

一种基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像新方法

李亚超,全英汇,邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 空中或海面目标复杂运动所产生的方位二次相位项,会造成方位成像的严重散焦;而传统的 RD 成像方法、WVD 瞬时成像方法、Radon-Wigner 成像方法和 DechirpClean 成像方法由于成像效果差或运算效率低等因素,不适合复杂运动目标的 ISAR 成像;因此,针对这些问题,本文提出了一种基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像新方法,即把包络对齐后的各距离单元数据变换到时频平面内,通过尺度变换,解信号瞬时时间和相关函数延迟量的耦合影响,把方位二次相位项所产生的时频平面内的斜线校正成平行于时间轴的直线,并沿时间轴进行能量积累,减少交叉项的影响,最终对复杂运动目标进行高分辨 ISAR 成像. 该方法成像效果好,同时,可以通过快速变换算法实现,因此,运算效率较高,适合实时成像. 最后,通过仿真和实测数据验证了该方法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达成像; 时频分布; 尺度变换; 二次相位项; 运算效率

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 09-2085-07

A New Method of ISAR Imaging Based on The Scale Transform in Time-Frequency Distribution Plane

LI Ya-chao, QUAN Ying-hui, XING Meng-dao

(National Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The azimuth quadratic phase term caused by the complex movement of target in the air or on the sea deteriorates the azimuth focusing quality. RD imaging algorithm, WVD imaging algorithm, Radon-Wigner imaging algorithm and DechirpClean imaging algorithm, due to bad imaging effect and inefficient operation and so on, are unfit for ISAR imaging of the complex motion target. Since, this paper shows a new method of ISAR imaging based on the scale transform in time-frequency distribution plane that changes each range cell data after range alignment correction to the new data in the time-frequency plane and solves the coupling effect between the signal time and the correlation function delay by the scale change. In doing that, the bias caused by the azimuth quadratic phase term becomes the beeline parallel to the time axis, at the same time, the ISAR image of the complex motion target can be acquired by the energy accumulation along the rectified beeline in the time-frequency plane. This method has many advantages, including the nice imaging effect and the high efficient operation and so on. The simulated and real data result confirm the effectiveness of this method at the end of this paper.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); the time-frequency distribution; the scale transform; the quadratic phase term; efficient operation

1 引言

对空中或海面复杂运动目标进行 ISAR 成像^[1,2]是当前国内外研究的热点;当目标复杂运动时,径向加速度和转动角加速度会使得回波信号的包络产生弯曲,同时,产生方位相位的二次项,严重影响 ISAR 的成像质量.

传统的 RD^[3]成像方法,适合于运动平稳的目标成像,当目标各散射点的方位二次相位项相同时,可以用多普勒参数估计^[4,5]的方法进行二次相位的补偿,并最

终方位 FFT 成像;而实际上,这种情况较少,大多是各散射点的方位调频特性不一样,参数估计很难准确的对数据进行二次相位补偿,从而影响成像质量;WVD^[3]瞬时成像方法,可以获得目标不同时刻的瞬时像,但由于交叉项的影响,使得成像质量下降;Radon-Wigner^[3]成像方法和 DechirpClean^[6]成像方法,分别是在时频域和信号域进行散射点信号的特性搜索,并最终成像,这两种方法可以得到质量较好的图像,但由于它们是通过搜索信号能量最大值获取信号的最佳特性,因此,运算量大,不易实现;并且,当方位二次相位项较大时,搜索的步进量

收稿日期:2007-05-14;修回日期:2009-04-28

基金项目:“新世纪优秀人才支持计划”项目(No. NCET-06-0861);武器装备预研基金项目(No. 9140C0102100902)

和初始值都难以控制。

因此,针对以上这些问题,本文提出了一种基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像新方法,该方法不需要通过参数估计来校正方位二次相位项,直接在数据包络对齐后,通过快速算法在时频平面上做尺度变换,解除信号瞬时时间和相关函数延迟量的耦合,把由方位二次相位项所产生的在时频平面上的斜线分布校正成沿时间轴的直线分布,并通过沿时间轴对信号进行积累,减少交叉项的影响,最后,通过在频率轴上的投影得到目标的 ISAR 像。该方法能有效的对复杂运动目标进行高分辨 ISAR 成像,并且,运算量较小,适合实时处理。在本文的最后,通过仿真和实测数据的处理,验证了该方法的有效性。

