

一种基于估计理论的 ISAR 超分辨成像方法

陈阿磊¹, 王党卫², 马晓岩², 粟毅³

- (1. 空军雷达学院研究生队, 湖北 武汉 430019;
2. 空军雷达学院空/天基预警监视装备系, 湖北 武汉 430019;
3. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像中给定合成孔径长度下方位向匹配滤波脉冲压缩输出的主瓣分辨率随雷达至等效阵列距离变化这一难题, 基于线性系统理论, 通过目标方位向回波信号的等效建模, 提出了一种基于最小均方估计理论的超分辨成像方法。不同于传统基于谱估计的超分辨成像方法, 该方法利用对目标系统方位向冲击响应的估计信号进行成像, 因而能够完全消除雷达至等效阵列的距离对方位向分辨率的影响。仿真实验证实了该方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 高分辨成像; 脉冲压缩; 最小均方估计
中图分类号: TN 951 **文献标志码:** A

Method of super resolution imaging for ISAR based on estimation theory

CHEN A-lei¹, WANG Dang-wei², MA Xiao-yan², SU Yi³

- (1. Dept. of Graduate Management, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China;
2. Dept. of Air/Space-based Early Warning Surveillance Equipment, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China;
3. School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the difficult problem that the mainlobe resolution compressed by matched filtering changes with the range between equivalent array and radar when the length of the synthetic aperture is given, a new method of super resolution imaging based on least-mean-square estimation theory is proposed, which is based on the theory of linear systems and the equivalent model of target's echo signals in azimuth. Different from the traditional super resolution imaging method which is based on spectrum estimation, this one uses the estimated signal of the target's impulse response system in azimuth, and as a result it can completely eliminate the impact of the range between equivalent array and radar on the resolution in azimuth. Simulation experiment proves the effectiveness of the method.

Keywords: inverse synthetic aperture radar (ISAR); high resolution imaging; pulse compression; minimum mean square estimation

0 引言

随着现代军事技术的发展, 特别是面临现代战争中日益增加的空中威胁, 发展对空目标高分辨成像雷达, 尤其是二维高分辨成像雷达已成为一个重要发展方向。作为最常用的二维高分辨成像雷达之一, 逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)^[1-2]已受到越来越多的关注。

就 ISAR 成像而言, 其距离向高分辨通常利用发射宽带信号来实现, 而方位向高分辨则主要利用具有方位分辨能力的一维合成阵列天线来获得。目前, 距离多普勒^[1-2]成

像处理方法是 ISAR 成像处理中最常用的方法之一, 其主要通过两个可分离的一维脉冲压缩处理来获取目标的二维图像。事实上, 距离多普勒成像时方位向的分辨率与雷达至合成阵列的距离是有关的。通常, 对于给定的合成阵列长度, 回波信号经匹配滤波后, 雷达至合成阵列的距离越远, 输出压缩脉冲包络主瓣宽度就越宽, 方位向分辨率也就越差。就基于匹配滤波的成像方法而言, 若要提高方位向分辨率, 就必须增大有效孔径长度。然而, 由于目标运动特性未知, 合成孔径长度的增加, 就必然意味着成像所需运动补偿难度的增加, 因此, ISAR 成像中有效观测孔径长度只

能在有限的范围内取舍,这就限制了方位向分辨率的进一步提高。为解决这一难题,文献[3-4]提出了一种谱外推超分辨方法,利用 AR 模型对观测数据进行外推,获取观测角之外的观测信息,使其能在不扩大成像角度的情况下,有效增加对目标的成像孔径,进而使得方位向分辨率得以提高。但是该方法是以阵列方位向观测回波满足 AR 模型为前提的,其空间谱估计的误差较大,因此,限制了方位向分辨率的改善。为进一步提高方位向分辨率,文献[5]提出了连续 Hopfield 神经网络超分辨方法,其利用 Hopfield 神经网络来求解谱估计中的最小二乘估计,从而实现方位向分辨率的提高,但其计算量十分巨大,难以实时应用。随后,文献[6-8]提出了 ESPRIT 超分辨算法,其利用特征分解的原理来实现方位向的超分辨。相比上述两种方法,尽管 ESPRIT 超分辨算法性能更为优越,不仅分辨率较高,且计算量相对较小,但其由于采用特征分解和矩阵求逆,而信号参数的估计精度与信噪比密切相关,使得低信噪比时成像质量显著降低。

