

文章编号: 1000-6893 (2004) 05-0492-04

基于修正离散 Chirp2Fourier 变换的高速目标 ISAR 距离像补偿

刘爱芳, 朱晓华, 刘 中

(南京理工大学 电子工程系, 江苏 南京 210094)

ISAR Range Profile Compensation of Fast2moving Target Using Modified Discrete Chirp2Fourier Transform

LIU Ai2fang, ZHU Xiao2hua, LIU Zhong

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

摘 要: 分析了高速运动目标的逆合成孔径雷达 (ISAR) 回波信号模型和高速运动对 ISAR 信号处理的影响。结果表明, 高速运动特征会导致目标一维距离像的畸变和二维像的模糊。为此, 提出了一种基于修正离散 Chirp2Fourier 变换 (MDCFT) 的高速运动目标距离像补偿算法, 采用 MDCFT 谱包络最小 Shannon 熵准则进行参数估计, 可解决幅度最大准则下参数估计性能恶化的问题。仿真结果表明了该距离像补偿算法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 修正离散 Chirp2Fourier 变换; 线性调频信号; 距离像

中图分类号: V243.2 文献标识码: A

Abstract: The inverse synthetic aperture radar (ISAR) echo signal model of fast2moving target and the effect of fast2moving character on ISAR signal processing are analyzed. The analysis results show that the fast2moving character will result in ISAR range profile aberration and tw2dimensional image blurring. To resolve this problem, a range profile compensation algorithm based on the modified discrete Chirp2Fourier transform is proposed. In the algorithm, the spectrum envelope entropy minimizing criterion is applied for Chirp rate estimation to overcome the parameter estimation difficulty under amplitude maximum criterion. The simulation results prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: inverse synthetic aperture radar; modified discrete Chirp2Fourier transform; LFM signal; range profile

逆合成孔径雷达 (ISAR)^[1,2] 作为一种高分辨成像雷达是空间目标探测和识别的一种重要手段。由于空间目标速度很高, 因此, 研究高速运动条件下的 ISAR 成像技术有着重要的现实意义。文献[3] 和文献[4] 在这方面作了一些尝试, 研究了高速运动目标的 ISAR 回波信号模型, 分析了高速运动对目标距离像的影响并探讨了补偿方法。但文献[3] 和文献[4] 的研究尚不够深入, 也没有提出实用的补偿算法, 因此, 高速运动条件下的 ISAR 运动补偿方法仍然需要更进一步的研究。

由文献[3] 和文献[4] 可知, 高速运动目标的 Stretch 混频输出信号中散射点子回波为线性调频 (LFM) 信号 (低速运动条件下为单频信号), 经纵向距离维压缩处理后高速运动目标的距离像严重畸变。本文深入地分析了高速运动对 ISAR 运动补偿和目标二维像的影响, 并将修正离散 Chirp2Fourier 变换^[5,6] 引入 Stretch 混频输出信号的参数估计中, 提出了基于该变换的高速运动目标距离

像补偿算法。仿真实验表明, 它能有效消除目标高速运动给目标距离像带来的影响, 距离像补偿后目标的二维像质量显著提高。

1 高速运动目标的 ISAR 回波信号模型

以目标上一个散射强度为 1 的理想散射点为例推导高速运动目标的 ISAR 回波信号模型。设雷达发射的宽带 LFM 信号 $S_T(t)$ 为

$$S_T(t) = a(t) \exp[jP(2f_0t + Kt^2)] \quad (1)$$

其中: $a(t)$ 为信号复包络; f_0 为载频; K 为调频斜率。设散射点延时为 S , 则回波信号 $S_R(t)$ 为

$$S_R(t) = a(t - S) \exp[jP(2f_0(t - S) + K(t - S)^2)] \quad (2)$$

设 Stretch 处理的混频参考信号 $S_r(t)$ 为

$$S_r(t) = a(t - S_1) \exp[-jP(2f_0t + K(t - S_1)^2)] \quad (3)$$

则 Stret ch 处理混频输出信号为

$$S_o(t) = S_R(t)S_r(t) = A(t) \exp[-j5_0] \# \exp[j2KP(S_1 - S)t] \quad (4)$$

式中: $5_0 = P[2f_0S - K(S^2 - S_1^2)]$; $A(t) = a(t -$

S) $a(t - S_1)$; S_1 为参考点延时。当目标径向速度很大时, 目标在脉冲作用期间的纵向距离变化不能忽略, 其延时可表示为 $S = S_0 - 2vt/C$ 。将 $S = S_0 - 2vt/C$ 和 $t = S_1 + nT_s$ 代入式(4), 可得 Stretch 混频输出的离散信号为