2 复杂运动目标的 ISAR 转台回波信号模型

如图 1 所示, O 点为目标转台轴心的位置, P 点(设其坐标位置为 x_p, y_p, z_p)为目标上任意一点的位置,用向量 r_p 表示。向量 e 是目标三维运动的合成转动角速度,在由 e 和雷达射线(其单位向量为 R)构成的平面里,向量 e 可以分解成与 R 同向的向量 e_R 和与 R 垂直的向量 e_\perp ;而由 e_R 生成的散射点移动没有径向分量,即不会引起回波的相位变化,而 e_\perp 则会使散射点产生径向移动,从而产生多普勒的变化,对目标进行高分辨成像,故将 e_\perp 称为有效转动向量。所以,散射点 P 的线速度为 $e \times r_p$,其径向分量为 $(e \times r_p) \cdot R$;考虑目标的平动分量 v_r ,则可得散射点 P 的多普勒频率为

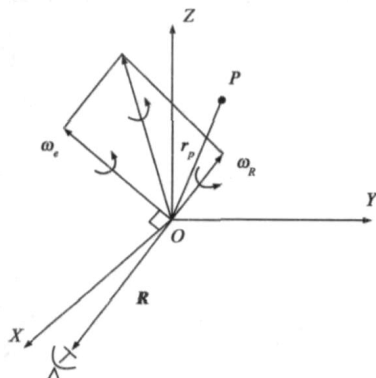


图1 三维转台目标成像示意图

$$f_d = \frac{2}{\lambda} (v_r + (e \times r_p) \cdot R) \quad (1)$$

式(1)中,符号 \times 和 \cdot 分别表示矢量的外积和内积; λ 为信号波长。由于 ISAR 成像时间较短,目标在这极小段时间内,其成像投影平面可以近似认为不变,故散射点 P 的多普勒频率可以进一步展开为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} [v_r + e_x (r_{py}R_z - r_{pz}R_y) + e_y (r_{pz}R_x - r_{px}R_z) + e_z (r_{px}R_y - r_{py}R_x)] \quad (2)$$

式(2)中, e_x 、 e_y 和 e_z 分别为向量 e 在三坐标轴上的投影分量, r_{px} 、 r_{py} 和 r_{pz} 分别为散射点 P 位置向量 r_p 在三坐标轴上的投影分量; R_x 、 R_y 和 R_z 分别为单位向量 R 在三坐标轴上的投影分量;当目标运动较为复杂时, e_x 、 e_y 和 e_z 一般不为常数,它们都会随时间的变化而变化,而由于成像时间较短,高次项的影响可以忽略,因此,可以近似认为 e_x 、 e_y 和 e_z 随着时间作线性变化,其表示为

$$\begin{aligned} e_x &= x + x t_m \\ e_y &= y + y t_m \\ e_z &= z + z t_m \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, t_m 为方位慢时间; x 、 y 和 z 以及 x 、 y 和 z 分别为 e_x 、 e_y 和 e_z 的常数项和一次项系数;把式(3)代入式(2)可以得到复杂运动目标的多普勒频率展开式

$$f_d = \frac{2}{\lambda} (v_r + e_x \cdot R + (e_y \cdot R) t_m) \quad (4)$$

其中: $e_x = [x, y, z]$; $e_y = [x, y, z]$;

$$r = [(r_{py}R_z - r_{pz}R_y), (r_{pz}R_x - r_{px}R_z), (r_{px}R_y - r_{py}R_x)]$$

因此,根据式(4)可以得到目标散射点 P 到雷达的作用距离为

$$\begin{aligned} R(t_m) &= \frac{t_m}{t_0} - \frac{2}{\lambda} f_d dt_m = \frac{t_m}{t_0} - (v_r + e_x \cdot R + (e_y \cdot R) t_m) dt_m \\ &= R_0 - (v_r + e_x \cdot R) t_m - \frac{1}{2} (e_y \cdot R) t_m^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, t_0 为方位成像的起始时刻, R_0 为雷达离目标中心的起始距离;由于目标的复杂运动,使得目标上各散射点到雷达的瞬时距离体现出二次项的特性,转换到方位相位上就是调频项的特性,将严重影响方位多普勒成像。假设雷达发射信号的复包络为

$$s(\tilde{t}) = a_r(\tilde{t}) \exp(j2(f_c \tilde{t} + \frac{1}{2} \tilde{t}^2)) \quad (6)$$

式(6)中, $a_r(\tilde{t})$ 为距离信号包络, \tilde{t} 为距离快时间, f_c 为发射信号载频, \tilde{t} 为发射信号的调频率。则雷达接收到的 P 点回波基频信号为

$$\begin{aligned} s(\tilde{t}, t_m) &= a_r(\tilde{t} - \frac{2R(t_m)}{c}) a_a(t_m) \\ &\exp(j(\tilde{t} - \frac{2R(t_m)}{c})^2) \exp(-j\frac{4}{\lambda} R(t_m)) \end{aligned} \quad (7)$$

