

基于去调频宽带 LFM 信号的二次距离压缩算法 及其实时实现¹

姚萍*** 张涛** 李明峰** 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: 该文在基于匹配滤波的二次距离压缩算法 (SRC) 基础上, 通过对去调频的线性调频 (LFM) 信号的时、频域关系的分析, 给出基于去调频 LFM 信号的 SRC 算法, 与距离多普勒算法 (RD) 和普通 LFM 信号 SRC 算法对比, 分析该算法的运算量, 说明该算法适合于去调频体制 SAR 实时成像处理. 对于去调频 SAR 数据采用该算法压缩得到清晰的图像, 同时对比斜视下 SRC 与 RD 成像的结果, 验证了在高分辨率实时成像时 SRC 算法优于 RD 算法.

关键词: 合成孔径雷达, 二次距离压缩, LFM 信号, 去调频宽带 LFM 信号

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0181-07

SRC Imaging Method of De-chirped Broadband LFM Signal and Its Real Time Implementation

Yao Ping*** Zhang Tao** Li Ming-feng** Wang Zhen-song**

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

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

Abstract Based on the analysis of the time and frequency domain character of the de-chirped broadband LFM signal, this paper presents the SRC imaging method of SAR with de-chirped LFM signal. In comparison with the RD and SRC method of normal LFM signal with the same swath and resolution, this method is proved suitable for real time processing with a decrease of data to be processed and a little amount of calculation increased. Data collected in de-chirp LFM SAR system is formed into images with this method and demonstrates it is better than RD to form fine-resolution images when there exists a squint angle in SAR system, which is usually the case in reality.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Second Range Compression(SRC), LFM signal, De-chirping wide bandwidth LFM signal

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 本质上是一个距离、方位二维耦合的系统, 二次距离压缩 (SRC) 算法^[1,2]、Chirp Scaling(CS) 算法^[3] 比传统距离多普勒 (RD) 算法^[4-6] 能更好地克服耦合影响, 获得高分辨率图像, 是近年来广泛应用的 SAR 成像算法.

SAR 系统通常发射线性调频 (LFM) 信号, 其距离向分辨率 ρ_r 由发射信号带宽 f_b 决定

$$\rho_r = c/(2f_b) \quad (1)$$

¹ 2002-08-30 收到, 2003-01-20 改回
国家自然科学基金 (69896250-2) 资助课题

式中 c 为光速。提高距离向分辨率必然要提高发射信号带宽 f_b ，相应地要提高距离向采样率 F_s ，从而对 A/D 变换速度、数据存储容量及实时处理速率要求很高。去调频方法^[7]使接收机输出信号的中频带宽 B_{IF} 远小于发射信号带宽 f_b ，输出信号的采样率 F_s 由 B_{IF} 决定，远小于 f_b ，在分辨率不变的前提下，有效地避免上述问题，适合于高分辨率 SAR 系统。

显然，去调频 SAR 信号的距离维处理和匹配滤波压缩不同。如果采用 CS 算法，必须先对距离向插值恢复成原来的 LFM 信号，插值会增加运算量而且影响图像质量，因此 CS 算法不适合去调频 SAR 信号。通常文献中的 SRC 算法距离维处理针对 LFM 进行，不适用于去调频信号。因此本文分析给出基于去调频信号的 SRC 算法，与普通 LFM 信号 SRC 算法对比，分析该算法的运算量和实时处理要求，并以实际数据成像结果验证了算法的正确。

2 SRC 算法的基本原理

SAR 系统中，雷达和成像目标的相对距离变化不仅形成回波信号的相位历史，而且产生距离迁移，使点目标回波不在同一个距离单元，因此距离压缩后的点目标响应 $h_a(x, r)$ 是一个距离、方位二维函数，表示为距离向一维响应与一个距离弯曲较小的二维响应的卷积^[1,2]

$$h_a(x, r) = W_a(x) \cdot \{\delta[r - r_1(x)] \otimes_r [\sin(C_0 r)/C_0 r]\} \cdot \exp[-j4\pi r_1(x)/\lambda] \quad (2)$$

其中 x 为雷达方位向位移， r 为雷达发射电磁波通过的距离， $r_1(x)$ 为点目标到雷达天线相位中心的距离， $\delta(\cdot)$ 为 sinc 函数， λ 为雷达波长， $C_0 = 2\pi f_b/c$ ， $W_a(x)$ 是方位向天线方向图， f_b 是发射信号带宽， c 是光速。将 (2) 式变换到方位向频域，即距离多普勒域^[1,2]：

$$\hat{h}_a(f, r) \cong \hat{W}_a(f) \{\delta[r - \hat{r}_1(f)] \otimes_r A(r)\} \cdot \exp\{j\psi(f)\} \quad (3)$$

