

使用去调频宽带 LFM 信号的 SAR 实时成像处理

李明峰^{1,2}, 王贞松¹, 张 涛¹, 姚 萍¹, 韩冀中¹

(1. 中科院计算技术研究所, 北京 100080; 2. 中科院电子学研究所, 北京 100080)

摘 要: 本文阐述了对采用去调频宽带 LFM 信号方法的 SAR 条带模式数据进行高分辨率实时成像的处理算法. 与以前的实时处理不同之处在于: (1) 距离向目标的回波信号经过了去调频处理; (2) 要对距离单元迁移实时校正; (3) 方位向单孔径实时连续成像. 本文详细讨论了对 SAR 距离向去调频数据处理的原理和方法, 提出适合实时处理的距离迁移校正的方法, 并分析了整个实时处理流程的时限和计算量. 实践证明本文的实时处理算法和流程是有效的.

关键词: SAR; 去调频; 实时成像处理; 距离单元迁移校正

中图分类号: TN957. 52 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 12-1912-03

The RealTime Image Processing of the SAR of the De2Chirped Wide Bandwidth LFM Signal

LI Ming2feng^{1,2}, WANG Zhen2song¹, ZHANG Tao¹, YAO Ping¹, HAN JI2zhong¹

(1. Institute of Computing Technology, Academia Sinica, Beijing 100080, China;

2. Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract: The high resolution realtime image processing method for the strip mode SAR with the stretching method of the broadband LFM signal is discussed in this paper. There are three differences from the existing realtime image processors. The first is the echo of range is de2chirped in SAR receiver, the second is the necessity of realtime correcting the range cell migration during the processing and the third is the realtime continuous processing by one2aperture method in azimuth. The processing principle and method for the de2chirped range data is analyzed in detail and the RCMC suited for realtime processing is discussed carefully. At last, the time limitation and the total amount of computation in realtime image processing are analyzed clearly.

Key words: SAR; de2chirped LFM Signal; realtime image processing; RCMC

1 引言

众所周知, 为了提高合成孔径雷达 (SAR) 的距离向分辨率 Q 和方位向分辨率 Q_a , 就必须增加发射的线性调频 (LFM) 信号的带宽 B_r 和方位向处理的多普勒带宽 B_a ^[1], 而 SAR 方位向的采样率 PRF 是由 B_a 决定的, 在机载条件下通常是过采样的; 距离向的采样率 F_s 则是由 B_r 决定的, 一般不能低于 B_r , 否则将造成距离向数据在频域的频谱混叠, 使与频域有关的算法失效.

根据总采样时宽 T_r 与发射的 LFM 信号脉冲宽度 S_0 以及测绘带宽度 L_0 之间的关系^[2]:

$$T_r = S_0 + 2L_0/c \quad (1)$$

可知在 S_0 和 L_0 一定时, 随着分辨率的不断提高, 采集的数据量也不断提高, 尤其是在高分辨率的情况下, 数据量更是成倍的增长, 既极大地增加了数据处理的负担, 又限制了高分辨率条带 SAR 的应用. 采用去调频的方法可减小待处理的信号带宽从而降低采样率, 减少数据处理量. 在合成孔径雷达中, 这一技术被用于聚束模式的合成孔径雷达 (Spotlight SAR), 但是聚束模式观测带不连续. 为解决高分辨率和观测带连续这对矛盾, 本次试飞的 SAR 在条带模式下也采用了去调频技术, 并率先在国内实现了优于 1 米分辨率的实时成像.

2 距离向处理方法

2.1 去调频信号分析

回波信号与一个作为基准的、有相同调频斜率 K_r 、脉冲宽度为 T_r 的 LFM 信号的混频过程就是对回波信号的去调频过程, 见图 1. 去调频

是求两个信号相位差的过程, 通过相位差来反映频率差, 利用的是 LFM 信号频率与时间成线性关系这一特性, 把一个频率随时间作线性变化的 LFM 信号变换为一个固定频率信号, 频率的高低则由两个信号的相对位置决定. 当

