

基于图像域均衡的逆合成孔径 雷达多普勒质心跟踪法

叶春茂¹, 许 稼^{1,2}, 彭应宁¹, 王秀坛¹

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 空军雷达学院信息与指挥自动化系, 湖北武汉 430019)

摘 要: 相位校正严重影响了逆合成孔径雷达 (ISAR) 图像的聚焦和成像质量, 其中多普勒质心跟踪 (DCT) 法因具备明确的算法原理和适中的计算量, 成为一种广泛应用的相位校正方法. 但是, 当目标存在强散射点时, DCT 法的效果往往不佳. 在分析和比较现有方法的基础上, 本文提出采用图像域均衡处理来改进 DCT 法. 新方法通过简单的均衡和反馈环节, 能够显著降低强散射点的影响, 并提高 DCT 法的稳健性和成像质量. 最后, 和多类目标实测数据的成像结果证明了新方法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达; 相位校正; 多普勒质心跟踪; 图像均衡

中图分类号: TN957. 52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 09-1676-06

Modified Doppler Centroid Tracking Method of Inverse Synthetic Aperture Radar Based on Image Domain Balancing

YE Chun-mao¹, XU Jia^{1,2}, PENG Ying-ning¹, WANG Xiur-tan¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Information & Command Automation, AFRA, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: Phase correction may seriously affect the ultimate focusing and imaging quality of inverse synthetic aperture radar (ISAR). Due to the explicit algorithm principle and moderate computation amount, Doppler centroid tracking (DCT) method is a well used phase correction method of ISAR. However, the performance of DCT is normally unsatisfactory when the target has strong scatterers. Based on the analysis and comparison of existing methods, the image domain balancing is proposed to modify DCT method in this paper. By using the simple operators of balancing and feedback, the proposed method may dramatically reduce the effect of strong scatterers and improve the robustness and the ultimate imaging quality. Finally, the performance analysis and imaging results of several kinds of real target are also provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); phase correction; doppler centroid tracking; image domain balancing

1 引言

逆合成孔径雷达成像 (ISAR) 能够对实际空间中非合作运动的典型目标 (如飞机、舰船等) 获取高分辨率的聚焦图像^[1-3], 显著提高了雷达目标识别的性能. 早在 1960 年, Willow Run 实验室^[4] 就已经开始了旋转体目标的 ISAR 成像研究. 七十年代, Brown 等^[5] 则提出极坐标格式 (PFA) 算法解决了大旋转角目标成像, 并得到了遥远星体等旋转目标的成像结果. 1980 年, C. C. Chen 等^[6] 首次提出了对实际非合作飞行目标的运动补偿和成像方法. 在此基础上, 许多国家均深入开展了 ISAR 的系统

实现和信号处理研究.

相对于合成孔径雷达, ISAR 的运动补偿更具挑战性. 这是因为 ISAR 所需的运动是由目标的运动提供的, 而目标运动通常是未知和非合作的^[1-6], 且不同目标具有不同的运动特性. 这种非合作的运动会同时调制目标回波的相位和包络, 对成像处理提出了挑战. 但是, 根据 ISAR 的成像模型, 这种非合作运动可以分解为两类可分离的运动成分, 即为提供目标成像信息的转动分量和干扰目标成像的径向运动 (也称为平动) 分量. 因此, ISAR 运动补偿实质就是估计目标的平动分量, 消除其对回波包络和相位的影响, 并将目标补偿为一个单纯的旋

收稿日期: 2007-01-22; 修回日期: 2007-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60502012); 教育部科技创新工程重大项目培育基金 (No. 706004); 部委预研基金 (No. 9140A07020106JW0103); 航天支撑基金 (No. J042005047)

转体. 消除平动分量对于目标包络的影响通常称为包络对齐, 而消除平动对于回波相位的影响通常称为相位校正(或自聚焦). 前者对补偿的精度要求是亚分辨率量级的, 而后者则是亚波长量级的. 因此, 包络对齐和相位校正也被分别称为粗补偿和精补偿. 鉴于相位校正对于精度的要求, 通过惯导等辅助手段获取目标运动信息是远远不能满足需要的, 必须从实际接收的回波数据中提取. 因此, 寻找稳健有效的相位校正算法始终为 ISAR 成像的核心问题之一.

