

基于二维 CP-GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨成像*

代大海** 王雪松 肖顺平

国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

摘要 针对全极化 ISAR 成像雷达体制, 建立了能够精确描述雷达目标高频电磁极化散射机理的二维相干极化 GTD(CP-GTD)模型, 提出了基于二维 CP-GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨成像方法, 并在此基础上实现了全极化 ISAR 散射中心特征提取, 从根本上解决了现有方法难以提取散射中心的相干极化信息的难题. 与已有方法相比, 二维 CP-GTD 方法的突出优点在于建立了更精确的散射模型, 能够准确估计散射中心的相干散射矩阵; 此外全极化信息的利用, 使得它还具有超分辨成像效果更好、估计精度更高、计算效率更高等优点. 通过对实验结果进行非相干性及相干性指标评估分析, 验证了二维 CP-GTD 模型的优越性.

关键词 极化 二维相干极化 GTD 模型 ISAR 超分辨 散射中心 散射矩阵

高分辨成像和极化从不同方面刻画了目标的散射特性, 高分辨成像技术大大降低了极化描述模型的模糊性, 而极化技术则使得高分辨成像描述的结构信息更为全面, 二者的结合可以相得益彰. 全极化高分辨成像已成为雷达目标识别最具应用前景的研究方向, 已经受到越来越多的关注^[1-5].

一方面, 在逆合成孔径雷达(ISAR)成像中, 如何提高成像分辨率一直是一个重要的研究课题. 传统的基于 Fourier 分析方法的距离和方位分辨率分别受限于发射信号带宽和目标相对于雷达的转角^[6]. 特别针对弹头等空间目标而言, 要在其轨道运动期间进行高分辨的二维 ISAR 成像, 需要发射信号带宽很大, 横向积累时间要求也很长^[7,8]. 因此寻求空间目标在较低信号带宽、较小转角条件下的 ISAR 超分辨成像问题就显得迫切而重要. 事实上, 在经过距离对齐和相位补偿之后, ISAR 超分辨成像问题可以归结为一个谱估计问题, 现代谱估计方

法已在 ISAR 超分辨成像中得到了广泛的应用^[3,5,8-11]. 然而随着研究工作的不断深入, 人们发现超分辨算法的瓶颈已不再是算法本身的性能, 而更多取决于选取参数模型的逼真度, 即该模型是否真实地反映了目标的散射机理. 常见的散射中心模型包括理想点散射模型、衰减指数和模型^[10](DE)和几何绕射理论(GTD)模型^[11,12]. 其中 GTD 模型能够精确描述高频电磁散射, 与现有超分辨最经常采用的理想点散射模型不同, GTD 模型认为散射中心的散射强弱与信号频率存在依赖关系, 该依赖因子可以反映散射中心的几何特征, 更加贴近于高频电磁散射的物理机制.

另一方面, 目标的极化信息与其结构、材料、形状、姿态取向等有着本质的联系. 通过极化信息的提取, 可获取目标表面粗糙度、对称性和取向等其他参数难以表征的信息, 是完整刻画目标特性所不可或缺的. 对于多极化情形, 常规处理思路是各

2007-01-18 收稿, 2007-03-28 收修改稿

* 全国优秀博士学位论文专项资助(批准号: 08100101), 新世纪优秀人才计划项目(批准号: NCET-04-0997)和国家自然科学基金(批准号: 60672033)资助项目

** E-mail: daidahai@nudt.edu.cn 或 wxs1019@vip.sina.com

极化通道分别建立单极化 GTD 模型, 单独进行散射中心提取和参数估计^[8]. 这会导致一个极化通道估计出的散射中心数目多, 而另一个极化通道估计出的散射中心数目少; 由于各通道散射中心位置估计不一致, 将直接导致无法准确得到散射中心的相干极化特性信息, 这就严重限制了目标高分辨极化特性的应用. 虽然文献[11]指出可以通过各通道散射中心关联, 来部分弥补这一缺陷, 但其实这一措施本质上是“无奈之举”, 其效果大大堪疑, 并不能解决多通道估计不一致的问题.

在上述背景下, 针对全极化 ISAR 成像雷达体制, 本文首先建立能够精确描述高频电磁极化散射机理的二维相干极化 GTD 信号模型(以下简称 CP-GTD 模型), 提出一种基于二维 CP-GTD 的全极化 ISAR 超分辨成像方法, 在实现全极化 ISAR 超分辨的基础上, 实现对超分辨极化图像中散射中心的位置、强度、类型以及相干极化散射矩阵等特征的同时估计. 与已有方法相比, 二维 CP-GTD 方法的突出优点在于建立了更贴近于目标散射物理机理的极化散射精确模型, 从根本上解决了散射中心的相干极化散射矩阵难以准确估计的难题. 此外全极化信息的利用, 使得它还具有超分辨效果更好、无需散射中心关联、估计精度更好、计算效率更高等优点.

1 全极化 ISAR 的二维 CP-GTD 信号模型

不考虑目标平动的影响, ISAR 的原始回波实际上可用“角度-频率域”二维信号来表征^[6]. 全极化 ISAR 是指进行正交双通道分时或同时发射(同时发射需要对信号进行特殊的设计^[3]), 同时接收. 不失一般性, 设双通道极化为水平极化 H 和垂直极化 V. 考虑相干极化 GTD 模型, 可知目标的散射回波可以用(1)式来表征,

$$E_{sc} = \sum_{i=1}^d \exp(-j2kr_i) \left(j \frac{k}{k_c} \right)^{\alpha_i} S_i E_{in} \quad (1)$$