为减小雷达至合成阵列的距离对方位向分辨率的影响和进一步提高信噪比较低时成像图像的质量,本文从线性系统理论出发,将目标看作一个二维冲击响应系统,目标的成像实际上可通过对这个二维冲击响应系统的求解来完成。由于这种成像方法本质上是对接收数据解卷积的过程,因而通过估计理论获取目标方位向系统冲击响应的过程能够完全去除信号波形对成像结果的影响,使得方位向成像分辨率与雷达至合成阵列的距离无关。基于此设想,本文首先导出了 ISAR 成像中匹配滤波脉冲压缩时方位向分辨率的理论表达式,分析了制约 ISAR 方位向分辨率提高的因素;随后,基于线性系统理论,通过目标方位向回波信号的线性系统建模,提出了基于最小均方估计理论的超分辨成像方法。仿真实验表明,本文给出的方法能够完全避免雷达至合成阵列的距离对方位向分辨率的影响,可显著改善目标成像质量,且相比于 ESPRIT 超分辨算法,在信噪比较低时仍能得到满意的结果。

1 ISAR 成像及存在问题

作为目前对空成像最为主要的技术手段,ISAR 有着广泛的应用前景和发展潜力,其成像模型通常如图 1 所示。图中 L_s 为合成阵列长度, H_0 为雷达至合成阵列的距离。若假设雷达与目标之间的平动分量已非常理想地进行运动补偿,此时成像模型等效为如图 2 所示的旋转目标模型。

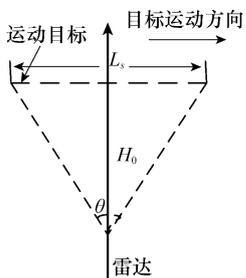


图 1 ISAR 成像基本原理

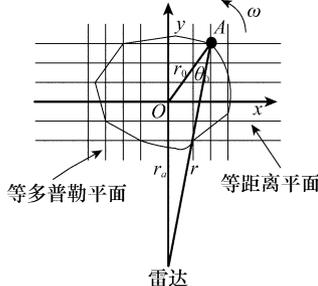


图 2 旋转目标成像原理

若目标以均匀角速度作旋转运动,雷达与目标旋转中心之间的距离为 r_a ,目标绕旋转中心 O 的角速度为 ω ,则某时刻旋转目标上某一散射点 $A(r_0, \theta_0)$ 到雷达的距离可表示为^[9]

$$r = [r_0^2 + r_a^2 + 2r_0 r_a \sin(\theta_0 + \omega t)]^{1/2} \quad (1)$$

一般来说,雷达与目标之间的距离远大于目标的几何尺寸($r_a \gg r_0$),因此,式(1)可近似表示为

$$r \approx r_a + x_0 \sin(\omega t) + y_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$x_0 = r_0 \cos \theta_0, y_0 = r_0 \sin \theta_0$$

式中, (x_0, y_0) 为相对于旋转中心 O 时散射点 A 的直角坐标。

于是,回波信号的多普勒频率可写成

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dr}{dt} = \frac{2x_0 \omega}{\lambda} \cos(\omega t) - \frac{2y_0 \omega}{\lambda} \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中, λ 为雷达信号波长。

