

doi: 10.7690/bgzdh.2013.10.023

去调频处理的 SAR 成像方法

刘峰, 李文亮, 李黎

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 为了降低 SAR 回波信号的采样率和数据的计算量, 将去斜率处理方法应用于合成孔径雷达成像。以正侧视 Stripmap SAR 为例, 在分析回波信号 dechirp 处理方法原理的基础上, 研究条带式正侧视合成孔径雷达成像的去斜率处理算法, 给出了成像步骤, 并利用仿真数据完成去调频后的成像。实验结果表明, 该方法是可行、有效的。

关键词: 合成孔径雷达; 去斜率; 脉冲压缩; 成像算法

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A

SAR Imaging Based on Stretch Processing

Liu Feng, Li Wenliang, Li Li

(School of Electronic & Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For reducing the sample rate and the quantity of synthetic aperture radar (SAR) echo signal, the dechirp method is applied to SAR imaging. Taking side-looking stripmap SAR as an example, in the analysis of echo signal processing method based on the principle of dechirp, the imaging algorithm of dechirp SAR signal is analysed and studied. Imaging steps are presented and imaging of the targets is completed by using the simulation data. The feasibility and validity of this imaging algorithm is proved by the experimental results.

Key words: SAR; dechirp; pulse compression; imaging algorithm

0 引言

合成孔径雷达 (synthesize aperture radar, SAR) 作为一种高分辨率雷达在军事和民用中占有很重要的地位, 应用较广^[1-3]。合成孔径雷达的发射信号往往采用大的时宽带宽积信号, 如线性调频信号来提高距离分辨率^[4]。随着信号带宽的增加, 系统硬件的要求会有很大的提升, 特别是 A/D 采样的要求更高。为了降低 A/D 的采样率, 减少系统数据的计算量和存储量, 可以对接收信号进行去斜率处理。去斜处理技术已经成功应用于高分辨率合成孔径雷达系统, 如美国的 Sandia 国家实验室 (SNL) 与通用原子 (GA) 合作研制的 Ku 波段的高分辨合成孔径雷达 Lynx, 瞬时带宽 3 GHz, 该系统采用去斜率技术来降低 A/D 采样率, 最高分辨率可达 0.1 m^[5]; 美国密执安环境研究所 (ERIM) 研制的 p3 超宽带 SAR 系统也采用了去斜率技术, 处理带宽为 500 MHz, 距离分辨率为 0.3 m^[6]; 因此, 笔者将去调频处理技术应用于合成孔径雷达成像, 降低了 SAR 接收信号的中频带宽, 降低了数据采集的难度和数据量。

1 SAR 的回波信号模型

SAR 在运动过程中, 以一定的脉冲重复频率发射和接收脉冲。以正侧视 stripmap SAR 为例, 发射

波束中心与运动方向垂直。天线波束照射到地面上, 如图 1, 选取世界坐标系 XYZ 为参考坐标系, XOZ 平面为地面, SAR 平台距地平面高 H, 沿 X 轴正向以速度 V 匀速飞行。图中 P 点为 SAR 平台的位置矢量, Q 点为目标的位置矢量。在波束所覆盖的区域内各散射元 (点) 对入射波后向散射, 这样, 发射脉冲经目标和天线方向图的调制, 携带目标和环境信息形成 SAR 回波。从时域来看, 发射和接收的信号都是一时间序列。

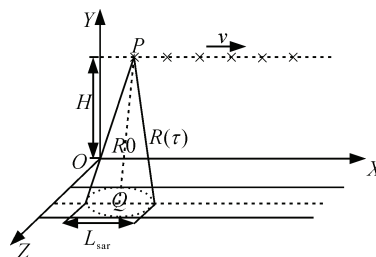


图 1 SAR 几何关系示意图

设雷达发射的线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号在一个脉冲周期内为

$$s(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c\hat{t} + \frac{1}{2}K_f\hat{t}^2\right)\right] \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$; \hat{t} 为发射信号的快时间;

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-06-22

作者简介: 刘峰 (1981—), 男, 山东人, 在读博士, 从事多天线雷达成像技术研究。

f_c 为中心频率； T_p 为脉宽， K_r 为调频率。

点目标与雷达的距离为 R ，若不考虑点目标的回波系数和天线方向图的调制，则雷达接收到该目标的反射回波为

$$s_r(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R/c}{T_p}\right) \times \exp\left[j2\pi(f_c(\hat{t} - 2R/c) + \frac{1}{2}K_r(\hat{t} - 2R/c)^2)\right] \quad (2)$$

