

# 色高斯噪声条件下自动目标识别的雷达目标二维衰减参数化模型方法

王 军

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 919 515 信箱, 四川绵阳 621900)

摘 要: 本文通过提取色高斯噪声条件下二维雷达目标具有频率依赖性的散射中心参数, 作为自动目标识别的高分辨率目标特征矢量. 而且, 所导出的提取算法性能不受高信噪比门限和雷达瑞利分辨率极限的约束. 并且, 通过使用混合算法, 给出了一种基于该复杂模型的八步自动目标识别系统. 最后, 给出了一个例证.

关键词: 逆散射; 雷达目标建模; 自动目标识别

中图分类号: TN955+.2 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2001)10-1433-03

## 2-D Damped Parametric Model of Radar Target for ATR in the Presence of Colored Gaussian Noise

WANG Jun

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-515, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: In this paper, the parameters of scattering centers with frequency dependence for 2-D radar target in the colored Gaussian noise are extracted as the high resolution target feature vectors for ATR. Moreover, the extraction method developed is not restricted by high SNR threshold and Rayleigh resolution limits of radar. Eight stages ATR scheme based on the complex model is also proposed by using hybrid algorithm. Finally, an illustrative example is given.

Key words: inverse scattering; radar target modeling; automatic target recognition

### 1 引言

文献[1]曾给出了一种基于后时 E 脉冲响应的色噪声条件下的自动目标识别系统(ATR). 鉴于该方法仅依赖与方位无关的信息, 因此它节约了存储空间和计算时间. 然而在实际应用中, 当信噪比不满足高门限条件时, 该方法会由于自然谐振混叠而产生识别模糊, 从而同时输出多个相似候选目标. 此时必须考虑具有高能量的早时响应, 并通常使用其参数化模型以提高分辨率. 然而, 常用的目标早时响应数据模型为白噪声条件下的多个二维正弦波集合(点散射中心)[2].

此外, 根据经典的瑞利分辨率理论[3], 雷达的距离和方位分辨率分别反比于雷达带宽(B)和方位角扇区( $\phi$ ). 但不幸的是宽 B 和  $\phi$  条件下的数据采集和处理会占用大量的时间和存储空间.

本文利用衰减的复 E 指数序列对目标的后向散射场建模. 该模型通过增加对散射中心频率依赖性的详细描述而更加接近人造目标的实际场. 并且, 它能实现对雷达原始数据的压缩.

### 2 基于复杂雷达目标模型的 ATR 系统

在雷达频率 f 和方位角  $\theta$  处, 雷达目标的远场回波可表征为[4]

$$h(f, \theta) = \sum_{i=1}^k a_i (j \frac{f}{f_0})^{\beta_i} \exp[-j \frac{4\pi}{c} (R_0 + x_i \cos \theta + y_i \sin \theta)] + C(f, \theta) \quad (1)$$

其中, k 为目标主要散射体的总数;  $a_i$  为第 i 个散射体的强度;  $f_0$  为雷达中心频率;  $\beta_i$  为第 i 个散射体的衍射系数, 它反映了散射体的形状[5]. 例如,  $-1/2$  表示弯曲边缘反射,  $-1$  表示角衍射, 0 表示点散射体、双曲面反射或直边缘衍射. C 为光速;  $R_0$  为目标参考点和雷达之间的距离, 它能在预处理时被补偿掉;  $(x_i, y_i)$  为第 i 个散射体相对于目标参考点的距离和方位角坐标;  $C(f, \theta)$  表示方差为  $\sigma_N^2$  的零均值二维色高斯噪声.

当低瑞利分辨率雷达被用于数据采集时, 测量是在窄带宽  $B(B \ll f_0)$  和小方位角扇区  $\phi(\cos \phi \approx 1, \sin \phi \approx \phi)$  上进行的. 然后, 使用 Cartesian 内插[4], 即

$$f = f_0 + m \Delta f, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$\theta = \theta_0 + n \Delta \theta, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

其中,  $f_0$  和  $\theta_0$  表示初始值;  $\Delta f$  和  $\Delta \theta$  表示测量采样间隔.