其中 $A(r)$ 是下式的逆傅里叶变换：

$$\hat{A}(f_1) = \text{rect}(f_1/f_b) \exp\{-j\psi_1(f_1)\} \quad (4)$$

$$\psi_1(f_1) = \frac{\pi}{f_R} (\lambda f_D/C)^2 f_1^2 \quad (5)$$

式 (5) 中的 f_D , f_R 分别为回波信号的多普勒中心频率和调频率。可见，距离迁移导致回波信号在距离向产生一个与 f_D , f_R 和 f_b 相关的附加调频分量 $A(r)$ 。因此方位向压缩分两步：首先将信号与方位距离参考函数 $A(r)$ 相关以去除附加调频分量，即二次距离压缩；然后与传统 RD 算法一样完成频域距离迁移校正和方位压缩。在距离迁移较小时， $A(r)$ 近似于 sinc 函数，此时二次距离压缩可以省略；当距离迁移很大时，这一步骤必不可少。

3 基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 算法

3.1 去调频宽带 LFM 信号的原理

去调频利用 LFM 信号频率与时间的线性关系，在接收机中将接收的距离向 LFM 信号与去调频参考脉冲（发射 LFM 信号的延时，通常延时取为发射脉冲至接收到测绘带中心回波的时间延迟）相混频，把频率随时间线性变化的 LFM 信号变换为固定频率信号^[7]，如图 1。发射 LFM 信号的调频率为 K_r ，回波信号相对参考脉冲时延 t_d ，去调频后信号频率为

$$\Delta f = K_r \times t_d \quad (6)$$

实际系统的回波信号为距离向各散射点回波的叠加，因此去调频后信号的频率直接反映各散射点回波相对于去调频参考脉冲的不同延时，即各散射点相对于测绘带中心在距离向的不同位置，信号的幅值则代表各散射点对电磁波反射能力的强弱。因此对去调频宽带 LFM 信号，只需做一次傅里叶变换切换到频域，即可区分各散射点，完成信号的距离向压缩，比采用距离维匹配滤波压缩的传统 SAR 成像算法运算量小很多。

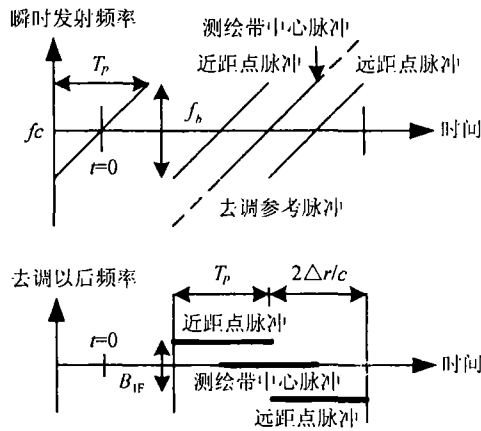


图 1 去调频信号的时间、频率关系

3.2 去调频宽带 LFM 信号的距离维处理

雷达散射系数为 σ_t 的散射点的回波经去调频后可以表示为

$$s_0(n, \hat{t}) = a_t \sum_{n=0}^{N_p-1} [\text{rect}[(\hat{t} - 2R_t/c)/T_p] \exp(j\phi(n, \hat{t}))] \quad (7)$$

$$\phi(n, \hat{t}) = -\frac{4\pi K_r}{c} [f_c/K_r + \hat{t} - 2R_a/c](R_t - R_a) + (4\pi K_r/c^2)(R_t - R_a)^2 \quad (8)$$

其中 $a_t = \sqrt{\sigma_t}$, n 为脉冲序号, $\hat{t} = t - nT$ 为距离向快时间, K_r 为发射信号的调频率, f_c 为载频, T 为脉冲重复周期, T_p 为脉冲持续时间, R_t 是散射点到天线中心的距离, R_a 是测绘带中心到天线中心的距离。式 (8) 表明, 随着各散射点 R_t 不同, 其回波信号频率也不同, 同时还产生一个与 $(R_t - R_a)^2$ 成正比的常数相位, 称为残留视频相位 (RVP)。

RVP 是去调频 LFM 与普通 LFM 经匹配滤波压缩的重要差别。在雷达扫过点目标的整个合成孔径时间内, 目标与天线中心的距离不断变化导致 RVP 是一个变量, 从而在方位向 LFM 信号上叠加一个变化的相位, 使方位向匹配滤波失配, 降低成像质量。从时域看, RVP 导致去调频后不同频率信号尽管持续时间相同, 但有一个随频率变化的延迟, 如图 1。