通常,在 ISAR 成像中,雷达对目标的总观测角 $\Delta\theta$ 仅为几度,因此,式(2)和式(3)又可近似为

$$r \approx r_a + y_0 \quad (4)$$

$$f_d = \frac{2x_0 \omega}{\lambda} \quad (5)$$

显然,由式(5)可知,目标至雷达的距离和目标多普勒频率与散射点 $A(x_0, y_0)$ 的位置参数有关。因此,利用分析回波信号的距离延时和多普勒频率即可反演出目标的位置参数。

距离向上的高分辨通常是利用大带宽信号获得,其分辨率为 $\rho_r = c/(2B)$,其中 B 为带宽, c 为光速。由式(5)可看出,方位向上空间谱域多普勒带宽为

$$\Delta B = \frac{2\omega T}{\lambda} \quad (6)$$

式中, T 为相干积累时间。

于是,可知横向分辨率为

$$\rho_a = \frac{1}{\Delta B} = \frac{\lambda}{2\omega T} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (7)$$

式中, $\Delta\theta$ 为相干积累时间内旋转目标转过的角度,由图 1 的几何关系可知

$$\Delta\theta \approx \frac{L_s}{H_0} \quad (8)$$

因此,有

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \approx \frac{\lambda H_0}{2L_s} \quad (9)$$

由式(9)可见,ISAR 成像时实际方位分辨率与入射波长和转动角度两个基本因素有关。对于给定载频,方位向上的分辨率仅与相对转角有关,目标转动角度越大,方位分辨率就越高。而 ISAR 转动角度通常由雷达至合成阵列的距离 H_0 和阵列孔径决定。对于给定合成阵列孔径长度,雷达至合成阵列的距离越小,转动角就越大,方位向上的分辨率也就越高;反之,则转动角越小,方位分辨率越差。也

就是说, ISAR 成像时实际方位分辨率不仅与入射波长有关, 还与合成阵列长度和雷达至合成阵列的距离有关。

2 基于估计理论的超分辨成像方法

由上节可知, 对于给定的雷达载频和合成阵列长度, ISAR 成像中图像方位分辨率主要由雷达至合成阵列距离决定, 其远近直接影响着方位向上分辨率的好坏, 这显然不利于对远距离目标的高分辨成像。

事实上, 对于 ISAR 二维成像而言, 目标可被看作一个二维冲击响应系统, 回波信号就是发射信号与这个二维系统冲击响应卷积的结果。对于目标的二维成像, 实际上就是利用接收数据对目标二维冲击响应的反演。基于此设想, 本文提出如下基于估计理论的超分辨成像方法。

设运动目标为理想的多点散射目标, 散射点个数为 M , 目标中心至雷达的距离为 $r(t_m)$, 各散射点至雷达的距离为 $r_i(t_m)$ ($i=1, 2, \dots, M$), 其中 $t_m = mT_r$ ($m=0, 1, \dots, L-1$), T_r 为采样周期。若雷达发射信号为编码信号, 则距离向匹配滤波脉冲压缩后输出的回波信号可表示为^[10-11]

$$y(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^M \sigma_{r_i} \operatorname{sinc} \left\{ B \left(\hat{t} - \frac{2r_i(t_m)}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_i(t_m) \right) + v(\hat{t}, t_m) \quad (10)$$

式中, \hat{t} 为快时间; σ_{r_i} 为距离压缩后散射点信号的幅度; λ 为发射信号中心频率对应的波长; v 为高斯白噪声; sinc 函数为 $\operatorname{sinc}(a) = \frac{\sin(\pi a)}{\pi a}$ 。

由于雷达至目标之间的距离远大于目标的几何尺寸, 则目标各散射点至雷达的距离可认为是相同的。对式(10)的回波信号进行包络对齐后, 可得

$$y(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^M \sigma_{r_i} \operatorname{sinc} \left\{ B \left(\hat{t} - \frac{2r(t_m)}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_i(t_m) \right) + v(\hat{t}, t_m) \quad (11)$$

