

# 一种适用于编队目标的 ISAR 成像处理实现方法

陈文驰

(江南大学通信与控制工程学院, 江苏无锡 214122)

**摘 要:** 在对编队目标的 ISAR 成像中, 由于目标之间的间距很小, 各目标回波常常在距离域和多普勒域都有重叠, 难以进行多目标回波分离和分别成像. 本文提出一种适用于编队目标的 ISAR 成像实现方法. 对多目标回波统一进行径向加速度补偿和 Keystone 变换, 完成多目标的距离对齐. 在横向作多普勒分辨时, 考虑各目标散射点子回波可近似为线性调频信号, 引入修正离散 Chirp Fourier 变换, 并结合 CLEAN 技术, 同时得到多目标的距离-多普勒像. 仿真实验结果证明了该方法的有效性.

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 多目标; Keystone 变换; 修正离散 Chirp Fourier 变换

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)06-1119-04

## An Implementation Method of ISAR Imaging for Multiple Targets in Formation

CHEN Wenchi

(School of Communication and Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** When multiple targets in formation are in the observation region, the return signals from these targets may be overlapped both in the range and Doppler domain. Thus, it is difficult to separate these targets from each other, and each individual target cannot be clearly imaged. A new implementation method of ISAR imaging is proposed for multiple targets in formation. After radial acceleration compensation and Keystone transformation are performed, range alignment is accomplished for all moving targets. When multiple targets are moving smoothly, the Doppler variation of subechoes from scatterers can be approximated as a first-order polynomial. Therefore, the modified Chirp Fourier transform combined with the CLEAN technique is applied to each range cell to obtain the cross-range profiles of multiple targets simultaneously. The imaging results obtained by using simulated data show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** inverse synthetic aperture radar; multiple targets; keystone transformation; modified discrete Chirp Fourier transform

## 1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 是一项已得到深入研究的雷达成像技术. 一般的 ISAR 成像处理只考虑了在雷达波束内仅有一个目标的情形, 当需要用 ISAR 对处在观测区内的多个运动目标成像时, ISAR 的运动补偿变得非常困难. 各个目标之间存在一定的运动差异, 使用常规的运动补偿方法不可能同时将各目标的平动成分补偿掉. 这时, 各目标的回波成分常常在距离域和多普勒域都有重叠, 也很难直接利用距离信息和多普勒信息从混合回波中将各目标信号分离, 分别进行成像处理. 文献[1]尝试根据各目标不同的多普勒史, 利用短时傅立叶变换在时频平面进行多目标回波分离, 但对作一致运动的编队飞行目标而言, 多目

标呈近似刚性, 其运动参数相差不大, 在时频平面上各目标的时频曲线往往难以区分.

针对编队飞行目标的成像问题, 本文提出一种新的 ISAR 成像实现方法. 编队目标的径向加速度差异较小, 首先以最小熵法用同一参数统一补偿各目标的径向加速度, 基本消除各目标二次项距离走动, 进而使用 Keystone 变换法<sup>[2]</sup>同时校正各目标距离像的线性距离走动, 实现对多目标的距离对齐. 在横向作多普勒分辨时, 根据各目标散射点子回波为线性调频信号的特点, 利用修正离散 Chirp Fourier 变换<sup>[3]</sup>同时得到多目标的横向多普勒像. 本文成像方法避免了对编队目标回波分离的困难, 能够同时完成多个目标的运动补偿和成像处理. 仿真实验结果表明了该方法的有效性.

## 2 编队多目标回波信号模型

成像雷达以周期  $T$  发射宽带信号, 对接收到的回波下变频并作傅立叶变换后, 可在频率域和慢时间域将回波信号以阵列格式表成:

$$S_R(f_m, t_n) = P(f_m) \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{q_i} A_{i,j} e^{-j(4\pi c)(f_c + f_m)R_{i,j}(t_n)} \quad (1)$$

式中

$$f_m = \frac{mB}{M}, m = -\frac{M}{2}, -\frac{M}{2} + 1, \dots, \frac{M}{2} - 1$$

$B$  为发射脉冲带宽,  $t_n = nT$  为慢时间,  $n = -N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1$ ,  $P(f_m)$  是发射脉冲的傅氏变换,  $f_c$  为中心频率,  $c$  为光速,  $A_{i,j}$  为第  $i$  个目标的第  $j$  个散射点的散射系数,  $R_{i,j}(t_n)$  为该散射点在  $t_n$  时刻与雷达之间的距离, 观测区内共有  $L$  个目标, 第  $i$  个目标含有  $q_i$  个散射点.

