

逆合成孔径雷达多普勒质心跟踪法性能分析

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: 目标强散射中心的转动相位成分(RPC)是限制逆合成孔径雷达多普勒质心跟踪(DCT)法自聚焦性能的主要因素. 基于统一的目标散射信号模型, 本文提出扰动角的概念以衡量RPC的影响, 并分析了决定扰动角的若干因素. 据此, 本文证明了提高雷达脉冲重复频率可改善DCT法的自聚焦性能, 并证明了圆移位DCT(CS-DCT)和图像均衡DCT(IE-DCT)两类改进方法的原理等效性. 最后, 数值实验结果验证了本文性能分析的正确性.

关键词: 逆合成孔径雷达; 自聚焦; 多普勒质心法; 脉冲重复频率

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1324-05

Performance Analysis of Doppler Centroid Tracking for ISAR Autofocusing

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

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

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

Abstract: The rotational phase component (RPC) of target's prominent scattering centers may affect the performance of Doppler centroid tracking (DCT) seriously in the inverse synthetic aperture radar (ISAR) autofocusing. Based on a unified ISAR scattering signal model, this paper introduces the concept of induced angle to evaluate the effect of RPC, and the factors affecting the induced angle are also analyzed. It is proved that the performance of DCT may be improved with the increase of radar pulse repetition frequency, and it is also shown that two improved DCT methods, i. e. circular shifting based DCT (CS-DCT) and image equilibrium based DCT (IE-DCT) are equivalent in principle. At last, numerical experiments are also provided to verify the effectiveness of the above performance analysis.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); autofocusing; Doppler centroid tracking (DCT); pulse repetition frequency (PRF)

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)能实现运动目标(如飞机、舰船等)的高分辨率成像^[1~6], 并提高后续的目标识别性能. 通常, ISAR成像针对的是非合作运动目标, 对运动补偿环节提出了更高要求^[1~4]. 目标的非合作运动可分解为提供成像信息的转动分量和干扰成像的平动分量. 通常, 消除平动分量对回波包络的影响称为包络对齐, 而消除平动分量对回波相位的影响称为初相校正. ISAR成像对后者的精度要求很高(亚波长量级), 惯导等硬件辅助手段远不能满足要求, 需要ISAR通过自聚焦处理从实际回波中提取并校正目标的平动相位分量.

多普勒质心跟踪(DCT)法是一种经典的自聚焦方法^[2], 其稳健性好, 计算量小. 文献[3]证明了当目标强散射中心形成的转动相位成分(RPC)的影响可忽略的

情况下, DCT能够提供平动相位成分(TPC)的最大似然估计(MLE). 而在实际情况下, 目标通常含有较强的散射成分, RPC对MLE性能的影响无法忽略. 因此, 当目标散射中心的强度变化范围较大时, DCT法补偿精度有限, 只能用作更高精度的自聚焦算法的预处理步骤. 文献[3]将相位梯度自聚焦(PGA)^[5]算法引入到ISAR的DCT处理中, 提出了基于圆移位的DCT(CS-DCT)法. 该方法通过在图像对逐个距离单元中的强散射中心进行圆移位处理, 抑制RPC对MLE性能的影响, 并通过统一的加窗处理隔离杂波分量, 提高TPC的估计精度. 我们在文献[4]中则提出了一种基于图像均衡处理的DCT改进方法(IE-DCT), 该方法先采用DCT法对TPC初步补偿, 然后在图像域对散射中心的强度进行均衡, 以降低强散射成分RPC的影响, 同样改进了TPC的补偿结果.

然而, 无论是CS-DCT法还是IE-DCT法都缺乏RPC

对 DCT 性能影响的深入分析,也难以基于 DCT 自聚焦算法的进一步改进提供依据. 本文采用统一的散射信号模型,引入扰动角的新概念以衡量 DCT 中 RPC 的影响,并得到了决定扰动角的诸因素. 由此证明 ISAR 系统通过提高脉冲重复频率 (PRF),除了可提高成像结果的信噪比 (SNR)^[2],还可明显提高 DCT 方法的自聚焦性能. 同时,本文还证明了 CS-DCT 法和 IE-DCT 法都是通过抑制目标散射强度随机分布的“尖峰”特性以改进 TPC 补偿效果的,但它们各自仍存在不足和需改进之处. 本文的工作可为进一步改善 DCT 性能和优化 ISAR 系统设计提供依据.