式中(7), $a_a(t_m)$ 为方位信号包络。经过距离向的匹配滤波之后,式(7)变为

$$s(\tilde{t}, t_m) = m \sin(f_r(\tilde{t} - \frac{2R(t_m)}{c})) \exp(-j\frac{4}{\lambda} R(t_m)) \quad (8)$$

式中(8), m 为信号复包络。结合式(5)和(8)可以看出,在距离压缩后,目标的复杂运动会产生严重的包络徙动和方位相位二次项;而包络徙动通过包络对齐^[7,8]和

keystone^[9,10]方法可以很好的加以校正,这在相关的文献中都有详细的论述,本文就不再深入的讨论了;本文所提出的新方法主要是对方位向的处理,很好的解决方位相位二次项的影响,从而实现高分辨的 ISAR 成像,这在后面将有详细的分析。

3 基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像方法

回波信号经过距离压缩和包络对齐后,对信号进行方位 ISAR 处理主要依靠式(8)的指数项;而从式(5)可以看出,由式(8)的指数项所表示的方位相位中,还存在目标平动误差 v_r ,当 v_r 为常数时,主要影响 ISAR 像的位置,当 v_r 随时间变化时,在方位相位上会产生调频项,影响方位成像质量,因此,必须加以补偿;文献[3]中,提出的多特显点综合法可以很好的对目标平动引起的相位误差进行校正;通过校正可以消除平动分量 v_r 在方位相位的影响。由于对方位向成像是在不同距离单元中实现的,所以,先考虑一个距离单元的方位向回波特性,则经过相位平动误差补偿后,式(8)在一个距离单元中的方位向信号形式可以简写为

$$s_p = \exp(-j \frac{4}{\lambda} R_0) \times \exp(j2 (f_p t_m + \frac{1}{2} p t_m^2)) \quad (9)$$

其中: $f_p = \frac{2}{\lambda} (v_r \cdot r)$ $p = \frac{2}{\lambda} (v_r \cdot r)$

式(9)中, f_p 为点目标信号中心频率, p 为点目标信号调频率, m 为信号复包络。式(9)中,第一个指数项为常数项,对成像没有影响;第二个指数项用于方位成像,可以看出,对目标的各散射点来说,都是一个线性调频信号,不同点目标的横向位置有不同的多普勒中心和调频率的值,在没有调频率的影响时,通过方位 FFT 把信号变换到频域,根据不同点目标的横向位置所产生的不同的多普勒中心值区分开不同的散射点,从而实现高分辨的 ISAR 成像;为了方便分析,只保留式(9)中的第二个指数项,则简写为

$$s_p = \exp(j2 (f_p t_m + \frac{1}{2} p t_m^2)) \quad (10)$$

对式(10)进行 WVD 变换为

$$\begin{aligned} \text{WVD}_{s_p}(t_m, f_a) &= s_p(t_m + \frac{1}{2}) s_p^*(t_m - \frac{1}{2}) e^{-j2 f_a d} \\ &= e^{j2 (f_p + \frac{1}{2} p t_m)} e^{-j2 f_a d} \\ &= [f_a - (f_p + \frac{1}{2} p t_m)] \end{aligned} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,由于信号散射点调频率的存在,使得其在时频平面内的分布为一条斜线,该斜线的中心频率为 f_p ,斜率为 p ;对式(11)的频率向进行 IFFT 变换(即 f_a)为

$$\begin{aligned} \text{WVD}_{s_p}(t_m,) &= [f_a - (f_p + \frac{1}{2} p t_m)] e^{j2 f_a d} \\ &= \exp(j2 (f_p + \frac{1}{2} p t_m)) \end{aligned}$$

$$= \exp(j2 f_p) \times \exp(j2 \frac{1}{2} p t_m) \quad (12)$$

从式(12)可以看出,信号 s_p 在时频平面内呈斜线分布是因为式(12)中第二个指数项的 p 和 t_m 相互耦合产生的,如果能消除这一耦合项的影响,并沿时间域积累,就可以对方位向进行 ISAR 成像了;为了实现这一目的,可以做如下的尺度变换

$$t_m = A t_m \Rightarrow t_m = \frac{A t_m}{A} \quad (13)$$

式(13)中, A 为尺度变换的常数,它的大小会影响尺度变换后信号能量在时频平面内沿时间轴分布的长度大小;当 A 较大时,变换后的时间轴尺度更密了,能量所表现的宽度更长;当 A 较小时,变换后的时间轴尺度更疏了,能量所表现的宽度更短;具体的尺度变换特性和 A 的选取将在后面有更详细的分析。把式(13)代入式(12)可以得到

$$\text{WVD}_{s_p}(t_m,) = \exp(j2 f_p) \times \exp(j2 \frac{1}{2} p A t_m) \quad (14)$$

