

雷达目标二维结构成像方法研究¹

姜卫东 王 伟 陈曾平 郭桂蓉

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 室 长沙 410073)

摘 要 该文首先研究了雷达目标二维电磁散射的频域散射模型;而后提出了用参数估计方法实现目标 ISAR 成像的思想,并研究了 MP2D 参数估计方法;最后用仿真数据和波音 727 客机真实目标实测数据对该方法进行了实验验证.实验结果表明,该方法能准确估计目标的二维散射中心,且对噪声有较强的抑制能力.

关键词 电磁散射, 散射中心, 雷达成像, 参数估计
中图分类号 TN951

1 引 言

雷达目标 ISAR 成像其实质是利用目标回波信息估计目标反射系数在二维平面上的分布,反射系数在二维平面上的分布可以看作是目标二维结构函数的近似,雷达目标成像是电磁散射求逆问题.在不大的角度范围内,雷达目标可以用多个位置和强度不变的强散射点(散射中心)来表示它的散射特性,目标回波是这些散射点后向电磁散射的矢量叠加.研究表明:目标在平面上由二维散射中心构建的散射模型可模型化为二维谐波信号模型^[1-3],因此,求解该模型各谐波分量在二维平面上的分布和强度信息可以得到关于目标二维散射结构成像特征,这种由结构特征构成的“离散图像”,我们称之为参数化的目标 ISAR 成像.

本文研究目的是寻求用参数估计方法提取雷达目标二维散射中心的实现途径,为基于雷达目标二维成像的目标识别方法提供准确的、容易描述的目标二维结构特征信息.文章首先研究二维谐波估计的参数方法^[4],而后,用仿真试验和目标实测数据对该方法进行了验证,最后,从实验中得出一些结论.

2 目标二维散射模型

设目标包含 K 个散射中心,第 i 个散射中心相对坐标原点的坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, K$. 用频率为 f 的电磁波以角度 θ 照射目标,则第 i 个散射中心后向电磁散射可表示为

$$E_i(f, \theta) = A_i(f, \theta) \exp(j2\pi f t_i) \quad (1)$$

其中 $A_i(f, \theta)$ 是第 i 个散射中心的后向散射场, t_i 是第 i 个散射中心到坐标参考点的延迟时间,则 t_i 表示为

$$t_i = 2(x_i \cos \theta + y_i \sin \theta) / c \quad (2)$$

c 表示光速.容易推导^[5],包含 K 个散射中心的目标总散射场为

$$E(l, n) = \sum_{i=1}^K E_i(0, 0) z_{x_i}^l z_{y_i}^n \quad (3)$$

其中 $E_i(0, 0) = A_i(f_x(0), f_y(0)) \exp(j4\pi[f_x(0)x_i + f_y(0)y_i]/c)$, $f_x(0)$ 和 $f_y(0)$ 为 f_x 和 f_y 的起始值; l, n 分别表示 X 和 Y 轴坐标; $z_{x_i} = \exp(j4\pi\Delta f_x x_i)/c$, $z_{y_i} = \exp(j4\pi\Delta f_y y_i)/c$, Δf_x ,

¹ 2001-10-10 收到, 2002-04-17 改回

Δf_y 分别为测量数据从极坐标转换为直角坐标后在 X 轴和 Y 轴上的两个增长量。(3) 式是目标在平面上由二维强散射中心构建的散射信号模型。

3 目标二维结构成像的 MP2D 算法

矩阵束 (MP) 方法是一种高效的一维谐波参数估计方法^[6,7], 文献 [4] 把 MP 方法推广到二维情况, 提出了二维谐波估计的 MP2D (Matrix Pencil method of 2D frequencies retrieval) 方法, 该算法的基本思想是: 通过对二维谐波相关矩阵的分析, 把二维谐波信号参数估计问题分解为两个一维谐波信号参数估计问题, 采用一维谐波信号参数估计的矩阵束方法分别估计两组一维谐波信号的频率, 而后, 再把估计的两组一维谐波频率用一种称之为“基于正交子空间的配对算法” (Pairing algorithm) 配对, 实现二维频率估计。利用二维谐波频率估计结果, 用最小二乘估计 (LS) 或全局最小二乘估计 (TLS) 方法实现幅度估计。

3.1 信号模型自相关矩阵的特性

为书写方便, 把 (3) 式改写为叠加高斯白噪声的二维谐波信号模型形式:

$$x(m, n) = \sum_{i=1}^I a_i \exp(j\phi_i + j2\pi f_{1i}m + j2\pi f_{2i}n) + e(m, n) \quad (4)$$

