

• 通信与信息工程 •

ISAR运动参数估计和补偿改进方法

张晓玲, 黄书伟, 郭少南

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 在使用FFT距离多普勒算法进行ISAR成像处理时, 回波相关性的减弱将加大运动补偿难度, 带来较大的误差。该文在常规相邻相关法基础上, 提出了一种改进的运动补偿方法。在距离向上, 利用基准回波相关法与曲线拟合, 克服了低回波相关性下包络对齐时出现的包络漂移、包络跳变等缺陷; 在方位向上, 利用DCFT变换, 对目标的运动参数进行精确估计并加以补偿, 减小了回波相关性降低对相位补偿的影响。仿真验证了该方法的有效性。

关键词 离散调频傅里叶变换; 包络漂移; 包络跳变; 二次曲线拟合
中图分类号 TN918; O332 **文献标识码** A

An Improved Method for Parameter Estimation and Motion Compensation in ISAR Imaging

ZHANG Xiao-ling, HUANG Shu-wei, and GUO Shao-nan

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

Abstract When the range-Doppler algorithm is used in inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging, the reduction of echo correlation will add more difficulties on motion compensation and bring more error. Accordingly, based on the adjacent-correlate compensate method used in FFT range-Doppler algorithm, an improved compensation method is presented in this paper. The traditional compensation method is modified to avoid the envelope drift and envelope jump in range align. In phase compensation, a new algorithm based on accurate target parameter estimation by use of discrete chirp-Fourier transform (DCFT) transform is presented. Finally the improve method is verified by simulation.

Key words discrete chirp-Fourier transform; envelope drift; envelope jump; 2 order polynomial fitting

FFT距离多普勒算法由于其计算量小、实现简单的优点, 被广泛应用于ISAR成像领域。该算法利用相邻回波间的强相关性, 估计它们的相对时延并进行运动补偿, 因此, 它对回波的相关性有着较高的要求^[1]。

然而, 目标运动速度增大、目标的不规则运动、干扰与噪声的增强、脉冲重复频率(PRF)的降低都将导致回波间相关性的减弱。而传统FFT距离多普勒基于相邻回波相关性的补偿算法会产生较大误差, 难以满足成像的精度要求。

本文提出了一种针对较低回波相关性改进的运动补偿算法。

1 回波信号模型

在单散射点情况下, 雷达按一定 PRF 发射 chirp

信号, 接收的第 k 个回波为^[2-3]:

$$f^k(t) = K \exp \left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{2r_k(t)}{c} \right) + j2\pi\beta \left(t - \frac{2r_k(t)}{c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中 M 为目标散射点数; K 为散射点的散射系数; f_0 为信号载频; $r_k(t)$ 为距离函数; β 为 chirp 信号的调频斜率; c 为光速。

采用去斜率方法对回波做检波处理后得到:

$$f_B^k(t) = K \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{2r_k(t)}{c} \right) \times \exp \left(j2\pi\beta \frac{4r_k^2(t)}{c^2} \right) \times \exp \left(-j4\pi\beta \frac{2r_k(t)}{c} t \right) \quad (2)$$

收稿日期: 2006-11-24; 修回日期: 2007-06-05

基金项目: 国防预研基金

作者简介: 张晓玲(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事合成孔径雷达(SAR)处理技术、ISAR技术、目标分类与识别技术以及卫星导航定位技术等方面的研究。

在相对短的回波接收时间内, $r_k(t)$ 变化不大, 可看作常数, 将式(2)离散化并经距离压缩(FFT)后, 得到距离向上的一维像:

$$\begin{aligned} \text{FFT}[f_b^k(n)] &= K \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2r_k(n)}{c}\right) \times \\ &\exp\left(j2\pi\beta \frac{4r_k^2(n)}{c^2}\right) \times \\ &\delta\left(n + j4\pi\beta \frac{2r_k(n)}{c}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

进行方位向上的处理时, 距离函数 $r_k(t)$ 不再是快时间 n 的函数, 而是回波序号 k 的函数, 忽略回波的距离向影响, 得到信号为:

$$I(k) = K \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2r(k)}{c}\right) \exp\left(j2\pi\beta \frac{4r^2(k)}{c^2}\right) \quad (4)$$