为了不影响方位向匹配滤波, 去调频宽带 LFM 信号距离向压缩后还要去除 RVP, 即距离向去斜。由于 RVP 随空间变化, 对应的延迟随频率变化, 不便在时域处理, 但是在频域, 只要对不同频率乘以一个和频率相关的相位, 就可以去除延迟, 使不同频率的信号在时域对齐^[7,8]。首先, 将式 (7) 变换到距离向频域, 第 n 个脉冲为

$$S_b(n, f_i) = a_t T_p \text{sinc}[T_p(f_i + 2(K_r/c)(R_t - R_a))] \exp(j\phi_b(n, f_i)) \quad (9)$$

式 (9) 即为距离向压缩以后的信号, 其中

$$\phi_b(n, f_i) = -(4\pi f_c/c)(R_t - R_a) - (4\pi K_r/c^2)(R_t - R_a)^2 - (4\pi f_i/c)(R_t - R_a) \quad (10)$$

与频率 f_i 相关的相位补偿项为

$$S_c(f_i) = \exp(-j\pi f_i^2/K_r) \quad (11)$$

式 (9) 与式 (11) 相乘并做逆傅里叶变换返回时域, 由于 LFM 信号的时间带宽积很大,

$$S_{rd}(n, \hat{t}) = a_t \text{rect}[(\hat{t} - 2R_a/c)/T_p] \exp(j\phi_{rd}(n, \hat{t})) \quad (12)$$

其中

$$\phi_{rd}(n, \hat{t}) = -(4\pi K_r/c)(\hat{t} + f_c/K_r - 2R_a/c)(R_t - R_a) \quad (13)$$

对比式 (12) 与式 (7), 显然 RVP 已经去除, 不同距离散射点的回波在时域全部与 R_a 点回波对齐, 如图 2.

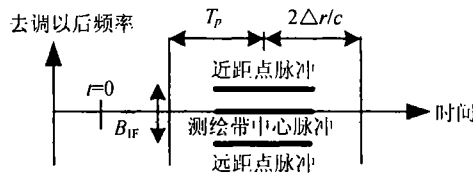


图 2 距离向去斜后的去调频 LFM 信号

图 2 中不同频率的去调频信号在时域对齐后, 在脉冲持续时间内所有信号的发射频率都从 $f_c - f_b/2$ 线性变化到 $f_c + f_b/2$, 即完成了所有信号的频率对齐。因此, 距离向去斜后的信号不同时刻代表不同频率, 是去调频信号的距离向频域形式。相应地, 距离向傅里叶变换后的信号将各散射点区分开形成距离图像, 是信号的时域形式。

由式 (4) 可见, 附加调频分量 $\hat{A}(f_1)$ 与发射信号的频率相关, 不同频率对应不同的残余二次相位, 而距离向各点的回波信号经去斜后在频域对齐, 因此只要在频域与 $\hat{A}(f_1)$ 共轭相乘, 即可去除所有点由于方位、距离耦合产生的残余二次相位。这与匹配滤波在频域一次去除所有点的二次相位完成脉冲压缩很类似, 是由信号的时域、频域对偶关系决定的, 正是变换域信号分析的优点。

3.3 基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 算法

对高分辨率 SAR 成像, 测绘带通常较窄, 在整个测绘带内 f_D 、 f_R 变化不大, 满足^[1,2]

$$|2\Delta f_D/f_D - \Delta f_R/f_R| < 2|f_R|[c/(\lambda f_D f_b)]^2 \quad (14)$$

因此在距离向不需调整 $A(r)$, 可以一次完成距离压缩和二次距离压缩^[1,2]。根据去调频宽带 LFM 信号的时、频域关系, 距离向去斜、压缩以及二次距离压缩可以共同完成, 如图 3。

距离维处理后的数据, 依次进行方位向傅里叶变换、频域距离迁移校正、方位向压缩、逆傅里叶变换等传统 RD 算法的方位向处理得到 SAR 图像。

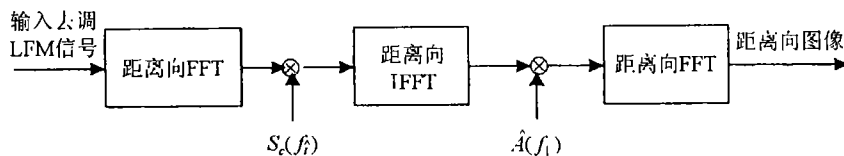


图 3 去调频宽带 LFM 信号的距离向处理

4 基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 的实时实现

4.1 基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 的运算量分析

设回波信号方位向长度为 m 点, FFT 点数为 M ; 距离向长度为 n , FFT 点数为 N , 方位向参考函数长为 m_f , 距离迁移数为 n_m , 对应频域单元为 n_f . M 和 N 均为 2 的整数次幂. SRC 算法的距离压缩、二次距离压缩一次完成时, 普通 LFM 信号的 SRC 算法, 以及去调频 LFM 信号的 RD、SRC 算法距离向处理的运算量如表 1. 在合成孔径时间内, 去调频 LFM 信号的 RVP 变化通常不大, 因此 RD 算法成像不必做距离向去斜.