即,

$$\begin{bmatrix} E_{H}^{sc}(f, \theta) \\ E_{V}^{sc}(f, \theta) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^d \left(j \frac{k}{k_c} \right)^{\alpha_i} \exp(-j2kr_i) \cdot \begin{bmatrix} S_{iHH}(f, \theta) & S_{iHV}(f, \theta) \\ S_{iVH}(f, \theta) & S_{iVV}(f, \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{H}^{in}(f, \theta) \\ E_{V}^{in}(f, \theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $E_{in} = \begin{bmatrix} E_{H}^{in}(f, \theta) \\ E_{V}^{in}(f, \theta) \end{bmatrix}$ 表示入射信号, $E_{sc} = \begin{bmatrix} E_{H}^{sc}(f, \theta) \\ E_{V}^{sc}(f, \theta) \end{bmatrix}$ 为目标散射信号, $E_H(f, \theta)$ 为水平极化分量, $E_V(f, \theta)$ 为垂直极化分量; $S_i(f, \theta) = \begin{bmatrix} S_{iHH}(f, \theta) & S_{iHV}(f, \theta) \\ S_{iVH}(f, \theta) & S_{iVV}(f, \theta) \end{bmatrix}$ 为目标第 i 个散射中心的散射矩阵, $S_{pq}^i(f, \theta)$ 为目标第 i 个散射中心在 q 发射极化 p 接收极化组态下的复散射系数; $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长; d 为目标散射中心数目; f 为信号频率, θ 为目标相对于雷达的姿态角. α 是散射中心的散射对频率依赖因子, 表征了该散射中心的类型, 反映了该散射中心的几何特征. 由 GTD 理论可知, α 取值是 $1/2$ 的整数倍, 且其取值和目标几何特征的对应关系为: $\alpha=1$ 为平板、两面角散射; $\alpha=1/2$ 为单曲面散射; $\alpha=0$ 为点散射中心、双曲面散射或直接边缘反射; $\alpha=-1/2$ 为边缘绕射; $\alpha=-1$ 为角绕射.

不难得出, 全极化 ISAR 的各通道回波可表示为

$$x_{pq}(f, \theta) = \sum_{i=1}^d \left(j \frac{k}{k_c} \right)^{\alpha_i} S_{pq}^i(f, \theta) \cdot \exp(-j2k(x_i \cos\theta + y_i \sin\theta)) + u_{pq}(f, \theta) \quad (3)$$

其中 $p, q=H$ or V , $u_{pq}(f, \theta)$ 表示在单极化条件下的测量噪声.

在较小转角目标成像条件下, 可以忽略目标上各散射中心散射矩阵随雷达观测姿态的变化, 即认为 S 在成像期间保持不变, (3)式简化为

$$x_{pq}(f, \theta) = \sum_{i=1}^d \left(j \frac{k}{k_c} \right)^{\alpha_i} S_{pq}^i \cdot \exp(-j2k(x_i \cos\theta + y_i \sin\theta)) + u_{pq}(f, \theta) \quad (4)$$

经过 Stolt 插值处理^[6], 即

$$k^x = k \cos\theta, k^y = k \sin\theta \quad (5)$$

可得到二维相干极化 GTD 模型的波数域均匀采样

$$x_{pq}(k_m^x, k_n^y) = \sum_{i=1}^d \left(j \frac{k}{k_c} \right)^{\alpha_i} S_{pq}^i \cdot \exp(-j2(k_m^x x_k + k_n^y y_k)) + u_{pq}(k_m^x, k_n^y)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

将之写成矩阵的形式

$$z = As + u \quad (7)$$

其中 z 是 $MN \times 4$ 维矩阵, 对应全极化测量信息; A 为 $MN \times d$ 维导向矢量矩阵, 对应目标散射中心的位置信息; s 为 $d \times 4$ 维矩阵, 对应目标散射中心的极化散射矩阵信息; u 为 $MN \times 4$ 维测量噪声矩阵. 它们具体表示形式如下,

$$z = [x_{HH} \quad x_{HV} \quad x_{VH} \quad x_{VV}] \quad (8)$$

$$A = [a(\alpha_1, x_1, y_1) \quad a(\alpha_2, x_2, y_2) \quad \dots \quad a(\alpha_d, x_d, y_d)] \quad (9)$$

$$s = [s_{HH} \quad s_{HV} \quad s_{VH} \quad s_{VV}] \quad (10)$$

其中 x_{pq} 为单极化条件下的测量信息的矢量展开形式; $a(\alpha, x_i, y_i)$ 为第 i 个散射中心对应的导向矢量; s_{pq} 为单极化条件下的目标散射信息. 具体表示形式如下,

$$x_{pq} = [x_{pq}(1,1), x_{pq}(2,1), \dots, x_{pq}(M,1), x_{pq}(1,2), \dots, x_{pq}(M,N)]^T \quad (11)$$

$$a(\alpha_i, x_i, y_i) = \begin{bmatrix} \left(j \frac{\sqrt{(k_x^i)^2 + (k_y^i)^2}}{k_c} \right)^{\alpha_i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \left(j \frac{\sqrt{(k_x^i)^2 + (k_y^i)^2}}{k_c} \right)^{\alpha_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \left(j \frac{\sqrt{(k_x^i)^2 + (k_y^i)^2}}{k_c} \right)^{\alpha_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp[j(k_x^i x_i + k_y^i y_i)] \\ \exp[j(k_x^i x_i + k_y^i y_i)] \\ \vdots \\ \exp[j(k_x^i x_i + k_y^i y_i)] \end{bmatrix} \\ \hat{=} \Gamma(\alpha_i) \mathbf{a}_i(x_i, y_i) \quad (12)$$

$$s_{pq} = [s_{1,pq} \quad s_{2,pq} \quad \dots \quad s_{d,pq}]^T \quad (13)$$

值得指出的是, 二维 CP-GTD 模型并非常规 GTD 模型的简单拓展, 其与既有模型不同之处在于其认为每个散射中心具有唯一的相干极化散射矩阵, 并将全极化散射作为一个整体进行建模. 换言之, 散射矩阵和位置、类型、强度等参数一样, 自然地成为散射中心的固有特征参数, 从而避免了对多个极化通道应用常规 GTD 方法进行参数估计时的散射中心不能配准, 导致不能准确估计极化相干散射矩阵的缺陷. 二维 CP-GTD 模型的优点在于能够精确描述雷达目标的高频电磁极化散射机理, 结合了 GTD 模型和相干极化散射模型的优点, 能完整地给出雷达目标的高分辨极化散射特性, 这一点将在下面两节得到证实.