用匀加速运动模拟目标运动轨迹 $r(k)$, 将式(4)化简得到:

$$\begin{aligned} I(k) &= K \exp\left\{j2\pi\left[\left(\frac{2v_r}{\lambda\text{PRF}} + \frac{8\beta R_0 v_r}{c^2\text{PRF}}\right)k + \right. \right. \\ &\left.\left. \left(\frac{R_0 a_r + v^2 - v_r^2}{\lambda R_0 \text{PRF}^2} + \frac{4\beta(R_0 a_r + v^2)}{c^2\text{PRF}^2}\right)k^2 + \right. \right. \\ &\left.\left. \left(\frac{v_r(2v_r^2 - R_0 a_r - v^2)}{2\lambda R_0^2 \text{PRF}^3}\right)k^3 + O(k^3)\right]\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 v_r 为径向速度; R_0 为雷达与目标起始距离; a_r 为目标径向加速度; PRF 为脉冲重复频率; λ 为工作波长; v 是目标运动的绝对速度。多散射点为单散射点情况的线性叠加。

式(5)各指数项对方位分辨的影响:

(1) 一次项包含了各散射点的相位信息, 通过方位向压缩可以实现方位分辨。

(2) 二次项为目标平动产生的线性调频相位, 是影响方位向分辨的最主要因素。

(3) 三次项为由载波引起的方位向多普勒分量中的高阶分量, 将导致方位向压缩的散焦, 目标速度方向不同, 散焦的程度也不相同, 但根据仿真结果, 该项影响可以被忽略。

(4) 其他高阶项可以忽略。

因此, 只要检测出影响方位向分辨的线性调频项, 并做相应的补偿, 以消除式(5)中二次项, 再进行方位向的压缩, 即可实现方位向分辨。

基于上述的回波模型, 本文提出了改进的包络对齐改进算法和调频斜率估计算法。

2 包络对齐改进算法

FFT 距离多普勒成像法采用相邻相关法做包络

对齐时, 是把前一个距离像作为对准的基准, 因此它的偏差会一直传播下去。设第 i 次估计的误差为 δr_i , 则对第 m 个距离像的补偿误差为:

$$\Delta r_m = \sum_{i=0}^m \delta r_i \quad (6)$$

设各次估计误差统计特性相同, 均值为 0, 方差为 σ_r^2 , 则对第 m 个距离像补偿误差的方差为:

$$\sigma_m^2 = E(\Delta r_m^2) = \sum_{i=0}^m E(\delta r_i^2) \approx m\sigma_r^2 \quad (7)$$

由式(7)可知, 相邻相关法补偿误差的方差与已补偿的一维像个数成正比, 这将会导致包络漂移的产生。

另外, 由于某种原因, 可能使某次的距离估计值产生较大误差, 这个误差传播下去, 将造成后续一维像均产生一个较大的距离向移动, 从而导致包络跳变。回波相关性的降低, 将使得包络漂移和包络跳变现象更加严重^[4-6]。

新的包络对齐方法将针对以上不足进行改进:

设定一个基准回波, 后续各次回波与基准回波做相关运算估计时延补偿值, 避免了误差积累的影响。在距离多普勒算法适用的转角范围内(一般为 $3^\circ \sim 5^\circ$), 目标一维像可以看作是不变的^[7-8], 因此设定基准回波的方法是适用的。

新方法对各次回波的估计时延补偿值进行曲线拟合, 根据拟合得到的解析关系构造各次回波新的时延补偿值, 再通过一维像的时移进行包络对齐, 从而避免了出现包络跳变的可能。

算法具体步骤如下:

(1) 以第一个回波一维像信号为基准, 通过相关法计算得到第 $2 \sim N$ 次回波一维像与基准信号的时延差值, 构成时延补偿函数 $R(n)$, 其中 N 为成像时间内积累的回波数, $n < N$ 。

(2) 如果成像时间内, 目标运动距离较大, 可能存在周期模糊现象。此时的时延补偿函数 $R(n)$ 是一个非连续的周期跃变函数, 无法进行曲线拟合, 需要进行解周期模糊处理。

(3) 到时延补偿函数 $R(n)$ 的非线性性, 以及目标可能存在的加速度的影响, 用二次函数来拟合函数 $R(n)$, 并通过此拟合解析关系得到新的时延补偿函数 $R'(n)$ 。

(4) n 次回波进行值为 $R'(n)$ 的时延补偿, 可以实现各次回波一维像的粗略对齐。

(5) 回波相关性使得构造 $R(n)$ 时存在较大误差, 使二次拟合得到的解析关系发生偏差, 导致步骤(4)处理后, 首尾一维像间仍然存在若干距离门差

值, 因此需要进行二次对齐。其具体方法为: 对第一个回波的一维像信号进行恒虚警检测, 得到信号起始位置对应的距离门序号, 记做 R_0 , 同理检测得到最后一个回波信号起始位置对应距离门为 R_1 。对第 n 次回波 ($1 \leq n \leq N$, N 为成像的积累回波数) 再进行 $n(R_1 - R_0)/N$ 的时延, 则可进一步提高包络对齐精度。