其中， $\hat{t} - 2R/c$ 为雷达从发射信号到接收到点目标反射回波的时间延时。

雷达 P 点坐标记为 (x, y, z) ，目标 Q 点坐标记为 (x_i, y_j, z_k) 。则

雷达到目标的斜距 R 为

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_k)^2} \quad (3)$$

而： $y=0$ ， $z=H$ ， $z_k=0$ ，由此

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + y_j^2 + H^2} \quad (4)$$

回波的时延 $\hat{t}_{ij} = 2R/c$ 为快时间域的延时，雷达平台的慢时间为 $t_m = x/V$ ，则

$$R = \sqrt{(Vt_m - x_i)^2 + y_j^2 + H^2} \quad (5)$$

令 $R_j = \sqrt{y_j^2 + H^2}$ 为点目标到雷达载体航线的垂直斜距，带入式 (5)

$$R = R(t_m, R_j) = \sqrt{(Vt_m - x_i)^2 + R_j^2} \quad (6)$$

一般情况下， $|Vt_m - x_i| \ll R_j$ ，由菲涅耳近似可得：

$$R(t_m, R_j) = \sqrt{(Vt_m - x_i)^2 + R_j^2} \approx R_j + \frac{(Vt_m - x_i)^2}{2R_j} \quad (7)$$

因此，斜距是 t_m 和 R_j 的函数。不同的目标， R_j 也不一样。

将 $R(t_m, R_j)$ 带入式 (2)

$$s_r(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R/c}{T_p}\right) \times \exp\left[j2\pi(f_c(\hat{t} - 2R/c) + \frac{1}{2}K_r(\hat{t} - 2R/c)^2)\right] \quad (8)$$

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R(t_m, R_j)/c}{T_p}\right) \times \exp\left[j2\pi(f_c(\hat{t} - 2R(t_m, R_j)/c) + \frac{1}{2}K_r(\hat{t} - 2R(t_m, R_j)/c)^2)\right] \quad (9)$$

式 (9) 即为点目标的回波信号模型。

2 去斜率处理^[7]

常规去斜率处理的脉压方式是针对线性调频信

号提出的，对不同延时时间信号进行脉冲压缩，回波信号与本振信号之间的时间差就转换成不同的差频频率，由于时间差跟目标的回波和参考信号的斜距差成正比，因此差频频率也就反映了目标与参考信号的距离差。如图 2 所示。

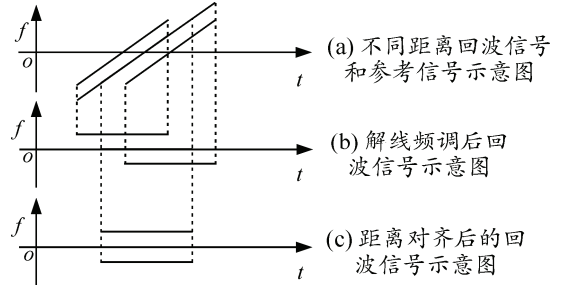


图 2 线性调频去斜率原理

参考信号是与发射信号频率、调频率均相同的 LFM 信号，如图 2(a)。设参考距离为场景中心到天线相位中心的距离 R_{ref} ，则参考信号为

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c}{T_{\text{ref}}}\right) \times \exp\left[j2\pi(f_c(\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c) + \frac{1}{2}K_r(\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c)^2)\right] \quad (10)$$

其中： A 为参考信号的幅度； T_{ref} 为参考信号的脉宽，通常它比 T_p 要大一些。

则差频输出为

$$s_{\text{rd}}(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(\hat{t}) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R(t_m, R_j)/c}{T_p}\right) \times \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}K_r(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c})R_{\Delta}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c R_{\Delta}\right] \exp\left[j\frac{4\pi K_r}{c^2}R_{\Delta}^2\right] \quad (11)$$