$$S_o(n) = A(t) \exp(j5_2) \# \exp[jP(2f_{d1}nT_s + K_1n^2T_s^2)] \quad (5)$$

其中: $5_2 = -2Pf_0S_0 + 2Pf_dS_1 + KPD^2$; $f_d = 2v/C$; $D = S_0 - S_1(1 + 2v/C)$; $f_{d1} = f_d - KD(1 + 2v/C)$; $K_1 = 4K(v/C + 1)(v/C)$; S_0 为观测开始时刻的目标距离; T_s 为采样频率。由式(5)可见, 高速目标的散射点子回波为 LFM 信号且每次回波中各散射点子回波的调频斜率相同。因此, ISAR 纵向聚焦的 FFT 处理会导致散射点频谱的展宽和目标距离像的畸变。

2 基于修正离散 Chirp2Fourier 变换的参数估计方法

文献[5]提出的离散 Chirp2Fourier 变换(Discrete Chirp2Fourier Transform: DCFT)是一种有效的 LFM 信号检测方法, 但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^[6]。为了克服这些缺点, Guo X 等人^[6]对 DCFT 的定义进行了修正, 提出了修正离散 Chirp2Fourier 变换(Modified Discrete Chirp2Fourier Transform: MDCFT), 其定义为

$$S(f_d, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) W_N^{f_d n + kn^2/N} \quad (6)$$

其中: $s(n)$ 为信号序列; f_d 和 k 分别为起始频率和调频斜率; 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^[6]。对于离散 LFM 信号

$$s(n) = a_1 W_N^{(f_{d0}n + k_0n^2/N)} \quad (7)$$

其 MDCFT 谱为

$$S(f_d, k) = \frac{a_1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{(f_d - f_{d0})n + (k - k_0)n^2/N} \quad (8)$$

由式(8)可知, 当 $f_d = f_{d0}$, $k = k_0$ 时, 信号能量发生最大聚集, MDCFT 谱表现出尖峰。基于 MDCFT 的 LFM 信号参数估计的常规方法为: 首先计算信号 $s(n)$ 的 MDCFT 谱 $S(f_d, k)$ 并求模得到 $|S(f_d, k)|$, 然后通过二维搜索获得最大值的坐标对应的起始频率 f_{d0} 和调频斜率 k_0 , 则估计得

到 LFM 信号参数, 起始频率 $f_d = f_{d0}$, 调频斜率 $k_0 = k_0$ 。

3 基于修正离散 Chirp2Fourier 变换的高速运动目标距离像补偿算法

高速运动目标的 Stretch 混频输出信号为调频斜率 K_1 相等且起始频率相近的多分量 LFM 信号, 因此, 其 MDCFT 谱可能存在严重的频谱分量叠加, 在常规的幅度最大准则下难以获得理想的参数估计性能。为此, 提出了基于 MDCFT 谱包络最小 Shannon 熵准则的调频斜率估计方法, 其依据为: 当 $S(f_d, k)$ 的 k 越接近调频斜率 K_1 时, 各散射点子回波的频谱展宽越小, 频谱包络锐化度越高, 包络的 Shannon 熵就越小。故可用对应不同 k 的 MDCFT 谱包络 Shannon 熵最小作为估计 K_1 的准则。具体方法如下。

设某次回波 Stretch 混频输出信号对应于 k 的 MDCFT 谱包络为 $|S(f_d, k)| = |S_1, S_2, \dots, S_N|$, 定义其归一化包络为 $P_i = |S_i| / \sum_{i=1}^N |S_i|$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 则 $|S(f_d, k)|$ 的 Shannon 熵为

$$H[S(f_d, k)] = - \sum_{i=1}^N P_i \lg(P_i) \quad (9)$$

则 Stretch 混频输出信号的调频斜率估计值为

$$K_{1i} = 2 \arg \min_k H[S(f_d, k)] \quad (10)$$

在包络最小 Shannon 熵准则下用 MDCFT 分别估计 ISAR 各次宽带回波信号的调频斜率 K_{1i} 后 ($i = 1, 2, \dots, M$; M 为成像积累的回波个数), 可用 K_{1i} 构造补偿参考信号 $s_{r,i}(t) = \exp(-jPK_{1i}n^2T_s^2)$ 分别补偿各次回波 Stretch 混频输出信号的调频斜率。由于用单次回波估计 K_{1i} 可能存在较大的估计误差, 对由单次回波估计得到的 K_{1i} 进行突变误差消除和最小二乘拟合处理以进一步提高估计精度。基于 MDCFT 的高速运动目标距离像补偿算法主要包括以下步骤:

(1) 在一定的起始频率 f_d 和调频斜率 k 范围内, 分别计算第 i ($i = 1, 2, \dots, M$) 次回波 Stretch 混频输出信号的 MDCFT 谱 $S(f_d, k)$;