如式(11)所示, 距离向经过匹配滤波脉冲压缩和包络对齐后, 获得了目标距离向系统冲击响应, 而式中的相位项 $\exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_i(t_m) \right)$ 则可看作散射点方位向系统冲击响应与方位向等效输入信号卷积的结果。若设 $x(t_m)$ 为方位向上目标系统冲击响应, $s(t_m)$ 为方位向等效输入信号, 则式(11)又可表示为

$$y(\hat{t}, t_m) = \left\{ \sum_{i=1}^M \sigma_{r_i} \operatorname{sinc} \left[B \left(\hat{t} - \frac{2r(t_m)}{c} \right) \right] \right\} \cdot [x(t_m) \otimes s(t_m)] + v(\hat{t}, t_m) \quad (12)$$

式中, \otimes 为卷积运算符。

如图 1 所示, 以目标运动轨迹的中心点为中心建立直角坐标系, 方位向系统冲击响应则为 $x(t_m) = \sum_i \delta[u(t_m) - x_i]$, 其中 x_i 为目标上各散射点在方位向上的坐标, $u(t_m)$ 为 t_m 时刻目标的相对位置坐标。对于小斜视下 ISAR 成像来

说, $r_i(t_m) = \sqrt{[u(t_m)]^2 + H_0^2}$, 由于合成阵列的有效长度远小于雷达至合成阵列的距离, 则利用 Fresnel 近似式后, 方位向等效输入信号可表示为

$$s(t_m) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left(H_0 + \frac{1}{2} \frac{[u(t_m)]^2}{H_0} \right) \right\} \quad (13)$$

方位向上的成像过程就是目标方位向上系统冲击响应 $x(t_m)$ 的获取过程。由于基于估计理论的方位向系统冲击响应的获取过程能够完全去除信号波形对成像结果的影响, 使得成像分辨率与雷达至合成阵列的距离无关。因此, 下文给出了基于最小均方估计理论的方位向成像方法。

信号 $y(t_m)$ 由接收的回波信号经距离向匹配滤波脉冲压缩后得到, 这时参考式(11), 方位向上冲击响应 $x(t_m)$ 可利用 $y(t_m)$ 反演获得。为了简化, 现设离散采样后方位向上系统冲击响应为 $x(l)$ ($l=0, 1, \dots, L-1$)。若以目标冲击响应 $x(l)$ 与估计的冲击响应 $\hat{x}(l)$ 的均方差为代价函数, 则目标方位向冲击响应可通过如下过程进行估计, 即

$$\hat{x}(l) = \mathbf{w}(l)^T \tilde{\mathbf{y}}(l) \quad (14)$$

式中, $\mathbf{w}(l) = [\omega^l(0), \omega^l(1), \dots, \omega^l(N-1)]^T$ 为方位向上分辨单元 l 上的权值矢量; $\tilde{\mathbf{y}}(l) = [y(l), y(l+1), \dots, y(l+N-1)]^T$ 为方位向上 N 个相邻单元采样。

式(14)中, $\mathbf{w}(l)$ 为待定的权系数, 线性均方估计的原理就是使均方误差函数 $E\{(x(l) - \hat{x}(l))^2\}$ 最小。通过对 $\mathbf{w}(l)$ 求导, 并根据正交性原理, 可得权值矢量为^[12]

$$\mathbf{w}(l) = (E[\tilde{\mathbf{y}}(l)\tilde{\mathbf{y}}^H(l)])^{-1} E[\tilde{\mathbf{y}}(l)x^*(l)] \quad (15)$$

式中, $E(\cdot)$ 代表数学期望; $*$ 代表共轭运算。

若进一步设定目标冲击响应邻近采样不相关, 且冲击响应与噪声无关, $\tilde{\mathbf{v}}(l)$ 为方位向上 N 个相邻单元的噪声采样, 则第 l 个分辨单元上冲击响应的权值矢量可表示为^[13]

$$\mathbf{w}(l) = \rho(l)(\mathbf{C}(l) + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{s} \quad (16)$$