表 1 去调频 LFM 和普通 LFM 的 RD, SRC 算法的距离向运算量比较

	普通 LFM 的 SRC (RD) 距离向处理	去调频 LFM 的 RD 算法距离向处理	去调频 LFM 的 SRC 算法距离向处理
复数乘法次数	$3m(N/2)\log_2 N + mN$	$m(N/2)\log_2 N$	$3m(N/2)\log_2 N + 2mN$
复数加法次数	$3mN\log_2 N$	$mN\log_2 N$	$3mN\log_2 N$

上述去调频 LFM 信号的 SRC 算法距离向处理的等效实数运算量为

$$\text{实数乘法次数: } 6mN\log_2 N + 8mN$$

$$\text{实数加法次数: } 9mN\log_2 N + 4mN$$

显然, 无论去调频 LFM 信号还是普通 LFM 信号, RD 与 SRC 的方位向处理运算量相同, 都由频域距离迁移校正、参考函数生成、频域匹配滤波组成. 整个方位向处理运算量为

$$\text{实数乘法次数: } 6kM\log_2 M + 12nM\log_2 M + 4(n - n_m)M + 20n_f(n - n_m)$$

$$\text{实数加法次数: } 3kM\log_2 M + 6nM\log_2 M + 2(n - n_m)M + 10n_f(n - n_m)$$

可见对同样发射带宽的 LFM 信号, 接收机做去调频处理后, 采用 SRC 算法成像, 仅在距离向处理时比普通 LFM 信号增加 mN 次复数乘法, 运算量增加不大, 却能够成倍地降低数据的采样率, 从而成倍降低处理的数据量, 适合于实时成像处理. 考虑到普通 SAR 接收机只需接收回波信号, 而去调频体制 SAR 接收机还要将回波信号与发射 LFM 信号的延时相混频, 实际上是以设备复杂度的增加换取成像处理运算量的降低.

4.2 基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 的实时实现

如前所述, SRC 算法与 RD 算法流程基本相同, 因此实时处理的结构也相似, 可以考虑两种方案. 一种是将一帧图像数据作为一个处理单元, 进行二维压缩处理形成图像. 这种方法要求处理设备的存储量足够大, 同时处理能力足够完成上述全部运算. 另一种方法将二维处理分解为距离、方位两个顺序的一维处理模块, 降低对每个模块的存储、运算能力的要求. 距离处理模块只需要一个脉冲的存储量, 在脉冲重复周期 T 内完成该脉冲的距离向处理. 由于距离、方位耦合作用, 方位处理模块至少需要同时存储 n_m 条方位线进行距离迁移校正和方位压缩, 随着 n_m 的增加, 方位维处理的存储、运算要求也相应加大.

5 基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 算法成像结果

对于去调频宽带 LFM 信号, 采用前面的 SRC 算法, 得到某机场的图像, 如图 4. 其中 $f_b=240\text{MHz}$, $T_p = 40\mu\text{s}$, $f_c = 15.5\text{GHz}$, 测绘带宽 2km , $T=0.001\text{s}$. 斜视角为 2.2° . 相应的方位距离参考函数 $A(r)$ 近似于 sinc 函数, 如图 5(a). 此时, 二次距离压缩效果不明显, SRC 算法性能与 RD 算法相似.

对于同一雷达系统, 当 $f_b = 80\text{MHz}$, 测绘带 6km , 斜视角 14.7° 时, $A(r)$ 如图 5(b). 对于图像中的两个较强点目标, RD 算法和 SRC 算法成像结果的等高线图如图 6. 显然, SRC 算法能够有效地克服图像在距离向的扩散, 提高图像的距离向分辨率.