2 基于统一模型的 ISAR 相位校正方法分析

在近年的 ISAR 研究中, 已经提出了很多相位校正方法. 概括而言, 它们主要可分为两类, 即参数化方法和非参数化方法. 前者假设目标的平动符合一定的运动模型^[7,8], 并引入判断估计精度的衡量标准, 如图像熵或图像对比度, 作为模型参数估计精度的衡量标准. 参数化方法精度一般较高, 但是由于和模型紧密结合, 稳健性一般不强. 非参数化方法则对目标运动不提出模型约束, 通过时变的相位估计实现自聚焦, 虽然精度稍差, 但是具有较强的稳健性. 目前广泛采用的特显点处理(PPP)方法^[1]、相位梯度自聚焦算法(PGA)^[1,9]以及多普勒质心跟踪(DCT)法^[2-4]则都是典型的非参数化方法.

相对于参数化方法, 非参数化方法不敏感于目标的运动形式, 因而也得到了更加广泛的应用. 但是, 具体的非参数化方法对于目标的散射特性有不同的要求. PPP法和PGA方法均要求目标存在强散射点, 例如PPP法要求目标具有特显点, 并且同时假设其他弱散射点可以忽略. 显然, PPP方法受具体目标散射特性的限制, 并不适用所有目标. PGA方法则同时考虑特显点和弱散射点(杂波)的影响, 在付出算法复杂度基础上, 提高了方法对于目标散射特性的普适性. 与PPP法和PGA法不同, DCT方法则通过大量距离单元的平均获得平动分量的估计, 其要求目标不具备突出的强散射点. 换言之, 目标的各散射点越均衡越好, 目标的强散射点反而会降低DCT的相位估计精度. 为此, 文[3]提出采用圆移位改进了DCT方法, 消除强散射点的影响. 实际上, 可证明基于圆移位的DCT法与PGA法是等效的. 下面根据统一的信号模型, 分析不同的非参数化相位校正方法.

通常, 对于实际运动目标的 ISAR 成像采用的是小角度旋转体目标成像^[2].

如右图 1 所示, ISAR 雷达发射宽带信号并进行相干处理. 在小角度旋转的约束下, 通过补偿平动分量和距离-多普勒分析可最终得到目标的二维聚焦的

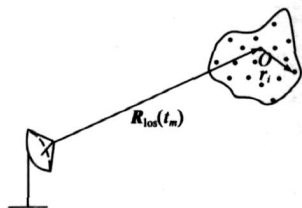


图 1 ISAR 原理示意图

成像结果. 针对采用 chirp 信号的 ISAR 系统, 经过脉压处理的高分辨率距离脉冲(HRRP)可以表示成如下的形式:

$$s(t_m) = \sum_{i=1}^{N_i} \sigma_i \text{sinc} \left[B \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{los}}(t_m)}{c} - \frac{2}{c} \mathbf{n}_{\text{obs}}(t_m) \cdot \mathbf{r}_i \right] \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} [R_{\text{los}}(t_m) + \mathbf{n}_{\text{obs}}(t_m) \cdot \mathbf{r}_i] \right\} \quad (1)$$

式中, $t_m = mT_r$ 为慢时间, $\hat{t} = t - mT_r$ 为快时间, 而 T_r 为脉冲重复间隔(PRI). σ_i 为复散射点强度, $\mathbf{R}_{\text{los}}(t_m)$ 为雷达至目标参考点的距离矢量, $R_{\text{los}}(t_m) = |\mathbf{R}_{\text{los}}(t_m)|$ 为目标参考中心到雷达 APC 的距离, $\mathbf{n}_{\text{obs}}(t_m) = \mathbf{R}_{\text{obs}}(t_m)/R_{\text{los}}(t_m)$ 为雷达视线矢量. \mathbf{r}_i 为某个散射点相对于目标参考点的位置矢量. B 为信号带宽, c 为光速, f_c 为载波频率. 为了方便理解, 可以将其谱空间数据可表达为:

$$S(f_b) = \sum_{i=1}^{N_i} \sigma_i \text{rect} \left(\frac{f_b}{B} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_b + f_c) [R_{\text{los}}(t_m) + \mathbf{n}_{\text{obs}}(t_m) \cdot \mathbf{r}_i] \right\} \approx \sum_{i=1}^{N_i} \sigma_i \text{rect} \left(\frac{f_b}{B} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_b + f_c) R_{\text{los}}(t_m) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_b + f_c) \mathbf{n}_{\text{obs}}(t_m) \cdot \mathbf{r}_i \right\} \quad (2)$$