2 DCT 方法及其两类改进方法

在 ISAR 成像的相干积累时间内,通常可假设目标匀速转动,各散射中心的 RCS 不发生变化,且可忽略越分辨单元徙动 (MIRC). 若第 n 个距离单元中有 L_n 个散射中心,则该距离单元的第 m 个脉冲采样可表示为^[1]:

$$s_n(m) = \exp\left\{j \sum_{i=1}^{L_n} \left[\exp\left\{j \left(in_0 + \frac{4}{\lambda} mx_{in} \right) \right\} + w_n(m) \right] \right\} \quad (1)$$

$m = 0, \dots, M-1; n = 0, \dots, N-1$

其中, in_0 、 in_0 和 x_{in} 分别表示散射中心子回波的幅度、起始相位和横距, λ 表示载波波长, $\frac{4}{\lambda} mx_{in}$ 即为目标 RPC, M 为脉冲总数, N 为经过包络对齐后目标占据的距离单元总数, $w_n(m)$ 表示该距离单元内的噪声, m 为目标 TPC. m 只取决于脉冲序号,而与距离单元无关. ISAR 的初相校正就是要估计并补偿式 (1) 中 m 的影响.

实际上,式 (1) 是统一的 ISAR 目标信号模型. 若目标中各散射中心散射强度非常均匀,不存在特显点,则式 (1) 可近似为:

$$s_n(m) = \sqrt{n(m)} \exp\left\{j \left(\sum_{i=1}^{L_n} \left[in_0 + \frac{4}{\lambda} mx_{in} \right] \right) \right\} \quad (2)$$

$m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, \dots, N-1$

其中 $\sqrt{n(m)}$ 近似为符合零均值的正态分布. 基于式 (2) 的信号模型,可证明^[3] TPC 差分的最大似然估计 (MLE) 为:

$$\hat{m} = \arg \left(\prod_{n=0}^{N-1} s_n(m) s_n^*(m-1) / \left| \prod_{n=0}^{N-1} s_n(m) s_n^*(m-1) \right| \right) \quad (3)$$

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

其中, $\arg\{\cdot\}$ 表示取辐角. 式 (3) 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,最终得到 TPC 差分 \hat{m} 和 TPC 的估计 \hat{m} .

然而,实际目标回波很难满足式 (2) 的信号模型,需要提出改进措施以便应用 (3) 所示的 DCT 方法. 文献

[3] 基于 PGA 算法的圆移位思想,提出了 CS-DCT 方法. 该方法对经过初步 TPC 补偿之后脉压数据进行距离多普勒成像,然后在图像域将每个距离单元中最强的散射中心圆移位到图像中央,从而抑制了该强散射中心附加的 RPC,得到了改进的 TPC 补偿效果. 我们则在文献 [4] 中提出了 IE-DCT 方法,它采用传统 DCT 方法对 TPC 进行初步校正,然后根据距离多普勒图像结果选择强散射中心,在保留其相位信息的同时对其强度进行均衡,同样改进了 TPC 的补偿效果. 可以看出,CS-DCT 和 IE-DCT 都是通过图像域处理,抑制强散射中心 RPC 的影响,获得了改进的 TPC 补偿效果. 通过进一步的分析,本文将证明,这两种方法具有相同的原理,均是通过抑制目标散射强度随机分布的“尖峰”特性改善自聚焦性能的.

3 RPC 影响的统计分析

忽略噪声成分的影响,将式 (1) 的多散射中心信号模型代入到式 (3),可得

$$\begin{aligned} & \prod_{n=0}^{N-1} s_n^*(m-1) s_n(m) \\ &= \exp\left\{j \sum_{n=0}^{N-1} \left[\sum_{i=1}^{L_n} \left(P_{in} + \sum_{k=i+1}^{L_n} C_{ikn} \right) \right] \right\} \\ &= \exp\left\{j \sum_{n=0}^{N-1} (p + c) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $p = m - m - 1$ 为相邻回波间的 TPC 差分, p 表示回波自身项成分, c 表示交叉项成分.

令 $L = \sum_{n=0}^{N-1} L_n$ 表示所有距离单元中子回波数目, $L_n = \sum_{n=0}^{N-1} L_n(L_n - 1) / 2$ 表示交叉项数目,其最小值为 $L_{\min} = \frac{L}{2} (\frac{L}{N} - 1)$. 不失一般性,可以假设目标上散射中心的强度服从一个随机分布,且令

$$\begin{aligned} E\left\{ \begin{matrix} in_0 \\ \frac{2}{in} \end{matrix} \right\} &= \mu & D\left\{ \begin{matrix} in_0 \\ \frac{2}{in} \end{matrix} \right\} &= 2 \\ E\left\{ \begin{matrix} \frac{2}{in} \\ \frac{2}{in} \end{matrix} \right\} &= 2 + \mu^2 & D\left\{ \begin{matrix} \frac{2}{in} \\ \frac{2}{in} \end{matrix} \right\} &= 2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 表示统计期望, $D(\cdot)$ 表示统计方差.

