

一种斜视 SAR 成像算法¹

韩春林 王建国 陆志强

(电子科技大学科技处 成都 610054)

摘要 该文详细分析了斜视 SAR 的成像原理, 研究了大斜视 SAR 与正侧视 SAR 回波信号的差异, 在此基础上, 提出了一种高运算效率的成像方法, 实现了大斜视 SAR 成像, 并获得较好的图像分辨力。

关键词 合成孔径雷达, 斜视合成孔径雷达, 成像处理, 相关

中图分类号 TN951

1 引言

合成孔径雷达 (SAR: Synthetic Aperture Radar) 具有高分辨力、全天候、强透射等优点, 现已被广泛地应用于军事和民用领域。当合成孔径雷达被用于地面目标的高分辨成像时, 其高分辨的斜距分辨力靠脉冲压缩技术获得, 而方位向的高分辨力, 则由对雷达与目标的相当运动产生的多普勒频移的处理来获得。在传统的条带式 SAR 模式中, 雷达天线波束指向垂直于平台运动方向; 当雷达波束指向正侧视的前方或后方时, 则是斜视 SAR 模式。斜视 SAR 在军事和民用中有巨大的应用潜力。

由于对正侧视 SAR 的长期深入的研究, 现在人们对在这种模式下的雷达回波信号已有深入的了解, 并产生了大量有效的 SAR 成像算法^[1-3], 这些算法有实域处理、距离-多普勒域处理和二维频域处理等多种形式。然而, 由于斜视 SAR 回波信号的不同特性, 传统的正侧视 SAR 成像算法不能被直接用于斜视 SAR 的成像处理。近年来, 已经有一些由传统正侧视 SAR 成像算法基础上改进得来的斜视 SAR 成像算法出现, 例如, 改进的 Chirp Scaling (CS) 算法^[3,4], 改进的二次距离压缩算法^[5]等, 但这些算法仅适合于小或中等斜视角的情况, 不适合于大斜视角的情况。本文在分析了斜视 SAR 回波信号特征的基础上, 提出了一种新的斜视 SAR 成像算法, 该算法可以在大斜视角的条件下, 获得较好的成像结果。

2 斜视 SAR 成像原理

斜视 SAR 带状成像系统的几何关系原理图如图 1 所示, SAR 系统在高度 H 处飞过成像区域发射和接受信号。雷达接受到的地面目标回波信号的一般表达形式, 应是一个包含雷达与目标间的斜视角和斜距等变量的函数。

$$s(t) = \iint_D \sigma(x', r') W_a(x - x') W_r(r - r') f\left(t - \frac{2r(x - x', r - r')}{c}\right) dx' dr' \quad (1)$$

其中“ D ”表示波束照射区域; $\sigma(x, r)$ 表示点 (x, r) 的后向散射系数; $W_a(\cdot)$, $W_r(\cdot)$ 分别为方位向和距离向的天线增益; $r(x, r)$ 表示雷达与目标 (x, r) 的距离。由图 1 所示, 雷达和地面成像区域内一点目标之间的瞬时斜距可表示为

$$r(x, r) = (x^2 + r^2 - 2xr \cos \eta)^{1/2} \quad (2)$$

¹ 2000-10-16 收到, 2001-05-16 定稿
电子部预研基金资助项目

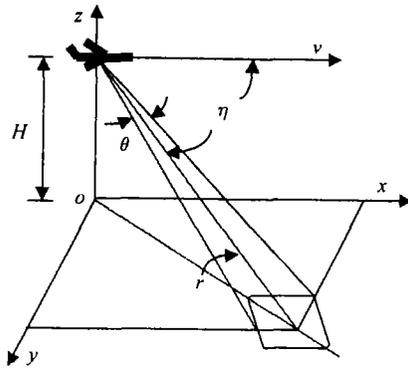


图 1 斜视 SAR 成像原理示意图

式中 x 是沿雷达飞行路线的距离变量, r 是目标在 $x = 0$ 时到雷达天线相位中心的距离, η 为斜视角的余角, 定义为斜距与雷达飞行方向之间的夹角。用 Taylor 级数关于 x 展开 $r(x, r)$,

$$r(x, r) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \dots \quad (3)$$

其中 $a_0 = r$, $a_1 = -\cos \eta$, $a_2 = \frac{\sin^2 \eta}{2r}$, $a_3 = \frac{\cos \eta \sin^2 \eta}{2r^2}$, $a_4 = \frac{\sin^2 \eta (5 \cos^2 \eta - 1)}{2r^3}$, \dots 。由于 $r \gg x$, 上式各项收敛很快, 我们可以忽略三次项以上的高次项的影响。在大斜视角 SAR 系统中, 点目标与雷达的距离在合成孔径时间内是非对称变化, 斜距改变量要明显大于正侧视的情况, 这使得斜视 SAR 回波信号的距离徙动现象更为严重, 导致了多普勒中心频率随距离发生的大变化, 同时, 大的距离徙动造成单个距离门中方位向的小时间带宽积, 这样使回波信号在没有进行距离迁移补偿时的压缩比更小, 导致图像分辨率下降。正侧视与斜视情况下多普勒频率的变化情况如图 2 所示, 在斜视 SAR 系统中, 目标回波的多普勒频率不再近似地是时间 t 的线性函数, 这也是传统的 SAR 成像算法不能用于大斜视角 SAR 系统的原因之一。