当对飞机一类机械惯性较大的目标成像时, 若目标作平稳飞行, 在短时间内可将  $R_{i,j}(t_n)$  以二次多项式近似:

$$R_{i,j}(t_n) = R_{i,j}(0) + v_{i,j}t_n + \frac{1}{2}a_{i,j}t_n^2 \quad (2)$$

其中  $v_{i,j}$  和  $a_{i,j}$  分别为第  $i$  个目标的第  $j$  个散射点在 0 时刻的径向速度和加速度. 将式(2)代入式(1)中得:

$$S_R(f_m, t_n) = P(f_m) \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{q_i} A_{i,j} e^{-j(4\pi c)(f_c + f_m)R_{i,j}(0)} e^{-j(4\pi c)(f_c + f_m)v_{i,j}t_n} \cdot e^{-j(2\pi c)(f_c + f_m)a_{i,j}t_n^2} \quad (3)$$

## 3 编队目标回波的距离对齐

### 3.1 基于加速度补偿的目标群二次项距离走动校正

通常, ISAR 的平动补偿可分为距离对齐和初相补偿两步. 对多目标回波包络的距离对齐, 由于各目标包络距离走动的轨迹不同, 相邻距离像不存在强相关性, 传统的相关对齐法不再适用. 在秒级的相干积累时间内, 目标回波复包络沿距离变化相对较慢, 主要由目标径向速度和加速度引起. 目标回波包络的线性距离走动校正将在下一节讨论, 这里先考虑由径向加速度导致的二次项距离走动. 当对一致运动的编队目标成像时, 多目标编组呈近似刚性, 目标间相对运动不大, 各目标的径向加速度和多普勒调频率差异较小<sup>[4]</sup>. ISAR 距离走动的补偿精度要求远低于相位补偿, 误差小于一个距离分辨单元即可. 在距离走动的补偿中, 可以认为多目标的径向加速度近似相等, 以同一参数统一补偿各目标的径向加速度, 补偿后目标的二次项距离走动基本得以消除, 各目标散射点残余的径向加速度分量对距离走动的影响可忽略. 但在后续高精度的相位补偿时, 常常仍要考虑各目标散射点未补偿的加速度分量的影响. 目标的径向加速度导致回波的横向多普勒展宽. 可以想象, 当补偿的加速度参数接近目标群的径向加速度时, 各目标散射点子回波的多普勒谱展宽都显著减小, 一维横向像的锐化度趋向最大. 这里, 我们以多目标回波横

向像的 Shannon 熵最小化为准则得到目标群径向加速度估值. 具体方法如下:

设  $S(m, n)$  为雷达接收到的二维复数据矩阵, 考察式(3)可知, 各目标散射点子回波在第  $m$  个频率单元的多普勒调频率为  $\frac{2}{c}(f_c + f_m)a_{i,j}$ . 假定目标群的径向加速度值为  $a_R$ , 构造相移因子补偿各个频率单元数据中由线性调频引起的二次相移, 第  $m$  频率单元数据乘以相移因子  $e^{j\frac{2\pi}{c}(f_c + f_m)a_R(nT)^2}$ , 再对相移后的数据矩阵在  $n$  维方向进行 FFT, 得到由目标横向像组成的数据矩阵, 记为:

$$I(m, n, a_R) = \text{FFT}_n[S(m, n) e^{j\frac{2\pi}{c}(f_c + f_m)a_R(nT)^2}] \quad (4)$$

根据 Shannon 熵的定义, 第  $m$  频率单元横向像的 Shannon 熵为:

$$H(m, a_R) = - \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \frac{|I(m, n, a_R)|}{\sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} |I(m, n, a_R)|} \cdot \log \frac{|I(m, n, a_R)|}{\sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} |I(m, n, a_R)|} \quad (5)$$

当加速度补偿精确时, 各频率单元的横向像的熵值都达到最小, 因此, 对所有频率单元的横向像的熵值求和, 在一定范围内对  $a_R$  进行搜索, 使总熵值最小得到估计  $\hat{a}_R$ :

$$\hat{a}_R = \arg \min_{a_R} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} H(m, a_R) \quad (6)$$

利用  $\hat{a}_R$  对回波数据进行相位补偿后, 可以校正各目标的二次项距离走动.