其中， $R_{\Delta} = R(t_m, R_j) - R_{\text{ref}}$ 。

在一个周期内， R_{Δ} 为一常数。只看上式的指数项，第一个相位项是距离向所对应的相位，第二和第三个相位项是常数；因此，雷达回波信号在时间域里为频率与 R_{Δ} 成正比的单频脉冲。如图 2(b) 所示。此时的瞬时频率为

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{d\hat{t}} \left(-\frac{4\pi}{c}K_r(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c})R_{\Delta}\right) = -K_r \frac{2R_{\Delta}}{c} \quad (12)$$

在频域中，窄脉冲的脉冲宽度为 $1/T_p$ ，结合式 (12)，可得相应的距离分辨率为

$$\rho_r = \frac{c}{2K_r} \cdot \frac{1}{T_p} = \frac{c}{2B} \quad (13)$$

其中， $B = K_r \cdot T_p$ 为发射 LFM 的带宽。

返回式 (11)，后面的 2 个相位项单独写出：

$$\Phi_d = -\frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta + \frac{4\pi K_r}{c^2} R_\Delta^2 \quad (14)$$

Φ_d 中的第一项的 R_Δ 变化使回波产生多普勒, 是进行方位向脉压处理所必须的, 而第二项是解线频调方法所独有的, 称为剩余视频相位 (residual video phase, RVP)。

由式 (11) 得不同距离的目标回波在时间上错开, 对以后的应用会带来不便, 通常希望在不同距离目标的回波在距离上对齐, 即“去斜”处理, 而去斜的结果 RVP 项也随之消失。此即为图 2(b)到图 2(c)的过程。式 (11) 对快时间进行傅里叶变换 (以参考点的时间为基准), 可得到在差频域的表达式

$$S_{rd}(f_i, t_m) = AT_p \sin c[T_p(f_i + 2\frac{K_r}{c} R_\Delta)] \times \exp\left[-j\left(\frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta + \frac{4\pi K_r}{c^2} R_\Delta^2 + \frac{4\pi}{c} f_i R_\Delta\right)\right] \quad (15)$$

式中 $\sin c(u) = \frac{\sin \pi u}{\pi u}$ 。

式 (15) 中的 3 个相位项, 第 1 个相位项是多普勒项, 是正常的, 第 2 项为 RVP 项, 第 3 项为回波包络“斜置”项, 后 2 项均应去除。由于在差频域为峰值 $f_i = -2\frac{K_r}{c} R_\Delta$ 处的 $\sin c$ 函数, 只要补偿此处的相位即可。由此, 需要补偿的相位项可以表示为

$$\Delta\Phi = -\frac{4\pi K_r}{c^2} R_\Delta^2 - \frac{4\pi}{c} f_i R_\Delta = \frac{\pi f_i^2}{K_r} \quad (16)$$

于是, 将式 (15) 乘以 $S_c = \exp[-j\Delta\Phi] = \exp\left[-j\frac{\pi f_i^2}{K_r}\right]$ 得

到校正后的差频域信号:

$$S'_{rdregu}(f_i, t_m) = S_{rd}(f_i, t_m) \cdot S_c = AT_p \sin c\left[T_p\left(f_i + 2\frac{K_r}{c} R_\Delta\right)\right] \exp\left[-j\left(\frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta\right)\right] \quad (17)$$

式 (17) 中的指数项即为多普勒项, 为方位向脉压所必须的相位项。由于 $R_\Delta = R(t_m, R_j) - R_{ref}$ 中的 R_{ref} 为常数项, 因此可以在校正相位的时候去掉。

此时校正函数为:

$$S'_c = \exp\left[-j\frac{\pi f_i^2}{K_r}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c} R_{ref}\right] = \exp\left[-j\left(\frac{\pi f_i^2}{K_r} + \frac{4\pi f_c}{c} R_{ref}\right)\right] \quad (18)$$

校正后的差频域信号

$$S'_{rdregu}(f_i, t_m) = S_{rd}(f_i, t_m) \cdot S'_c = AT_p \sin c\left[T_p\left(f_i + 2\frac{K_r}{c} R_\Delta\right)\right] \exp\left[-j\left(\frac{4\pi}{c} f_c R(t_m, R_j)\right)\right] \quad (19)$$