其中 I 表示二维谐波的个数, a_i 表示谐波幅度, ϕ_i 表示谐波相位, $e(m, n)$ 表示与信号不相关的高斯白噪声。数据长度设为 $0 \leq m \leq M-1; 0 \leq n \leq N-1$ 。

容易证明, $x(m, n)$ 的自相关函数可以由下式表示^[4]:

$$r(l, k) = \sum_{i=1}^I A_i \exp(j2\pi f_{1i}l) \exp(j2\pi f_{2i}k) + \delta_c^2 \delta(l, k) \quad (5)$$

其中 δ_c^2 表示白噪声的方差, A_i 表示与频率无关的常量。分别令 $k=0$ 和 $l=0$, 则有

$$r(l, 0) = \sum_{i=1}^I A_i \exp(j2\pi f_{1i}l) + \delta_c^2 \delta(l) \quad (6)$$

$$r(0, k) = \sum_{i=1}^I A_i \exp(j2\pi f_{2i}k) + \delta_c^2 \delta(k) \quad (7)$$

由上二式可以得出结论: 二维谐波信号的自相关函数 $r(l, k)$ 在 $k=0$ 或 $l=0$ 时, 仅包含一组频率成分, 即在自相关函数的“边缘”, 频率成分 $\{f_{1i}|i=1, 2, \dots, I\}$ 与 $\{f_{2i}|i=1, 2, \dots, I\}$ 无耦合。MP2D 算法正是基于这一“解耦”特性, 把二维谐波频率求解问题分解为两个一维谐波频率求解问题来处理。

3.2 一维 MP 算法

输入数据为测量数据自相关矩阵的“边缘”分量 (即 $r(0, k)$ 或 $r(l, 0)$), 下面给出 MP 算法的求解过程概要, 详细内容见文献 [5]。设一维谐波信号模型为

$$x(k) = \sum_{i=1}^I b_i z_i^k \quad (8)$$

其中 $z_i = \exp(j2\pi f_i)$, $b_i = a_i \exp(j\phi_i)$, 记 $x_k = x(k)$, 构造矢量 $D_t = [x_t, x_{t+1}, \dots, x_{N-L+t-1}]^T$, 构造 Hankel 矩阵 $X_0 = [D_{L-1}, D_{L-2}, \dots, D_0]$ 和 $X_1 = [D_L, D_{L-1}, \dots, D_1]$, 则 MP 算法步骤如下:

- (1) 由测量数据相关矩阵的“边缘”分量 $x(k)$, 构造两个 Hankel 矩阵 X_0, X_1 ;
- (2) 对 X_0, X_1 矩阵降秩近似得到 X_{0T}, X_{1T} (见文献 [5]);
- (3) 计算 $X_{1T}^+ X_{0T}$, 并求解其特征值 $\{\lambda_i | i = 1, 2, \dots, I\}$, 取特征值的对数, 获得信号频率。

3.3 谐波模型的二维频率配对

实现二维谐波估计的重要一步是怎样把两组一维谐波准确配对, 即在二维频域空间找出它们位置的对应关系^[8]。设二维谐波信号自相关函数矩阵为 R , 对 R 进行特征分解, 则 R 可表示为

$$R = \sum_{i=1}^M \lambda_i u_i u_i^H = U_S \Sigma_S U_S^H + U_n \Sigma_n U_n^H \quad (9)$$

其中 λ_i 为 R 的特征值, u_i 为 R 的特征向量, U_S 为由主特征值对应的特征矢量构成的矩阵, U_n 由非主特征值对应的特征矢量构成的矩阵。构造如下信号矢量:

$$e_L = y_L \otimes z_L \quad (10)$$

其中 \otimes 表示 Kronecker 积, e_L 是二维信号矢量的一维表示, $y_L = [1, y, \dots, y^{P-1}]$, $z_L = [1, z, \dots, z^{Q-1}]$, $y = \exp(j2\pi f_1)$, $z = \exp(j2\pi f_2)$, $P \times Q = M$ 。 P, Q 表示一维信号矢量的维数, M 表示自相关矩阵 R 的维数。由子空间理论可知, 信号空间与噪声空间正交, 这表明由 (10) 式构成的信号矢量 e_L 在 $(f_1, f_2) = \{(f_{1i}, f_{2i}) | i = 1, 2, \dots, I\}$ 处有 $e_L \perp U_n$ 。根据这一性质构造如下代价函数:

