

# 一个实用化的机载 SAR 实时成像处理系统 和在其他信号处理中的应用<sup>1</sup>

陈冰冰 王贞松\*

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

\*(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

**摘要** 该文详细介绍了一个实用化的机载 SAR 高分辨率实时成像处理系统的信号处理流程, 体系结构以及该系统在其他信号处理领域应用可能性的探讨。由于采用了通用总线, 微处理器和 DSP 芯片, 以及通用的操作系统, 使得该信号处理系统实现了模块的标准化和开发的软件化, 具有良好的应用前景。

**关键词** SAR 实时信号处理, 体系结构, 脉冲多普勒雷达

**中图分类号** TN951, TN911.72

## 1 机载 SAR 高分辨率实时成像处理系统简介

高分辨率的 SAR 信号处理, 是一种高计算强度的系统。SAR 的数据率通常在数十兆字节每秒到数百兆字节每秒之间。过去 SAR 的成像多是在地面由大型计算机完成。随着硬件和软件技术的飞速发展, 对高分辨率 SAR 的原始数据进行实时二维数字成像, 并进行实时记录和实时滚动显示变得可能。面向地学的高分辨率 SAR 就是按照这个思路设计的全数字实时处理系统。该系统主要分为两个部分, 一部分是信号预处理系统, 一部分是成像系统。我们知道机载 SAR 的实际系统并不是理想的, 而且系统在飞行的过程之中, 载机的运动轨迹也不完全是按照理论模型的轨迹运动。因此, 这些实际系统中的不理想, 将在 SAR 原始数据的回波中, 引入各种误差。机载 SAR 点目标真实的回波模型可以表示成为

$$s(\tau, t; r) = \sigma \cdot a\left[\tau - \frac{2}{C}R(t; r)\right] \cdot \exp\left\{j\pi b\left[\tau - \frac{2}{C}R(t; r)\right]^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t; r)\right\} \cdot \exp\{j\phi_{\text{err}}(t, \tau)\} \quad (1)$$

其中  $\sigma \cdot a[\cdot]$  是回波的包络,  $\phi_{\text{err}}(t, \tau)$  是回波中附加的各种相位误差。而相位项  $\exp\{-j\pi b[\tau - (2/C)R(t; r)]^2\} \cdot \exp\{-j(4\pi/\lambda)R(t; r)\}$  则对应的是理想的回波信号模型。信号预处理的一个重要任务就是最大限度地消除回波模型中附加的相位误差和幅度误差, 使得进入成像系统的信号最大限度地接近理想的信号回波模型。对于机载 SAR 来说, 回波相位误差的主要来源是载机非理想运动的运动误差。因此消除由运动造成的相位误差, 是机载 SAR 实时预处理的主要任务, 这部分任务主要由运动传感器 (IMU)<sup>[1]</sup> 进行实时运动补偿完成。运动补偿的过程可以表述为

$$S_{\text{comp}}(\tau, t; r) = s(\tau, t; r) \exp\{-j\hat{\phi}_{\text{err}}(\tau, t)\} = s(\tau, t; r) \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} \int \int_t [h_{\text{HPF}}(t) \otimes \mathbf{A} \cdot \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|}] dt\right\} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{A}$  是 IMU 测量得到的天线相位中心的加速度矢量;  $\mathbf{R}$  是天线相位中心到理想测绘条带中心的单位向量;  $h_{\text{HPF}}(t)$  是一个专用于消除惯性部件, 加速度误差的特殊高通滤波器。此

<sup>1</sup> 2000-12-27 收到, 2002-01-17 定稿

国家自然科学基金资助项目 (NFNS 69896250-2)

外, 经过 AD 变换后的回波的幅度, 在成像处理器中, 并不一定非常理想, 这就需要自动增益部分对回波的增益加以适当控制 (AGC)。而且还需要利用增益控制, 对正交通道进行通道平衡的自适应矫正, 以进一步消除原始数据中的相位误差。自动增益控制和通道平衡控制需要对正交双通道分别进行, 可以表示为

$$SS_{AGC}(\tau, t; r)_I = SS_{comp}(\tau, t; r)_I K / \sigma_Q \quad (3a)$$

$$SS_{AGC}(\tau, t; r)_Q = SS_{comp}(\tau, t; r)_Q K \sigma_I / \sigma_Q^2 \quad (3b)$$