即可把 RVP 项和包络斜置的 2 个相位项去掉, 再通过逆傅里叶变换可得时域信号, 即为解线频调去斜处理框图的后面部分, 如图 3。

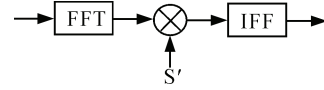


图 3 线性调频去斜率原理

由此处理后得到时域信号

$$s'_{rdregu}(\hat{t}, t_m) = \text{IFFT}(S'_{rdregu}(f_i, t_m)) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{ref}/c}{T_p}\right) \times \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} K_r \left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right) R_\Delta\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} f_c R(t_m, R_j)\right] \quad (20)$$

式 (20) 说明, 去调频处理后的信号转化为单一频率的信号。其频率和目标与参考距离差成正比。因此在不改变距离分辨率的情况下降低了中频信号的有效频率^[8], 可选取低采样率、高精度的模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 对其采样。

3 方位压缩^[7,9-10]

式 (7) 在回波包络里的时延值, 可以写成与慢时间 t_m 无关的常数, 即

$$R(t_m, R_j) = \sqrt{(Vt_m - x_i)^2 + R_j^2} \approx R_j \quad (21)$$

因此, 式 (19) 可以简化^[11]为:

$$S'_{rdregu}(f_i, t_m) = AT_p \sin c \times \left[T_p\left(f_i + 2\frac{K_r}{c} (R_j - R_{ref})\right)\right] \exp\left[-j\left(\frac{4\pi}{c} f_c \left(R_j + \frac{(Vt_m - x_i)^2}{2R_j}\right)\right)\right] \quad (22)$$

多普勒调频率

$$K_a = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{d^2(R(t_m, R_j))}{dt_m^2} = -\frac{2V^2}{\lambda R_j} \quad (23)$$

而方位向去调频的参考信号^[12]为

$$s_a(t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_a}\right) \exp(j\pi K_a t_m^2) \quad (24)$$

式中 T_a 为方位向参考信号的脉冲宽度。对式 (22) 点乘式 (24) 的共轭, 即进行去斜处理

$$S'_{rdregu}(f_i, t_m) \cdot s_a^*(t_m) = AT_p \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_a}\right) \times \sin c\left[T_p\left(f_i + 2\frac{K_r}{c} (R_j - R_{ref})\right)\right] \exp\left[-j2\pi\left(\frac{2R_j}{\lambda} - \frac{K_a x_i^2}{2V^2}\right) - j2\pi \frac{K_a x_i}{V} t_m\right] \quad (25)$$

对式 (25) 进行慢时间 t_m 的傅里叶变换, 得到

$$S = A \sin c\left[T_p\left(f_i + 2\frac{K_r}{c} (R_j - R_{ref})\right)\right] \times B \sin c\left(T_a\left(f_a + \frac{K_a x_i}{V}\right)\right) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{2R_j}{\lambda} - \frac{K_a x_i^2}{2V^2}\right)\right] \quad (26)$$

由此, 方位向的目标位置被压缩至

$f_a = -(K_a x/V)$ 处。

由以上分析可以得到去斜率合成孔径雷达成像的步骤：

- 1) 接收信号与参考信号混频去斜处理；
- 2) 对快时间 \hat{t} 进行 FFT 变换，得到距离向；
- 3) 对相位进行补偿，补偿因子为

$$\exp \left[-j \left(\frac{\pi f_i^2}{K_r} + \frac{4\pi f_c}{c} R_{ref} \right) \right];$$

- 4) 进行方位向脉冲压缩处理；
- 5) 对方位压缩后信号进行慢时间 t_m 的 FFT，得到聚焦后的二维图像。

去斜率成像算法流程如图 4 所示。

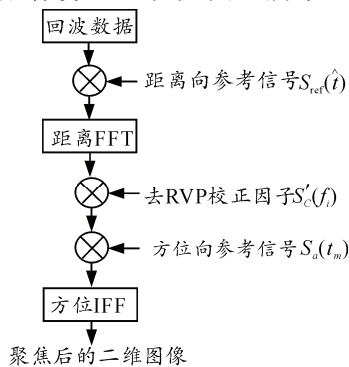


图 4 去斜率成像算法流程

4 仿真实验

主要实验参数为：波长 10 cm，脉宽 5 μ m，带宽 30 MHz，飞机速度 150 m/s，高度 5 000 m，成像宽度 1 000 m，距离向分辨率 5 m，方位向分辨率 2 m，点目标的斜距 11 180 m，脉冲重复频率 233 Hz。单点目标的仿真图如图 5~图 9，5 个点目标的仿真图如图 10~图 11。图 4 表示单点目标的回波信号经过 dechirp 处理后的一维距离向波形，其中横轴已经转化为斜距。图 5 中的主峰 -3 dB 宽度所对应的距离为 5 m，与计算所得的分辨率相同。图 6 为回波信号经过方位向的 dechirp 处理后的波形图。图 9 和图 10 表示点目标的二维脉冲压缩成像结果。