从式(14)可以看出, p 和 t_m 的耦合项经过在时频平面内的尺度变换后已经消除了,取而代之的是尺度变换常数 A 调节的新时间量 t_m ;对式(14)的 t_m 做 FFT 变换(即 f_a)为

$$\text{WVD}_{s_p}(t_m, f_a) = (f_a - f_p) \exp(j2 \frac{1}{2} p A t_m) \quad (15)$$

从式(15)可以看出,去除 p 和 t_m 的耦合后,信号 s_p 在时频平面内的分布变为平行于时间轴的一条直线,新的时间域受尺度变换常数 A 的调节;同时,该直线在频率轴上的投影为该信号的多普勒中心所对应的值,对于目标上不同横向坐标散射点所产生的不同多普勒中心在频率轴上的投影就可以把目标上各散射点区分开来,从而实现高分辨的 ISAR 成像。

不过,式(15)只是单个点分量方位信号去除 p 和 t_m 的耦合后,在时频平面内的分布结果;实际上,目标的回波信号中包含了許多散射点,这些散射点分量在时频平面内的分布除了自身的 WVD 分量外,还有信号之间严重的 WVD 交叉项;假设信号有两个散射点分量

$$s(t_m) = s_p(t_m) + s_Q(t_m) \quad (16)$$

$$\text{其中: } s_p(t_m) = \exp(j2 (f_p t_m + \frac{1}{2} p t_m^2))$$

$$s_Q(t_m) = \exp(j2 (f_Q t_m + \frac{1}{2} q t_m^2))$$

对信号 $s(t_m)$ 做式(11)~(15)的变换后,可以得到两个散射点分量 $s_p(t_m)$ 和 $s_Q(t_m)$ 各自去除 p 和 t_m 耦合后在时频平面内的分布结果和它们的交叉项

$$\begin{aligned} \text{WVD}_s(t_m, f_a) &= (f_a - f_p) \exp(j2 \frac{1}{2} p A t_m) \\ &+ (f_a - f_Q) \exp(j2 \frac{1}{2} q A t_m) \\ &+ \text{WVD}_{s_{pq}}(t_m, f_a) + \text{WVD}_{s_{qp}}(t_m, f_a) \end{aligned} \quad (17)$$

从式(17)可以看出,经过时频平面尺度变换后,散射点分量 $s_p(t_m)$ 和 $s_Q(t_m)$ 在时频平面内的分布都由原

来的斜线变成了沿时间轴分布的一条直线,它们在频率轴上的投影就是它们各自的多普勒中心,在时间轴上的任意时刻沿频率轴方向取值就是它们在多普勒域的横向位置信息,所以,利用这一特性就可以实现对复杂运动目标的高分辨 ISAR 成像;但各散射点分量共同作用所产生的交叉项会严重影响成像质量,因此,为了减少交叉项的影响,应该对式(17)进行沿时间轴方向的 FFT 积累

$$\begin{aligned} \text{WVD}_s(f_{t_m}, f_a) = & (f_a - f_p)(f_{t_m} - pA) \\ & + (f_a - f_Q)(f_{t_m} - Q A) \\ & + \text{WVD}_{s_{pQ}}(f_{t_m}, f_a) \cdot j^2 f_{t_m} dt_m \\ & + \text{WVD}_{s_{QP}}(f_{t_m}, f_a) e^{-j^2 f_{t_m} dt_m} \quad (18) \end{aligned}$$

从式(18)可以看出,对时间做 FFT 之后,时频平面的分布由时间-频率($f_{t_m} - f_a$)域变为伪频率-频率($f_{t_m} - f_a$)域,在频率 f_a 轴上对应的量是信号的多普勒中心,在伪频率 f_{t_m} 轴上对应的量是信号的调频率信息,不同多普勒中心和调频率的散射点在新的伪频率-频率($f_{t_m} - f_a$)域可以很好的区分开来;但有相同多普勒中心的散射点在进行方位多普勒成像时,是重合在一起的,因此,为了更进一步的减少交叉项的影响,可以把在伪频率-频率($f_{t_m} - f_a$)域分布的信号沿伪频率 f_{t_m} 轴进行求和

$$s(n) = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \text{WVD}_s(m, n) \quad n = -N/2 \dots N/2-1 \quad (19)$$