2 极化 ISAR 超分辨成像与特征提取

上节已建立雷达目标的极化 ISAR 二维 CP-GTD 模型, 下面首先对其进行极化 ISAR 超分辨成像, 进而实现对各散射中心的极化散射矩阵、空间位置、频率依赖因子等特征的精确提取.

2.1 基于修正 MUSIC 方法的超分辨与特征提取

本文将阵列信号处理中常用的 MUSIC 谱估计^[13]的思想进行推广, 得到修正的 MUSIC 算法, 并用来对全极化 ISAR 进行超分辨成像. MUSIC 方法最初主要用于阵列信号处理中的空间谱估计, 它具有很高的分辨率、估计精度, 并且有很好的稳定性. 下面给出具体的算法.

设全极化测量信号的协方差矩阵 $R_{zz} = E(zz^T)$ 和散射中心数目 d 均已知, 则对 R_{zz} 进行特征分解,

$$R_{zz} = E(zz^T) = \sum_{n=1}^{MN} \lambda_n u_n u_n^H \quad (14)$$

其中, “ H ” 代表共轭转置.

将特征值按降序排列, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{MN}$, 那么前 d 个特征值对应的特征向量就组成了信号子空间 $U_s = \text{span}\{u_1, u_2, \dots, u_d\}$, 其余特征向量则张成噪声子空间 $U_N = \text{span}\{u_{d+1}, u_{d+2}, \dots, u_{MN}\}$.

定义目标的二维极化 MUSIC 谱(以下简称 2D

P-MUSIC 谱)为

$$P_{2\text{DP-MUSIC}}(\alpha, x, y) = \frac{\mathbf{a}(\alpha, x, y)^\dagger \mathbf{a}(\alpha, x, y)}{\mathbf{a}(\alpha, x, y)^\dagger \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^\dagger \mathbf{a}(\alpha, x, y)} \quad (15)$$

理论上讲,通过三维谱峰搜索方法,即可得到全极化条件下散射中心位置 x, y 和类型 α 的精确估计.显然,由于这里采用了 CP-GTD 模型,并且采取了全极化联合处理,各个极化通道关于散射中心数目、位置和类型也是基于 2D P-MUSIC 谱搜索得到的,信号子空间和噪声子空间都是利用了全极化信息得到的,因此保证了各极化通道的估计结果的一致相干性,避免了后续多极化散射中心关联和配准过程,从根本上解决了现有方法难以提取散射中心的相干极化信息的难题.

另外,大量仿真结果表明,散射中心的类型估计偏差对散射中心位置估计的影响可以忽略(这和文献[14]的结论是一致的).因此,可以先确定散射中心位置参数,即

$$P_{2\text{DP-MUSIC}}(x, y) = \frac{\mathbf{b}^\dagger(x, y) \mathbf{b}(x, y)}{\mathbf{b}^\dagger(x, y) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^\dagger \mathbf{b}(x, y)} \quad (16)$$

在搜索 (x, y) 时,可采取先粗搜,得到散射中心粗略位置之后,根据此位置进行局部搜索,得到散射中心位置的精确估计.确定 (\hat{x}, \hat{y}) 后,只需再对类型参数进行离散搜索即可.当 α 估计与位置为 (\hat{x}, \hat{y}) 处的散射中心一致时,信号模式矢量在噪声子空间上投影的倒数最大,由此可判断当前散射中心的类型.即

$$P(\alpha | (\hat{x}_i, \hat{y}_i)) = \frac{\mathbf{b}^\dagger(\hat{x}_i, \hat{y}_i) \mathbf{\Gamma}^\dagger(\alpha) \mathbf{\Gamma}(\alpha) \mathbf{b}(\hat{x}_i, \hat{y}_i)}{\mathbf{b}^\dagger(\hat{x}_i, \hat{y}_i) \mathbf{\Gamma}^\dagger(\alpha) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^\dagger \mathbf{\Gamma}(\alpha) \mathbf{b}(\hat{x}_i, \hat{y}_i)} \quad (17)$$

对于全极化散射中心提取而言,不仅要估计出每个散射中心的位置,还应估计出该散射中心的强度、相干极化散射矩阵等.在得到散射中心位置估计之后,就可以根据(12)式和(9)式构造出导向矢量矩阵的估计 $\hat{\mathbf{A}}$,进而由(7)式得到各散射中心的极化散射矩阵的最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{s}} = (\hat{\mathbf{A}}^\dagger \hat{\mathbf{A}})^{-1} \hat{\mathbf{A}} \mathbf{z} \quad (18)$$

估计出每一个散射中心的极化散射矩阵 $\hat{\mathbf{S}}_i = \begin{bmatrix} \hat{S}_{i,HH} & \hat{S}_{i,HV} \\ \hat{S}_{i,VH} & \hat{S}_{i,VV} \end{bmatrix}$ 之后,通过简单的计算即可得到各散射中心的强度 I_i 以及归一化相干极化散射矩阵的估计 $\hat{\hat{\mathbf{S}}}_i$, 即

$$I_i = |\hat{S}_{i,HH}|^2 + |\hat{S}_{i,HV}|^2 + |\hat{S}_{i,VH}|^2 + |\hat{S}_{i,VV}|^2 \quad (19)$$

$$\hat{\hat{\mathbf{S}}}_i = \frac{\hat{\mathbf{S}}_i}{\sqrt{I_i}} \exp(-j \arg(\hat{S}_{i,HH})) \quad (20)$$

其中, $\arg(\cdot)$ 代表求取相位角,这里归一化相干极化散射矩阵的强度为 1,且首项元素为实数,这样做的好处在于利于各散射中心属性的判断.