式中, 信号矢量 \mathbf{s} 为式(13)中 N 个相邻单元信号采样; $\rho(l) = |x(l)|^2$; $\mathbf{R} = E[\tilde{\mathbf{v}}(l)\tilde{\mathbf{v}}^H(l)]$; $\mathbf{C}(l) = E[\mathbf{A}^T(l)\mathbf{s}\mathbf{s}^H\mathbf{A}^*(l)] = \sum_{n=-N+1}^{N-1} \rho(l+n)\mathbf{s}_n\mathbf{s}_n^H$ (对于 $n \geq 0, \mathbf{s}_n = [0, \dots, 0, s_1, \dots, s_{N-n}]^T$; 对

于 $n < 0, \mathbf{s}_n = [s_{n+1}, \dots, s_N, 0, \dots, 0]^T$), 其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x(l) & x(l+1) & \cdots & x(l+N-1) \\ x(l-1) & x(l) & \cdots & x(l+N-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(l-N+1) & \cdots & x(l-1) & x(l) \end{bmatrix}$$

此外, 为简化运算, 权值矢量的初始值常取为

$$\mathbf{w}_0(l) = \left(\sum_{n=-N+1}^{N-1} \mathbf{s}_n\mathbf{s}_n^H \right)^{-1} \mathbf{s} \quad (17)$$

根据式(14)~式(16)的推导, 通常只需若干步迭代即可得到权值 $\mathbf{w}(l)$, 进而通过式(14), 就可得到方位向目标冲击响应的估计值, 完成目标的方位向成像。

由上文推导可知, 本文提出的基于最小均方估计理论的超分辨成像算法在 ISAR 成像时使得方位向分辨率与雷达至合成阵列距离无关, 而只是取决于合成阵列的虚拟阵元的间距。此外, 该方法对噪声也不敏感, 这是由于在对权

值矢量进行估计时所采用的参数均为已知,如式(16)所示,进而使得目标方位向的系统冲击响应的估计误差很小,因此成像结果不受限于信噪比的高低。

3 仿真与结果分析

为了验证本文给出成像方法的有效性和正确性,本节将对提出方法进行数值仿真。雷达的发射信号采用 40 位多相编码信号,其带宽 $B = 314$ MHz,子脉冲长度约为 33.33 ns,中心频率对应的波长为 0.05 m。编码序列由式(18)产生,编码子脉冲包络为矩形包络。

$$Code = 2\pi * randn(1, N) \quad (18)$$

式中,randn 为 Matlab 中随机变量产生函数,其产生的随机变量均服从均值为 0,方差为 1 的高斯分布。

为简化仿真,本文设定的 ISAR 成像雷达的坐标系见图 1,合成天线阵列为均匀线阵,虚拟阵元数为 201,坐标横轴零点位于合成阵列中心,即第 101 个虚拟阵元上。虚拟阵元间距为 1 m,则方位向分辨率为 1 m。距离向采样 100 个距离单元,距离分辨率为 0.5 m。假设目标有 4 个强散射点,各散射点的 RCS 均为 1,可设这 4 个点分别位于 $(-1, 52), (1, 52), (-1, 50), (1, 50)$ 。雷达至合成阵列的距离 $H_0 = 100$ km,本文给出了 ISAR 成像时分别采用匹配滤波脉冲压缩和基于最小均方估计理论的超分辨两种方法的方位向成像结果,如图 3、图 4 所示。

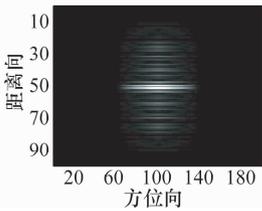


图 3 匹配滤波脉冲压缩后的成像结果($H_0 = 100$ km)

