

相对运动多目标的逆合成孔径雷达成像

毛 勇¹, 阮成礼²

(1. 电子科技大学中山学院计算机系 广东 中山 528402; 2. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】由于非合作的机动多目标相对于雷达射线的姿态是时变的,而且目标间可能存在相对运动,给逆合成孔径雷达(ISAR)成像造成较大的困难。当多目标间存在相对运动时,直接利用常规补偿方法通常得不到满意的结果。该文建立了目标相对运动的模型,分析了相对运动对成像的影响,提出了一种新的相对运动补偿算法。该算法对存在相对运动的目标在距离上利用Keystone变换进行分离,提取相对运动目标的回波,分别利用Autoclean算法进行运动补偿。模拟和实测数据的成像结果表明,该算法是可行的。

关键词 ISAR成像; Keystone变换; 机动目标; 相对运动
中图分类号 TN957.51 **文献标识码** A

Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Relative Motion Targets

MAO Yong¹ and RUAN Cheng-li²

(1. Department of Computer Engineering, Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China Zhongshan Guangdong 528402; 2. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging of the non-cooperative maneuvering multi-target is a challenging task due to its time-varying orientation and the relative motion among targets. Conventional motion compensation methods assume that targets' positions are almost fixed during the imaging time. In this paper, the model of relative motion targets is established and the effect of relative motion for ISAR image is analyzed. A new algorithm for relative motion compensation based on Keystone transformation and Autoclean algorithm is proposed. The imaging results using simulation and real data validate the new relative motion compensation method.

Key words ISAR imaging; Keystone transformation; maneuvering targets; relative motion

逆合成孔径雷达(ISAR)是基于距离-多普勒原理成像,成像的关键在于运动补偿。目前,运动补偿的方法很多,在距离压缩完成的数据中,距离对准可以通过包络互相关^[1]或跟踪参考点的历史时间(如峰值或矩心)来完成并拟合成一个多项式^[2]。然而,横向相位跟踪的要求比距离校准严格得多,并且距离误差必须控制在雷达波长的几分之一范围内。大多数现有横向相位估计算法是通过跟踪单个隔离良好的目标的强散射体的相位历史来获得横向相位误差,如强散射体算法(DSA)^[3]、多散射体算法(MSA)^[4-6]。DSA在目标上有孤立强散射体时性能较好,然而,由于目标闪烁和阴影的作用,在多数情况下的效果不理想。基于矩心的算法在某种意义上比DSA更稳健,但需要进行相位平均,若相位展开不正确,这种平均过程反而更加有害。文献[7]提出

了一种Autoclean的自聚焦算法,不同于其他的多散射体算法,在二维(2D)图像域中自动选择(不需孤立或非常强的)多个散射体,并采用最佳方法将其相位和RCS信息加以综合,从而避免繁琐的相位展开步骤。

但对于多目标回波,当以其中的任一个目标为参考点进行运动补偿时,即使补偿精度很高,如果目标间存在相对运动,相对运动产生的多普勒频率会使横向产生多普勒频移,从而使二维成像模糊。因此,必须对目标间的相对运动进行补偿,消除相对运动对成像结果的影响。本文建立了点目标的相对运动模型,在运动补偿的基础上对运动目标进行二次补偿,消除了相对运动的影响。并对应用该方法的模拟和实测数据的成像结果与其他方法进行了比较。

1 相对运动对成像的影响

本文以2个存在相对运动的散射点为例分析相对运动对成像的影响,如图1所示。设雷达位于原点 L , A 、 B 为成像空间内的2个散射点,初始时刻 A 与雷达的距离为 R_0 , A 与 B 的距离为 r_0 ,目标 A 的运动速度为 v , v 与 LA 的夹角为 β , A 与 B 的相对运动速度为 v_0 ,且 AB 与速度 v 的方向相同。当 $R_0 > r_0$ 时,初始时刻 B 到雷达的距离为 $R_b = R_0 + r_0 \cos \beta$,在时刻 t 目标 A 、 B 分别运动到 A' 、 B' ;当 $R_0 > \Delta t$ 时,目标 A 到雷达的距离为:

$$R_0(t) \cong R_0 + \Delta t \cos \beta + \frac{(\Delta t)^2}{2R_0} \quad (1)$$

而时刻 t 时目标 B 到雷达 L 的距离为:

$$R_b(t) \cong R_0 + [r_0 + (v + v_0)t] \cos \beta + r_0 \cos \beta + \frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{2R_0} + \frac{(v + v_0)^2 t^2}{2R_0} \quad (2)$$

以 A 为参考点进行距离补偿,即相当于把 A 平移到以 R_0 为半径的圆周上,将 A' 点平移到 A'' ,则 B' 平移到 B'' 。若目标间不存在相对运动,时刻 t 时目标 B 运动到 C 点,补偿后 C 平移到 C'' ,则 C'' 到雷达的距离为:

$$R'_c(t) = \sqrt{(R_0 + r_0 \cos(\beta - \theta))^2 + (r_0 \sin(\beta - \theta))^2}$$