其中,  $\sigma_I$  是孔径内 I 路信号的均方根值,  $\sigma_Q$  是 Q 路信号的均方根值,  $K$  是一个增益控制常数。信号预处理系统的另外一个主要任务是完成回波的方位向降采样。在机载实时系统中, 由于方位向采样率 PRF 往往远大于处理带宽, 因此适当降低采样频率, 不仅不会造成成像分辨率的下降, 反而有助于降低数据率, 减轻成像处理的负担<sup>[2]</sup>。可是, 直接的降采样, 往往造成方位功率谱的混叠, 因此降采样之前需要对数据进行 FIR<sup>[2,3]</sup> 自适应预滤波, 以压缩信号带宽, 减轻功率谱混叠。在一个 SAR 系统中, 信号预处理有着与成像处理对等的作用。成像处理部分我们采用了 RD 算法<sup>[4]</sup>, 并依照这个算法设计了系统。在方位向处理部分除了方位脉压外, 还设置了自动聚焦等运动补偿过程。为了加速聚焦的收敛, 除了在预处理部分使用自适应信号处理外, 还在系统中设置了 GPS 参数传递机制, 将 IMU 传感器得到载机速度参数传递到方位处理板, 并将 IMU 得到的速度作为自动聚焦的初始化参数。经过方位处理后的数据矩阵, 再次转置后, 得到复数图像, 送主机加以实时记录。主机对复数图像取模后, 送显示器进行实时显示。图 1 是机载 SAR 信号处理系统的基本结构框图。

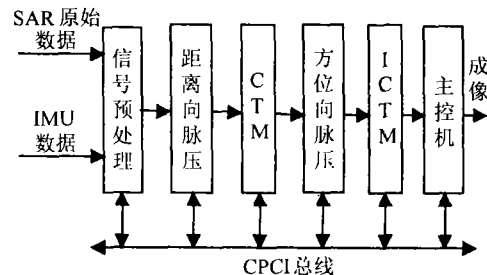


图 1 机载实时成像处理器的体系结构

在体系结构方面, 我们采用了多处理器, 多总线的流水结构, 系统各分机由主控计算机通过 CPCI 总线集中控制, 成像后的数据通过该总线采集, 并实时地将复图像记录到硬盘或其他介质上。并对实图像加以实时的滚动显示。CPCI 总线是 PCI 总线的扩展, 完全兼容微机的 PCI 总线, 而可靠性又得到了进一步加强。由于 CPCI 总线具有很大的传输带宽和高的可靠性, 因此得到了广泛的应用。相关的硬件接口和软件支持也相当完善, 这就为 CPCI 总线的开发提供了良好的条件, 极大地加快了开发的进程。主控计算机采用了先进的 PIII 处理器, 运行 WindowsNT 操作系统。目前基于实时 Linux 平台的成像处理已经开发完毕, 并得到了成像结果, 可望近期内投入使用。由于 Linux 源码开放, 一旦投入使用, 该成像处理器将拥有全部的自主软件知识产权, 有着非常重大的意义。

系统中各分机之间数据通信, 采用 CAB 总线组成流水结构, 极大地扩展了数据传输的带宽。各分机除了信号预处理部分采用了大规模 CPLD 完成信号预处理任务外, 其余的所有分机全部采用 DSP 芯片或者微处理器完成信号处理和数据转置的任务。距离脉压和方位脉压的板载 DSP, 采用了 TI 公司新一代的高速信号处理芯片。而且每个处理板具有四个处理芯片, 支持板级的流水结构。由于通用总线、微处理器芯片和操作系统的使用, 使得该信号处理机的处

理任务可以主要通过软件来实现, 整个实时信号处理机系统, 就是一个通用的超级运算平台。它不仅可以应用于 SAR 信号处理, 还可以应用于其他体制的雷达信号处理, 以及通信系统的信号处理之中。