3 调频斜率估计算法

在相位处理方面, 传统的FFT距离多普勒成像法利用相邻回波相关性得到时延补偿值, 并构造相位补偿项进行平动相位补偿, 因此, 在回波信号相关性降低的情况下, 同样会导致补偿效果不理想^[9]。

由信号模型分析可知, 对相位的补偿, 只需要正确检测出线性调频项, 即估计其调频项的调频斜率。用此调频斜率构造补偿项进行补偿, 则可以消除目标平动对相位的影响。对调频信号的检测, 可以使用离散调频傅里叶变换(DCFT), 定义DCFT为^[10]:

$$X_c(k, l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{n^2 l + kn} \quad (8)$$

式中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$; $x(n)$ 为待检测信号; l 、 k 分别为调频信号的调频斜率与初始频率。若信号 $x(n)$ 为 $x(n) = W_N^{-(an^2 + bn)} + z(n)$, 其中 $z(n)$ 为噪声, 则其DCFT变换 $X_c(k, l)$ 在 (a, b) 处有极大值。

调频斜率估计算法的具体实现步骤如下:

(1) 设待检测信号 $x(n)$ 的采样频率为 F , 根据采样定理的约束条件, 在 $k \in (0, F/2)$, $l \in (0, F/2N)$ 之内, 以一定步进对 (k, l) 点进行搜索, 计算 $x(n)$ 在点 (k, l) 的 DCFT 变换 $X_c(k, l)$ 的值, 并根据各点的值得到一幅以 (k, l) 为轴的二维功率谱图像。

(2) 检测出图像中灰度最大点, 记录该点对应的初始频率与调频斜率值 (k_0, l_0) , l_0 则为调频斜率估计值。

(3) 以 (k_0, l_0) 值为中心, 缩小范围对 (k, l) 点进行第二次搜索, 计算 $x(n)$ 在各 (k, l) 点上的 DCFT 变换值, 得到更高精度的二维功率谱图像。

(4) 重复第(2)和(3)步, 直到最终估计的调频斜率值 l 满足精度要求。

在得到调频项调频斜率的精确估值后, 构造补偿项对不同方位向信号进行相位补偿, 再经过方位向压缩(IFFT)则可以得到最后的 ISAR 图像。

4 仿真结果

利用本文提出的改进算法对三维目标进行成

像, 以验证其有效性。成像目标采用本文自建的某导弹模型, 假定参数为: 雷达载频 10 GHz, 信号带宽 1.2 GHz, PRF 2.5 kHz, 成像积累时间 0.4 s, 目标运动速度 7 km/s, 目标中心与雷达起始距离 150 km。对该模型产生的回波数据分别用传统方法和改进方法进行成像。