于是, 式(1)变成

$$h_{m,n} = \sum_{i=1}^k A_i \exp[j(mS_{1i} + nS_{2i}) + j\Phi_i] + C_{m,n} \quad (4)$$

其中,  $A_i = a_i^{\beta_i} \exp[-j \frac{4\pi}{c} f_0 (x_i \cos \theta_0 + y_i \sin \theta_0)]$ ,

$$S_{1i} = \omega_{1i} - j\beta_i \Delta f / f_0,$$

$$\omega_{1i} = -\frac{4\pi}{c} \Delta f (x_i \cos \theta_0 + y_i \sin \theta_0),$$

$$S_{2i} = -\frac{4\pi}{c} \Delta f (y_i \cos \theta_0 - x_i \sin \theta_0),$$

相位  $\varphi_i$  为在  $(-\pi, \pi)$  上均匀分布的随机变量。

另外, 式(4)中的有关项可表示成  $u_i(m, n) = A_i \exp[j(mS_{1i} + nS_{2i})]$ ,  $v_i = \exp(j\varphi_i)$ . 于是可得

$$E[v p_j^*] = \delta(i-j), E[v_i v_j^*] = 0, E[v_i^* v_j^*] = 0$$

$$\text{and } E[v p_j^* v_i^*] = \delta(i-j+s-l) \quad (5)$$

其中,  $E$  表示随机变量的期望。

而  $h_{m,n}$  的四阶累积可表示成<sup>[9]</sup>

$$C_{4h}(\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{31}, \tau_{32})$$

$$= E[h_{m,n} h_{m+\tau_{11}, n+\tau_{12}}^* h_{m+\tau_{21}, n+\tau_{22}}^* h_{m+\tau_{31}, n+\tau_{32}}^*]$$

$$- E[h_{m,n} h_{m+\tau_{11}, n+\tau_{12}}^*] E[h_{m+\tau_{21}, n+\tau_{22}}^* h_{m+\tau_{31}, n+\tau_{32}}^*]$$

$$- E[h_{m,n} h_{m+\tau_{21}, n+\tau_{22}}^*] E[h_{m+\tau_{11}, n+\tau_{12}}^* h_{m+\tau_{31}, n+\tau_{32}}^*]$$

$$- E[h_{m,n} h_{m+\tau_{31}, n+\tau_{32}}^*] E[h_{m+\tau_{11}, n+\tau_{12}}^* h_{m+\tau_{21}, n+\tau_{22}}^*] \quad (6)$$

设  $\tau_{11} = \tau_{12} = \tau_{31} = \tau_{32} = 0$ ,  $\tau_{21} = m$ ,  $\tau_{22} = n$ , 并由式(5)和式(6), 于是可得

$$C_{4h}(0, 0; m, n; 0, 0) = \sum_i \sum_j \sum_s \sum_l \mu_i(m, n) u_j^*(m, n)$$

$$\cdot u_s(2m, 2n) u_l^*(m, n) \delta(i-j+s-l)$$

$$- \sum_i \sum_j \mu_i(m, n) u_j^*(m, n) \delta(i-j)$$

$$\cdot \sum_s \sum_l \mu_s(2m, 2n) u_l^*(m, n) \delta(s-l)$$

$$- \sum_i \sum_l \mu_i(m, n) u_l^*(m, n) \delta(i-l)$$

$$\cdot \sum_j \sum_s \mu_j^*(m, n) u_s(2m, 2n) v_k \delta(j-s) \quad (7)$$

其中, 所有的求和  $\Sigma$  均为从 1 到  $k$ .