## 2 一些实时成像处理的结果

图 2 是飞行中成像处理器实时成像并实时记录下的一幅 SAR 图像。后来我们利用该成像处理器对比了基于运动传感器 (IMU) 的运动补偿, 实时后自动增益控制, 实时自适应预滤波和固定系数预滤波, 自适应预滤波对方位幅度调制的消除, L-SAR 实时成像等课题的研究, 并取得了大量的成果。图 3 是图 2 的数据经过实时 IMU 运动补偿后的结果, 运动补偿的效果相当明显。图 4 和图 5 分别是实时自适应预滤波对方位调制的消除效果。图 6 是利用当年飞行的 L-SAR 数据, 通过 SAR 信号源回放, 然后输入该实时成像处理器得到的 L-SAR 的地面图像。

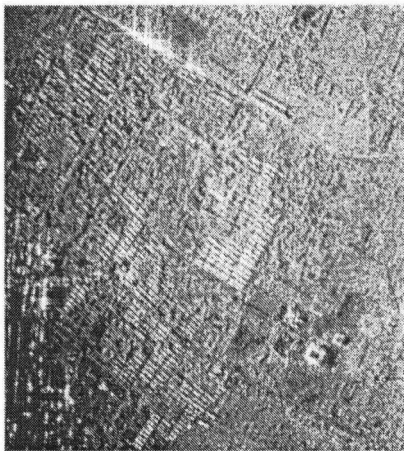


图 2 飞行中的实时成像结果 (无 IMU 补偿)

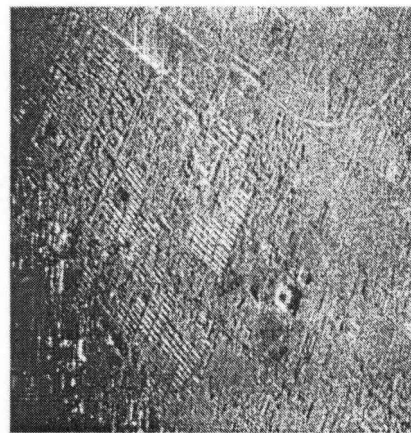


图 3 IMU 运动补偿后的结果

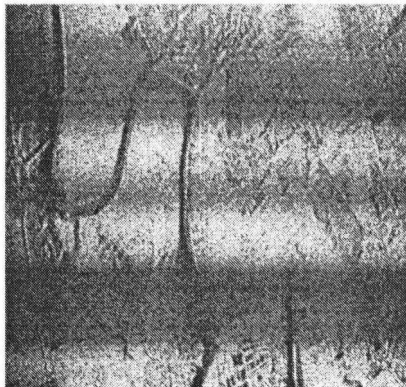


图 4 固定预滤波造成方位幅度调制

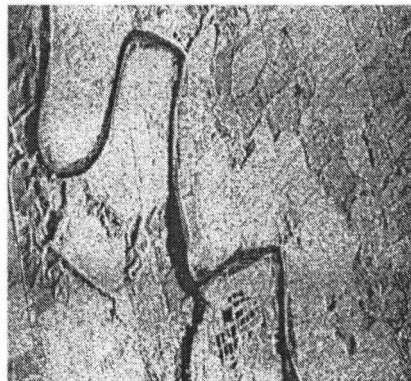


图 5 自适应预滤波后得到的图像

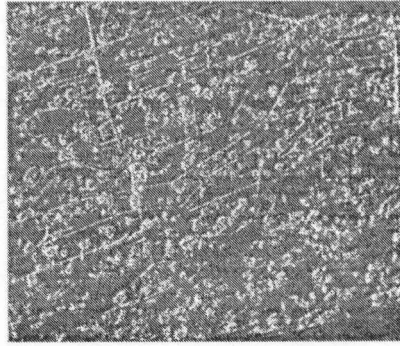


图 6 某地农村的 L-SAR 图像

### 3 系统实时性能分析

定义参数:  $N_r$  为距离向样本点数,  $N_a$  为方位向样本点数,  $M$  为降采样率,  $R_{\text{pipe}}$  为距离向处理板流水 DSP 的数目,  $A_{\text{pipe}}$  为方位向处理板流水 DSP 的数目,  $t_r$  为一条距离线脉压时间,  $t_a$  为一条方位线脉压时间,  $t_{\text{CTM}}$  为转置时间,  $t_{\text{record}}$  为图像实时记录时间, PRF 为脉冲重复频率。