### 3.2 基于 Keystone 变换的多目标线性距离走动校正

Keystone 变换是一种基于时间坐标变换的距离走动校正算法<sup>[2]</sup>, 此变换与目标速度无关, 适用于对所有以不同速度运动的散射点的线性距离走动校正.

在对目标群的径向加速度进行补偿后, 各目标还存在不同的线性距离走动, 对多目标回波实施 Keystone 变换可同时校正各目标的线性距离走动. 径向加速度补偿后的多目标回波可表为:

$$S_R(f_m, t_n) = P(f_m) \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{q_i} A_{i,j} e^{-j(4\pi c)(f_c + f_m)R_{i,j}(0)} e^{-j(4\pi c)(f_c + f_m)v_{i,j}t_n} \cdot e^{-j(2\pi c)(f_c + f_m)\Delta a_{i,j}t_n^2} \quad (7)$$

式中,  $\Delta a_{i,j} = a_{i,j} - \hat{a}_R$  为加速度补偿后各目标散射点残余的加速度分量.

观察式(7)中  $e^{-j(4\pi c)(f_c + f_m)v_{i,j}t_n}$  一项可知, 各目标散射点子回波的频率  $-2(f_c + f_m)v_{i,j}/c$  都随  $f_m$  的变化而变化. 经距离压缩后, 这一时频耦合项导致包络随  $t_n$  作线性走动. Keystone 变换正是利用线性坐标变换消除了多普勒频率与  $f$  之间的耦合, 从而同时校正各目标由速度引起的距离走动.

对慢时间  $t_n$  进行坐标变换

$$t_n = \frac{f_c}{(f_c + f_m)} t_n \quad (8)$$

变换后的回波信号可表为:

$$S_R(f_m, t_n) = P(f_m) \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{q_i} A_{i,j} e^{-j4\pi f_c (f_c + f_m) R_{i,j}(0)} e^{-j4\pi f_c v_{i,j} T_n} \cdot e^{-j2\pi f_c (1 + \frac{f_m}{f_c})^{-1} \Delta a_{i,j} T_n^2} \quad (9)$$

在实际中, *Keystone* 变换可通过基于变尺度 DFT 的线性插值算法快速实现<sup>[5]</sup>. 对上式的信号在频域作 IFFT 可得沿  $t$  排列的基本无移动的复距离像.

## 4 基于 MDCFT 的横向成像处理

多目标回波的距离像对齐后, 必须考虑对每一距离单元的数据进行初相误差补偿. ISAR 初相补偿的精度要求极高, 其允许误差常在亚毫米级<sup>[6]</sup>, 前文用同一参数进行的径向加速度补偿是不够精确的. 补偿后各目标散射点子回波的多普勒频率仍是变化的, 且可以以线性调频模型近似. 由于各目标残存的加速度分量有所差异, 不同目标散射点的多普勒调频率也是不同的, 无法用同一个相位误差序列同时完成对多个目标的初相校正. 由于各目标散射点子回波为线性调频信号, 本文引入修正离散 Chirp Fourier 变换 (Modified Discrete Chirp Fourier Transform: MD-CFT), 避免复杂的相位补偿, 直接完成对多目标回波的横向成像处理.

文献[7]提出的离散 Chirp Fourier 变换 (Discrete Chirp Fourier Transform: DCFT) 是一种有效的 LFM 信号检测方法. DCFT 为线性变换, 当存在多个 Chirp 信号分量时不存在交叉项. 但是, 它不仅要求信号的总采样点数为质数, 而且要求信号参数必须是整数, 否则其性能将急剧下降. 为了克服这些缺点, 文献[3]对 DCFT 的定义进行了修正, 提出了 MDCFT, 其定义为:

$$X(k, l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn + \frac{l}{2}n^2} \quad (10)$$

其中,  $x(n)$  为信号序列,  $k$  和  $l$  分别为初始频率和调频斜率,  $W_N$  为 Fourier 变换旋转因子,  $N$  为序列长度. 尽管 MDCFT 对 LFM 信号的时频聚集性稍低, 但它对信号的采样总点数和信号参数没有约束条件, 因而更具实用价值.