$$J_n(i, j) = \sum_{k=I+1}^M \|u_k^H e_L(y_i, z_i)\|^2 \quad (11)$$

显然, 当 $(f_1, f_2) = \{(f_{1i}, f_{2i}) | i = 1, 2, \dots, I\}$ 时, $J_n(i, j)$ 最小(正交性原理), 而其它频率组合将有较大的代价。因此, 频率配对方法为固定 $i(i = 1, 2, \dots, I)$, 对 $j = 1, 2, \dots, I$ 分别求出在 i 条件下的函数值 $J_n(i, j)$, 寻找 $J_n(i, j)$ (j 为变量) 的最小值所对应的下标, 设为 $j(i)$, 则配对频率为 $(y_i, z_{j(i)})$, 重复以上工作, 直至频率搜索完毕。

3.4 二维谐波模型的幅度估计

文献 [8] 给出了幅度估计方法, 把频率估计结果代入 (4) 式, 估计出幅度值, 把 (4) 式改写为矩阵形式。令

$$w(f_{1i}) = \{1, \exp(j2\pi f_{1i}), \dots, \exp[j2\pi f_{1i}(M-1)]\}^T \quad (12)$$

$$w(f_{2i}) = \{1, \exp(j2\pi f_{2i}), \dots, \exp[j2\pi f_{2i}(N-1)]\}^T \quad (13)$$

$$A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_I), \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (14)$$

把测量数据 $x(m, n)$, $m = 0, 1, \dots, M-1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 用矩阵形式表示为

$$X = \begin{bmatrix} x(0,0) & x(0,1) & \dots & x(0,N-1) \\ x(1,0) & x(1,1) & \dots & x(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x(M-1,0) & x(M-1,1) & \dots & x(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

不考虑噪声的影响, 则 (4) 式可改写为

$$X = W_1 A W_2 \quad (16)$$

其中 \mathbf{W}_1 为 $M \times I$ 矩阵, \mathbf{W}_2 为 $I \times N$ 矩阵, 分别表示为

$$\mathbf{W}_1 = [w(f_{11}), g(f_{12}), \dots, g(f_{1I})], \quad \mathbf{W}_2 = [w(f_{21}), g(f_{22}), \dots, g(f_{2I})]^T \quad (17)$$

直接对 (16) 式求解, 可以得到幅度系数矩阵 \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \mathbf{W}_1^+ \mathbf{X} \mathbf{W}_2^+ \quad (18)$$

式中 \mathbf{W}_1^+ , \mathbf{W}_2^+ 分别表示 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 的伪逆。可以看出, 根据 (16) 式求解幅度 \mathbf{A} 隐含着假设条件, 即叠加在测量矩阵上的噪声可以忽略不计 (大 SNR 条件)。当 SNR 较低时, (16) 式求解结果可能有较大的误差。当 SNR 较低时, 可以用下面的方法估计信号的幅度。

对测量方程求其自相关矩阵, 则有

$$\mathbf{R} = (1/c) \mathbf{X} \mathbf{X}^H \quad (19)$$

其中 c 为常数。 \mathbf{R} 为 $M \times M$ 矩阵, 把 (16) 式代入 (19) 式, 则有

$$\mathbf{R} = (1/c) \mathbf{W}_1 \mathbf{A} \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_2^H \mathbf{A}^H \mathbf{W}_1^H \quad (20)$$

由于

$$(1/c) \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_2^H = (1/c) [w(f_{21}), \dots, w(f_{2I})]^T \{ [w(f_{21}), \dots, w(f_{2I})]^T \}^H = I \quad (21)$$

则 (20) 式可改写为

$$\mathbf{R} = \mathbf{W}_1 \mathbf{A} \mathbf{A}^H \mathbf{W}_1^H \quad (22)$$

所以 \mathbf{A} 可表示为

$$\mathbf{A} \mathbf{A}^H = \mathbf{W}_1^+ \mathbf{R} (\mathbf{W}_1^H)^+ \quad (23)$$

为降低噪声对自相关矩阵 \mathbf{R} 的影响, 可以对 \mathbf{R} 进行特征分解, 以降低自相关矩阵中噪声方差的影响。

$$\mathbf{R}' = \sum_{i=1}^I (\lambda_i - r) \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H, \quad r = \frac{1}{N - I} \sum_{i=I+1}^N \lambda_i \quad (24)$$