首先分析预处理部分。预处理由于采用了大规模 CPLD 的处理模式, 所有处理单元可以完全并行设置, 因此实时性能的分析只需考虑对实时性能影响最大的降采样滤波器部分。假设预滤波处理能力为  $P_{\text{pref}}$ , 则要求在一个脉冲周期内完成距离向所有样本的一次乘法累加, 则  $P_{\text{pref}}$  可以由下式表示

$$P_{\text{pref}} = 2N_r \text{PRF} \quad (4)$$

考虑距离向实时性能的时候, 需要考虑降采样的作用。它要求在  $M$  个脉冲周期内, 完成一条距离线的脉冲压缩。即

$$t_r \leq M/\text{PRF} \quad (5)$$

CTM 由于带有缓存, 要考虑平均效果。需满足  $MN_a/(\text{PRF})$  个脉冲周期内完成 CTM

$$t_{\text{CTM}} \leq MN_a/(\text{PRF}) \quad (6)$$

方位向处理需要考虑三页式和两页式结构的区别。以三页转置为例

$$2N_g t_a \leq MN_a/(\text{PRF}) \quad (7)$$

ICTM 的要求与 CTM 相同。实时存贮显示的要求可以表示为

$$t_{\text{record}} \leq MN_a/(\text{PRF}) \quad (8)$$

由于  $t_r$ ,  $t_a$ , PRF,  $t_{\text{record}}$  都是已知参数, 因此可以利用 (5), (6), (7), (8) 式计算系统中各处理模块, 对降采样率  $M$  的要求, 最后系统的总降采样率为  $M = \max[M_r, M_{\text{CTM}}, M_a, M_{\text{ICTM}}, M_{\text{record}}]$ 。如果再考虑到距离和方位板上的 DSP 可以做并行流水线处理, 最终的降采样率将是

$$M = \max \left[ \frac{M_r}{R_{\text{pipe}}}, M_{\text{CTM}}, \frac{M_a}{A_{\text{pipe}}}, M_{\text{ICTM}}, M_{\text{record}} \right] \quad (9)$$

将有关参数带入 (4), (5), (6), (7), (8), (9) 式求得在单 DSP 处理模式下, 对 L-SAR 三页存贮方式满足

$$M_L = \max [M_r, M_{\text{CTM}}, M_a, M_{\text{ICTM}}, M_{\text{record}}] = \max [5, 4, 10, 4, 1] = 10 \quad (10)$$

对 X-SAR 三页存贮方式满足

$$M_X = \max [M_r, M_{\text{CTM}}, M_a, M_{\text{ICTM}}, M_{\text{record}}] = \max [4, 3, 8, 3, 1] = 8 \quad (11)$$

同理, 在全部 DSP 进入流水处理状态下, L-SAR 和 X-SAR 降采样率分别是

$$M_L = \max \left[ \frac{M_r}{R_{\text{pipe}}}, M_{\text{CTM}}, \frac{M_a}{A_{\text{pipe}}}, M_{\text{ICTM}}, M_{\text{record}} \right] = \max [2, 4, 2, 4, 1] = 4 \quad (12)$$

和

$$M_X = \max \left[ \frac{M_r}{R_{\text{pipe}}}, M_{\text{CTM}}, \frac{M_a}{A_{\text{pipe}}}, M_{\text{ICTM}}, M_{\text{record}} \right] = \max [1, 3, 2, 3, 1] = 3 \quad (13)$$

CTM 是一个系统的瓶颈。这是由于 CTM 采用了比较低速的 DRAM 的缘故。利用降采样率  $M$ , 就可以确定方位向预处理滤波器的截止频率等重要参数。目前, 利用更高速度 DRAM 作为存贮介质的 CTM 板正在研制之中。