实际上,本文方法同样适用于单极化测量雷达或双极化测量雷达,单极化情形即对应于极化通道数为 1 的情况,双极化情形即对应于极化通道数为 2 的情况,分别相当于本文方法的某种简化.全极化散射中心提取的好处在于:(i) 各个通道的散射中心数目和位置是一致的,保证了散射矩阵估计的相干性,避免了后续散射中心属性判定以及目标识别应用中的配对和融合过程.(ii) 定义了 2D P-MUSIC 谱,同时利用了所有极化通道的信息,提高了信噪比,使得散射中心数目、位置、类型、强度以及相干极化散射矩阵等参数的估计更为准确.(iii) 只涉及估计一个全极化的协方差矩阵,只作一次矩阵分解,因此其特征提取的速度较各通道单独处理时要快,效率更高.

2.2 全极化散射中心数目的估计和协方差矩阵的平滑处理

上一节假设散射中心数目 d 是已知的,实际测量中散射中心数目是未知的,对散射中心数目的估计是一个关键问题.若 d 取值过小,将会丢失一些散射中心;反之,若 d 取值过大,将会把噪声误认为成散射中心,造成散射中心估计出现误差甚至错误.当信噪比较高时,通常可以通过观察 \mathbf{R}_{xx} 特征值的办法大致估计出散射中心数目,即前面较大的非零特征值数目就是散射中心数目,但是该方法带有明显的主观性.本文采用空间谱估计中常用的盖氏圆法^[15],因为该方法具有对信噪比不太敏感等特点,适用于本文的实际情况.

上一节讨论的另一个假设是 R_z 已知, 实际上 R_z 也要通过估计的办法得到. 本文借鉴阵列处理中空间平滑思想得到 R_z 的估计 \hat{R}_z , 这里采用的是前向平滑估计方法^[15], 注意这里平滑是对二维矩阵的分块平滑, 即

$$\hat{R}_z = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{R}_l \quad (21)$$

其中, $L = (M - p_1 + 1) \times (N - p_2 + 1)$, $\hat{R}_l = z_l z_l^\dagger$, z_l 是第 l 个 $p_1 p_2 \times 4$ 维的测量数据矩阵, 即

$$z_l = \begin{bmatrix} x_{HH}(l, l) & x_{HV}(l, l) & \cdots & x_{VV}(l, l) \\ x_{HH}(l+1, l) & x_{HV}(l+1, l) & \cdots & x_{VV}(l+1, l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{HH}(l+p_1-1, l+p_2-1) & x_{HV}(l+p_1-1, l+p_2-1) & \cdots & x_{VV}(l+p_1-1, l+p_2-1) \end{bmatrix}$$

值得指出的是: 为了使(18)式中 \hat{s} 的最小二乘解唯一, 要求 $\hat{A}^\dagger \hat{A}$ 非奇异, 即要求 $p_1 p_2 > d$.

2.3 算法流程

综上所述, 可得极化 ISAR 超分辨成像与特征提取算法的完整流程如下:

- (1) 根据全极化测量数据构建极化测量数据矩阵 z ((8)式);
- (2) 选定 p_1, p_2 , 对极化测量数据矩阵进行分块, 估计协方差矩阵 \hat{R}_z ((21)式);
- (3) 对协方差矩阵进行特征分解, 利用盖氏圆法估计散射中心数目;
- (4) 对极化 ISAR 的超分辨 2D P-MUSIC 谱, 并进行 2D P-MUSIC 谱搜索, 得到散射中心位置的估计值((16)式);
- (5) 针对每个散射中心, 进行超分辨 2D P-MUSIC 谱离散搜索, 得到散射中心类型的估计值((17)式);
- (6) 得到各散射中心的相干散射矩阵估计((18)式);
- (7) 得到各散射中心的强度 I_i 以及归一化相干极化散射矩阵的估计((19), (20)式);
- (8) 根据各点归一化相干散射矩阵 \hat{S}_i 对各散射中心的属性进行判断^[16-18], 并应用于目标识别.

3 性能分析

为评估本文所提出的极化 ISAR 超分辨成像与特征提取算法的性能, 选取传统 FFT 方法和常规 GTD 方法作为对照. 后两种方法都是先在每个极化通道单独进行散射中心提取, 之后进行多极化散射

中心关联, 将关联后的各通道散射系数集合在一起作为该散射中心的极化散射矩阵估计.

3.1 非相干参数的估计精度评估指标

衡量极化超分辨和特征提取的评估指标可以分为两类: 一类为非相干参数的估计精度, 要估计的非相干参数包括散射中心数目、位置、类型、散射强度. 这里假设常规 GTD 方法和 CP-GTD 方法对散射点数目都能估计正确的情况下, 选取后三个参数的估计误差均方根值作为非相干参数的估计精度的评估指标. 其定义为

$$\sigma_r = \sqrt{E[(r - \hat{r})^2]} = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]} \quad (22)$$

其中, r 为位置真值, \hat{r} 为位置估计值, $E[\cdot]$ 为求集合平均. 其余评估指标定义类似, 即 $\sigma_\alpha = \sqrt{E[(\alpha - \hat{\alpha})^2]}$, $\sigma_I = \sqrt{E[(I - \hat{I})^2]}$.

3.2 相干参数的估计精度评估指标

另一类评估指标为相干参数的估计精度. 众所周知, 雷达目标的相干极化散射矩阵是一个复矩阵, 散射矩阵各元素的相位尤其是相对相位是准确反映目标极化特性的重要信息(如球和二面角的散射矩阵差异就体现在共极化相位差上^[3]), 因此保证雷达目标的散射矩阵估计中的相干性也是至关重要的.

在互易性条件下, 相干极化散射矩阵共包括三个相对相位: 即 ϕ_{VV-HH} , ϕ_{HV-HH} , ϕ_{HV-VV} . 其中, ϕ_{VV-HH} 为散射矩阵元素 S_{VV} 和 S_{HH} 的相位差, 即 $\phi_{VV-HH} = \arg(S_{VV} S_{HH}^*)$. 综合考虑, 可以选取上述三个相位差的估计误差均方根值作为相干参数估计精

度的评估指标. 即

$$\sigma(\phi_{VV-HH}) = \sqrt{E[(\phi_{VV-HH} - \phi_{VV-HH})^2]} \quad (23)$$

$\sigma(\phi_{HV-HH})$, $\sigma(\phi_{HV-VV})$ 也依此原则定义.