式中 θ 为雷达视线的转角, $\theta \approx vt \sin \beta / R_0$ 。则有:

$$R'_c(t) \approx R_0 + \frac{r_0^2}{2R_0} + r_0 \cos \beta + \frac{r_0 vt \sin^2 \beta}{R_0}$$

此时, B 点运动引起的相对于雷达的距离差为:

$$\Delta R_c(t) = R'_c(t) - R_b = \frac{r_0^2}{2R_0} - \frac{r_0 vt \sin^2 \beta}{R_0}$$

所以不存在相对运动时, B 点产生的多普勒频率为:

$$f'_d = \frac{2f}{c} \frac{r_0 v \sin \beta}{R_0} \quad (3)$$

而 B'' 到雷达的距离为:

$$R_b(t) \approx R_0 + \frac{(r_0 + v_0 t)^2}{2R_0} + (r_0 + v_0 t) \cos \beta - (r_0 + v_0 t) \frac{vt \sin^2 \beta}{R_0}$$

则相对速度引起的距离变化为 $\Delta R(t) = R'_c(t) - R_b(t)$,故相对运动引起的多普勒频率为:

$$f_d = \frac{2f}{c} \frac{d\Delta R}{dt} = \frac{2f}{c} \left(v_0 \cos \beta + \frac{r_0 v_0 + v_0^2 t}{R_0} - \frac{2v_0 vt \sin^2 \beta}{R_0} \right) \quad (4)$$

式中 f'_d 为目标不存在相对运动时,目标 B 等效为

转台旋转所产生的多普勒频率,是雷达成像需要的因素; f_d 为目标相对参考点运动所产生的多普勒频率,其大小主要由目标的相对运动速度 v_0 决定。当 f_d 大于横向多普勒分辨率时,在横向产生多普勒模糊,必须对相对运动进行补偿。对于存在加速度的运动目标,在同一成像时间内可看成是匀加速直线运动,只要在以上各式中加入加速度的影响即可。

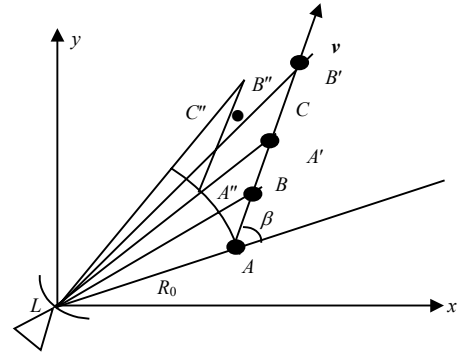


图1 目标相对运动模型

由于回波信号中包含的是所有散射点的信息,而相对运动只引起某一特定散射点(体)的位置与相位变化。从以上推导可知,当以任一散射点为参考点进行运动补偿,另一散射点必定存在距离迁徙。因此,要对相对运动引起的相位变化进行补偿,就必须从总回波中提取该散射点(体)的子回波信息。在成像时间内,若存在相对运动散射点的回波与其他散射点回波混合在一起(即与其他散射点径向距离较近),则无法直接从总回波中提取该散射点的独立信息,此时不能单独对相对运动进行补偿,必须对回波信号进行分离。

2 Keystone变换及运动补偿算法

逆合成孔径雷达回波的支撑域是一维平面。平面的坐标轴分别是快时间(即脉内时间)和慢时间(即脉间时间)。在快时间域进行傅里叶变换,将回波变换到 f - t 平面。Keystone变换就是变量代换 $t = f_0 \zeta / (f + f_0)$,该变换使 f - t 平面上的矩形支撑域在 f - ζ 平面上变成一个倒梯形,如图2所示。Keystone变换实际上是一种对 t 轴的伸缩变换,伸缩幅度和频率有关,高频拉伸幅度较大。Keystone变换正是利用线性坐标变换消除多普勒频率与 f 之间的耦合,从而校正速度引起的距离走动。Keystone变换已被用于动目标的合成孔径雷达成像^[8-9]。

若雷达发射周期线性调频信号,则雷达接收的回波信号(以基带形式表示)为:

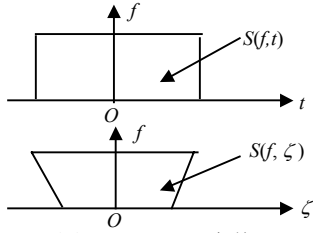


图2 Keystone变换

$$S(\eta, t_m) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{P_i} A_{ij} a\left(\eta - \frac{2r_{ij}(t_m)}{c}\right) e^{-j\frac{4\pi f_0}{c} r_{ij}(t_m)} \quad (5)$$