另外,假设目标的旋转角速度为 ω , 散射中心离旋转中心的最大横向距离为 x_{mc} , 则不发生混叠的脉冲重复频率 f_r 应该满足: $|2x_{mc}\omega| / f_r < f_r/2$. 定义目标在多普勒向的展览因子 K 为:

$$K \triangleq \left| \frac{4x_{mc} \cdot in}{f_r} \right| = \left| \frac{4x_{mc} \cdot \omega}{f_r} \right| < \quad (6)$$

其中 $x_{mc} \cdot in$ 是 x_{mc} 对应于散射中心信号模型的离散横向距离. 易见, $K \in [0, \infty)$.

(4) 式中 $p + c$ 是一个复数,而 RPC 对 TPC 估计的影响是由该复数的非零辐角引起的. 从附录的推导可知,该复数的实部均值较大,而虚部均值为零,这一结论正是传统 DCT 算法的前提假设. 本文中,为衡量该

随机辐角的影响大小,定义扰动角 m .如图 1 所示,该

角的正切为 $p + c$ 虚部的均方差与 $p + c$ 实部的均值之比,显然,若目标的散射中心统计上越独立,散射中心数目越多,该正切越能描述扰动的影响.显然,扰动角为辐角方差的近似,根据其物理意义可知,扰动角越大,则散射中心的 RPC 对 TPC 的 MLE 影响越大.经过推导,该正切可表达为:

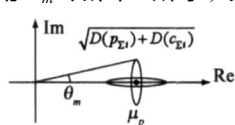


图1 扰动角的定义

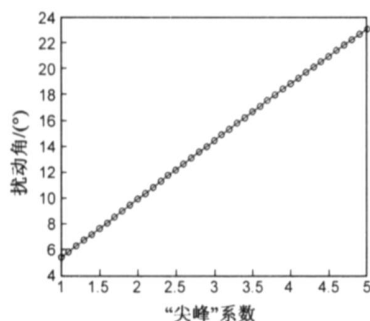
$$\tan m = \frac{\sqrt{\frac{L_a}{L^2} \left(\frac{K^2}{\sin^2 K} - 1 \right)} + \frac{\phi_s}{2L} S_p^2}{\mu_p} \quad (7)$$

其中,

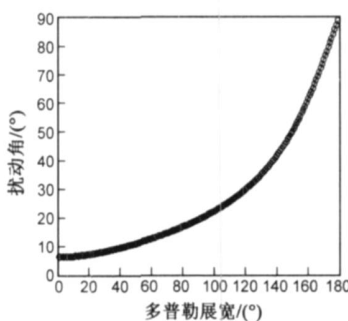
$$S_p = \sqrt{\frac{2}{(2 + \mu^2)^2 + 1}} = \sqrt{\frac{E \left[\frac{4}{2} \right]}{E^2 \left[\frac{2}{in} \right]}}, \phi_s = \frac{K^2}{\sin^2 K} \left(1 - \frac{\sin 2K}{2K} \right) \quad (8)$$

由概率论知识可知, S_p 表示散射中心强度随机分布的“尖峰”特性^[6], S_p 越大,则随机分布的“尖峰”特性越强.另外, ϕ_s 是关于 K 的非负函数.可见,散射强度分布的“尖峰”特性越强,扰动角 m 越大,如图 2 (a) 所示,此时 RPC 对 TPC 估计的影响越大.

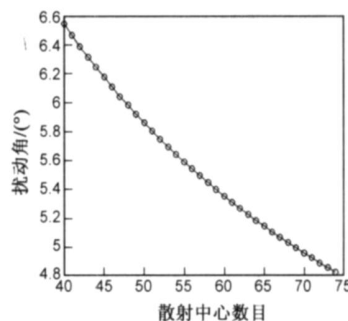
整理式(7),和参数 K 相关的项可以写成如下形式:



(a) 扰动角随“尖峰”系数变化



(b) 扰动角随目标多普勒展宽因子变化



(c) 扰动角随散射中心总数变化

图2 影响扰动角的因素

总结上述分析,可以得到如下的结论:

(1) PRF 越高,或载波波长越长,则目标的多普勒展宽因子 K 越小,RPC 对 TPC 的 MLE 影响也越小.这是因为 DCT 法利用的是相邻回波之间的相关性,因此,若 PRF 提高,回波之间的相关性增强,故可期望得到改善的补偿效果.