3.3 仿真实验

设定一个具有 8 个散射中心的目标, 散射结构

如图 3, 目标尺寸约为 $6\text{ m} \times 8\text{ m}$, 仿真起始频率为 8.75 GHz , 频率步进为 10 MHz , 频点数为 32, 即发射信号带宽 310 MHz , 成像期间目标相对雷达转角 1.97° , $p_1=5$, $p_2=5$, 仿真次数为 1000, 信噪比为 25 dB , 其中信噪比定义为目标强度与噪声强度之比, 即 $SNR=10\lg\left(\frac{I}{4\sigma^2}\right)$.

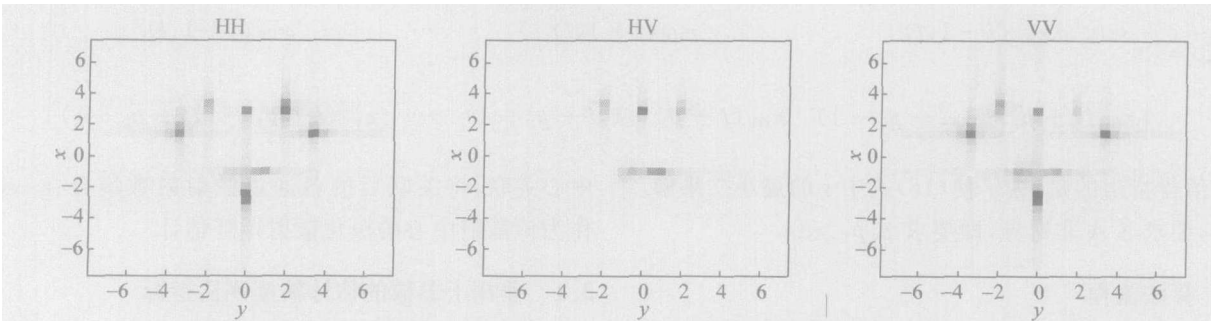


图 1 常规 FFT 方法的 ISAR 成像结果

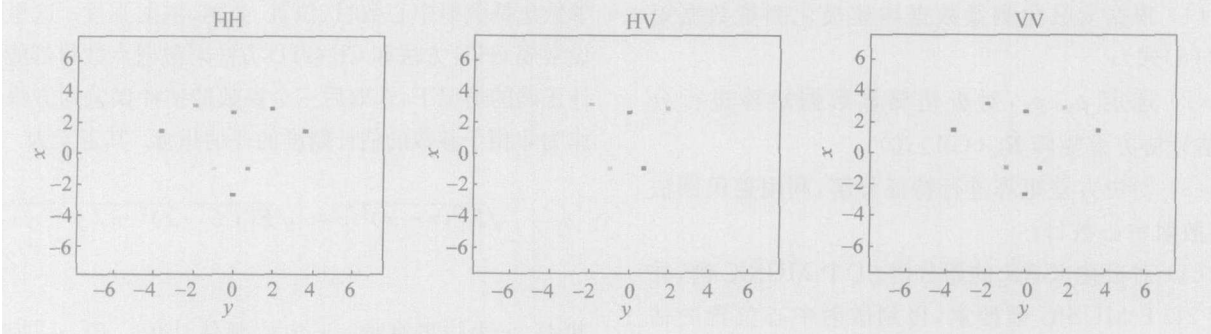


图 2 基于二维 CP-GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨成像结果

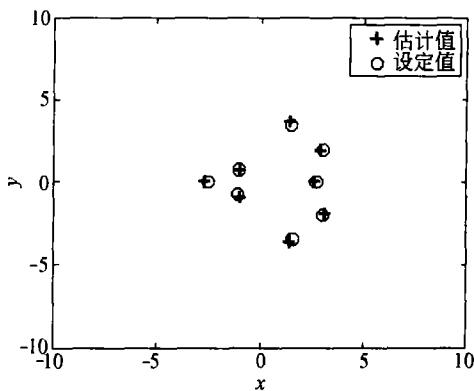


图 3 全极化 ISAR 超分辨的散射点位置提取结果图

图 1 给出了常规 FFT 方法的极化 ISAR 成像结

果图(图中横纵坐标单位均为 m, 以下成像结果图中均适用, 如图 2—3, 6, 8, 10—11). 图 2 给出了本文方法进行极化 ISAR 超分辨成像结果. 图 3 给出了在极化超分辨基础上估计的散射中心位置与真值设置的对比情况. 从图 1—3 的结果可以看出, 常规 FFT 进行各极化通道的 ISAR 成像分辨率很差, 成像结果中旁瓣效应很明显, 以此为基础提取的散射中心的散射矩阵显然不能正确反映目标的极化特性, 而且常规 FFT 处理也无法实现散射中心类型和相干极化散射矩阵的估计. 而极化 ISAR 超分辨成像方法能使得各极化通道均能达到很高的分辨率, 并且能准确地估计出各散射中心的位置、类型以及相干极化散射矩阵等信息.

