能处理解译框架	29
9.3.3	SAR 影像高性能处理解译系统的开发和集成成果	31
第 10 章	SAR 遥感综合实验	43
10.1	SAR 遥感综合实验方案	43
10.1.1	四川若尔盖实验区	44
10.1.2	内蒙古大兴安岭实验区	51
10.2	SAR 遥感综合实验星—机—地数据获取及处理	62
10.2.1	四川若尔盖实验区	62

10.2.2	内蒙古大兴安岭实验区	68
10.3	SAR 遥感综合实验数据库与共享	88
第 11 章	高精度地形测绘应用示范	89
11.1	SAR 测绘应用概况	89
11.2	SAR 地形测绘生产工艺流程	90
11.3	SAR 影像定位应用	91
11.3.1	若尔盖地区机载 SAR 影像定位	92
11.3.2	登封地区机载 SAR 影像的定位	96
11.3.3	星载 SAR 影像空中三角测量	99
11.4	SAR 影像制作 DEM 产品	103
11.4.1	1 : 5000 DEM 产品制作	103
11.4.2	1 : 10000 DEM 产品制作	104
11.4.3	1 : 50000 DEM 产品制作	105
11.5	SAR 影像制作 DOM 产品	106
11.5.1	1 : 5000 DOM 产品制作	106
11.5.2	1 : 10000 DOM 产品制作	107
11.5.3	1 : 50000 DOM 产品制作	109
11.6	SAR 影像制作 DLG 产品	110
11.6.1	星载 SAR 1 : 50000 DLG 产品制作	110
11.6.2	机载 SAR 1 : 50000 DLG 产品制作	113
第 12 章	SAR 森林植被覆盖监测应用示范	117
12.1	SAR 森林植被覆盖监测应用概况	117
12.1.1	SAR 林地及森林类型分类制图	117
12.1.2	SAR 森林垂直结构信息提取	118
12.2	多时相星载多极化 SAR 林地类型分类	121
12.2.1	应用示范区及数据	122
12.2.2	分类流程	123
12.2.3	分类结果及精度评价	129
12.3	高分辨率机载极化 SAR 森林类型分类	131
12.3.1	应用示范区及数据	132
12.3.2	分类流程	134
12.3.3	分类结果及精度评价	139
12.4	高分辨率机载干涉 SAR 森林树高估测	148

12.4.1	应用示范区及数据	149
12.4.2	森林树高估测方法	149
12.4.3	估测结果及精度评价	151
12.5	高分辨率机载极化 SAR 森林地上生物量估测	153
12.5.1	应用示范区及数据	154
12.5.2	森林 AGB 估测方法	154
12.5.3	估测结果及精度评价	155
参考文献		159
结束语		168
彩图		

第 8 章 高分辨率机载极化干涉 SAR 数据获取系统

高分辨率机载极化干涉 SAR 数据获取系统，本书特指依托 863 计划“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”对原由中国测绘科学研究院牵头研制的机载多波段多极化干涉 SAR 数据获取系统的升级系统。系统经过升级，能够获取全极化干涉 X 波段数据与全极化 P 波段数据，分辨率最高为 0.3m。系统主要包括 X-SAR 传感器、P-SAR 传感器和飞控导航子系统，通过系统硬件接口集成和系统操控软件集成构建。其中，系统硬件接口集成是将系统所有组成部件的硬件设备接口连接起来，能够相互通信和传输信号。系统操控软件集成则是将各子系统的操控功能模块集成，形成单一软件，从而方便对系统进行集中控制。

8.1 X-SAR 传感器子系统

1. X-SAR 传感器子系统

X-SAR 传感器子系统是利用电磁波的干涉原理，采用双天线结构进行载波相位测量，从而获得 DEM 地面高程数据的一种高精度主动探测装置，原理如图 8.1 所示。其主要功能是基于 X 波段双天线干涉原理来获取 HH、HV、VH、VV 四种极化模式下的 SAR 原始数据及辅助数据。