式(19)中, $\text{WVD}_s(m, n)$ 是 $\text{WVD}_s(f_{t_m}, f_a)$ 的离散形式, N 是信号的方位向点数;对伪频率-频率($f_{t_m} - f_a$)域分布的信号沿伪频率 f_{t_m} 轴进行求和后,实际就得到了一个距离单元的 ISAR 像,通过设置一个相应的门限,剔除掉交叉项的影响,就可以得到高分辨的 ISAR 像;同时,在所有的距离单元中,重复式(11)~(19)的过程,就可以得到最终的目标高分辨 ISAR 像。

实际上,从式(11)和(12)可以看出,基于时频分布的尺度变换并不一定要对信号做 WVD 变换,因为,先对信号做 WVD 变换后,又对频率向做 IFFT 变换,只是把信号又变换到了时间域,和信号 WVD 变换前一样,因此,只要求解信号相关函数的瞬时值(如式(20)所示)就可以进行尺度变换了,并最终对复杂运动目标进行 ISAR 成像。

$$\begin{aligned} R(t_m,) &= s_p(t_m + \frac{1}{2}) s_p^*(t_m - \frac{1}{2}) \\ &= \exp(j2 (f_p + p t_m)) \quad (20) \end{aligned}$$

由于本文所提出的方法在实际应用中,不需要进行时频变换、参数估计和搜索等运算就能得到质

量良好的 ISAR 图像,因此,运算效率也较高,适合实时成像;其具体的成像流程如图 2 所示。

4 时频分布尺度变换的实现

上面对基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像方法进行了详细的分析,下面介绍一下尺度变换的具体实现方法。如式(11)所示,由于信号相关函数的瞬时值的取值范围为信号的时间长度,所以,对应的多普勒范围为信号时间所对应的频率范围;故离散化式(11)中和 t_m 分别为 n 和 m ,且它们的离散点数是一样的,设为 N ;从式(13)可以看出,尺度变换后的时间采样也是等间隔的,只是采样的间隔尺度有所变化,其变化的尺度因子为 $1/A$ 。把式(12)离散化为

$$\begin{aligned} \text{WVD}_{s_p}(m, n) &= \exp(j2 f_p n) \times \exp(j2 p n m) \\ m &= -N/2 \dots N/2-1, n = -N/2 \dots N/2-1 \quad (21) \end{aligned}$$

设信号相关函数的瞬时值 n 所对应的频率为 l ,信号的时间 m 对应的频率为 k ;通过尺度变化后,新的信号时间和频率与原来的时间和频率有不同的尺度,所以,设新的信号时间和对应的频率分别为 m 和 k ,这些变量的离散点数都是一样多的。由 $\text{WVD}_{s_p}(m, n)$ 变换到 $\text{WVD}_{s_p}(k, n)$ 时,因为 m 和 k 对应不同的尺度空间,不能用 FFT 实现,只能对其做 DFT 变换实现,而 k 和 m 对应相同的尺度空间,可以用 IFFT 的变换实现,整个变换过程为

$$\begin{aligned} \text{WVD}_{s_p}(m, n) &= \text{IFFT}(\sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \text{WVD}_{s_p}(m, n) e^{-j\frac{2\pi}{N} k m}) \\ m &= -N/2 \dots N/2-1, n = -N/2 \dots N/2-1 \quad (22) \end{aligned}$$

式(22)中, $1/A$ 为尺度变换的因子;通过变换后,就可以得到式(14)的结果。当然,在实际处理时,由于式(22)每次都要在频率域做插值,运算效率较低;但在文献[9]中对时频域尺度变换的快速算法进行了详细的

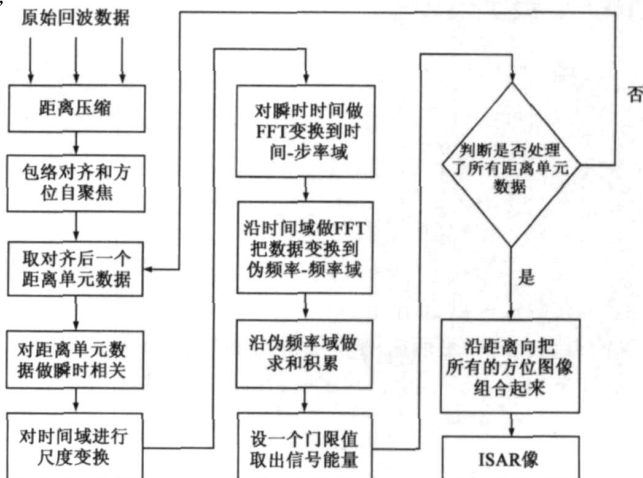


图2 基于时频分布尺度变换的ISAR成像流程图

说明,极大的提高了运算效率,使得该方法适用性更强了;在本文中具体从原理上说明,对于快速算法就不详细分析了。强了;在本文中具体从原理说明,对于快速算法就不详细分析了。