图 4 和图 5 分别给出了本文的二维 CP-GTD 方法和常规 GTD 方法在非相干性指标和相干性指标在不同信噪比下的评估结果。从图中可以得出如下结论：

(1) 无论非相干性指标方面还是相干性指标方面，CP-GTD 方法均优于常规 GTD 方法。在相干性指标方面，CP-GTD 方法远远优于常规 GTD 方法。在 25 dB 信噪比条件下，CP-GTD 方法的共极化通道相位差的估计误差很小，基本上稳定地维持在 $\pm 2^\circ$ 范围之类；而常规 GTD 方法给出的共极化通道相位差的估计误差起伏很大。这么大的相位估计误差，无疑大大限制了目标高分辨极化特性的应用。常规 GTD 方法要实现准确估计相干极化散射矩阵，信噪比至少要达到 35 dB 以上，而应用 CP-GTD 方法，即使在信噪比下降至 15 dB，估计出的散射矩阵相干性依然能得到保证。可见，常规 GTD 方法估计出的散射矩阵的相干性遭到了严重破坏，这表明即便在其他非相干参数估计较准确的情况

下，应用常规 GTD 模型以及由此得到的极化散射矩阵估计仍然是不可用的。

(2) 准确估计散射中心位置、类型、散射强度等参数所需要的信噪比是不一样的。总体而言，要估计散射中心类型所需要的信噪比更高。常规 GTD 方法，各极化通道对于位置、类型等参数估计不一致，这与各极化通道各自的信噪比有关。从图 4 的前两幅图可以看出，VV-GTD 对位置、类型的估计要差一些，这是由于散射中心设置中 VV 极化幅度相对最弱的缘故，这也是导致 VV 极化与其余两个极化通道的相对相位估计误差迟迟不能收敛到零的原因（参见图 5）。这些的结果进一步证明了 CP-GTD 模型并非对单极化条件下 GTD 模型的简单拓展，基于 CP-GTD 的散射中心提取方法本质上是一种高分辨和极化的联合处理，它避免了对多个极化通道分别应用常规 GTD 方法进行参数估计时的散射中心不能配准，从而导致不能准确估计散射中心相干散射矩阵的缺陷。

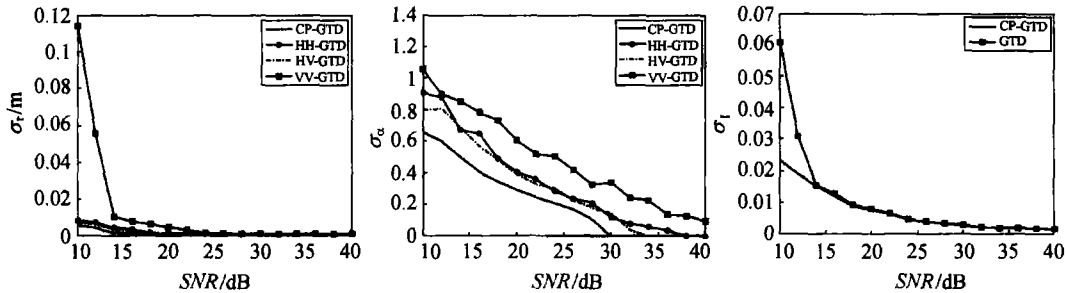


图 4 非相关性指标评估结果对比

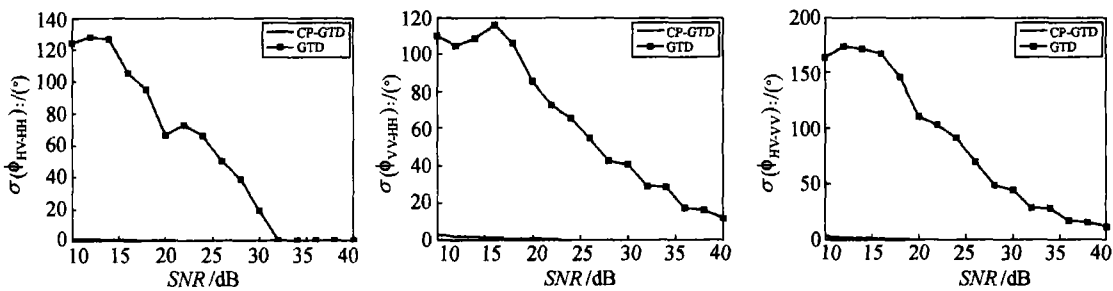


图 5 相关性指标评估结果对比

在其他参数估计精度方面, CP-GTD 方法也要比常规 GTD 方法准确. 这是因为 CP-GTD 方法, 不仅采取了更为准确的模型, 而且处理上还是一种高分辨和极化的联合处理, 在估计协方差矩阵时, 以及进行全极化二维 MUSIC 谱搜索时, 都用到了全极化信息, 提高了信噪比(参见图 6, 7. 图 6 给出的是进行极化 ISAR 超分辨时的 2D P-MUSIC 谱, 图 7 给出的是 CP-GTD 方法和常规 GTD 方法的协方差矩阵的特征值分布图), 这对于准确估计散射点数目、位置以及后续参数都是有益的; 此外, CP-GTD 方法只涉及一个全极化的协方差矩阵, 只作一次矩阵分解, 因此其特征提取的速度较各通道单独处理时要快, 效率更高.

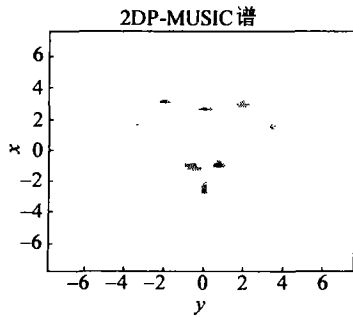


图 6 仿真实验的 2D P-MUSIC 谱图

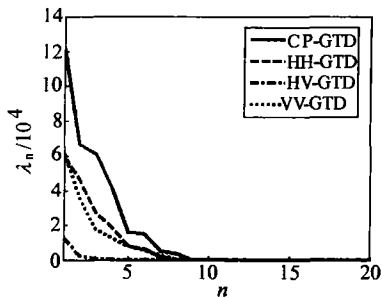


图 7 特征值分布图

综上所述, 验证本文方法的性能相较于传统方法具有比较明显的优势. 在非相干性指标的提高方面, 其原因可解释为由于综合利用了全极化信息, 增加了目标杂波的信噪比; 然而, 在相干性指标方面, 本文方法具有明显的优越性, 这归功于本文建立和采用的相干极化 GTD 模型, 其物理原因可解释为: 相较于各自处理的单极化 GTD 模型, 相干极化 GTD 更符合雷达目标高频电磁极化散射的实际情况.