在对多目标回波作横向多普勒成像时, 对每一距离单元的回波作 MDCFT, 在 MDCFT 的谱分布图上出现的多个峰值就对应了各目标散射点的信号. 根据峰值点的初始频率和幅度, 可以确定各散射点的多普勒和强度, 得到多目标在该距离单元的横向多普勒像. 在 ISAR 成像时, 各目标散射点的强度相差较大, 强散射点信号的峰值旁瓣很容易将弱散射点信号的峰值淹没. 为此, 我们结合逐次消去 (CLEAN)<sup>[8]</sup> 的思想, 给出一种基于 MDCFT 变换的 ISAR 横向成像算法. 具体的处理步骤如下:

(1) 设  $s(n)$  为每个距离单元的数据, 对  $s(n)$  作 MD-CFT, 选取一个最强的谱峰并估计该散射点的信号参数, 假设

其多普勒初始频率和调频斜率分别为  $f_{d1}$  和  $K_1$ ;

(2) 构造解线调参考信号  $s_{r1}(n)$ , 将其与  $s(n)$  相乘; 此时最强散射点的分量被补偿为频率为  $f_{d1}$  的单频分量, 而其他分量相当于在时频域旋转一个角度, 仍然为 LFM 信号. 其中参考信号  $s_{r1}(n) = \exp[-jpk_1(nT)^2]$ ;

(3) 在频域构造一个中心频率为  $f_{d1}$  的频带极窄的带阻滤波器, 经其滤波处理后, 最强分量被滤除而对其他分量的影响不大;

(4) 将滤波后的回波数据乘以  $s_{r2}(n) = \exp[jpk_1(nT)^2]$  将其他分量校正为原来的形式, 从而得到最强分量被滤除的回波信号;

(5) 对滤除最强散射点的回波信号再作 MDCFT, 检测出第二个强散射点信号, 重复步骤 (2) ~ (4), 直到所有的强散射点信号分量都被滤除;

(6) 对滤除各强散射点信号分量的回波信号作 MDCFT, 此时弱散射点信号的峰值就显露出来;

(7) 如有必要, 重复步骤 (1) ~ (6), 直到检测不出明显的散射点信号为止.

## 5 仿真实验结果

在缺少实测数据的情况下, 借助计算机仿真实验说明上述算法的有效性.

假设用 ISAR 照射两架沿图 1 所示航路作匀速直线飞行的米格 25 战机, 其速度分别是  $v_1 = 200 \text{ m/s}$ ,  $v_2 = 205 \text{ m/s}$ , 速度方向与  $x$  轴正向夹角  $\theta_1 = \theta_2 = 2^\circ$ . 初始观测时刻两架飞机在坐标系中的位置为  $(-13, -5)$ ,  $(13, 5)$ , 雷达与坐标原点之间距离  $R_0 = 17.8 \text{ km}$ . 成像雷达的重复频率为  $650 \text{ Hz}$ , 宽带信号中心频率  $5.52 \text{ GHz}$ , 带宽为  $300 \text{ MHz}$ , 经过  $3.15 \text{ s}$  的时间, 接收到 2048 次回波, 目标 1 转过  $2.02^\circ$ , 目标 2 转过  $2.07^\circ$ . 两目标的理论纵向距离

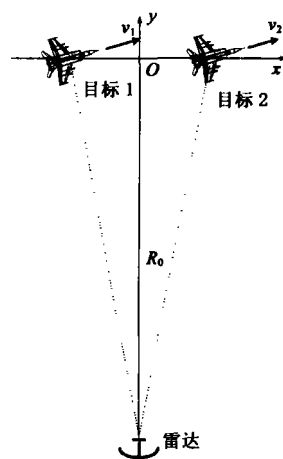


图 1 编队目标运动示意图

分辨力为  $0.5 \text{ m}$ , 理论横向分辨力分别为  $0.79 \text{ m}$  和  $0.77 \text{ m}$ .