5 仿真分析

5.1 基于时频分布尺度变换特性分析

为了更好的解释本文所提出的基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像方法,在此,对时频分布尺度变换特性进行了仿真分析。假设一信号由两个线性调频分量组成,这两个线性调频分量的参数分别为 $f_P = 50\text{Hz}$, $p = 250\text{Hz/s}$, $f_Q = -50\text{Hz}$ 和 $Q = -250\text{Hz/s}$;并且信号的采样率为 $f_s = 800\text{Hz}$,信号的作用时间为 $T = 0.2\text{s}$;图 3

(a) 为两个线性调频分量组成的信号时频分布结果,从图中可以看出,两个线性调频分量在时频平面内沿着斜线分布,并且有较严重的交叉项,与有效的信号分量相比,它们的能量相差不大,不好剔除,将严重影响成像质量;图 3(b) 为该信号经过本文所提出的尺度变换方法后得到的式(18)的结果,选择的尺度变换常数 $A = 0.01$,并且以全局能量最大值为基准,把能量在 -3dB 以下的交叉项剔除掉了,可见,在其三维分布图中得到了很好的两个峰值分量;图 3(c) 为图 3(b) 的结果在频率轴上的投影,可见,两个线性调频分量在频率轴上的投影值正好是它们的多普勒中心频率值,反映了它们的横向坐标位置,可以用于高分辨的 ISAR 成像。

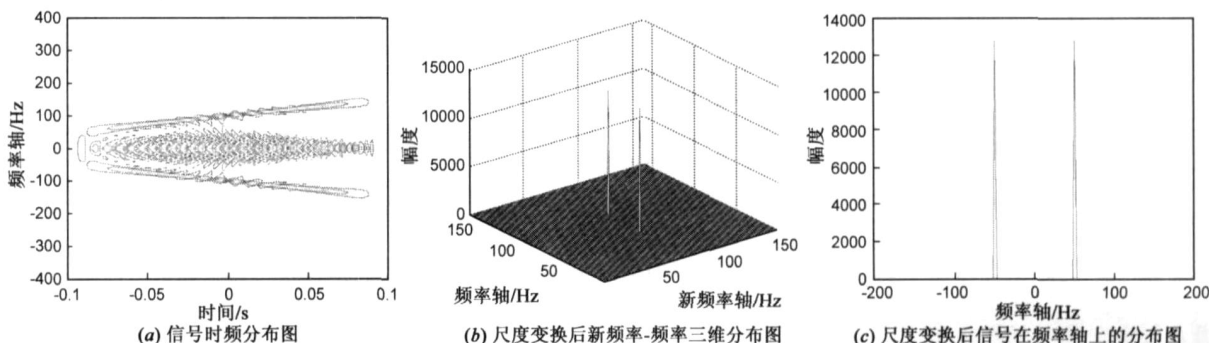


图3 时频分布尺度变换特性分析图

5.2 仿真数据基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像分析

现利用本文所提出方法对仿真的机动飞行的飞机目标进行 ISAR 成像;假设雷达工作参数为:发射信号载频 $f_c = 5.2\text{GHz}$,雷达作用距离 $R_s = 37\text{km}$,信号的频带宽度 $B = 300\text{MHz}$,采样频率 $f_s = 400\text{MHz}$,发射信号时宽 $T_p = 10\mu\text{s}$,脉冲重复频率 $\text{prf} = 1000\text{Hz}$,目标飞机的速度 $v = 200\text{m/s}$,加速度 $a = 10\text{m/s}^2$,由于目标偏离雷达射线方向飞行,其速度和加速度在三坐标轴上的投影会产生角速度 ω_1 和角加速度 ω_2 ;仿真飞机的原始坐标模型如图 4(a) 所示,飞机飞行轨迹与雷达波束射线呈 30° 夹角向右上方运动;由于飞机机动飞行产生的加速度的影响,使得回波数据在距离包络对齐后方位向数据体