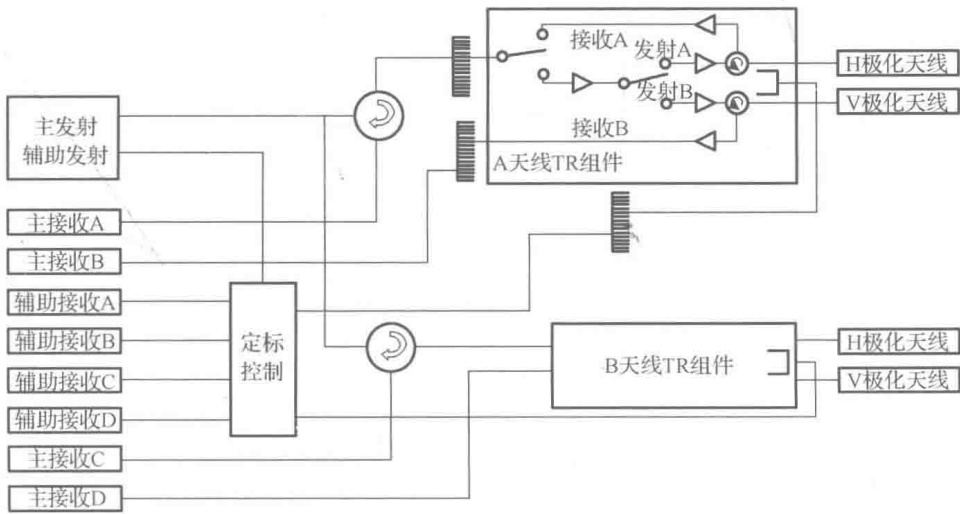


图 8.1 X-SAR 传感器部件的工作原理

2. X-SAR 结构

X-SAR 传感器子系统的结构,主要包括以下分机组件: X-SAR 监控分机、低功率射频分机、微波组合分机、发射机分机、内定标分机、天线分机、数据采集分机、数据记录分机、电源分机。其中, X-SAR 监控分机、数据采集分机和数据记录分机作为通信接口,负责与外部设备进行信息交互。

(1) X-SAR 监控分机,是整个雷达系统的操控中心,为整个系统提供时序控制,并可与计算机进行串口通信。

(2) 低功率射频分机,是整个雷达系统的核心工作单元,负责产生雷达基准频率和线性调频信号,如图 8.2 所示。其由激励源、频率合成、接收通道 1、接收通道 2、电源共 5 个模块组成,根据不同雷达工作模式,其不同模块为整个系统提供中心频率 9.6GHz 的信号源、基准时钟和采样时钟,主要完成雷达回波接收信号的放大、变频、滤波、幅度调整和正交解调,同时兼具收发转换。

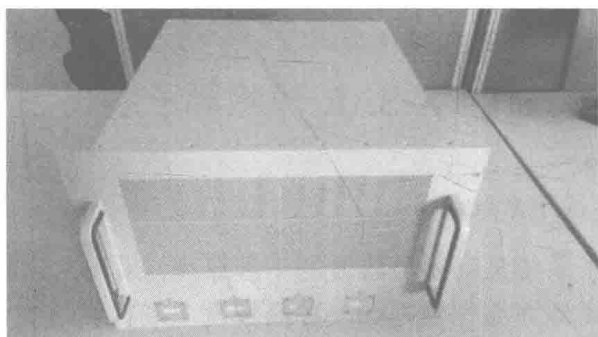


图 8.2 低功率射频分机

(3) 微波组合分机,是雷达收发系统的重要组成部分,主要使用 Ping-Pang(乒乓)切换开关在低功率射频分机、发射机分机、天线分机之间传递雷达发射和接收信号,完成收发转换与信号传递的功能,如图 8.3 所示。