式中, f_b 为基带信号的频率, 其它参数如式(1). $\mathbf{n}_{\text{obs}}(t_m) \cdot \mathbf{r}_i$ 表示了雷达视角的变化对回波的影响, 也是 ISAR 成像所必需的运动. 而 $R_{\text{los}}(t_m)$ 表示目标相对于雷达的径向运动, 它会造成回波包络的总体延时, 并对相干处理所需的相位信息造成干扰. 因此, 需要对该项造成的影响进行补偿. 在式(2)中, 通过精确估计 $R_{\text{los}}(t_m)$ 并在相位上直接补偿似乎从原理上是可行的. 但是由于 ISAR 成像一般在微波波段, 在相位上直接补偿就要求相当高的距离估算精度. 如对于 3cm 波段雷达而言, 3mm 的距离估算误差就会带来 72° 的相位补偿误差^[8]. 因此, 这种方式在实际中是行不通的. 如式(1)所示, 可将运动补偿分为包络对齐和初相校正两步. 通常采用相关原理进行包络对齐, 从而校正平动造成的回波包络延迟. 进一步, 需要通过初相校正克服平动对于相位的干扰. 下面基于统一的信号模型讨论和分析几种典型的非参数化初相校正方法: 特显点处理方法(PPP)、相位梯度算法(PGA)和多普勒质心跟踪法.

首先, ISAR 对目标宽带回波进行匹配滤波或 Dechirp 处理获取 HRRP. 在成像积累的的时间内, 通常可假设目标匀速转动, 各散射点的 RCS 不发生变化, 且越分辨单元徙动(MIRC)可忽略. 若第 n 个距离单元中共有 L_n 个散射点, 则该距离单元横向复序列可表示成如下形式^[1]:

$$s_n(m) = e^{j\zeta_m} \left[\sum_{i=1}^{L_n} \alpha_{in} e^{j\varphi_{i0}} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} x_{in} m} + w_n(m) \right] \quad (3)$$

$m = 0, 1, \dots, M-1$

式(3)中括号内表示该距离单元里有 L_n 个散射点子回波,其幅度、起始相位和横距分别为 α_{in} , φ_{i0} 和 x_{in} , $w_n(m)$ 表示该距离单元中的噪声.另外, ζ_m 表示各次回波的初相,只与脉冲采样有关,与距离单元无关,初相校正就是要估计该参数并补偿其影响.实际上,式(3)构成了 ISAR 相位校正广义的信号模型,不同方法的适用目标模型均可视为式(3)的变形.

2.1 特显点处理(PPP)法

若目标在距离单元 p 存在孤立的强散射点(特显点),且该单元中其它的散射成分和噪声可以忽略,则该单元的子回波复包络可表示如下:

$$S_p(m) = \sigma_{lp} e^{j(\varphi_{lp0} + \frac{4\pi}{\lambda} x_{lp} m + \zeta_m)}, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

PPP 法直接将该距离单元的相位作为初相的估计,即 $x_m^{\%} = \arg(s_p(m))$, 其中 $\arg()$ 表示为取相位运算,然后将所有距离单元的相位减去该距离单元的相位即可以补偿初相造成的影响,并将该强散射点补偿为不动点,同时补偿了平动相位在各距离单元的影响.如何在目标回波中确定特显点是 PPP 处理方法的关键,其通常采用归一化幅度方差对目标所在区域的距离单元进行搜索,寻找存在特显点所在的距离单元,这种算法被称为最小方差算法(MVA)或者主散射点算法(DSA).