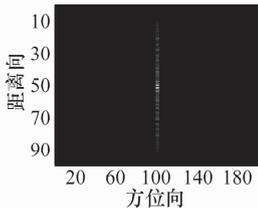


图 4 基于估计理论方法的成像结果($H_0 = 100$ km)

由图 3、图 4 可看出,方位向上采用基于最小均方估计理论的超分辨方法进行成像时得到的图像质量明显优于匹配滤波脉冲压缩的图像质量。这是由于在雷达距合成阵列 100 km 时,匹配滤波脉冲压缩时方位向的分辨率为 25 m,而基于最小均方估计理论的方法进行成像时方位向的分辨率为 1 m,显然,这对于方位向上相距 2 m 的两个散射点来说,后者的成像效果要明显好于前者。此外,当采用基于估计理论方法对目标方位向进行成像时获得的为目标方位向的系统冲击响应,因而其成像结果方位向上的旁瓣要明显低于匹配滤波脉冲压缩的旁瓣。

为了验证雷达至合成阵列的距离是否影响基于最小均方估计理论超分辨方法的成像效果,现设雷达至合成阵列的距离 $H_0 = 20$ km,这时匹配滤波脉冲压缩时方位向的分辨率为 5 m。其他实验条件不变,得到仿真结果图如图 5、图 6 所示。

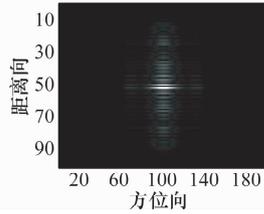


图 5 匹配滤波脉冲压缩后的成像结果($H_0 = 20$ km)

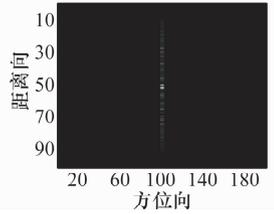


图 6 基于估计理论方法的成像结果($H_0 = 20$ km)

由图 3~图 6 可看出,匹配滤波脉冲压缩后成像图像的质量明显与雷达至合成阵列距离 H_0 有关,图 5 的成像结果明显优于图 3。这是由于雷达至合成阵列距离越近,采用匹配滤波脉冲压缩时方位向上分辨率就越高,目标成像的图像也就越清晰。而图 6 的成像结果与图 4 相比没有明显变化,这是由于基于估计理论超分辨成像方法对目标成像时方位向的分辨率均为 1 m,其与雷达至合成阵列距离 H_0 无关。由此可见,ISAR 成像时方位向上采用基于最小均方估计理论的超分辨方法得到的图像质量明显优于匹配滤波脉冲压缩的图像质量,且更为重要的是,成像图像质量的优劣与雷达至合成阵列的距离无关。

另外,为比较 ESPRIT 超分辨算法和基于最小均方估计理论超分辨方法的成像效果差异,设信噪比分别为 20 dB 和 5 dB,雷达至合成阵列的距离 $H_0 = 20$ km,现分别采用这两种方法对目标进行成像,其他实验条件同上,成像结果如图 7~图 10 所示。

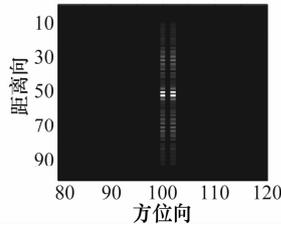


图 7 ESPRIT 超分辨算法的成像结果(20 dB)

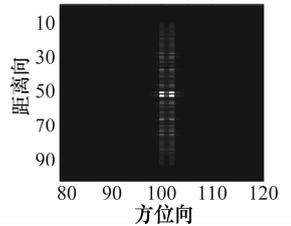


图 8 基于估计理论方法的成像结果(20 dB)

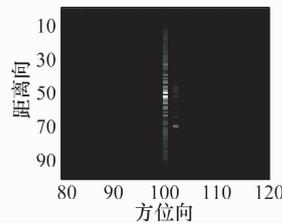


图 9 ESPRIT 超分辨算法的成像结果(5 dB)

