

机载 SAR 实时数字成像处理器的研制*

朱锡兴 荆麟角 黄声根 李建雄 黄玲

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 本文在介绍机载合成孔径雷达实时成像处理器的工作原理和系统组成的基础上,阐述了我国自行研制的第一台机载 SAR 实时数字成像处理器的主要性能和初步应用结果,并给出了该成像系统产生的微波数字图像。

关键词 SAR, 实时成像处理, 多处理器实时操作系统

1 引言

合成孔径雷达(简称为 SAR)是一种高分辨率成像雷达。它采用脉冲压缩技术来提高距离向分辨率,采用基于频率分析原理的合成孔径技术来提高角分辨率,从而把雷达从只能“探测”目标提高到能对目标进行“成像”。合成孔径雷达的高分辨率与作用距离无关,以及它的全天候昼夜工作能力等特性,使它受到各方面的重视并日益广泛地应用于国防和国民经济的许多领域^[1]。

合成孔径雷达有多种工作模式,图 1 是测绘用侧视 SAR 的几何关系。它的成像过程可简单描述如下:一部采用实际孔径较小的天线的雷达装在飞行器上,天线的波束指向与飞行方向垂直的正侧方。雷达一面以匀速直线前进,一面以固定的重复频率发射和接收信号,并把每个包含地物目标特征的回波信号的幅度和相位信息存储起来。将这些信号进行适当的相干处理,就可以使雷达的角分辨率提高到相当于一个天线阵列所产生的效果^[2]。SAR 信号处理,或称成像处理就是把雷达系统收集的包含目标信息的回波信号变换为目标图像。由于 SAR 信号具有数据率高,数据容量大的特征,所以在发展合成孔径雷达的很长一段时期内,一直是采用光学胶片记录数据和光学相关器成像的两步成像方法。由于这种方法缺乏实时性,在军事侦察、灾情监测等需要快速反应的应用领域中存在很大的局限性。到了 80 年代中期,能否实现实时数字成像处理已经成为合成孔径雷达系统先进性的重要标志。

我所已研制出单通道机载合成孔径雷达(包括光学相关器)系统,多条带、多极化机载合成孔径成像雷达系统,与此同时还完成了在通用计算机上实现机载 SAR 数字成像技术的研究等等。近年我们承担了国家 863 计划信息获取与处理技术专题下的攻关课题:“机载 SAR 实时数字成像处理器”的研制任务,现已圆满完成,并通过了中国科学院主持

1994-11-22 收到

* 国家 863 高技术计划资助项目

朱锡兴 男,1938 年生,高级工程师,现从事微波遥感和数字信号处理方面的研究工作。

荆麟角 男,1939 年生,高级工程师,现从事微波遥感和新型雷达等方面的研究工作。

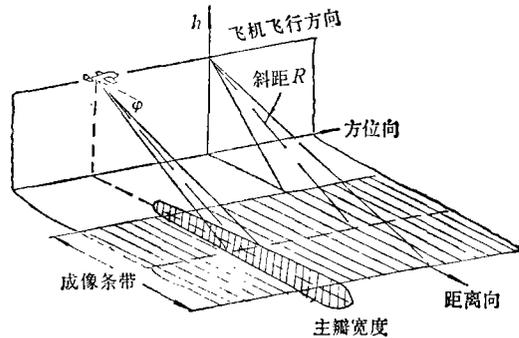


图 1 机载侧视 SAR 工作几何关系示意图

的成果鉴定。

2 数字成像原理和主要技术指标

如前所述, SAR 信号处理器的任务是将雷达收到的原始回波数据变为地面目标的图像。从对合成孔径雷达工作原理的分析知道, 合成孔径雷达收到的回波 $S_r(r, x)$, 可以表达为目标场的雷达波后向散射截面函数 $\sigma(r, x)$ 与两个脉冲响应函数的卷积, 即

$$S_r(r, x) = \sigma(r, x) * [h_1(r, x) * h_2(r, x)],$$

式中

$$h_1(r, x) = \begin{cases} W_a(x)\delta(r - r_1)\exp[-j4\pi r_1(x)/\lambda], & (r, x) \in R_1; \\ 0, & \text{其余;} \end{cases}$$

$$h_2(r, x) = \begin{cases} A(r)\delta(x)\exp[j\varphi(r)/c], & (r, x) \in R_2; \\ 0, & \text{其余;} \end{cases}$$