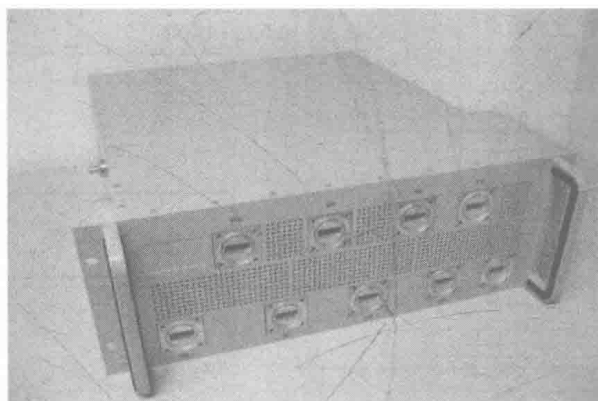


图 8.3 微波组合分机

(4)发射机分机,是雷达的微波功率放大器,负责将频综器送来的发射激励信号进行脉冲调制、功率放大,然后经收发开关、微波馈线波导送到天线上对外辐射电磁波信号。

(5)内定标分机,是 X 波段高分辨率极化干涉合成孔径雷达的重要组成部分,如图 8.4 所示。其在 SAR 系统中的功能是在雷达的数据流中注入内定标器发出的定标脉冲,通过数据分析来刻画 SAR 系统响应以及系统性能变化。

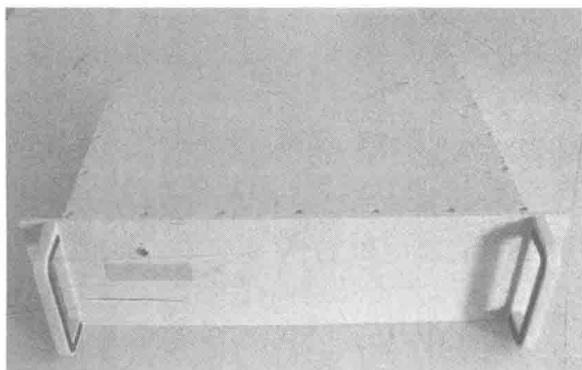


图 8.4 内定标分机

(6)天线分机,包含两根天线用于干涉处理,将发射机的输出微波功率进行传输和辐射,然后接收来自辐射目标的回波信号,通过馈线波导传送给接收机,如图 8.5 所示。



图 8.5 天线分机

(7)数据采集分机,由定标、采集 1、采集 2、电源共 4 个模块组成,主要负责采集双通道原始数据和实现系统的内定标功能。

(8)数据记录分机,主要负责将采集的双通道原始数据打包,除了记录两路 I/Q 雷达原始数据,还同步记录用于后处理的辅助数据,如图 8.6 所示。



图 8.6 数据记录分机

(9) 电源分机，是整个雷达系统的供电装置，包括配电箱和电源逆变器，负责提供机载电子设备所需的 28V 直流电和 115V 交流电，并可通过电源控制模块监测各个分机供电是否异常。

8.2 P-SAR 传感器子系统

1. P-SAR 功能

P-SAR 传感器子系统的主要功能，是利用 P 波段电磁波辐射原理来获取全极化（即 HH、VV、HV 和 VH 四种极化）模式下的 SAR 原始数据及辅助数据。P-SAR 传感器子系统的工作原理如图 8.7 所示。