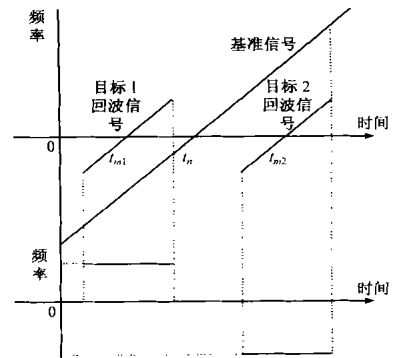


图 1 去调频示意图

测绘带宽度 L_0 一定时, 如果把整个距离向去调频后的回波数据看成一个新的信号数据, 那么该新信号的带宽为:

$$Sf_{\text{new}} = K_r @ (2L_0/c) \quad (2)$$

可见, 新信号的带宽只与 K_r 和 L_0 有关, 而与发射的 LFM

信号带宽 B_r 无关, 采样频率只要略大于 f_{new} 即可。

具体来说, 若 t_n 是基准 LFM 信号的中心时刻, t_m 是目标回波的中心时刻, $S_1 \sim S_2$ 是目标回波被基准信号去调频的区域, 显然去调频的区域不能大于 S_0 , r 是目标到天线相位中心的距离, 则有回波的延时 t_d :

$$t_d = 2r/c = t_m - S_0/2 \quad (3)$$

去掉载频后, 回波信号 $s(t)$ 可表示为:

$$s(t) = \exp\{-j2P f_{dc} t\} @ \exp\{jPK_r(t - t_m)^2\}, \\ - S_0/2 [t - t_m] S_0/2 \quad (4)$$

基准 LFM 信号 $s_d(t)$ 为:

$$s_d(t) = \exp\{jPK_r(t - t_n)^2\} \quad (5)$$

目标回波被去调频后, 形成新的信号:

$$g(t) = s(t) @ s_d^*(t) \\ = \exp\{-j2P f_{dc} t\} @ \exp\{-jPK_r(t_n^2 - t_m^2)\} \\ @ \exp\{j2PK_r(t_n - t_m)t\}, S_1 [t - S_2] \quad (6)$$

对 $g(t)$ 进行傅立叶变换, 可知:

$$F(g(t)) = \int_{S_1}^{S_2} g(t) \exp\{-j2Pft\} dt \\ = A \exp\{-j2P f_{dc} t\} \# \exp\left\{j2P(f_0 - f) \frac{S_1 + S_2}{2}\right\} \\ \text{sinc}(2P(f_0 - f)(S_2 - S_1)/2) \quad (7)$$

式(7)中

$$A = (1/(S_2 - S_1)) \exp\left\{-jPK_r(t_n^2 - t_m^2)\right\} \quad (8)$$

$$f_0 = K_r(t_n - t_m) \quad (9)$$

从式(7)可以看出去调频后的点目标回波频谱是一个 sinc 函数, 峰值位于 f_0 , 3dB 宽度为其分辨率^[1], 则其频谱分辨率可近似表示为:

$$Q = 1/(S_2 - S_1) \quad (10)$$

对应的距离分辨率为:

$$Q = \frac{S_0}{S_2 - S_1} \# \frac{c}{2B_r} \quad (11)$$

需注意的是采用去调频的 SAR 与一般使用宽带 LFM 信号的 SAR 的距离分辨率是有区别的, 与回波信号被去调频的范围相关, 这一点常常被忽视. 对于完全去调频的目标回波, 即 S_2 与 S_1 之差等于 S_0 时, 目标在频谱上的分辨率最高, 所对应的距离分辨率也达到了理论值。

2.1.2 回波数据的距离向处理

根据上述的推导可以看出距离向上不同位置的目标回波被同一基准信号去调频后, 其频率响应的峰值将出现在不同的频率点上, 只要频差大于 Q 就可以从频谱上分辨出各目标; 从另一个角度看, 频域上的每个频率范围都与距离向上一定位置的目标相对应, 这个特性使得用去调频后的回波频谱代替距离向的时域图像成为可行的实时成像方法。

在本次飞行试验中, 为了充分利用 DSP 芯片内部的高速缓存, 在对距离向数据实时处理中, 以测绘带中心目标的回波中心为基准, 前后分别连续截取 2048 个样本点, FFT 后经过数据重排形成距离图像. 根据式(11), 在极限情况下, 测绘带最近端和最远端的目标分辨率将下降 15%, 但由于发射的 LFM 信号带宽为 240MHz, 在下视角小于 30 度时, 其分辨率仍可以