2.2 多普勒质心跟踪(DCT)法

若目标中各散射点散射强度非常均匀,不存在特显点,则各距离单元的信号均可表示为:

$$s_p(m) = \sigma_{lp}(m) e^{j(\phi_{lp}(m) + \zeta_m)}, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

可证明^[1-4]在忽略转动分量造成的相位影响的前提下,对初相差分估计的最大似然法估计为:

$$\Delta \zeta_m = \arg \left(\sum_{p=0}^{N-1} s_p(m) s_p^*(m-1) \middle/ \left| \sum_{p=0}^{N-1} s_p(m) s_p^*(m-1) \right| \right) \quad (6)$$

其中,式(6)就是经典的 DCT 法,它将相邻回波信号各距离门相位差的复指数函数按幅度乘积进行加权平均,得到最终的初相差分和初相的估计 $\Delta \zeta_m$ 和 $\Delta \zeta_m$.可见,当距离单元中存在强散射点,即实际信号模型符合式(5)时,强散射点将直接影响 DCT 法的估计精度.对于许多实际目标数据,DCT 法的前提假设是难以很好满足的.因此,直接采用 DCT 法通常难以得到良好聚焦图像.但是由于该算法运算量很小,可作为 ISAR 成像得到初步成像结果的一种预处理方法,并成为 PGA 等改进自聚焦算法的基础.

3 DCT 方法的改进算法

针对 DCT 方法对信号模型的要求,需要提出方法

来抑制由于强散射点的转动形成的相位对初相估计的影响,现有的方法主要包括 PGA 算法和基于圆移位的 DCT 法.

3.1 相位梯度自聚焦(PGA)法

假设经 DCT 法初相校正的后距离单元 p 的回波可表达成主散射点和多个弱散射点(即杂波)等因素共同作用的结果,则式(3)可改写为:

$$s_p(m) = \sigma_{lp}(m) e^{j \left(\varphi_{lp0} + \frac{4\pi}{\lambda} x_{lp} m + \phi_{lp}(m) + \zeta_{r,m} \right)}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

其中, $\zeta_{r,m} = \zeta_m - \zeta_{m-1}$ 表示经 DCT 法初步成像后第 m 个脉冲对应的残差初相, $\sigma_{lp}(m)$ 和 $\phi_{lp}(m)$ 表示特显点和杂波所引起的幅度和相位的随机调制,其中后者具有零均值.为得到相位差分估计,PGA 方法通常对上述信号作相关处理:

$$s_p(m) s_p^*(m-1) = \sigma_{lp}(m) \sigma_{lp}(m-1) \cdot e^{j \left(\frac{4\pi}{\lambda} x_{lp} + \Delta \phi_{lp}(m) + \zeta_{r,m} \right)}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

其中, $\Delta \zeta_{r,m} = \zeta_{r,m} - \zeta_{r,m-1}$ 表示相邻脉冲的残差初相相位差分,而 $\Delta \phi_{lp}(m) = \phi_{lp}(m) - \phi_{lp}(m-1)$ 是相邻脉冲杂波的相位差分.若对初步的成像结果进行圆移位操作^[9],可消除最强散射点对初相的估计造成的影响,即

$$R_p(m) = s_p(m) s_p^*(m-1) e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} x_{lp}} = \sigma_{lp}(m) \sigma_{lp}(m-1) e^{j(\Delta \phi_{lp}(m) + \zeta_{r,m})}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (9)$$

在消除了特显点后得到的残差相位差分如下所示:

$$\Delta \tilde{\zeta}(m) = \Delta \phi_{lp}(m) + \Delta \zeta_{r,m}, p = 1, \dots, L \quad (10)$$

式中, L 为挑选的具有特显点的距离单元数.利用上述的残差相位差分,并假设小散射和杂波等因素满足高斯分布,可以采用最大似然法估计残差相位差分,即:

$$\Delta \tilde{\zeta}_{r,m} = \arg \left(\sum_{p=1}^L s_p(m) s_p^*(m-1) e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} x_{lp}} \right) \quad (11)$$

PGA 方法^[1,9]还可通过加窗处理降低杂波因素的影响,通过迭代处理不断修正最强散射点造成的残差相位,提高补偿的精度.