L-SAR 和 X-SAR 实测的一些参数列于表 1。

表 1 L-SAR 和 X-SAR 实测的一些参数

参数	L-SAR	X-SAR
PRF(Hz)	667	1000
距离向样本点数 $N_g$	8192	4096
$P_{\text{pref}}$ (MIPS) <sup>[1]</sup>	300(10.9)	300(8.2)
方位向样本点数 $N_a$	2048	2048
$t_r$ (ms)	7.0	3.4
$t_a$ (ms)	1.8	1.8
$t_{\text{CTM}}$ (ms)	10064(三页)	5023(三页)
$R_{\text{pipe}}$	4	4
$A_{\text{pipe}}$	4	4
$t_{\text{record}}$ (ms)	980	437

[1] 括号中的数值是为了满足实时性要求需要的处理能力。

## 4 实时成像处理系统在其他信号处理中的应用

### 4.1 在脉冲多普勒雷达信号处理中的应用

经典的机载脉冲多普勒雷达的处理过程<sup>[5]</sup>其实非常类似于 SAR 的成像处理过程。它也需要首先进行信号的方位向预处理 (MTI) 滤波, 然后分别进行距离向和方位向处理, 对运动目标进行检测, 并对目标的径向速度进行估值。脉冲多普勒雷达预处理所使用的 MTI 滤波器是凹口对准低速杂波谱的梳状滤波器<sup>[6]</sup>。它既可以是 FIR 的也可以是 IIR 的。如果使用 FIR 的类型, 除了系数设计与 SAR 预处理 FIR 设计不同外, 其余滤波器的结构和算法流程完全相同, 这