式中 $W_a(x)$ 为与阵列加权等因素有关的幅度函数; $A(r)$ 为与作用距离等因素有关的幅度函数; c 为无线电波传播速度; $r_1(x) \approx r_0 + (x - x_0)^2 / (2r_0)$; R_1, R_2 分别是 h_1, h_2 的有效范围, 它们与天线波束形状和发射脉冲持续时间等因素有关; 脉冲响应函数 h_2 是同发射脉冲等效的一维波形, 而 $h_1(r, x)$ 通常是二维的, 是一个理想点目标对一个无限窄的发射脉冲的回波响应^[3]。

因此, 合成孔径雷达的数字信号处理, 其基本出发点就是对雷达接收机收到的回波信号进行二维的反卷积运算, 以重建目标场函数, 形成雷达图象。当然, 由于雷达载体的非理想运动和天线指向误差的影响, 在处理过程中还必须引入运动补偿等功能, 所以实际成像时的总运算量将有所增加, 并使方位处理的运算复杂化^[3-5]。

实现 SAR 信号的实时数字成像处理, 要解决许多关键技术, 例如, 合成孔径雷达采集信号的正确数字化、大容量存储器的研制、高效计算方法的研究、研制运算能力足够高的硬件设备和有效的软件操作系统、解决图像数据的实时显示和实时记录, 等等。

在中国科学院电子学研究所研制的机载合成孔径雷达系统中, 已经在接收机内部采用表面声波器件 (SAW) 完成了回波信号的距离向压缩, 所以与之配套的数字成像处理器仅用于实现信号的方位向压缩。由该雷达系统决定的实时数字成像器的主要技术指标有:

成像总体参数要求

双路正交采样频率:	$\geq 15\text{MHz}$
采样精度:	8I, 8Q
每线距离门数:	4096
分辨率(距离 \times 方位):	10m \times 10m
测绘带宽度:	$> 35\text{km}$
方位多视处理能力	
输入行速率:	1024 行/s
前向 FFT 长度:	1024 复数点
逆向 FFT 长度:	256 复数点
多视处理数目:	4 视

此外,为了能在使用实时数字成像处理器的同时,保留现有雷达成像系统(包括原始数据光学记录在内)的全部功能,数字系统部分必须使用与光学记录部分不同的解调基准信号。由上述各种因素确定的机载 SAR 实时成像处理器可由如图 2 所示的 9 个功能块组成:(1) 去偏置频率电路,(2) 正交解调器和时钟产生器,(3) 高速模数变换和时间展宽器,(4) 方位预滤波器,(5) 数据转置存储器,(6) 方位多视处理器,(7) 视频实时显示器,(8) 图像实时记录器,(9) 实时成像处理器主控制器。

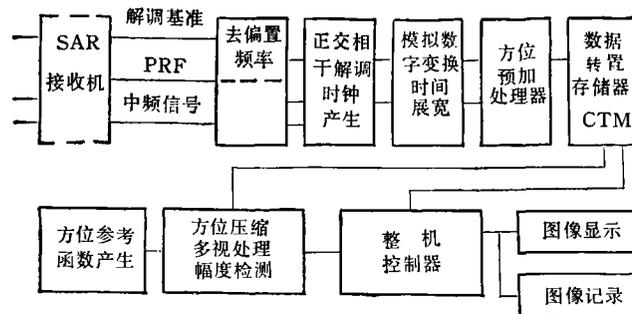


图 2 机载 SAR 实时数字成像处理器原理框图

3 系统组成

上述机载 SAR 实时数字成像处理器的实际结构如图 3 所示。主控制器部分采用以 MC68040 微处理器为核的 MVME167 板,方位多视处理等运算密集型的分机,采用符合 VME 总线标准的专用高速模板。模拟信号的相干解调,模拟/数字变换和时间展宽,方位预处理器等均采用课题组自己研制的专用模板。图像显示部分采用 VG-1281 控制卡,图像数据的记录采用 8mm 磁带机。