3.4 实测数据的超分辨和特征提取结果

图 8 给出了利用本文方法的暗室实测数据的全极化散射中心提取结果. 目标是某弹头模型(模型照片如图 9 所示), 起始频率为 8.75 GHz, 频率步进为 20 MHz, 频点数为 101, 俯仰角是 15° , 方位转角是 0° , $p_1=5$, $p_2=5$. 图 10 给出了该弹头的二维全极化 MUSIC 谱, 图 11 给出了该弹头的 2D CP-GTD 极化 ISAR 超分辨成像结果. 从图中可以看出, 极化 ISAR 超分辨成像结果可以准确反映目标的长度、宽度乃至几何外形结构: 该弹头目标一共存在 8 个散射中心, 头部(弹头鼻锥)1 个、中部 4 个、尾部 3 个; 提取的 GTD 频率依赖因子, 如头部的球形散射、中部的圆柱体散射以及尾部的角散射和边缘散射机理等, 都与实际目标模型的结构特性吻合得很好. 另外, 限于篇幅, 这里不再给出每一个散射中心的散射矩阵和频率依赖因子的详细结果. 上述结果进一步验证了极化超分辨成像在雷达目标识别领域的应用价值^[16-18], 也表明了根据极化超分辨特征提取进行目标几何结构反演的巨大潜力, 将另文阐述.

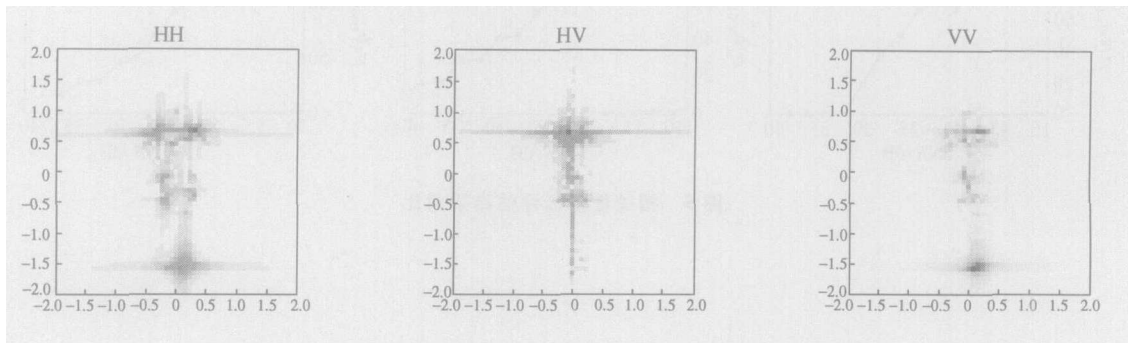


图 8 某弹头的常规 FFT 成像结果

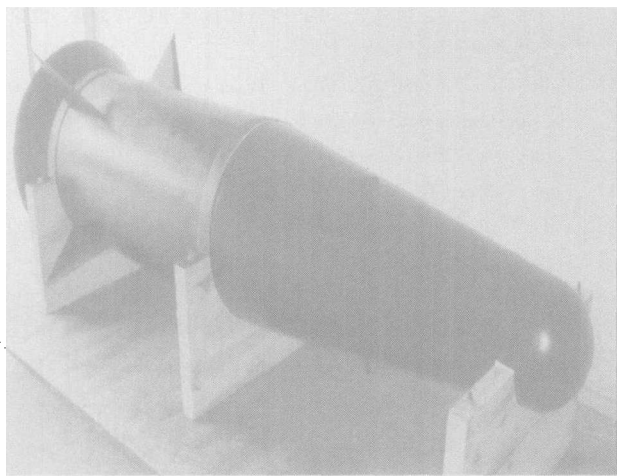


图 9 某弹头的模型照片

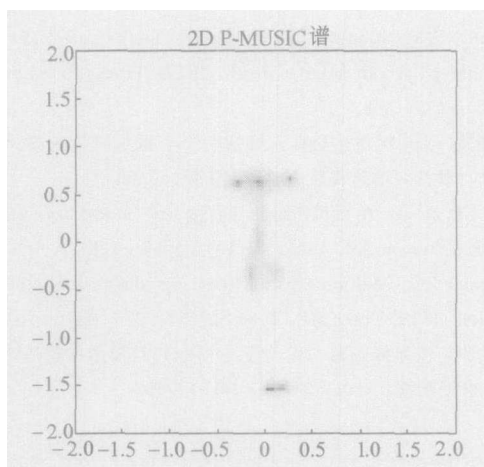


图 10 实测实验的 2D P-MUSIC 谱图

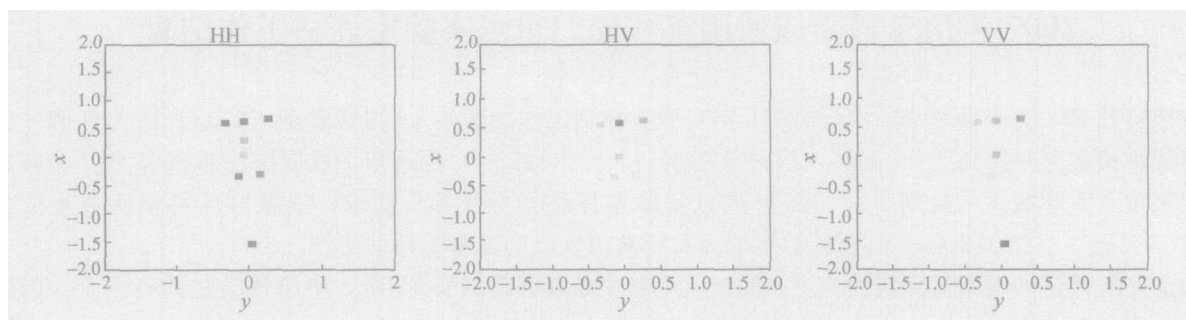


图 11 某弹头的极化 ISAR 超分辨结果图

4 结论

针对全极化 ISAR 成像雷达体制,建立了能够精确描述雷达目标高频电磁极化散射的二维 CP-GTD 散射模型,提出了基于二维 CP-GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨成像,并在此基础上实现了 ISAR 目标全极化散射中心特征提取,从根本上解决了多极化通道条件下难以提取散射中心的相干极化特性信息的难题.与已有方法相比,二维 CP-GTD 方法的突出优点在于采用了更精确的散射模型,能够准确估计散射中心的相干散射矩阵;此外全极化信息的利用,使得它还具有不需要进行散射中心关联、超分辨效果更好、参数估计精度更好、计算效率更高等优点.