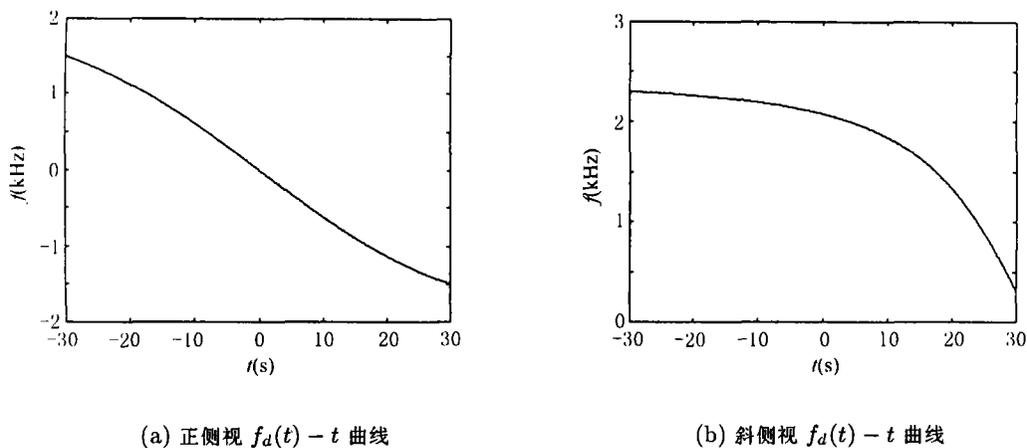
(a) 正侧视 $f_d(t) - t$ 曲线(b) 斜侧视 $f_d(t) - t$ 曲线

图 2 正、斜侧视 SAR 多普勒频率曲线

当雷达发射信号为线性调频信号时,

$$S_t(t) = R_e[\mu(t)e^{jw_c t}] = R_e[a(t)e^{j\varphi(t)}e^{jw_c t}] \quad (4)$$

点目标的回波信号为

$$S_r(t) = \text{Re} [K\mu(t-a)e^{jw_c(t-a)}] \quad (5)$$

其中 $a = 2r(t)/c$ 。可以将回波信号表示为以距离向的快变时间 t 和方位向的载机距离 x 为变量的函数:

$$S_r(x, t) = \text{Re} [K\mu(t-a(x))e^{jw_c(t-a(x))}] \quad (6)$$

经同步检波后, 去除载波, 归一化后得到

$$S_{rd}(t) = \text{Re} \left[e^{j\frac{1}{2}k_r(t-a(x))^2} e^{-jw_c[a(x)-\frac{2R}{c}]} \right] \quad (7)$$

分析斜视 SAR 的目标回波特性, 其回波相位为

$$\begin{aligned} \varphi_r(t, x) &= w_c(t-a(x)) - (1/2)k_r(t-a(x))^2 \\ &= w_c[t-2R/c] - (2w_c/c)(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) - (1/2)k_r[t-2R/c]^2 \\ &\quad + k_r[t-2R/c](a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) - (1/2)k_r(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

等式右边第 1 项为载频和固定相位项, 第 2 项为包含方位多普勒信号和方位一次, 三次项位相, 第 3 项为距离向线性调频相位项, 第 4 项为方位距离耦合相位项, 第 5 项为包含方位多普勒信号及其它各次方位相位项。当 $\eta = 90^\circ$ (正侧视), 上式中方位距离耦合项很小, 所以可以将对回波信号的处理简化为两个一维级联处理。而当 $\eta < 45^\circ$ 时, 距离走动可达几十甚至上百个距离单元。如果距离走动项 (相位一次项) 和高次距离弯曲 (三次相位项) 及方位距离耦合可补偿, 则可得一个简化的系统相应函数 $h(t, x)$:

$$h(t, x) = \left[\tau e^{-j\frac{1}{2}k_r t^2} \frac{\sin \left[\frac{\pi t}{\tau_r} \right]}{\pi \left[\frac{t}{\tau_r} \right]} \right] \left[L_s e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} x^2} \frac{\sin \left[\frac{\pi x}{\rho_s} \right]}{\pi \left[\frac{x}{\rho_s} \right]} \right] \quad (9)$$

式中 τ 为信号脉宽, 而 $\tau_r = 2\pi/(k_r\tau)$ 为线性调频压缩后主瓣宽度, 它决定雷达距离分辨力。 $\rho_s = \lambda R/(2L_s \sin \eta)$ 为斜视 SAR 处理后主瓣宽度, 它决定雷达方位分辨力。可以看到斜视与正侧视方位分辨力差一个因子 $1/\sin \eta_s$, 所以方位分辨力在斜视情况要比正侧视低。

由于 $x = vt$, 斜视情况下的距离门 r_0 处点目标多普勒频率可以改写为

$$f_D(t, x, r_0) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dr(x)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} (a_1v + a_2v^2t + 3a_3v^3t^2 + \dots) \quad (10)$$