在距离向上进行包络对齐, 对齐效果如图 1、图 2 所示。

由图可以看出, 传统的 FFT 距离多普勒算法在包络对齐时出现了包络漂移和包络跳变; 而采用改进的包络对齐方法则实现了较精确的对齐。

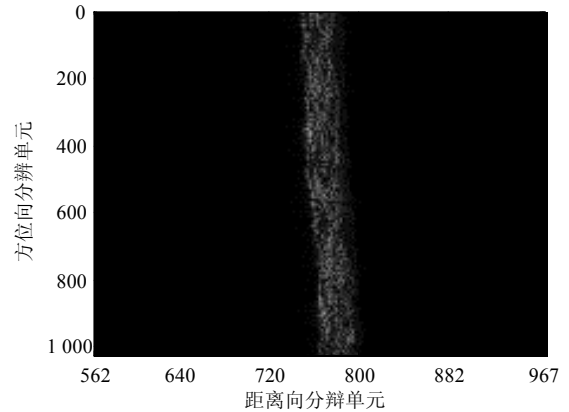


图 1 出现包络漂移和跳变的对齐

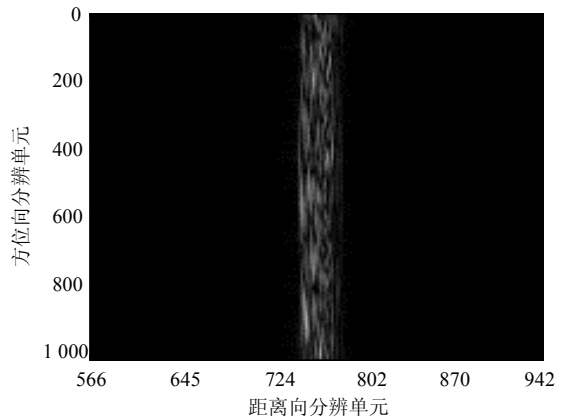


图 2 使用改进方法的对齐效果

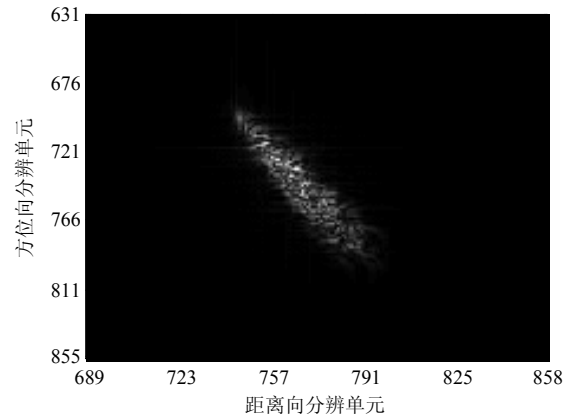


图 3 传统 FFT 距离多普勒算法成像

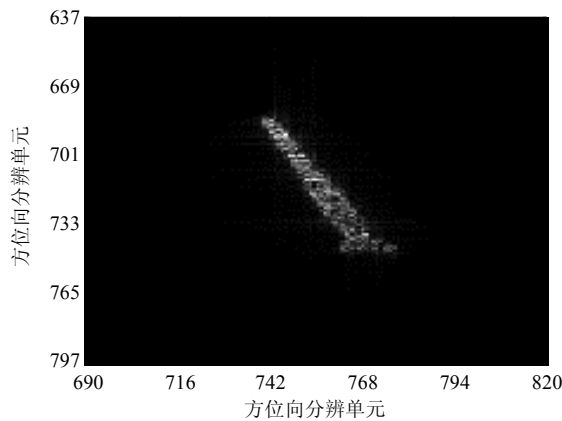


图4 改进的补偿算法成像

方位压缩效果如图3、图4所示,传统相位补偿方法由于误差较大,压缩效果较差;采用改进方法进行相位补偿,明显提高了成像质量。

5 结论

本文提出的 ISAR 成像运动补偿算法,在距离向上和方位向上,对传统的运动补偿算法做出了较大改进。在距离向上,基准回波相关法与曲线拟合的结合,能有效避免包络漂移与包络跳变;在方位向上,通过对目标运动参数的高精度估计,使得在较低回波相关性条件下,仍然能够达到较佳的成像效果。

参考文献

[1] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 267-269.

- [2] WANG Sheng-li, NI Jin-lin, ZHANG Guang-yi. Estimating the parameters of moving targets in the SAR[C]//Signal Processing Proceedings. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 1843-1846.
- [3] 保铮, 孙长印, 刑孟道. 机动目标的逆合成孔径雷达成像原理与算法[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 24-28.
- [4] WU Chao, GONG Cui-ling, SONG Wan-jie, et al. Research on real time range profile of marine targets and its characteristics[C]//Synthetic Aperture Radar, APSAR 2007. Anhui: Chinese Institute of Electronics, 2007: 683-686.
- [5] WANG Gen-yuan, BAO Zheng. The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation[C]//International Radar Conference Radar 97. Edinburgh: The Electronics and Communications Division of the Institution of Electrical Engineers, 1997: 236-239.
- [6] LI Yu, LI Chong-yi. Global correlation envelope alignment of high precision[C]//Synthetic Aperture Radar, APSAR 2007. Anhui: Chinese Institute of Electronics, 2007: 815-817.
- [7] 保铮, 刑孟道. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 31-33.
- [8] WANG Yong, JIANG Yi-cheng. A new method for estimating the rotation angle of ISAR image[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 9(3): 521-523.
- [9] THAYAPARAN T, LAMPROPOULOS G, WONG S K, et al. Adaptive joint time-frequency analysis for focusing ISAR images from simulated and experimental radar data[J]. IEE Proc Radar, Sonar Navig, 2003, 150: 213-220.
- [10] XIA Xiang-gen. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2000, 48(11): 3122-3133.

编辑 张俊

《电子科技大学学报》进入 Ei 核心期刊源

接美国工程信息公司(Ei)中国信息部通知, Ei从2008年开始已接受《电子科技大学学报》为其核心刊源,即《电子科技大学学报》被Ei Compendex数据库收录。这标志着《电子科技大学学报》的办刊水平和刊物质量上了一个台阶,为广大作者提供了一个更高层次的学术论文发表交流的载体。这一成绩的取得,与编委会的热忱指导和广大作者的理解支持息息相关,也是学报编辑们近年来辛勤工作和不懈追求的良好回报!进入Ei核心期刊源是学报发展的新起点,学报编辑部将继续朝着办成国内一流学术刊物的目标前进,更好地服务于科技成果的交流和学术人才的培养。

本刊编辑部