(2) 根据式(9), 式(10)在 MDCFT 谱包络最小 Shannon 熵准则下估计调频斜率 K_{1i} ;

(3) 对 K_{1i} 进行突变误差消除处理;

(4) 对 K_{1i} 进行最小二乘拟合处理;

(5) 用 K_{1i} 依次构造第 i 次回波 Stretch 混频输出信号 $S_{f,i}(n)$ 的参考信号 $s_{r,i}(t) = \exp(-jPK_{1i}n^2T_s^2)$, 并与 $S_{f,i}(n)$ 相乘;

(6) 对 $S_{fi}(n)$ 进行 FFT 处理得到距离像补偿后的高速运动目标距离像。

4 仿真实验结果

仿真实验中的雷达系统参数为: 雷达载频 $f_0 = 10\text{GHz}$; 发射信号带宽 $B = 1\text{GHz}$; 脉冲宽度 $T_p = 5112\text{Ls}$; 采样频率 $f_s = 5\text{MHz}$; 脉内采样点数 $N = 256$ 。取成像积累总转角为 5173b , 共 128 个观测角度采样。目标为由 8 @ 11 点的等散射强度理想散射点组成的平面方阵, 各散射点的横向、纵向间距均为 1m。设 Stretch 混频输出信号的信噪比为 0dB。在仿真中包络对齐采用整体包络相关法^[2], 相位补偿采用多普勒中心跟踪法^[7], 成像采用距离-多普勒(RD)法。目标初始位置为 $x_0 = 500\text{km}$, $y_0 = 250\text{km}$, 并以 $v_0 = 10\text{km/s}$ 的速度作匀速直线运动, 运动轨迹如图 1 所示。图 2 为 ISAR 未进行距离像补偿时得到的目标二维像。由图 2 可见, 在上述的参数条件下, 如果不对距离像进行有效的补偿, 后续的运动补偿和成像算法性能将会严重恶化, 成像质量急剧下降。在谱包络最小 Shannon 熵准则下利用 MDCFT 估计得到的 K_{1i} 如图 3 所示。由图 3 可见, 在包络最小 Shannon 熵准则下, MDCFT 能获得较高的调频斜率估计精度, 且突变误差消除和最小二乘拟合处理能进一步提高估计精度。图 4 为应用 K_{1i} 的估计值对高速目标的距离像进行补偿后的目标二维像。对比图 2 和图 4 易知, 应用高速目标距离像补偿算法能有效消除高速运动给目标距离像带来的影响, 距离像补偿后 ISAR 的成像质量显著提高。

由于利用 MDCFT 估计 Stretch 混频输出信号的调频斜率时既没有对目标运动轨迹有任何假设, 也不需要利用目标运动轨迹的先验信息, 因

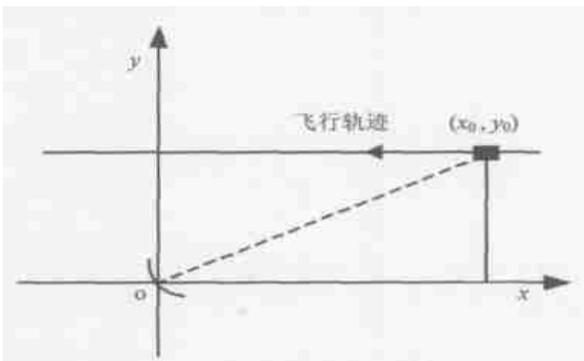


图 1 雷达和运动目标几何关系

Fig 1 Geometry of radar and moving target

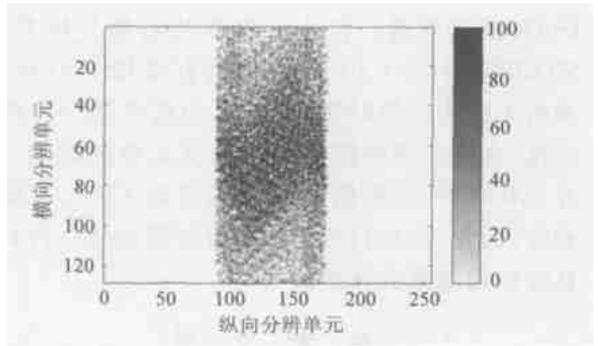


图 2 一维距离像未补偿时的高速目标二维像

Fig 2 ISAR image of fastmoving target without range profile compensation

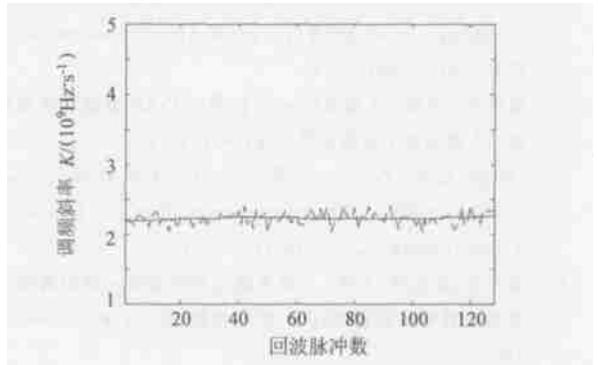


图 3 基于 MDCFT 的仿真数据 K_{1i} 估计值(虚线为原始估计值, 实线为曲线拟合结果)