参 考 文 献

1 Zebker HA, Vanzyl JJ. Imaging radar polarimetry: A review. Proc of IEEE, 1991, 79(1): 1583—1606

2 Boerner WM. Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992

3 庄钊文,肖顺平,王雪松.雷达极化信息处理及应用.北京:国防工业出版社,1999

4 Kim KT, Kim SW, Kim HT. Two-dimensional ISAR imaging using full polarisation and super-resolution processing techniques. IEE Proc -Radar, Sonar Navig, 1998, 145(4). 240—246

5 Dai DH, Wang XS, Chang YL et al. Fully-polarized scattering center extraction and parameter estimation: P-ESPRIT algorithm. IEEE Proc of Radar, Shanghai, China, 2006, 97—100

6 Soumekh M. Synthetic Perture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms. New York: Jone Wiley & Sons, INC, 1999

7 Andrew MS, John MC, Dietz B, et al. Countermeasures-A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System. Cambridge MA: Union of Concerned Scienst, 2000

8 冯德军.弹道中段目标雷达识别与评估研究.博士论文,长沙:国防科技大学研究生院.2006

9 Andre Q, Emanuel R, Totir FC. Some radar imagery results using superresolution techniques. IEEE Trans AP, 2004, 52(5):

- 1230—1244
- 10 Steadly WM, Moses RL. High resolution exponential modeling of fully polarized radar returns. *IEEE Trans on AES*, 1991, 27(3): 459—468
- 11 周健雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术. 博士学位论文, 长沙: 国防科技大学研究生院. 2006
- 12 Lee CP et al. A GTD-based parametric model for scattering. *IEEE Trans on AP*, 1995, 43(10): 1058—1067
- 13 Schmidt RO. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans AP*, 1986, 34(3): 276—280
- 14 贺治华, 张旭峰, 黎相, 等. 一种 GTD 模型参数估计的新方法. *电子学报*, 2005, 33(9): 1679—1682
- 15 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与方法. 北京: 清华大学出版社, 2004, 11
- 16 Fuller DF, Terzuoli AJ, Collins PJ et al. Approach to object classification using dispersive scattering centres. *IEE Proc-Radar Sonar Navig*, 2004, 151(2): 85—90
- 17 Emre E, Lee CP. Polarimetric classification of scattering centers using M-ary Bayesian decision rules. *IEEE Trans on AES*, 2000, 36(3): 738—749
- 18 Karnychev V, Valery AK, Leo PL, et al. Algorithms for estimating the complete group of polarization invariants of the scattering matrix (SM) based on measuring all SM elements. *IEEE Trans on GRS*, 2004, 42(3): 529—539

2007年信息科学领域国家和部门重点实验室评估工作结束

按照科技部《关于做好2004年—2008年实验室评估工作的通知》(国科基函〔2003〕15号)和《关于商请继续承担实验室评估工作的函》(国科函基字〔2003〕125号)的通知,根据科技部2003年7月新颁布的《国家重点实验室评估规则》及“国家重点实验室评估指标体系”要求,国家自然科学基金委员会于2007年3月至5月组织实施了信息科学领域国家和部门重点实验室的评估工作。

参加此次评估的国家重点实验室共30个,其中隶属教育部的有19个,中国科学院的有9个,国防科工委和山西省各有1个。

实验室评估分阶段进行,现场评估工作主要由国家自然科学基金委员会信息科学部承担。按照实验室研究方向相近的原则将参评实验室划分为5个小组。按专业领域每组由10位专家组成,共聘请了50位评估专家。除2位管理专家来自自然科学基金委外,其余的48位专家来自全国的42个单位。

现场评估从3月5日开始至3月21日结束历时17天。专家组通过听取实验室主任工作报告、代表性研究成果学术报告、现场考察、个别访谈和认真充分的讨论,得出小组的评估意见和本组实验室的排序意见。同时每位专家也给出个人对实验室的评估意见。现场评估结束后,各小组选派部分专家集中开会,交流各组实验室现场评估情况,综合评议,将参评实验室以投票分类的方式,在全部30个实验室中,确定了排序在前10名和后6名的实验室参加复评。

复评会议于5月9日至12日在南京举行,聘请19位参加现场评估的专家,并增聘了5位在信息领域学术造诣较高的专家共24位组成复评专家组,通过听取实验室主任工作报告、提问和答辩,进行充分评议和讨论,经过正式投票,得出对参加复评的16个实验室的排序结果。

与上一轮评估相比,信息科学领域国家和部门重点实验室的工作取得了显著的进步,其特点是:(1)实验室承担科研任务的能力大大提高,作为国家科技创新体系的重要组成部分发挥了重大作用;(2)实验室发表论文的数量显著增加,论文质量明显提高,有的领域已经在国际上有重要影响,进入了先进水平的行列;(3)具有自主知识产权和高技术研究成果在实际中得到应用,取得了显著的社会效益和经济效益;(4)一批充满活力的优秀青年科学家承担了实验室学术领导的重担,为重点实验室可持续发展奠定了坚实的基础。

信息科学领域国家和部门重点实验室坚持科研服务于国家重大战略需求,充分发挥自身优势,在通信、网络、计算机、自动化、光电和光学等信息科学领域为国家的发展和科技进步做出了突出的贡献。

供稿:孙晓兴