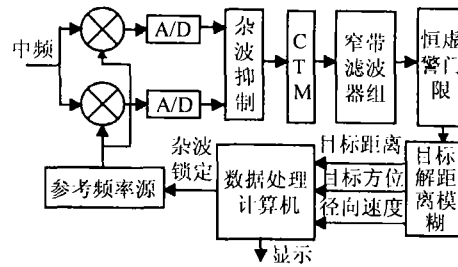


图 7 脉冲多普勒雷达典型信号处理结构

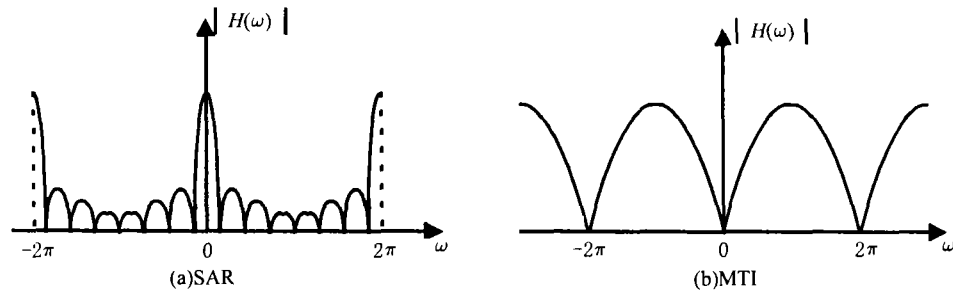


图 8 两种体制雷达的预处理滤波器频率响应

只需要将 SAR 的信号预处理滤波器系数加以更换, 并且关闭降采样和运动补偿部分即可。图 7 是脉冲多普勒雷达典型的信号处理流程。图 8(a) 是 SAR 方位向预滤波器的频率响应示意图。图 8(b) 是一种非递归二次 MTI 滤波器的频率响应示意图。需要注意的是, 在 PD 雷达中, 不同的脉冲重复频率 PRF 对预处理滤波器的频率响应特性要求是不同的。因此, 预处理滤波器应该是参数能够随工作模式不同而可以在线设置的。为了提高距离方向的分辨率, 现代脉冲多普勒雷达同样采用了脉冲压缩技术。当然, 对于工作在高脉冲重复频率 (HPRF) 模式下, 也可以不使用脉冲压缩。对于距离向脉冲压缩后的数据, 经过 CTM 转置后, 实时地发往多普勒滤波器组。在这里, 方位向处理并不进行脉冲压缩, 而是通过多普勒窄带滤波器组。数字处理中, 通常是对方位数据进行 FFT 处理, 并根据滤波的结果为每个距离、频率通道计算恒虚警门限, 从而检测目标。同时对于 HPRF 工作模式, 利用恒虚警检测的结果进一步估计载机与目标之间的径向速度。PD 雷达对方位数据的处理就远比 SAR 要简单。PD 雷达无论工作在中脉冲重复频率 (MPRF), 还是高脉冲重复频率模式, 都需要解算距离模糊。解算距离模糊有多种方法。如调频脉冲法、多 PRF 法和扣脉冲法等。由于解算只是在判定有目标存在的空间上进行, 因此运算量相对较小。比之机载 SAR 高分辨率成像而言, PD 雷达信号处理的整体运算量相对要小许多。图 1 的信号处理平台已经具备了 PD 雷达信号处理所需要的所有硬件资源。整个处理过程只需要编写相应的软件就可以基本实现了, 而硬件上并不需要改动。类似 FFT, 脉冲压缩等信号处理程序, 经过优化和测试, 可以写成函数库, 随时供使用者调用。而且对于不同的项目, 可以考虑增减标准的硬件模块。无疑, 这个平台将为雷达信号处理系统的设计带来很大的方便。

#### 4.2 在无线通信信号处理中的应用

由于图 1 系统中, 信号预处理部分是利用规模很大的 CPLD 来实现的, 因此该系统的硬件接口相当灵活。除了可以用于多种体制的 SAR 系统外, 同样可以非常方便地构造一个无线通信的信号处理平台。我们知道, 无线通信系统中, 同样也有信号预处理部分。我们可以把自适应的均衡滤波器, 自动频率控制 (AFC) 作为信号的预处理。把这部分, 利用 HDL 语言编写到预

处理的大规模 CPLD 中。利用软件,可以方便地编写后续信号处理的软件,以及在这个平台上的应用软件。有关这方面的工作正在开展。

## 5 结 束 语

我们成功地设计了一个 SAR 实时信号处理的通用系统。由于该系统体系结构具有很强的通用性、系统的可扩展性和软件的继承性。这就为下一步开发星载实时成像处理系统提供了有益的借鉴。除了用于 SAR 实时信号处理外,该系统在其他信号处理领域同样具有广泛的用途。

## 参 考 文 献

- [1] 李立伟, 高分辨率机载合成孔径雷达中运动补偿问题的研究, [博士论文], 北京, 北京航空航天大学, 1998.10, 35-42.
- [2] 张澄波, 综合孔径雷达原理、系统分析与应用, 北京, 科学出版社, 1989, 236-243.
- [3] J. H. McClellan, T. Parks, A unified approach to the design of optimum FIR linear-phase digital filters, IEEE Trans. on Circuit Theory, 1973, CT-20(11), 697-701.
- [4] Giorgio Franceschetti Riccardo Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing, CRC Press, 1999, 138-141.
- [5] 丁鹭飞, 张平, 雷达系统, 西安, 西北电讯工程学院出版社, 1984, 172-200.
- [6] 丁鹭飞, 耿富录, 雷达原理, 修订版, 西安, 西安电子科技大学出版社, 1995, 256-276.

## AN APPLIED AIRBORNE SAR REAL-TIME SIGNAL PROCESSING SYSTEM AND ITS APPLICATION TO OTHER SIGNAL PROCESSING AREAS

Chen Bingbing      Wang Zhensong\*

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

*\*(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

**Abstract** This paper discusses an applied high resolution airborne SAR signal processing system, its processing flow and its architecture. It also discusses the possible applications to other intense signal processing areas. Since the universal bus, microprocessors, DSP chips and Linux have been applied, both hardware and software modules in this system have been standardized. This will accelerate the further development.

**Key words** SAR, Real-time signal processing, Architecture, Pulse Doppler radar

陈冰冰: 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事高分辨率微波遥感系统理论的研究和高处理强度实时数字信号处理系统的研制和 SOC 设计等工作。

王贞松: 男, 1945 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事高分辨率微波遥感系统的理论, 高处理强度数字信号处理系统体系结构的研究工作。