其中 λ_i 为 \mathbf{R} 的特征值, \mathbf{u}_i 为特征值 λ_i 对应的特征矢量, r 表示噪声方差所引起的特征值的算术平均。因此, 降低噪声影响后幅度系数矩阵 \mathbf{A} 的估计为

$$\mathbf{A} \mathbf{A}^H = \mathbf{W}_1^+ \mathbf{R}' (\mathbf{W}_1^H)^+ \quad (25)$$

显然, 在 SNR 较低条件下, 用 (25) 式估计幅度系数矩阵比 (18) 式估计性能优越, 然而, (25) 式估计结果失去了幅度系数的相位信息。MP2D 算法估计二维谐波极点的性能由一维 MP 算法决定, 因此, MP2D 算法具有一维 MP 算法所有的优点。

4 部分实验结果

4.1 MP2D 算法仿真实验结果

设仿真实验信号频率为 $(f_{11}, f_{21}) = (0.22, 0.22)$, $(f_{12}, f_{22}) = (0.22, 0.24)$, $(f_{13}, f_{23}) = (0.24, 0.22)$, $(f_{14}, f_{24}) = (0.24, 0.24)$, 幅度 $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1$ 。定义信噪比 SNR 为

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^I (a_i^2 / 2) / \delta^2 \quad (26)$$

根据 (4) 式数学模型仿真实验信号。取模型阶数 $I = 4$, 采样数据长度为 $M = 64$, $N = 64$, 初相位 $\phi_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, I$, 实验中加高斯白噪声。频率配对时取 $P = Q = 8$ 。

表 1 为在不同信噪比条件下, 估计的一组信号频率。图 1 为在 SNR=3.2dB 条件下, 用 MP2D 算法对信号频率进行估计, 得到的估计频率在频域空间的分布。图中表示 4 组频率在频域空间的分布情况。由表 1 和图 1 可知, 在小的信噪比条件下, MP2D 算法对频率的估计仍然具有较高的精度。

根据估计的结果, 在 SNR=3.2dB 条件下 MP2D 估计的偏差和方差如表 2 所示。表 2 中频率估计偏差 Bias 和方差 Dev 的计算是按以下过程求出的: 首先用 MP2D 进行 100 次独立实验, 得到 100 次频率的估计结果, 而后, 用这 100 次估计的结果计算频率估计的偏差和方差。由表 2 可知, MP2D 算法估计频率的偏差与实际频率之比在 10^{-3} 数量级。

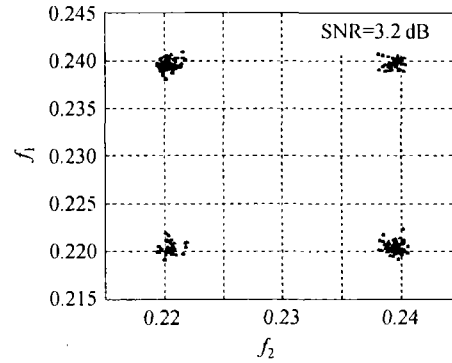


图 1 MP2D 算法估计频率在频域上的分布

表 1 不同 SNR 条件下 MP2D 算法估计信号的频率

SNR (dB)	f_{11}, f_{21} (Hz)	f_{12}, f_{22} (Hz)	f_{13}, f_{23} (Hz)	f_{14}, f_{24} (Hz)
25	0.2200, 0.2200	0.2200, 0.2400	0.2400, 0.2200	0.2400, 0.2400
15	0.2201, 0.2203	0.2201, 0.2402	0.2400, 0.2198	0.2401, 0.2400
5	0.2210, 0.2208	0.2207, 0.2388	0.2392, 0.2223	0.2413, 0.2305

表 2 MP2D 算法估计频率的偏差和方差

f_{1x}	Bias $\times 0.001$	Dev. $\times 0.01$	f_{2x}	Bias $\times 0.001$	Dev. $\times 0.01$
0.22	0.23	0.55	0.22	0.18	0.33
0.22	-0.29	0.65	0.24	-0.16	0.32
0.24	-0.16	0.32	0.22	0.11	0.24
0.24	-0.09	0.13	0.24	-0.12	0.32