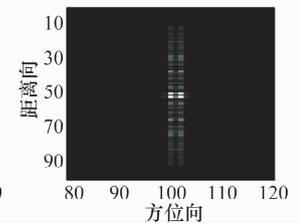


图 10 基于估计理论方法的成像结果(5 dB)

由图 7~图 10 可看出,在信噪比为 20 dB 时,两种方法成像后的图像质量没有明显差异;但信噪比为 5 dB 时,方位向上采用 ESPRIT 超分辨算法成像的图像质量明显差于基于估计理论的超分辨方法成像的图像质量,且明显丢失了两个散射点的信息。这是由于在信噪比较小时,噪声功

率相对较高,采用 ESPRIT 法时对信号参数估计误差较大造成的,而在不同信噪比下方位向上采用基于估计理论的超分辨方法成像的图像质量没有明显变化。此外,ESPRIT 法还涉及到求广义特征值和广义逆矩阵的运算,因而,计算量也相对较大。由此可见,ISAR 成像时方位向采用基于最小均方估计理论的超分辨方法不受限于信噪比的高低,即使在信噪比较小的情况下也能得到良好的图像,且计算量相对较小。

4 结 论

脉冲压缩是 ISAR 需要解决的关键技术之一,其直接决定了 ISAR 系统的检测、参数估计、高分辨成像以及目标识别等应用的性能。结合谱外推、神经网络、ESPRIT 等超分辨方法,本文将基于估计理论的超分辨方法用于 ISAR 方位向上的成像,取得了良好的效果。实验结果表明,方位向上采用基于最小均方估计理论的超分辨方法得到的图像质量明显优于匹配滤波脉冲压缩时得到的图像质量,且更为重要的是,前者成像图像的质量与雷达至合成阵列的距离无关。此外,相比 ESPRIT 超分辨算法,本文给出的方法在信噪比较低时仍能得到满意的结果,且计算量相对较小。本文只将该方法用于方位向上的成像,距离向的成像依然采用经典的匹配滤波脉冲压缩技术,其实可以想象,若距离向的成像也采用基于估计理论的超分辨成像方法,二维成像的图像就会更加理想。另外,尽管其计算量要大于匹配滤波脉冲压缩,但将来随着信号处理器件的发展,特别是并行处理器的应用,基于估计理论的超分辨成像方法将会在 ISAR 成像中获得广泛的应用。

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, 2001.
- [2] 保铮. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [3] 王永良,陈辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [4] Lu Guangyue, Bao Zheng. Range-instantaneous algorithm in ISAR based on instant equency estimation[C] // *Proc. of International Symposium on Multispectral Image Processing*, 1998:98 - 201.
- [5] Wu Xiaoqing, Zhu Zhaoda. Range-Doppler imaging with neural network[C] // *Proc. of CIE International Conference on Radar*, Beijing, China, 1991.
- [6] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(7):984 - 995.
- [7] Wang Genyuan, Bao Zheng. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets based on chirplet decomposition[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(9):1534 - 1541.
- [8] Wang Yuanxun, Hao Ling. A frequency-aspect extrapolation algorithm for ISAR image simulation based on two-dimensional ESPRIT[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4):1743 - 1748.
- [9] 王勇,姜义成. 一种估计 ISAR 成像转角的新方法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(3):521 - 523.
- [10] 李燕平,李亚超,邢孟道,等. 低信杂(噪)比情况下机载雷达的舰船目标成像[J]. *电子学报*, 2008, 36(3):433 - 439.
- [11] Ma Xiaoyan, Wang Dangwei, Su Yi. 2-D imaging via a narrow-band MIMO radar system[C] // *IEEE 9th International Conference on Signal Processing*, Beijing, China, 2008.
- [12] 皇甫堪,陈建文. 现代数字信号处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [13] Blunt S D, Gerlach K. Multistatic adaptive pulse compression [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3):891 - 903.