3.2 基于圆移位的 DCT 法

为克服强散射点的影响,文献[3]提出了一种基于圆移位的 DCT 方法.其处理过程是将各距离单元的强散射点信号作圆移位后,再作式(6)的 DCT 处理.比较其与 PGA 方法的流程可以看出二者实际上是等效的,都是采用圆移位克服强散射点的转动分量形成的相位对于经过 DCT 处理之后的数据的剩余相位的估计.不同的是,PGA 方法中距离单元数 L 为挑选出可能包含强散射点的距离单元数目,其小于目标分布的距离单元数.而 DCT 方法通常取目标分布所有的距离单元.

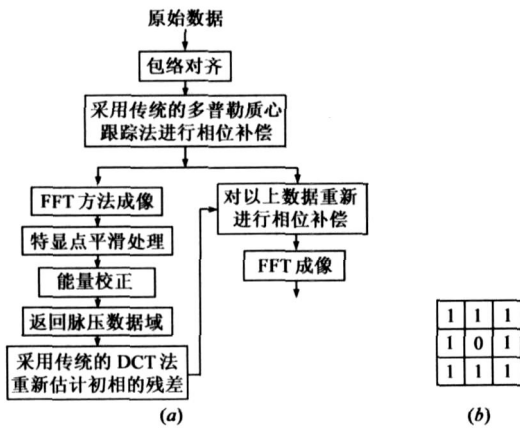


图 2 (a) 基于图像平滑处理的改进算法; (b) 平滑处理模板

4 基于图像域均衡的 DCT 算法

显然, PGA 和基于圆移位的 DCT 方法都是通过抑制强散射点的影响后, 再采用基于平均的最大似然方法得到初相的准确估计. 根据此原理, 本文提出了一种基于图像域平滑处理的方法来消除强散射点对 DCT 法的影响, 从而提高初相补偿的精度, 该算法如图 2 所示. 首先, 新方法采用常用的包络对齐方案^[1-4]对原始的脉压数据进行包络对齐. 然后, 采用传统的 DCT 法进行初相校正, 再经距离多普勒成像处理得到初步的成像结果.



图 3 (a) 目标所在的距离单元的确定; (b) 目标所在的多普勒单元确定

以上过程与经典的 ISAR 成像过程是完全一致的. 不同之处是: 新方法对以上初步成像结果进行均衡处理, 并经过能量校正后返回数据域. 再次采用 DCT 法重新估计初相的残差信息, 并将此初相残差用来补偿经过前一次 DCT 处理之后的数据. 然后, 采用成像算法得到最终满意的成像结果.

具体的图像域均衡处理过程如下: 首先在图像中寻找强度最大的像素点, 对该像素点采用图 2(b) 中的模板作图像空间的平滑处理(实验表明, 模板的大小对最终性能的影响不大), 也就是用该像素周围像素的强度平均值取代该像素的强度. 同时保留该像素点的相位信息. 并将上述操作循环 N 次. N 可以根据图像的大小选择, 一般选择 100~150 次即可得到很好的均衡效果. 可以这样表达上述处理过程:

$$A_{p,k} = \left(\sum_{i=p-k}^{p+k} \sum_{j=k-1}^{k+1} S_{i,j} - S_{p,k} \right) \setminus 8 \quad (12)$$

其中 $S_{p,k}$ 对应距离-多普勒图像中强度最大的像素的幅度, $A_{p,k}$ 是经过平滑之后该像素的幅度.

从表达式(12)可以看到, 图像均衡的过程中采用最大值点周围的平均幅度取代了该点的幅度, 目标的能量会受到损失; 而在成像过程中, 噪声并不会得到聚焦效果, 因而其能量不会受到影响; 这样就造成图像均衡之后成像信噪比的降低. 为此, 须对均衡之后的图像作能量的补偿. 首先需要确定图像所在的区域, 本文通过平均距离像和平均多普勒像来确定. 通过设定一定的门限, 可以将目标所在的距离单元范围和多普勒单元范围找出, 如图 3 所示. 其中多普勒门限的设置不要太高, 以避免形成较窄的矩形窗. 假设目标所在的距离单元上下限分别为 r_l, r_u ; 所在的多普勒单元上下限分别为 d_l, d_u . 则对该区域图像的幅度增强因子为:

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{i=r_l}^{r_u} \sum_{j=d_l}^{d_u} S_{i,j}^2}{\sum_{i=r_l}^{r_u} \sum_{j=d_l}^{d_u} A_{i,j}^2}} \quad (13)$$

其中 $S_{i,j}$ 是原始图像像素的幅度; $A_{i,j}$ 是经过均衡之后的图像像素的幅度.