其中 λ 是波长。

通过对上式的详细分析, 可以知道在大斜视情况下点目标的多普勒频率是很高的 (是速度 v 的线性函数), 而多普勒斜率相对正侧视 SAR 系统则要小得多。另外, 对于正侧视 SAR, 同一距离门上, 不同方位位置上的点目标在频域上有着相同的多普勒历程, 只是他们在时间上有先后之分, 通过利用经典的匹配滤波技术, 可以在时间上分离它们。而对于大斜视情况, 它的多普勒历程和传统正侧视情况有很大不同, 位于不同方位的目标在时域上差异很小, 因此我们很难用匹配滤波器对它进行压缩和分离。但是, 它们的频率中心在频域上具有较大的差异, 所以, 我们设计了一种新的斜视 SAR 成像算法, 利用这个差异进行频率分析, 以取得较好的成像效果。

3 斜视 SAR 成像处理算法

根据斜视 SAR 本身的特点,传统的 SAR 成像算法在大斜视角情况下难以获得理想的成像结果。在大斜视情况下, SAR 成像的难度主要体现在两个方面: (1) 合成孔径时间太长,从而使得载机平台的不稳定性对成像结果影响增大,并带来处理运算量的大量增加。(2) 多普勒斜率太小,相位的随机噪声将严重影响回波信号的相干积累效果。为此我们提出了一种新的斜视 SAR 处理算法,获得了初步的成像结果。

在斜视 SAR 情况下,散射体的回波在时间域上几乎重叠,但它们的多普勒历程的起止频率是不同的。利用这个频率差即可分辨开不同方位的目标。如图 3 所示,我们给出了处理斜视 SAR 的基本原理。图中首先采用一个可变的方位参考函数与距离压缩后的回波信号进行混频,方位参考函数是点目标回波多普勒历程函数的共轭,从而使得混频的输出为对应于目标不同方位位置的一组固定的频率。再通过一组多普勒滤波器组即可以将它们分辨开。

利用上述算法,我们对斜视 SAR 原始数据进行了成像处理,获得了较为满意的成像结果,如图 4 所示。

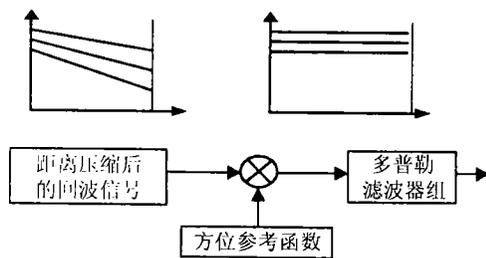


图 3 斜视 SAR 方位压缩原理图

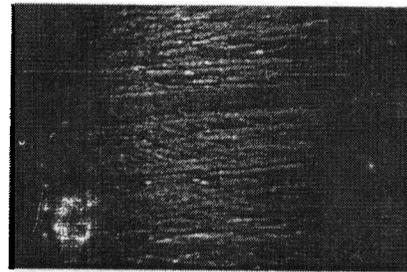


图 4 斜视 SAR 成像处理的结果

4 结 论

斜视 SAR 成像是一种具有广泛应用前景的雷达成像技术,对于大斜视角的情况下,传统的 SAR 成像处理技术难以获得理想的成像结果。本文在详细分析斜视 SAR 成像原理的基础上,提出了一种高运算效率的成像方法,实现了大斜视 SAR 成像,并对于斜视所引入的高阶量作了一定的补偿,可以获得较好的分辨力。

参 考 文 献

- [1] M. Jin, C. Wu, A SAR correlation algorithm which accommodates large-range migration, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1984, 22(5), 592-597.
- [2] C. Cafforio, C. Prati, F. Rocca, SAR data focusing using seismic migration techniques. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1991, 27(2), 194-206.
- [3] R K Raney, H Runge, R Balmer, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1994, 32(4), 786-799.
- [4] G. W. Davidson, A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1996, 32(1), 121-133.

- [5] C. Y. Chang, M. Jin, J. C. Curlander, Squint mode SAR processing algorithms, In Proc IEEE IGARSS, Vancouver, Canada, 1989, 1072-1076.

A NEW IMAGING ALGORITHM FOR SQUINT MODE SAR

Han Chunlin Wang Jianguo Lu Zhiqiang

(*University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract In this paper, the imaging theories for the squint mode SAR are discussed. Basing on the discuss of the difference between the centric side-looking and squint mode SAR, a new imaging algorithm for squint mode SAR is presented. By this algorithm, high quality image with satisfied resolution for the squint mode SAR is obtained.

Key words Synthetic aperture rader, Squint mode SAR, Imaging processing, Correlation

韩春林: 男, 1962 年生, 硕士, 教授, 从事星载和机载 SAR 成像处理和通信信号分类技术的研究. 在国内外发表论文 20 余篇.

王建国: 男, 1954 年生, 硕士, 教授, 从事星载和机载 SAR 成像处理及系统研究, 已在国内外发表学术论文 20 余篇.

陆志强: 男, 1973 年生, 硕士, 工程师, 从事合成孔径雷达成像方法研究.