式中 $\eta = t - mT$ 为快时间; $t_m = mT$ 为慢时间, T 为脉冲重复周期; A_{ij} 为第 i 个目标的第 j 个散射点的散射系数; $a(\cdot)$ 为延迟的复包络; f_0 为中心频率; c 为光速; $r_{ij}(t_m)$ 为第 i 个目标的第 j 个散射点在时刻 t_m 到雷达的距离。将 $r_{ij}(t_m)$ 在时刻 t_0 处以泰勒级数展开有:

$$r_{ij}(t_m) = r_{ij}(t_0) + v_{ij}(t_m - t_0) + \frac{1}{2} a_{ij}(t_m - t_0)^2 + \dots \quad (6)$$

式中 v_{ij} 、 a_{ij} 分别为第 i 个目标的第 j 个散射点的径向速度和径向加速度。式(5)对快时间 η 做傅里叶变换, 并把式(6)和 $t'_m = t_m - t_0$ 代入可得:

$$S_f(f, t'_m) = a(f) \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{P_i} A_{ij} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)r_{ij}(t_0)} \times e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)v_{ij}t'_m} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)\left[\frac{1}{2}a_{ij}t'^2_m + \dots\right]} \quad (7)$$

当多目标运动时, 平动速度 v_{ij} 是引起包络距离走动的主要因素, 对相对慢时间 t'_m 进行坐标变换 $t'_m = f_0\zeta / (f + f_0)$, 经过Keystone变换的慢时间 ζ 的取值范围, 在原来相对慢时间 t'_m 的基础上以 $f_0\zeta / (f + f_0)$ 的比例伸缩。若在原来 t'_m 的取值范围内以周期 T 为间隔采样, 慢时间点 ζ_m 对应原来的慢时间 $t' = f_0\zeta_m / (f + f_0)$, 通过线性插值, 可得 ζ_m 处的值为:

$$S_f(f, \zeta_m) = a(f) \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{P_i} A_{ij} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)r_{ij}(t_0)} \times e^{-j\frac{4\pi}{c}f_0v_{ij}\zeta_m} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)\left[\frac{1}{2}a_{ij}\left(\frac{f_0}{f_0+f}\zeta_m\right)^2 + \dots\right]} \quad (8)$$

对式(8)的频率 f 做IFFT, 得到目标沿 ζ_m 排列的复距离像为:

$$s(R, \zeta_m) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{P_i} \int_{-\infty}^{\infty} A_{ij} a(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)r_{ij}(t_0)} \times e^{j\frac{4\pi}{c}fR} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_0+f)\left[\frac{1}{2}a_{ij}\left(\frac{f_0}{f_0+f}\zeta_m\right)^2 + \dots\right]} df e^{-j\frac{4\pi}{c}f_0v_{ij}\zeta_m} \quad (9)$$

式(9)表明, 对新的时间变量 ζ_m 引起包络移动的线性相位不复存在, 积分号内的部分为基本无移动

的距离像, 即经过Keystone变换后, 各目标的距离走动的线性项同时得到校正。基准时间 t_0 的选择取决于各目标散射点的回波在Keystone变换和脉压后的径向距离 $r_{ij}(t_0)$ 。对多目标相对运动而言, 不同时刻各目标的回波在径向距离上的重叠情况是有差异的。在某一时刻各目标的回波在距离上可能有严重的重叠, 但是, 只要各目标之间存在相对运动, 经过一段时间的运动, 它们在距离上的重叠会逐渐变小。在距离-多普勒平面上各目标的回波成分是可分离的, 因此, 选择各目标的回波重叠较小的时刻作为基准时间进行Keystone变换, 有利于各个目标回波的分。

根据Keystone变换的特点, 可以得到具体的相对运动补偿的算法为:

- (1) 对初始回波利用整体包络相关法进行初步的距离补偿。
- (2) 对距离补偿后的回波进行Keystone变换, 校正各目标的距离走动, 同时消除目标间的相对运动。
- (3) 在距离-多普勒平面上对进行回波分离提取, 从总体回波中提取各目标的子回波 $S_1(t), S_2(t), \dots, S_K(t)$ 。
- (4) 利用基于多散射点的AUTOCLEAN自聚焦算法, 分别对目标子回波 $S_1(t), S_2(t), \dots, S_K(t)$ 作相位补偿, 消除高次项对相位的影响。
- (5) 把补偿后的子回波数据返回到总体回波中的对应距离单元。
- (6) 利用时-频分析法, 可以对总体回波进行二维成像。