现出二次相位项的特性,特别是方位信号调频项较大时,利用传统的 RD 算法对目标成像将会使方位图像严重散焦,如图 4(b) 所示;但利用本文所提出的基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像方法对其进行成像,将会得到良好的成像效果,如图 4(c) 所示,因为,该方法对二次相位项不敏感,其成像效果除了会产生交叉项,影响成像的门限值的选取外,没有其它的影响,并利用各信号分量的多普勒中心信息进行 ISAR 成像;当然,在实际的成像过程中,门限值一般利用全局能量最大作为基准信息,并剔除最大值 $-3\text{dB} \sim -4.5\text{dB}$ 以下的值进行 ISAR 成像,其成像效果一般都较良好;并且快速算法使得该方法运算量较小,易于实现。

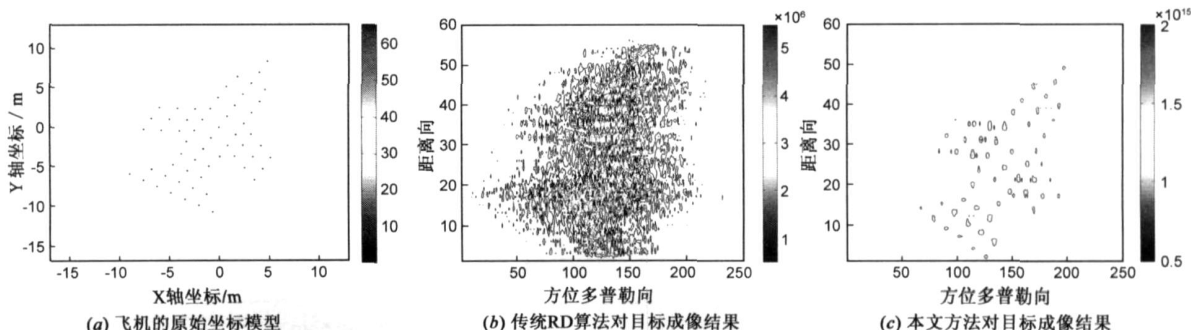


图4 仿真飞机数据成像结果

5.3 实测数据基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像分析

为了更好的证明本文所提出方法的有效性,下面将对实测的舰船目标数据进行 ISAR 成像. 实测数据的雷达部分参数为:发射信号载频 $f_c = 15.4\text{GHz}$,脉冲重复频率 $prf = 125\text{Hz}$,信号带宽 $B = 80\text{MHz}$;图 5(a)为实测舰船数据在利用前面所提出的包络对齐方法后的数据

RD 算法后的成像结果,可见,由于数据方位二次相位项的影响,使得成像聚焦效果较差,只能隐约的分辨出舰船的船头、船尾和桅杆的特性;而利用本文所提出的对复杂运动目标进行 ISAR 成像的新方法,可以得到聚焦效果良好的舰船图像,能清晰的分辨出舰船的船头、船尾和桅杆的特性(在图 5(c)中已标出);在处理时,为了减少尺度变换后时间范围的变化,尺度变换常数选取为 $A = 0.01$.