在已研制成功的机载 SAR 实时成像系统中,除了在硬件方面采用具有 90 年代初的国际先进水平的高速信号处理模板外,在系统软件方面采用了先进的多处理器实时操作系统,从而较充分地利用了硬件运算能力。

4 初步应用情况

在研制过程中,我们对机载 SAR 实时数字成像处理器的性能,如方位分辨率、最大旁瓣电平、实时成像能力、测绘带宽度、图像动态范围,以及系统的可操作性等等进行了严

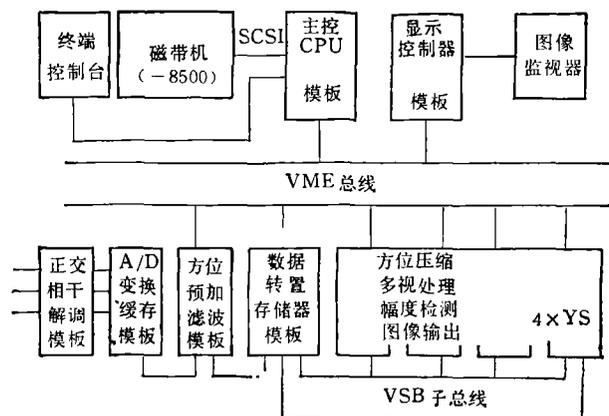
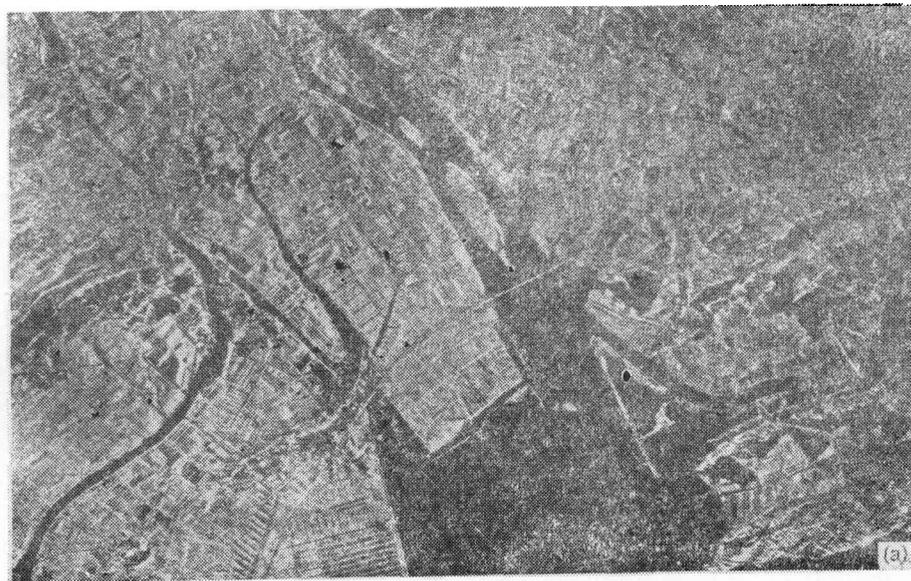