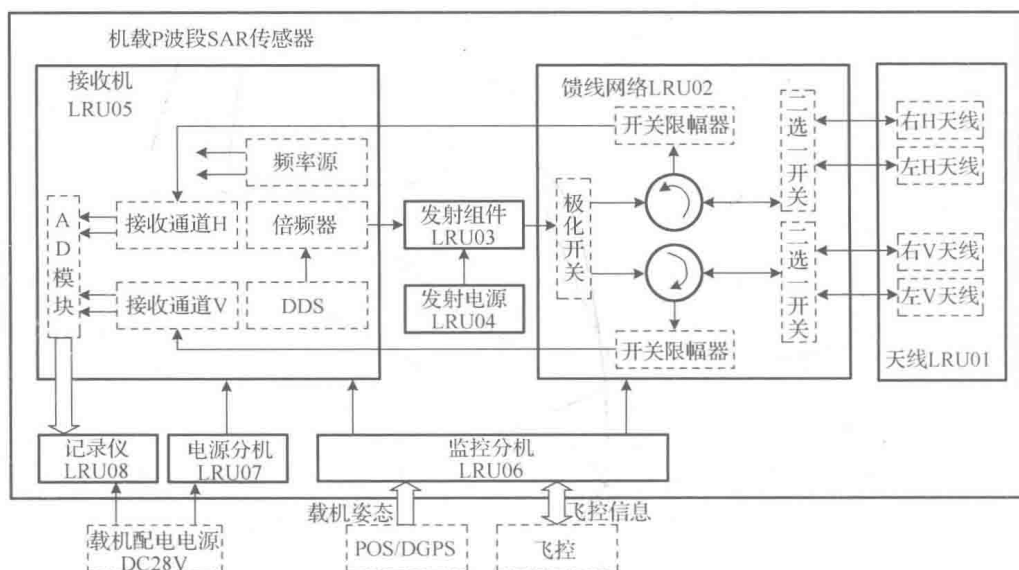


图 8.7 P-SAR 传感器部件的工作原理

当 P-SAR 传感器子系统工作时,在信号发送流程上,频率源首先产生基准频率,然后由波形产生模块生成发射激励信号后送入发射机进行功率放大,最后经环流器送入天线发射。在信号接收流程上,回波信号经天线接收后通过环行器送入接收机依次进行低噪声放大、IQ (In-Phase Quadrature) 解调和 AD (Analog to Digital) 量化,最后将量化后的数据存入高速大容量记录仪。P-SAR 系统通过极化开关交替发射 H、V 极化,双通道同时接收 H、V 极化,在两个脉冲周期内形成 HH、HV、VH、VV 四种极化,并通过 PIN 开关实现左右侧视工作。

2. P-SAR 结构

P-SAR 传感器子系统的结构,主要包括以下分机组件:天线分机、发射机分机、接收机分机、馈线分机、P-SAR 监控分机、数据记录分机和电源分机。其中,P-SAR 监控分机和数据记录分机是主要负责与外界进行信息交互的通信接口。

(1) 天线分机,采用背腔式平面的微带振子天线,由天线框架、微带振子、左右两个天线阵面、天线罩及两个 1 分 8 功分器等组件组成,如图 8.8 所示。天线分机采用双天线的侧视分时工作机制,每个天线采用单发双收的工作模式,因此每个天线阵面可采用 V 垂直极化发射或 H 水平极化发射。双通道接收机同时接收两种极化的回波信号。

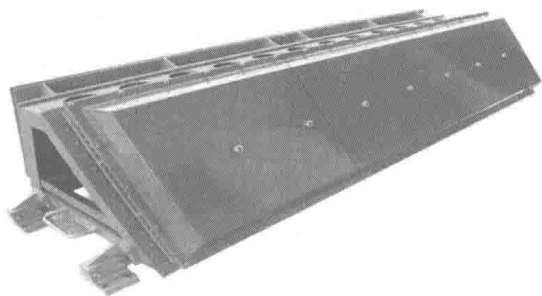


图 8.8 天线分机

(2) 发射机分机,由发射组件、发射电源组成,将输入的 10~13dBmW 激励小信号经高增益放大器、1:4:1 分配合成器进行处理后,输出 1kW 功率,如图 8.9 所示。

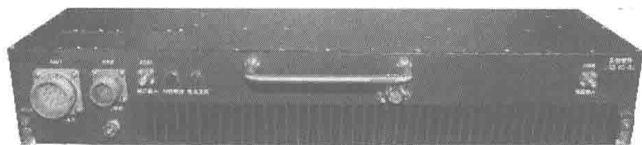


图 8.9 发射机分机

(3) 接收机分机,负责接收来自两种极化天线的回波数据,并经 IQ 解调、AD 量化后存入数据记录分机,如图 8.10 所示。



图 8.10 接收机分机

(4) 馈线分机，由 1 个定向耦合器、4 个三端环行器、1 个单刀四掷、两个单刀双掷及 PIN 保护开关组成，提供天线馈电、选择工作阵面及传输回波信号，如图 8.11 所示。



图 8.11 馈线分机

(5) P-SAR 监控分机，由两块阵面测控插件、印制背板组成，完成对其他分机的状态采集、时序控制及数据通信功能，如图 8.12 所示。

(6) 数据记录分机，由 1 个机载 ATR 机箱、1 个可插拔的存储机体组成，如图 8.12 所示。在数据存储时，将冗余校验数据保存到专用的冗余模板上，并将目录信息存入专用的、秒刷新率的双冗余 E²PROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) 中，保证数据的可恢复性和断电保护。