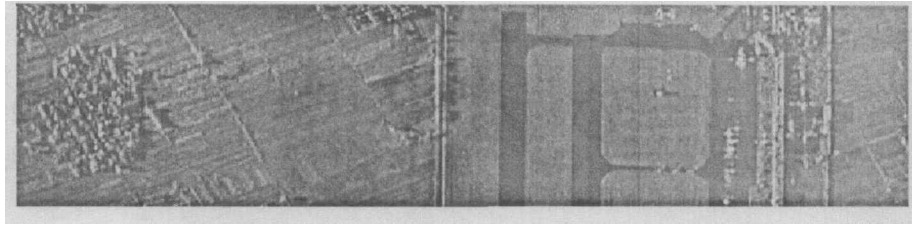
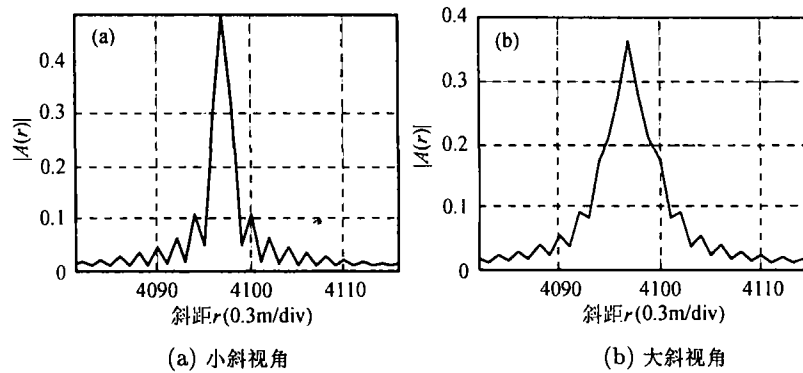


图 4 某机场的局部 SAR 图像

图 5 距离方位参考函数 $|A(r)|$ 和斜距 r 的关系

在机载 SAR 实际飞行中, 载机运动不可避免地受到各种扰动, 因此通常存在等效斜视角, 产生距离向附加调频量。SRC 算法可以有效地克服这种影响, 图像的距离向聚焦优于 RD 算法。因此基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 算法比 RD 算法更适合于实际成像处理。

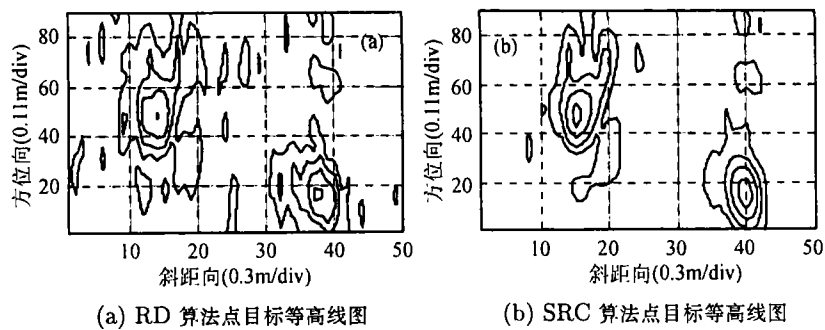


图 6 点目标成像的等高线图

6 结论

本文在去调频 LFM 信号的时域、频域特性分析的基础上, 给出基于去调频宽带 LFM 信号的 SRC 算法流程, 并与 RD 算法及普通 LFM 信号 SRC 算法相比较, 具体分析了其运算量, 证实了 SRC 算法适合于对去调频 SAR 信号进行实时处理。对于真实去调频宽带 LFM 飞行数据, 采用文中的方法得到了清晰的图像, 并与 RD 算法的成像结果相比较, 验证了在一定的斜视角范围内, SRC 成像质量优于 RD。

参 考 文 献

- [1] Jin Y, Wu Chialin. A SAR correlation algorithm which accommodates large-range migration. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1984, 22(6): 592-597.
- [2] Wu Chialin, Liu K Y, Jin Michael. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1982, 18(5): 563-575.
- [3] Raney R K, Runge H, Bamler R, Cumming Ian G, Wong F H. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-798.
- [4] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. New York, John Wiley & Sons, 1991: 154-209.
- [5] Bennett J R, Cumming I G, Deane R A. The digital processing of Seasat synthetic aperture radar data. *IEEE International Radar Conference*, Washington, DC., 1980: 168-175.
- [6] Wu Chialin. A digital fast correlation approach to produce Seasat SAR imagery. *IEEE International Radar Conference*, Washington, DC., 1980: 183-189.
- [7] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston, Artech House, 1995: 27-30, 501-506.
- [8] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. Signals & Systems. Prentice-Hall International, Inc., 1998: 284-400.

姚 萍: 1973 年生, 博士生, 研究方向为信号处理和 SAR 成像.

张 涛: 1971 年生, 博士后, 研究方向为信号处理和 ISAR 成像.

李明峰: 1974 年生, 博士生, 研究方向为信号处理和 SAR 成像.

王贞松: 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电波传播、SAR 系统设计、实时信号处理及信号处理机体系结构.