(2) 散射中心的强度越均衡,此时散射中心强度随机分布的“尖峰”特性减弱,RPC 对 TPC 的 MLE 影响越小.

(3) 雷达照射目标获得的散射中心数目越多,RPC 对 TPC 的 MLE 影响越小.另外,包络对齐的效果影响 DCT 的性能,包络对齐的效果越好,DCT 的性能越高.

从上述三点可见:当目标尺度和转速一定时,ISAR 通过增加 PRF 降低多普勒展宽因子 K 可以改善 DCT 的

$$\phi_c = \frac{K^2}{\sin^2 K} \left\{ \frac{2L_a}{L} + \left(1 - \frac{\sin 2K}{2K} \right) S_p^2 \right\} \quad (9)$$

当 $K \in [0, \infty)$ 时,扰动角是关于 K 的递增函数,如图 2 (b) 所示.根据 K 的定义,可知其取决于 PRF、目标的实际尺寸以及目标相对于雷达视线方向的旋转速度等因素.当目标相对于雷达没有视角变化时, $K=0$,该项的值最小.结合式(7)可知,此时扰动角也越小,RPC 对 TPC 的估计性能的影响也就达到最小,这正符合 MLE 估计的前提假设.

根据式(7)可以看出,对于某个距离单元而言,若回波的交叉项越少,则扰动角越小.根据式(4),对于特定的目标和系统参数,包络对齐的效果越好,则交叉项越少.另外,在 S_p 和 K 都固定的情况下,扰动角正切的最小值可以为:

$$\min(\tan m) = \sqrt{\frac{a}{2N} + \frac{b}{2L}} \quad (10)$$

其中, $a = K^2 / (\sin^2 K) - 1 > 0$

$$b = \frac{K^2}{\sin^2 K} \left\{ 1 + S_p^2 \left(1 - \frac{\sin 2K}{2K} \right) \right\} + 1 > 0 \quad (11)$$

根据上述表达式,可见目标所占据的距离单元数越多,则目标总的散射中心数目越多,则扰动角的下限越小,如图 2 (c) 所示,RPC 对 TPC 估计的影响也越小.

自聚焦性能;当 ISAR 系统参数确定时,为了保证 DCT 法的自聚焦效果,不应脉冲采样进行抽取.当 ISAR 系统参数和目标特性一定时,基于 DCT 的自聚焦方法需通过抑制目标强度随机分布的“尖峰”特性,来改善 TPC 的估计和补偿性能.

4 CS-DCT 和 IE-DCT 的等效性证明和进一步改进

下面从统计分析的角度讨论圆移位操作对抑制 RPC 影响所起的作用.在图像域对最强散射中心作圆移位操作相当于在信号域作如下处理^[1]:

$$\begin{aligned} s_n^{cs}(m) &= s_n(m) \exp \left[-j \frac{4}{L} m x_{1n} \right] \\ &= \exp \left[j \frac{4}{L} m \right] \left[1_n e^{j \frac{4}{L} m x_{1n}} + \sum_{i=2}^{L_n} i_n e^{j \frac{4}{L} m x_{in}} \exp \left[j \frac{4}{L} m x_{in} \right] \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $x_{in} = x_{in} - x_{1n}$, x_{1n} 和 x_{in} 分别是最强散射中心的幅度和横向距离. 经过圆移位的数据被变换到脉压信号域后, 采用 MLE 进行 TPC 的估计, 得到如下的表达:

$$S_n^{CS*} (m-1) S_n^{CS} (m) = \exp(j \phi_m) \left[\frac{2}{1n} + \sum_{i=2}^{L_n} \frac{2}{in} e^{j\phi_{in}} + \sum_{i=1}^{L_n-1} \sum_{k=i+1}^{L_n} \frac{2}{in kn} \cos(\phi_{ikn}) e^{j\phi_{ikn}} \right] \quad (13)$$