3 仿真与实验结果

本文对几组仿真数据和一批实测数据按上述方法进行补偿, 与没有做相对运动补偿的成像结果进行了比较。

在雷达发射频率7.5 GHz、带宽为600 MHz, 利用电磁仿真软件产生的转台数据如图3所示, 该仿真软件所模拟的电磁散射特性与真实情况非常类似。散射体间相对运动速度为50 m/s时, 利用Autoclean自聚焦算法补偿后的成像结果, 由于相对运动的存在, 利用一般补偿方法得到的ISAR图像存在着严重的多普勒模糊, 成像结果不能正确地反映散射体的个数以及空间分布。利用本文的方法运动补偿后的成像结果消除了相对运动的影响, 得到了散射体清晰的二维图像, 与图3a所示一致, 只是分辨率略有降低。

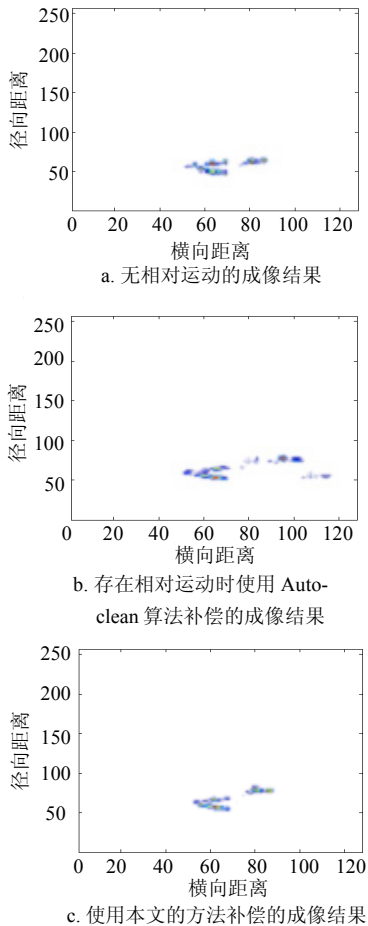


图3 2个多散射点目标相对运动的成像结果

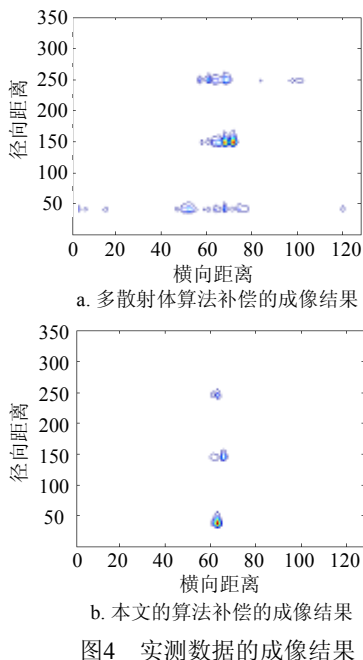


图4 实测数据的成像结果

窄带雷达的多目标数据的成像结果如图4所示。
图4a为未知相对运动速度的多目标相对运动补偿前

的成像结果；图4b为对雷达回波，利用相对运动补偿后的成像结果。从图中可以看到，由于相对运动产生的多普勒频移，使目标在二维图像中的横向位置发生改变；同时由于多普勒模糊可能产生虚假目标，经过相对运动补偿，可以补偿掉相对运动产生的影响，得到正确的二维图像。

4 结束语

本文讨论了对于非合作的机动多目标相对运动的一般模型；根据Keystone变换的特点，提出了相对运动补偿的实用算法；并用该算法对模拟数据和实测数据进行了成像处理。成像结果表明，该算法对相对运动的补偿非常有效，有助于提高雷达二维成像的质量。

本文的研究工作得到了电子科技大学中山学院博士启动资金的资助，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] WANG Guo-lin, XU Rong-qing, LIU Yong-tan. A fast method for ISAR motion compensation[J]. System Engineering and Electronics, 1996, 5: 63-69.
- [2] CHEN C C, ANDREWS H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, AES-16: 2-14.
- [3] WERNESSE S, CARRAR A W, JOYCE L, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 26(1): 57-67.
- [4] WU H, DELISLE G Y, FANG D G. Translational motion compensation in ISAR image processing[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 1995, 4(11): 1561-1571.
- [5] BAO Z, DENG W, YANG J. A new motion compensation scheme for ISAR imaging[C]//In Processing of the CIE International Conference on Radar. Beijing, China: Chinese Institute of Electronics, 1991.
- [6] ITOH T, SUEDA H, WATANABE Y. Motion compensation for ISAR via centroid tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3): 1192-1197.
- [7] JIAN L, RENBIAO W, CHEN V C. Robust autofocus algorithm for ISAR imaging of moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 1056-1069.
- [8] PERRY R P, DIPIETRO R C, FANTE R L. SAR imaging of moving target[J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35(1): 188-120.
- [9] 张顺生, 曾涛. 基于Keystone变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1675-1678.
ZHANG Shun-sheng, ZENG Tao. Weak target detection based on Keystone transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1675-1678.

编辑 黄 莘