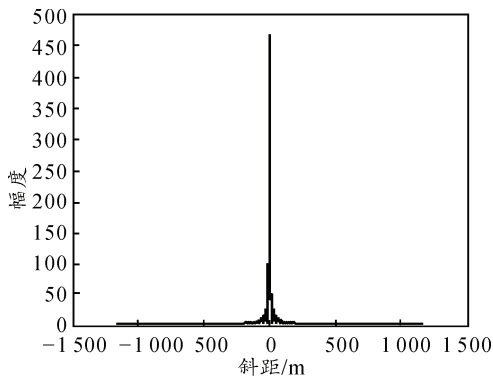


图 5 单点目标去斜率后的距离向波形

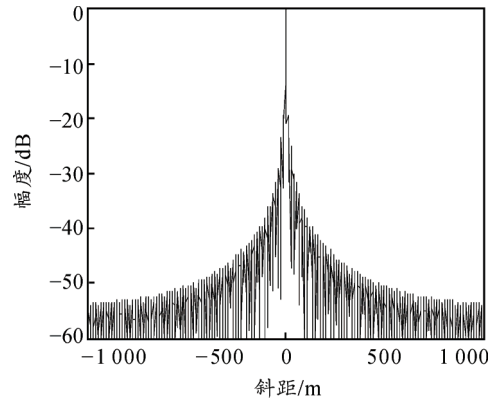


图 6 单点目标去斜率后的距离向波形图 (dB)

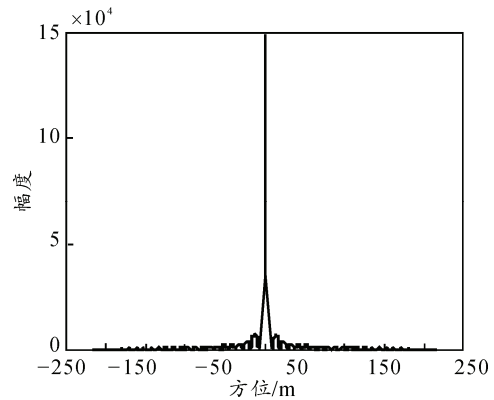


图 7 单点目标方位向去斜率后波形图

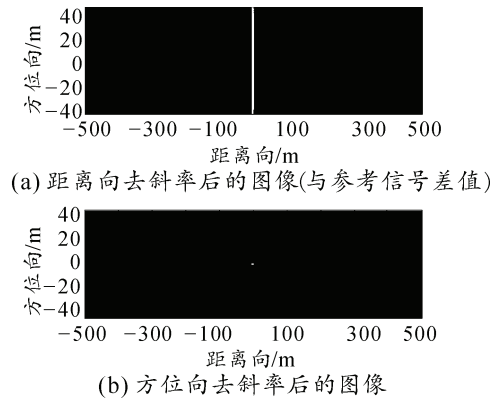


图 8 单点目标距离向、方位向去斜率后的图像

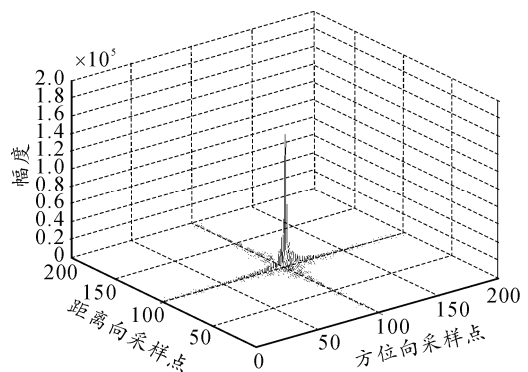


图 9 单点目标二维脉冲压缩后的图像