通过简单的图像域均衡处理, 强散射点的影响显著降低. 再经 IFFT 回到数据域的信号, 基本符合式(10)模型. 因此, 对其采用传统的 DCT 法, 能够取得很好的初相估计性能. 在图像域做均衡处理, 而非在信号域处理的原因是: 作为经典的 ISAR 成像过程, 其成像结果已初步确定了散射点的强度和位置信息, 而均衡处理可针对性地选择强散射点进行均衡, 使得所有散射点的强度大致均匀; 而在数据域信号中, 由于未经方位聚焦处理, 各散射点的位置不能有效区分, 其强度信息也是混叠在一起的, 均衡处理显然不能起到均衡的作用. 从处理流程可以看出, 该算法不需要迭代过程, 并且, 采用的相位校

正方法就是传统的 DCT 方法; 相对于传统的 DCT, 其引入得计算量就是图像均衡的运算量; 而相对于 PGA 算法, 由于算法避免了迭代过程, 因而可以降低运算量, 减少操作的复杂性.

5 实际数据成像验证

为了验证算法的有效性, 本文对多批实际数据进行了实验. 经过包络对齐之后的数据分别采用传统的多普勒质心跟踪法(DCT)、PGA 方法以及本文基于图像域均衡处理的 DCT 法进行处理, 并对比结果. 其中图 4(a)~(c) 为利用我国自行研制的 C 波段 ISAR 试验成像系统(其具体参数可参见文[1~3], 此处从略) 录取的实际数据, 对某批飞机数据进行处理的结果, 图 5(a)~(c) 为采用中国电子科技集团华东电子研究所(ECRIEE) 研制的 Ku 波段 ISAR 试验系统(其信号带宽为 80MHz), 对某批舰船数据处理的结果.

本文采用图像熵作为衡量图像聚焦程度的指标. 一般而言, 图像熵越小, 图像的聚焦程度越好. 其具体定义如下^[7]:

$$IE = - \sum_{x_1} \sum_{x_2} \bar{I}(x_1, x_2) \ln(\bar{I}(x_1, x_2)) \quad (14)$$

其中, $\bar{I}(x_1, x_2) = I^2(x_1, x_2) / A(I^2(x_1, x_2))$, 这里的算子 A 表示对空间坐标 (x_1, x_2) 求和.

表 1 和表 2 是对飞机和舰船数据成像结果的分辨率分析, 上述计算是对数据进行 16 倍线性插值的基础上得到的, 选取的散射点是在几个方法中都有较好聚焦且较为孤立的点. 当实际目标没有明显的散射点, 各散射点之间存在相互的影响, 按照以上方法计算的分辨率并不能绝对准确地定量地衡量成像指标. 因此, 本文称之为“相对多普勒分辨率”, 通过相对的数值可以比较各种方法的优劣. 由于难以进行图像横向定标, 本文成像结果的距离和方位的单位分别为距离单元(对应实际距离采样率)和多普勒单元(对应脉冲采样率和采样脉冲数). 同时, 表 1 和表 2 中分别计算了各种方法成像结果的图像熵. 通过整体指标(图像熵)和局部指标(相对多普勒分辨率), 可以看出: 改进的 DCT 法与现有的 PGA 方法有相当的自聚焦效果, 验证了本文方法的正确性和必要性. 另外, 从图(4)和图(5)的比较中可以看到, 飞机目标和舰船目标散射特性存在一定的差别: 前者存在孤立强散射点的情形更普遍, 后者则更均匀. 因此, PGA 和本文的改进算法对于飞机目标的改善效果更为明显.