在式(13)中, 括号中的第一项为实数, 对 TPC 估计没有干扰; 而其余散射中心的自身项和交叉项则是造成 TPC 估计误差的根源. 根据前面的分析, 可以知道, 此时扰动角表达式中的 N, L, K 参数都没有变化, 变化了的是“尖峰”参数 S_p . 根据式(13), 经过圆移位处理之后, 对 TPC 估计起影响的是其它弱散射中心强度随机分布的“尖峰”特性参数. 此时该“尖峰”特性参数表示如下

$$S_{cs} = \int_0^{u_o} f(t) dt \int_0^{u_o} t^2 f(t) dt / \left[\int_0^{u_o} f(t) dt \right]^2 \quad (14)$$

其中, u_o 表示其余的弱散射中心的最大强度, $f(\cdot)$ 表示目标散射中心的强度分布概率密度函数. 并可以证明

$$S_{cs} < \int_0^{u_o} f(t) dt \int_0^{u_o} x^2 f(x) dx / \left[\int_0^{u_o} f(x) dx \right]^2 = S_p \int_0^{u_o} f(t) dt < S_p \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 圆移位所起的作用就是抑制“尖峰”特性参数以减小扰动角的大小, 从而提高了 TPC 估计的精度. 另外容易看出, 在 CS-DCT 法中, 加窗操作就是限制多普勒展宽因子 K , 因而也显著提高了 DCT 法的自聚焦性能.

下面讨论 IE-DCT 法的原理. 根据 Cauchy-Schwartz 不等式,

$$E^2(y) = \left| \int y f(y) dy \right|^2 = \left| \int y \sqrt{f(y)} \cdot \sqrt{f(y)} dy \right|^2$$

$$y^2 f(y) dy \int f(y) dy = y^2 f(y) dy = E(y^2) \quad (16)$$

上述不等式表明, 一个随机分布的“尖峰”特性参数大于等于 1. 根据 Cauchy-Schwartz 不等式, “尖峰”参数最小值只有当下述条件满足时才能达到:

$$y \sqrt{f(y)} = h \sqrt{f(y)} \quad (17)$$

其中, h 是一个常数. 也就是说, 在其它条件一定的情况下, 当所有散射中心的强度均衡时, RPC 对 TPC 估计的影响最小. 因而, IE-DCT 法正是通过“均衡”处理抑制目标散射强度分布的“尖峰”特性, 使实际信号趋近式(17)的假设, 达到了改进 DCT 自聚焦性能的目的.

综上所述, 以上两种 DCT 改进方法都是在图像域抑制目标散射特性的“尖峰”特性改进自聚焦效果的. 其中, CS-DCT 法一般需通过迭代处理才能期望获得较好的补偿效果, 且该迭代过程通常不易控制; 更为重要的是, 通常 CS-DCT 对于一个距离单元中只存在一个强散射中心的目标才能取得较好的效果, 对于同一距离

单元中同时存在多个较强散射中心(或同一距离单元中散射中心强度比较均衡)的目标, 迭代过程往往无法收敛, 也难以取得理想的补偿效果. IE-DCT 不需要迭代操作, 然而其可能对 TPC 的相位信息造成一定的破坏^[4]. 而根据本文的统计分析结论, 将上述两种改进的 DCT 方法结合起来, 可能存在基于圆移位图像均衡 DCT (CSIE-DCT) 新方法对圆移位之后非图像中央的强散射中心进行均衡, 克服已有方法的缺点, 获得更好的 DCT 性能. 限于篇幅, 对于 CSIE-DCT 法的详细讨论和分析将另文介绍.

5 数值仿真实验

为了验证本文性能分析的正确性, 本部分通过仿真进行验证. 对 TPC 估计的精度和 ISAR 成像质量可以分别通过相位梯度估计的均方差和图像熵来衡量. 图像熵定义为^[7]:

$$IE = - \sum_{x_1, x_2} \bar{I}(x_1, x_2) \ln \left(\bar{I}(x_1, x_2) \right) \quad (18)$$

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.

主要的系统仿真参数设置如表 1 所示, 散射中心在物理平面内的位置如图 3 所示. 对于目标散射强度随机分布体现较强的“尖峰”特性的数据, 分别采用三种 DCT 方法的处理结果, 表 2 显示的是其对应的平动相位梯度估计均方差和图像熵结果. 表 3 显示的是对所有散射中心强度相同的目标, 采用三种 DCT 方法处理的结果. 图 4(a) 和 (b) 分别显示的是当目标特性以及其它系统参数给定的情况下, TPC 梯度估计的均方差及所成图像的熵随 PRF 的变化曲线.