图 3 采用专用高速运算模板的成像器结构示意图

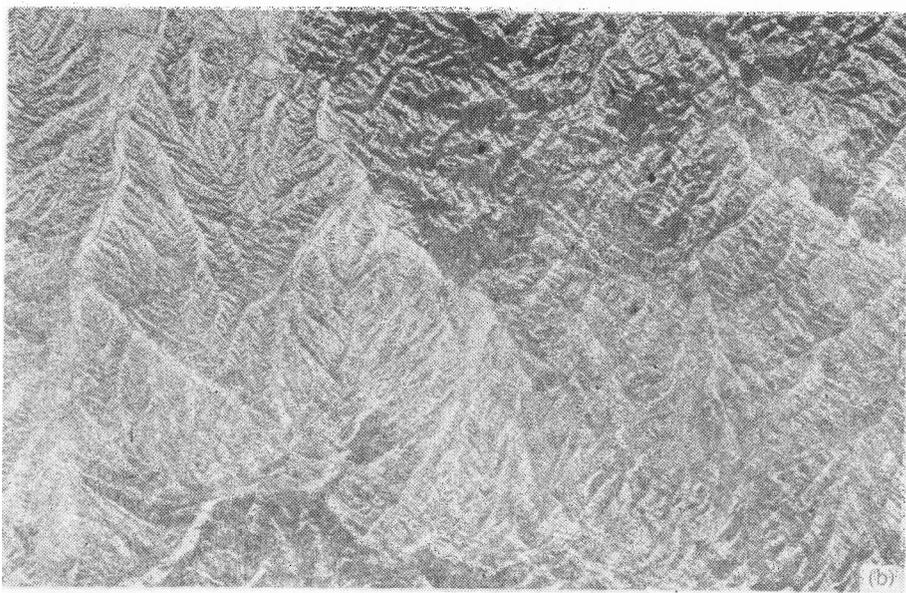
格的测试,并与雷达系统一起进行了机载条件下的实际飞行成像试验,成像地域包括内蒙山地、晋北高原、苏北平原和河网湖泊地区。在 SUN 工作站上对实时成像获得的图像进行了详细的数字分析。所有的试验结果都表明,该系统的性能符合设计要求,在实际飞行测绘条件下达到的主要技术指标如下:方位分辨率优于 9.3m,成像速度为 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{h}$ (相当于飞行速度 650km/h),测绘带宽度大于 40km,动态范围优于 48dB。

图 4 是该实时数字成像器获得的图像的两个实例。图 4(a) 是平原地区的图像,河流、岛屿、桥梁、陆地上的人为目标,乃至水面上人工建筑,都清晰可辨。图 4(b) 是山川地区的图像,在该图像上,山脉走向和地质纹理等都显示得十分清晰。

该实时数字成像处理器研制成功后不久,就实际应用于广东、广西洪水地区的雷达遥感监测和灾情评估行动。在雷雨多云的恶劣气象条件下,在短时间里对 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 面积的地域进行了测绘,获取了大面积的高质量图像,从而为灾情估计、成因分析、整治方案



(a) 广东某平原河口地区的雷达图像实例



(b) 内蒙某山地的雷达图像实例

图 4 机载 SAR 实时数字成像器获得的图像实例

的制订和领导决策提供了有力的依据,取得了很好的效果,产生了明显的社会效益。

参加本工作的还有翟锐锋、刘湛、乔蓉蓉、娄晓光、李朝晖、吴淑梅等人。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M I. Radar Handbook 2nd ed, McGraw-Hill, 1990. Chap. 21.
- [2] Beckner F L, *et al.* Synthetic Aperture Radar (SAR) Data Processing, N78-21567, 197-264.
- [3] Chialin Wu. A Digital Fast Correlation Approach to Produce Seasat SAR Imagery, IEEE International Radar Conference, Arlington, Virginia: April 28-30, 1980.
- [4] Kirk J C. IEEE Trans. on AES, 1975, AES-11(3): 326-337.
- [5] Clurlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc., 1991, Chap. 3 and Appendix A.

DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE SAR REAL-TIME DIGITAL IMAGING PROCESSOR

Zhu Xixing Jing Linjiao Huang Shenggen Li Jianxiong Huang Ling

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract An airborne SAR real-time digital imaging processor is presented, and its real-time digital imaging principle and main technical parameters are analyzed briefly. The system configuration and logical structure are described in detail. Finally the main features of this system and examples of imagery obtained with the system are also presented.

Key words SAR, Real-time imaging processor, Multiprocessor operation system