Fig 3 Curves of estimated k_{1i} using the MDCFT (dashed line: original estimated K_{1i} ; solid line: after curve fitting)

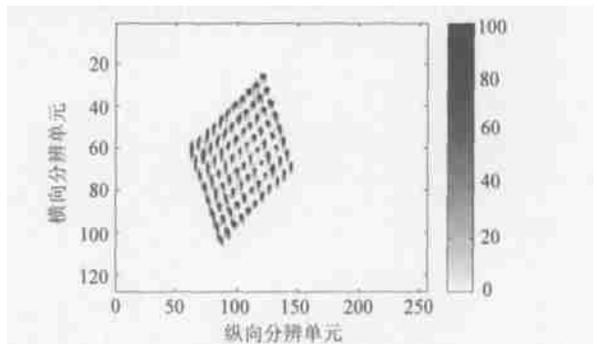


图 4 用 MDCFT 进行距离像补偿后高速目标二维像

Fig 4 ISAR image of fastmoving target after the range profile compensation using the MDCFT

此, 距离像补偿算法对目标运动规律有较强的适应性, 算法稳健性好。

5 结束语

在分析高速运动对 ISAR 信号处理影响的基础上, 结合包络最小 Shannon 熵准则提出了基于 MDCFT 的高速运动目标的距离像补偿算法。仿真结果表明, 该算法能有效地消除高速运动目标

的距离像畸变,从而显著改善高速运动目标的 ISAR 成像质量。作为一种新的时频分析方法,MD-CFT 不仅对 LFM 信号具有常规 Fourier 变换所无法比拟的时频聚集性,而且它是一种线性变换,在多分量情况下不存在交叉项的影响。另外,MD-CFT 的数值计算可以借助 FFT,运算量较少,因此,高速目标距离像补偿算法是一种具有良好应用前景的算法。

参 考 文 献

- [1] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging [J]. IEEE Transaction on AES, 1980, 16(1): 2- 14.
- [2] Delisle G Y, Wu H Q. Moving target imaging and trajectory compensation using ISAR [J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(3): 887- 899.
- [3] 张庆文, 保铮. 采用窄 Stretch 信号的 ISAR 成像与运动补偿 [J]. 西安电子科技大学学报, 1992, 19(1): 8- 16.
(Zhang Q W, Bao Z. Application of a short stretch signal to ISAR imaging and motion compensation [J]. Journal of Xidian University, 1992, 19(1): 8- 16.)
- [4] 黄小红, 邱兆坤, 王伟. 目标高速运动对宽带一维距离像的影响及补偿方法研究 [J]. 信号处理, 2002, 18(6): 487- 490.
(Huang X H, Qiu Z K, Wang W. Research on effect of wideband range profile imaging and compensation method for target moving with high velocity [J]. Signal Processing, 2002, 18(6): 487- 490.)
- [5] Xia X G. Discrete Chirp-Fourier transform and its application to

chirp rate estimation [J]. IEEE Transactions on SP, 2000, 48(11): 3122- 3133.

- [6] Guo X, Sun H B, Wang S L, et al. Discrete Chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. IEEE Transactions on SP, 2002, 50(12): 3115.
- [7] 朱兆达, 邱晓晖, 余志舜. 用改进的多普勒中心跟踪法进行 ISAR 运动补偿 [J]. 电子学报, 1997, 25(3): 65- 69.
(Zhu Z D, Qiu X H, She Z S. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(3): 65- 69.)

作者简介:

刘爱芳(1975-) 男,山西武乡人,2004年毕业于南京理工大学电子工程系,获博士学位,现为南京电子技术研究所站博士后。研究方向为:雷达信号处理、雷达成像和目标识别等。联系电话:025283773106, E-mail: lafx1997@163.com.



朱晓华(1966-) 男,江苏南通人,南京理工大学电子工程系教授,博士。研究方向为:雷达系统设计、雷达信号处理和高速数字信号处理。



刘中(1963-) 男,安徽灵璧人,南京理工大学电子工程系教授,博导。研究方向为:雷达信号处理、混沌和传感器网络。

(责任编辑:李泓洁)