小于 1 米, 因此这种距离向的实时处理方法仍然可以满足成像的要求, 同时进一步降低了待处理的数据量, 在不明显影响图像分辨率的同时提高了实时成像效率。

3 方位向处理方法

通过上述的推导可以看出距离向的去调频处理在相同的距离分辨单元产生相同的附加相位, 因此数据的方位向处理不受距离向去调频的影响。

考虑到 DSP 芯片进行 FFT 运算的高效性和后续处理中的多视处理和基于多视处理的 MD 算法^[3]的需要, 对方位向数据进行处理时, 仍采用匹配滤波的方法, 即在频域完成对原始数据的匹配滤波, 然后返回时域, 形成图像, 这一过程与传统的 R2D 算法相似. 但是, 在本次试验的方位向实时处理中, 与传统的 R2D 算法不同的是用单孔径成像法, 每次只保留一个合成孔径范围的图像, 这一方面是由于 SAR 的方位向波束角较宽、数据量较大, 另一方面是根据实时 RCMC 确定的. 根据对测绘带连续实时成像的要求, 在飞行过程中实时处理的一条方位线仅包括两个综合孔径的数据, 匹配滤波后只从中截取一个完整孔径的结果数据用于拼接, 这样一方面保证了图像的质量, 另一方面克服了类似 Spotlight 模式小区域成像造成的边界模糊, 图像不连续的情况。

4 实时距离单元迁移校正(RCMC)处理

根据距离单元迁移的表达式:

$$s_{rd} = (K/2) @ f_{dc} @ s - (K/4) @ f_{dr} @ s^2 \quad (12)$$

其中 s 是方位向的时间, f_{dc} 是多普勒中心, f_{dr} 为多普勒调频率, 虽然在整个合成孔径时间内距离弯曲可以达到几十个距离分辨单元, 但考虑到实时处理中 Q 和 Q 相匹配即可, 并不需要过高, 只需根据关系式:

$$(Q/K) \setminus R_c/8Q \quad (13)^{[4]}$$

来决定是否需进行弯曲校正. 在飞行试验中, Q 为 0.625 米, R_c 约 16 公里, K 为 0.0193 米, 根据式(13)可知 Q 为 111 米, 因此不需要弯曲校正, 只要校正距离走动即可。

由于在一定的测绘带宽度内 f_{dc} 近似相等, 因此可以在时域完成距离走动的校正. 考虑到距离向用数据的频谱图来代替时域图, 因此利用傅立叶变换的频移关系, 在每条距离线的时域数据上乘以一个特定频率的校正因子 $\exp(-jXt)$, 这样在距离向进行 FFT 后, 不仅得到距离向的图像, 而且把距离走动也校正到一个距离分辨单元内。

频率校正因子由方位向数据预处理时通过杂波锁定得到的 f_{dc} 来确定, 其表达式为:

$$X_i = 2P \left[f_{dc} @ \frac{K}{c} @ K_r @ \frac{i - i_0}{F_a} \right] \quad (14)$$

i 为当前处理的距离线, i_0 为校正走动时选择的基准单元所在的距离线, 在实时处理中以孔径中心所在的距离线为基准; F_a 代表方位向降采样以后的采样率。

这种以孔径中心为基准的距离走动校正带来的一个问题是在距离图像经方位压缩处理后, 会发生图像倾斜, 即本来在相同距离位置的目标沿距离向发生了错位, 其幅度与走动校正的幅度相同. 这一问题可以通过图像域距离向像素的简单平

移来解决,从而使得实时处理中相邻两帧的图像可以无缝的拼接起来。

5 实时成像处理流程和时限分析

在本次飞行试验中,对 SAR 信号的实时成像根据对进入处理机的实时数据流的处理分为方位向数据预处理、距离压缩和走动校正、转置存储、方位压缩、逆转置存储和数据截取与存储显示几个部分,其中方位向降采样率为 8,等效的 PRF 为 250Hz,为进一步提高方位分辨率留出裕量;距离向处理的样本数为 4096 个,方位向处理的样本数也是 4096 个,主控机从中截取 2048 个结果数据,在 812 秒内输出一个合成孔径的图像。

根据实时成像处理要求,每个部分的数据传输间隔是相同的,如时限的定义为实时处理机相应模块接收一条数据线的的时间总和,那么根据图 2 的分析可知各部分的时限关系:

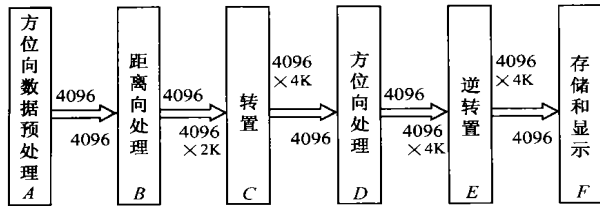


图 2 实时处理时限分析图

$$T_a / 4096 = T_b / 4096 \quad T_b / 4096 = T_c / (4096 @ 2048)$$

$$T_c / (4096 @ 4096) = T_d / 4096 \quad T_d / 4096 = T_e / (4096 @ 4096)$$

$$T_e / (4096 @ 4096) = T_f / 4096$$

可知 $T_b = T_a$, $T_c = T_e = 2048T_a$, $T_d = T_f = 0.15T_a$ 。

在实时处理时, $T_a = 8 @ (1/2000) = 4\text{ms}$, 由此可知 $T_b = 4\text{ms}$, $T_c = T_e = 8.2\text{s}$, $T_d = T_f = 2\text{ms}$ 。

6 实时成像处理的计算量分析

在本次飞行试验中,主要的计算量集中在方位向数据处理、距离压缩、方位压缩这几步。在实时成像处理期间进行的计算次数见表 1:

表 1 主要处理过程的计算量

	方位向 预处理	距离向处理 (含走动校正)	方位向处理	总计计算量
复数乘法(次)	134.22 @ 10^6	58.72 @ 10^6	268.43 @ 10^6	461.37 @ 10^6
复数加法(次)	134.22 @ 10^6	100.66 @ 10^6	503.31 @ 10^6	738.19 @ 10^6

除方位向预处理外,运算都是由 DSP 芯片完成的,要求完成每秒近 1G 的运算量。这一方面需要高性能的 DSP 芯片作为数据处理的基础,另一方面需要合理的体系结构和工作时序保证 DSP 芯片之间的协调工作。在本次飞行试验中,实时处理器以 TI 公司的 TMS320C6201 DSP 芯片为核心处理芯片,采用数据轮发、多 DSP 芯片并行处理的方式解决了高运算量的问题。

7 结论

在这次飞行试验中,对实时数据流进行处理时,在距离向直接对被去调频的回波数据作 FFT,用频谱图代替时域图;在方位向用基于匹配滤波的算法实现方位压缩,成功地在国内率

先实现了优于 1 米 X 1 米分辨率的连续条带成像,并且图像质量良好。图 3 是经过实时成像处理得到的图像,并在处理中对距离走动进行了实时校正。由于方位向数据的多普勒带宽还没有被完全利用,如果引入高效的距离弯曲校正算法,方位向分辨率还可以做到 0.5 米或更高,这也是以后实时成像的目标。

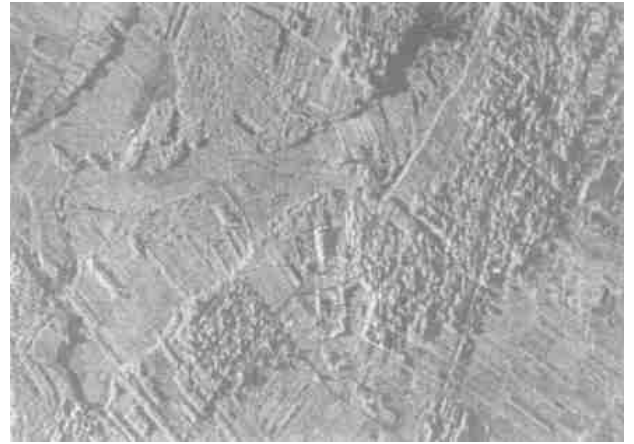


图 3 陕西某地雷达图像

致谢 感谢 38 所的张长耀老师,葛家龙老师以及方志洪、邓海涛、陈仁元、王燕宇等 38 所的各位同事给本文提出的参考意见

参考文献:

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 1-12, 43-45.
- [2] W G Carrara, R S Goodman, R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, INC, 1995. 27-30.
- [3] Giorgio Franceschetti, Riccardo Lanari. Synthetic aperture radar processing[M]. New York: CRC Press LLC, 1999. 152-155.
- [4] John C Curlander, Robert N McDonough. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, INC. 1991. 171-176.

作者简介:



李明峰 男, 1974 年 9 月生于吉林省长春市, 现为中科院电子所与计算所联合培养的博士研究生, 研究方向为信号处理和 SAR 成像。



王贞松 男, 1945 年 11 月生于上海市, 现为中科院计算所研究员, 博士生导师, 主要研究方向: SAR 系统设计、实时信号处理和处理机的体系结构。