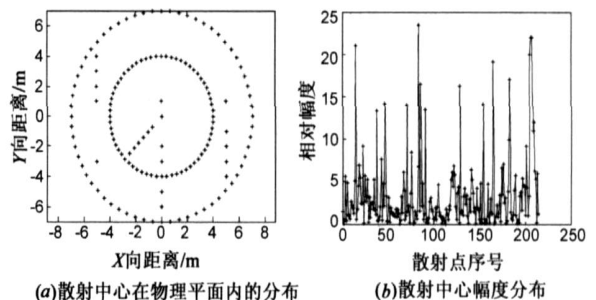


图 3 仿真目标特征

表 1 仿真参数设置

载波频率	5.52 GHz	相干积累角度	2.93°
信号带宽	300 MHz	脉冲重复频率	400 Hz

表 2 散射强度随机分布“尖峰”特性较强的目标, 三种 DCT 法平动相位梯度均方差和图像熵

	DCT	IE-DCT	CS-DCT
TPC 梯度估计方差	6.879e-004	2.971e-004	4.310e-004
图像熵	5.706	5.340	5.394

表3 散射中心强度相同的目标,三种DCT法平动相位梯度均方差和图像熵

	DCT	IE-DCT	CS-DCT
TPC 梯度估计均方差	1.443×10^{-4}	1.486×10^{-4}	1.412×10^{-4}
图像熵	6.230	6.226	6.145

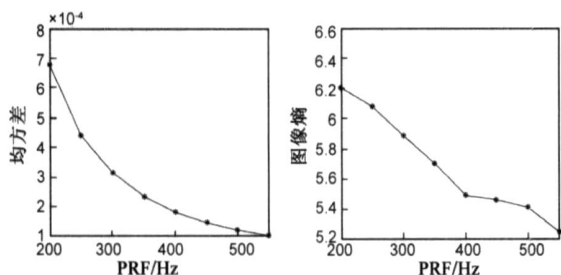


图4 PRF对平动补偿效果的影响

从上述仿真结果可看出,当目标散射中心强度非均匀分布时,采用CS-DCT法和IE-DCT法均能获得改进的平动相位估计和补偿结果;对于散射中心强度均衡的目标,三种DCT方法的估计效果相近;而当目标特性一定的情况下,通过提高ISAR的PRF可以提高TPC梯度估计的精度,并改善最终成像质量.这些均证明了本文统计分析结论的正确性.

6 结论

为了衡量散射中心的RPC对TPC的MLE的影响,本文基于统一的ISAR散射信号模型进行了统计分析.通过引入扰动角,讨论了决定RPC影响的目标散射强度随机分布的“尖峰”特性,多普勒展宽因子和散射中心的数目等因素,并进一步证明了CS-DCT法中的圆移位处理和IE-DCT法中的图像均衡处理的作用都是对目标散射中心强度随机分布的“尖峰”特性进行抑制以改善自聚焦性能的.更为重要的是,本文证明了当目标尺度和转速一定时,ISAR可以通过增加PRF改善DCT的自聚焦性能.最后通过仿真分析验证了本文分析结论的正确性.

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,2005.231-249.
- [2] 刘永坦等.雷达成像技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.267-277.
- [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] 叶春茂,许稼,彭应宁,王秀坛.基于图像域均衡的逆合成孔径雷达多普勒质心跟踪法[J].电子学报,2008,36(9):1676-1681.

Ye Chunmao, Xu Jia, Peng Yingning and Wang Xiurtan. Modified Doppler centroid tracking method of inverse synthetic aperture based on image domain balancing [J]. Acta Electronic Sinica, 2008, 36(9): 1676-1681. (in Chinese)

- [5] D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, C V Jakowatz. Phase gradient autofocus a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Trans AES, 1994, 30(3): 827-834.
- [6] R J A Tough, K D Ward, P W Shepherd. The modelling and exploitation of spatial correlation in spiky sea clutter [A]. Proceedings of the 2nd European Radar Conference [C]. Paris, France: IEEE, 2005. 5-8.
- [7] F Berizzi, M Martorella, B Haywood, E Dalle Mese, Silvia Bruscoli. A survey on ISAR autofocusing techniques [A]. Proceedings of the 2004 International Conference on Image Processing [C]. Singapore: IEEE, 2004. 9-12.

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.
E-mail: ycm05@mails.thu.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》、《IET Proceeding of RSN》、《IEEE Signal Processing Letter》、《Signal Processing》、《中国科学》、《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60余篇,其中被SCI、EI、ISTP等检索40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,主要研究方向包括检测与估计理论, SAR/ISAR 成像技术, 阵列信号处理, 自适应信号处理.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,主要研究方向为雷达信号处理.