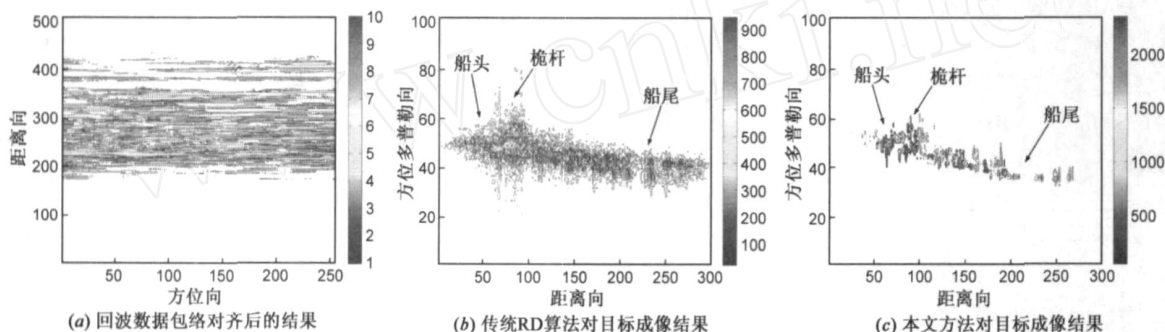


图5 实测舰船数据成像结果

6 结束语

对目标进行 ISAR 成像时,目标的复杂运动所产生的方位二次相位项,将严重影响目标的方位聚焦;利用传统的 RD 算法对复杂运动目标进行 ISAR 成像,必须对目标数据进行参数估计,并对高次相位误差加以补偿,ISAR 图像的质量依靠参数估计的准确度;利用 WVD 瞬时成像方法,由于交叉项的影响,使得成像质量下降;而 Radon-Wigner 成像方法和 DechirpClean 瞬时成像方法,由于要进行全局信号搜索,运算量大;并且,当方位二次相位项较大时,搜索的步进量和初始值都难以控制;因此,本文提出了一种基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像的新方法,该方法通过在时频平面内进行尺度变换消除了方位二次相位项的影响,最终通过信号能量的积累,并利用其在频率轴上的投影分布来实现方位横向高分辨 ISAR 成像;通过对仿真和实测数据的成像结果可以看出,该方法对复杂运动目标 ISAR 成像非常有效;同时,由于存在尺度变换的快速算法,所以,该方法也非常适合工程应用. 该方法虽能实现方位高分辨 ISAR 成像,并能较好的解决方位二次相位造成的方位散焦问题,但对于 RCS 很小的散射点,仍然会被交叉项遮掩,这个问题需要在后续工作中深入研究.

参考文献:

- [1] Caillec J M Le, Garellio R Airborne high-resolution ISAR imaging of ship targets at sea [J]. IEEE Trans on AES, 2004, 40 (1): 378 - 384.
- [2] 王根原, 保铮. 一种基于自适应 Chirplet 分解的逆合成孔

径雷达成像方法[J]. 电子学报, 1999, 27(3): 29 - 31.

- Wang Geng-yuan, Bao Zheng. ISAR imaging based on chirplet decomposition to maneuvering targets [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(3): 29 - 31. (in Chinese)
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 124 - 139.
- [4] Bamler R. Doppler frequency estimation and the cramer-rao bound[J]. IEEE Trans. on GRS, 1991, 29(3): 385 - 389.
- [5] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms [M]. Boston: Artech House, 1995. 256 - 278.
- [6] 邢孟道, 保铮. 外场实测数据的舰船目标 ISAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(12): 1271 - 1277.
Xing Meng-dao, Bao Zheng. ISAR ship imaging of real data [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2001, 23 (12): 1271 - 1277. (in Chinese)
- [7] 邢孟道, 保铮. 一种逆合成孔径雷达成像包络对齐的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(1): 93 - 96.
Xing Meng-dao, Bao Zheng. A new method for the range alignment in ISAR imaging[J]. Journal of Xidian University, 2000, 27(1): 93 - 96. (in Chinese)
- [8] 邢孟道, 保铮, 郑义明. 用整体最优准则实现 ISAR 成像的包络对齐[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1807 - 1811.
Xing Meng-dao, Bao Zheng, Zheng Yi-ming. Range alignment using global optimization criterion in ISAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1807 - 1811. (in Chinese)
- [9] 邢孟道, 保铮, 郑义明, 冯大政. 适合于大型平稳和机动目标的成像算法[J]. 信号处理, 2001, 27(3): 43 - 45 - 49.
Xing Meng-dao, Bao Zheng, Zheng Yi-ming, Feng Da-zheng.

The imaging algorithm for steadily flying or maneuvering big targets[J]. Signal Processing, 2001, 27(3): 43 - 45 + 49. (in Chinese)

- [10] 陈文池. 一种适用于编队目标的 ISAR 成像处理实现方法[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1119 - 1122.

Cheng Wen-chi. An implementation method of ISAR imaging for multiple targets in formation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1119 - 1122. (in Chinese)

作者简介:



李亚超 男, 1981 年 5 月生于江西南昌, 2003 年 3 月和 2008 年 6 月分别获西安电子科技大学硕士和博士学位, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室讲师, 主要从事雷达信号处理, 基于 DSP 和 FPGA 的实时成像信号处理技术、SAR/ISAR 成像和动目标检测及成像方面的研究工作.

E-mail: ycli@mail.xidian.edu.cn



全英汇 男, 1981 年 3 月出生于浙江丽水, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室在职博士生, 主要从事雷达信号处理、SAR、ISAR 成像等研究工作.



邢孟道 男, 1975 年 11 月生于浙江, 教授, 博士生导师, 1997 年 7 月在西安电子科技大学电子工程学院获工学学士学位, 同年免试推荐为本校雷达信号处理国家重点实验室硕博连读生, 2000 年留校工作, 以在职身份攻读博士学位, 2002 年 5 月获工学博士学位, 其博士论文获得 2004 年度全国百篇优秀博士学位论文提名奖. 2002 年 7 月破格评为副教授, 2004 年 7 月破格评为教授. 2006 年入选“新世纪优秀人才支持计划”. 研究方向为雷达成像、包括合成孔径雷达(SAR)成像、逆合成孔径雷达(ISAR)成像和 SAR 动目标检测等, 目前为雷达信号处理国家重点实验室雷达成像课题组组长, 已发表论文一百多篇.