(7) 电源分机，与 X 波段 SAR 子系统类似，为其他分机提供 28V 直流电，如图 8.12 所示。



图 8.12 电源分机、P-SAR 监控分机和数据记录分机

8.3 飞控导航子系统

1. 飞控导航子系统的主要功能

飞控导航子系统的主要功能，是在飞行过程中利用飞控计算机 (Flight Control Computer, FCC) 采集 POS 和 DGPS (Differential Global Positioning System) 实时测量的载机姿态与位置信息，为飞行员提供航线导航功能。同时 FCC 还对两部雷达子系

统实施操作控制, 利用 POS 系统实现与两部雷达子系统的数据同步。飞控导航子系统的工作原理如图 8.13 所示。

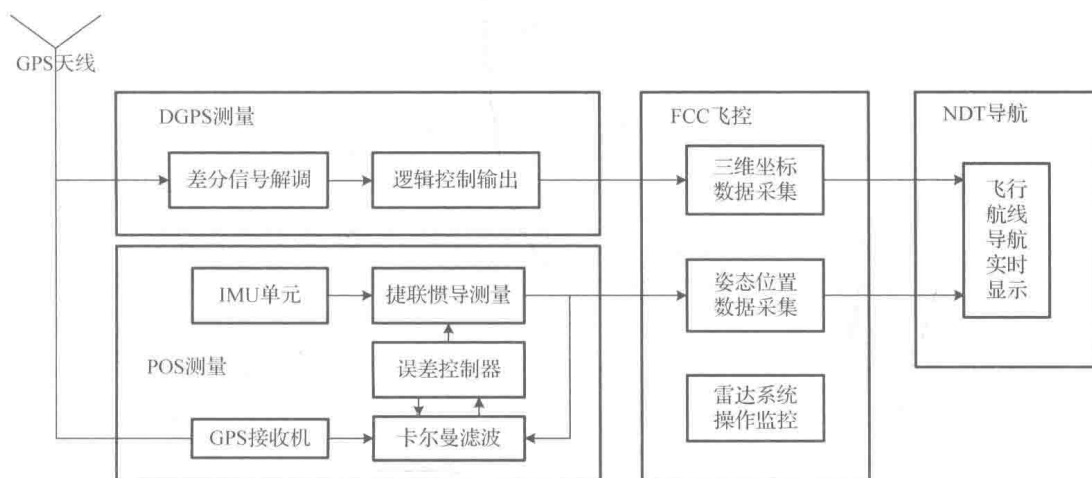


图 8.13 飞控导航子系统的工作原理

如图 8.13 所示, GPS 天线从 GPS 卫星上接收 GPS 信号, 并将接收的信号分两路分别传输至 POS 系统和 DGPS 接收机。POS 系统的内部 GPS 接收机处理 GPS 信号, 经卡尔曼滤波、误差控制器和捷联惯导测量后得到定位数据, 同时 IMU 经捷联惯导测量后得到载体姿态数据, 然后姿态与位置数据一并传输到姿态位置数据采集模块。DGPS 接收机对接收到的差分 GPS 信号进行解调得到精确定位数据, 然后将其经逻辑控制后输出到三维坐标数据采集模块。最后 FCC 将位置数据和飞行姿态数据综合处理后生成航线数据, 并输出至导航终端上显示, 为飞行员提供航线导航。

2. 飞控导航子系统结构

飞控导航子系统主要包括以下组成部件: POS 系统、DGPS 接收机、NDT 导航终端显示器和 FCC。

(1) POS 系统, 即定位定向测量系统, 主要用于测量经纬度、载体三维姿态角、(加)速度、角(加)速度等数据, 并使用标准 GPS 授时与雷达子系统实现数据同步, 如图 8.14 所示。POS 系统包含 PCS 计算机和 IMU 设备, PCS 内置一个 GPS 接收机。



图 8.14 POS 系统