4.2 MP2D 算法目标实测数据实验结果

数据来源: 真实目标测量数据, 测量雷达为 X 波段阶梯变频雷达, 脉冲重复频率为 20kHz, 中心频率为 9GHz, 变频带宽为 150MHz。测量时对每个方位角采样数据长度为 128 点, 连续测量 128 个方位角, 测量目标为波音 727 客机。首先, 对数据进行运动补偿, 并用 R-D 方法进行 ISAR 成像, 成像结果如图 2 所示。而后, 用 MP2D 算法估计目标的强散射中心, 估计散射中心的阶数 $I = 12$, 测量矩阵 $M = N = 128$, $P = Q = 8$ 。提取目标强散射中心位置如图 2 中圈号所示。

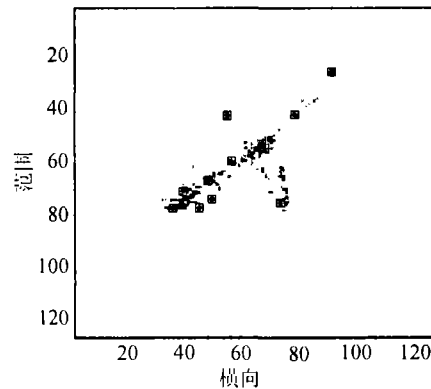


图 2 波音 727 客机实测数据 ISAR 成像结果与 MP2D 算法提取的强散射中心比较

由图 2 可见, MP2D 算法提取的散射中心位置与目标 ISAR 图像的强散射区域是一致的, 这证明了该算法直接从测量数据中提取目标散射中心是有效的, 同时, 从图 2 中还可以看到, MP2D 算法可以分辨出 ISAR 图像中不能区分开来的相距很近的多个散射中心。

5 结 论

实验研究表明: 该方法能直接从高分辨雷达频域测量数据中提取目标强散射中心的位置和幅度, 且该算法的频率估计性能与一维矩阵束算法估计性能完全相同; 与典型的二维谐波估计算法比较(如二维 MUSIC 算法), MP2D 算法具有估计精度高、计算量小的特点。因此, 该方法为雷达目标二维结构特征的提取(目标二维强散射中心的位置和幅度提取)提供了一种有效的手段, 其提取的特征可应用于雷达目标识别。

参 考 文 献

- [1] I. J. Gupta, High-resolution radar imaging using 2-D linear prediction, IEEE Trans. on AP., 1994, AP-42(1), 31-37.
- [2] J. W. Odendaal, E. Barnard, C. W. I. Pistorius, Two-dimension superresolution radar imaging using the MUSIC algorithm, IEEE Trans. on AP., 1994, AP-42(10), 1386-1391.
- [3] Lee C. Potter, Randolph L. Moses, Attributed scattering centers for SAR ATR, IEEE Trans. on Image Processing, 1997, IP-6(1), 79-91.
- [4] 姜卫东, 陈曾平, 庄钊文, 一种新的二维谐波估计方法, 国防科技大学学报, 2000, 22(1), 55-58.
- [5] 姜卫东, 光学区雷达目标结构成像的理论及其在雷达目标识别中的应用, [博士论文], 长沙, 国防科技大学, 2000.
- [6] Y. B. Hua, *et al.*, Generalized pencil-of-function method for extracting poles of an EM system from its transient response, IEEE Trans. on AP., 1989, AP-37(2), 229-234.
- [7] Y. B. Hua, T. Sarkar, Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise, IEEE Trans. on ASSP, 1990, ASSP-38(5), 814-824.
- [8] Y. B. Hua, Estimating two dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil, IEEE Trans. on SP, 1992, SP-40(3), 2267-2280.

STUDY OF TWO-DIMENSION STRUCTURE IMAGE METHOD OF RADAR TARGET

Jiang Weidong Wang Wei Chen Zengping Guo Guirong

(The ATR Nat. Lab, The Electron Sci. and Eng. Inst., the NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, first, the frequency scatter model of radar target two-dimension electromagnetic scattering is studied, then, the idea of ISAR by parameter estimation method is presented and the MP2D method is researched, finally, the experimental result is given using simulated data and measured data of Boeing 727 airplane and demonstrated that this method could accurately extract two-dimension scattering center of radar target and is low sensitive to noise.

Key words Electromagnetic scattering, Scattering center, Radar image, Parameter estimation

姜卫东: 男, 1968 年生, 讲师, 博士, 现从事信号处理、雷达目标识别研究。

王 伟: 男, 1971 年生, 讲师, 博士生, 现从事信号处理、雷达目标识别研究。

陈曾平: 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 现从事目标识别, 信号处理等方面研究。

郭桂蓉: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事信号处理与目标识别领域工作。