表 1 飞机数据各种处理方法的指标计算

	传统 DCT	PGA	改进 DCT
相对多普勒分辨率	8.7500	7.3750	6.1875
图像熵	4.9975	4.8046	4.8050

表 2 舰船数据各种处理方法的指标计算

	传统 DCT	PGA	改进 DCT
相对多普勒分辨率	5.6875	5.3125	3.0000
图像熵	7.0544	6.9705	7.0837

尽管本文提出的改进的 DCT 法同 PGA 方法抑制强散射点的目的是相同的, 取得的效果是相似的, 但是它们实现的方法是不同的. PGA 自聚焦法是通过圆移位抑制特强散射点的转动分量形成的相位对初相校正的影响的, 而本文改进的 DCT 方法则是通过图像域均衡的方法消除特强散射点的作用. 为了达到良好的处理效果, PGA 需要进行迭代处理^[3,9], 难以对迭代次数的进行有效控制. 基于图像域处理的方法则避免了迭代的操作过程, 操作简单, 成像质量同样稳健.

6 结论

基于统一模型, 本文分析了现有 ISAR 相位校正方法, 提出了一种基于图像域均衡的 DCT 改进算法, 显著降低了强散射点的影响, 提高了 DCT 法对不同目标的普适性. 同时, 算法避免了 PGA 法的圆移位和迭代处理, 操作简便, 具备明确的物理意义. 最后, 本文基于实际数据处理结果验证了新算法的有效性.

衷心感谢 ECRIEE 提供的实测数据和无私帮助.

参考文献:

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 王国林, 许荣庆, 刘永坦. ISAR 运动补偿的快速方法[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 5: 63- 69.
Wang Guolin, Xu Rongqing and Liu Yongtan. A fast method for ISAR motion compensation[J]. System Engineering and Electronics, 1996, 5: 63- 69. (in Chinese)
- [3] 朱兆达, 邱晓晖, 余志顺. 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 Zhaoda, Qiu Xiaohui, She Zhishun. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method[J]. Acta Electronic Sinica, 1997, 25(3): 65- 69. (in Chinese)
- [4] Wehner, Donald R. High resolution Radar[M]. Boston, London: Artech House, 1995.
- [5] W M Brown, R J Fredericks. Range Doppler imaging with motion through resolution cells[J]. IEEE Trans. AES, 1969, 5: 98- 102.
- [6] C C Chen, H C Andrews. Target motion induced radar imaging[J]. IEEE Trans. AES, 1980, 16(1): 2- 14.

- [7] F Berizzi, M Martorella, B Haywood, E Dalle Mese, Silvia Bruscoli, A survey on ISAR autofocus techniques[J]. International Conference on Image Processing, 2004, 1(10): 9- 12.
- [8] Jian Li, Renbiao Wu, Victor C. Chen, robust autofocus algorithm for ISAR imaging of moving targets[J]. IEEE Transactions on AES, 2001, 37(3): 1056- 1067.
- [9] D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, C V Jakowatz, Jr. Phase gradient autofocus - A robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(3): 827- 834.

作者简介:



叶春茂 男, 1981 年生, 现为清华大学电子工程系博士研究生, 主要研究领域为雷达信号处理, 雷达成像等.

Email: ycm05@mails. th. u. edu. cn



许稼 男, 1974 年生, 清华大学电子工程系博士后, 副教授. 研究领域包括雷达及水声领域的目标检测和识别、参数估计、仿真模拟、合成孔径/逆合成孔径成像、混沌非线性理论等. 目前已经在《IEEE Trans. on GRS》、《IEEE Trans. on AES》、《IEEE Proceeding of RSN》、《中国科学》、《声学学报》、《电子学报》等国内外刊物及各类学术会议上发表和录用论文五十余篇, 其中被 SCI、EI、ISTP 等检索四十余篇.



彭应宁 男, 1939 年生, 清华大学电子工程系教授, 博导. 原清华大学电子工程系高速信号处理和网络传输研究所所长. 长期从事雷达信号处理领域的研究. 已发表学术论文近 200 篇, 其中被 SCI、EI 和 ISTP 收录的论文 120 多篇, 出版专著 4 部, 并获十多项国家级和部委级科技进步奖.

王秀坛 女, 1947 年生, 清华大学电子工程系教授, 研究方向: 雷达信号处理.