对多目标回波作纵向距离压缩后, 得到图 2(a) 的两目标的原始动态距离像分布图. 利用最小熵方法补偿目标群的径向加速度, 得到图 2(b) 的动态距离像分布, 两目标的二次项距离走动基本消除. 图 2(c) 为对目标回波进行 *Keystone* 变换后的结果, 两目标的线性距离走动同时得到校正, 完成两目标的距离对齐. 利用基于 MDCFT 的成像算法对回波数据横向成像, 可以同时得到图 2(d) 的两目标的距离-多普勒二维像.

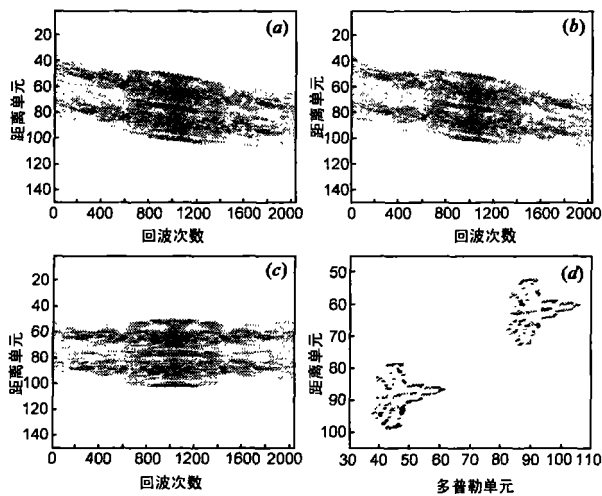


图2 仿真实验结果 (a) 两目标原始动态距离像分布;(b)加速度补偿后的动态距离像分布;(c) Keystone变换后的动态距离像分布;(d) 两目标的距离-多普勒像

## 6 结束语

多目标 ISAR 成像的研究是 ISAR 成像研究中的新兴课题,存在不少的难点.在观测区间里同时存在多个目标时,很难利用常规方法对多个目标同时进行运动补偿和成像处理.本文针对编队目标的成像问题,利用一致运动的多目标呈近似刚性的特点,提出利用加速度补偿和 Keystone 变换完成距离对齐,以修正离散 Chirp-Fourier 变换完成成像处理.该方法避免了对多目标回波的分离,可以同时给出多目标的两维像,为编队目标的 ISAR 成像问题提供了一种可以考虑的实现方案.

## 参考文献:

- [1] 朱兆达,殷军,邬小青,等.基于信号时间-频率分析的多运动目标 ISAR 成像[J].现代雷达,1993,15(5):33-37. ZHU Zhao-da, YIN Jun, WU Xiao-qing. ISAR imaging of multiple moving targets using time-frequency representations[J]. Modern Radar, 1993, 15(5): 33-37. (in Chinese)

- [2] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35(1): 188-199.
- [3] Guo X, Sun H, Wang S, et al. Comments on discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation[J]. IEEE Trans on SP, 2002, 50(12): 3115.
- [4] 张兴敢. 逆合成孔径雷达成像及目标识别[D]. 南京: 南京航空航天大学博士论文, 2001. 12-18. Zhang Xing-gan. ISAR Imaging and Targets Recognition [D]. Nanjing: Doctoral dissertation of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. 12-18. (in Chinese)
- [5] 邢孟道, 保铮, 郑义明. 适合于大型平稳和机动目标的成像算法[J]. 信号处理, 2001, 17(1): 47-55. Xing Meng-dao, Bao Zheng, Zheng Yi-ming. The imaging algorithm for steadily flying or maneuvering big targets[J]. Signal Processing, 2001, 17(1): 47-55. (in Chinese)
- [6] 崔东哲, 翁祖荫. 逆合成孔径雷达成像技术的研究[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(6): 15-21. CUI Dongzhe, WENG Zuryin. The research of inverse synthetic aperture radar imaging[J]. System Engineering and Electronics, 1996, 18(6): 15-21. (in Chinese)
- [7] Xia X G. Discrete chirp-fourier transform and its application to chirp rate estimation[J]. IEEE Trans on SP, 2000, 48(11): 3122-3133.
- [8] Tsao J, Steinberg B D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique [J]. IEEE Trans on AES, 1988, 36(4): 543-556.

## 作者简介:



陈文驰 男, 1978 年 3 月生于陕西省西安市, 助教, 2003 年 3 月获西安电子科技大学信号与信息处理专业硕士学位, 现就职于江南大学通信与控制工程学院, 研究方向: 雷达成像. E-mail: cwc1978314@sina.com