经过一些变换后, 可得

$$C_{4h}(0, 0; m, n; 0, 0) = \sum_{i=1}^k A_i^4 \exp[j(mS_{1i} + nS_{2i})] \quad (8)$$

如式(8)中所示, 经四阶累积, 理论上能将  $C_{m,n}$  从  $h_{m,n}$  中滤除. 并且, 式(8)的二维 Prony 模型能表示为

$$C_{4h}(0, 0; m, n; 0, 0) = \sum_{i=1}^k B_i P_{1i}^m P_{2i}^n \quad (9)$$

用修正的 Prony 算法<sup>[4, 7]</sup> 估计极点对  $\{(P_{1i}, P_{2i})\}_{i=1}^k$ , 并比较式(4)、式(8)和式(9), 可得目标特征矢量  $\{a_i, \beta_i, (x_i, y_i)\}_{i=1}^k$  为

$$\beta_i = (|P_{1i}| - 1) f_0 / \Delta f \quad (10)$$

$$x_i = -\frac{c \cdot \cos \theta_0}{4\pi \Delta f} \arg(P_{1i}) + \frac{c \cdot \sin \theta_0}{4\pi \Delta f} \arg(P_{2i}) \quad (11)$$

$$y_i = -\frac{c \cdot \sin \theta_0}{4\pi \Delta f} \arg(P_{1i}) - \frac{c \cdot \cos \theta_0}{4\pi \Delta f} \arg(P_{2i}) \quad (12)$$

$$a_i = (-B_i)^{1/4} j^{-\beta_i} \exp[j \frac{4\pi}{c} f_0 (x_i \cos \theta_0 + y_i \sin \theta_0)] \quad (13)$$

据此, 能给出一个基于该复杂模型的色高斯噪声条件下的 ATR 系统, 如表 1 中所示. 其中, 通过使用混合算法, 以进一步

准确估计模型阶数  $k$ <sup>[8]</sup> 和幅度  $B_i$ <sup>[9]</sup>.

表 1 色高斯噪声条件下的 ATR 系统

i	用低瑞利分辨率雷达测量未知目标的早时响应;
ii	在 Cartesian 频域中创建 $h_{m,n}$ ;
iii	用具有代价约束的套模型级方法 <sup>[8]</sup> 确定模型阶数 $k$ ;
iv	用式(7)计算 $h_{m,n}$ 的四阶累积量 $C_{4h}(0, 0; m, n; 0, 0)$ ;
v	基于 iv, 用修正的二维 Prony 算法估计式(9)中的 $\{(P_{1i}, P_{2i})\}_{i=1}^k$ ;
vi	用最小方差一致线性估计器 <sup>[9]</sup> 估计式(9)中的 $B_i$ ;
vii	用式(10)~(13) 提取目标特征矢量 $\{a_i, \beta_i, (x_i, y_i)\}_{i=1}^k$ ;
viii	基于提取的特征矢量和无噪声条件下的式(1), 重建未知目标在不同 $\theta$ 处的距离图, 然后分别与数据基中已知目标的响应进行相关处理, 并通过绘制相关因子——方位图进行目标判别.

### 3 实验结果

在低噪声微波暗室中, 具有相似形状的三个目标(图 1 所示)在频带 2G~8GHz(121 点等间隔采样)和  $0^\circ \sim 20^\circ$  方位角范围(101 点等间隔采样)上的响应被分别测量, 并作为它们的高保真先验知识存储在数据基中. 然后, 在  $10^\circ$  方位的目标 A 被选作未知目标, 它的采集数据由 2G~2.5GHz 和  $0^\circ \sim 4^\circ$  上的场值所确定, 以模拟低瑞利分辨率雷达的测量数据.

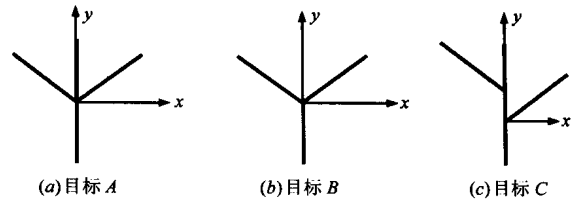


图 1 待识别目标

而污染  $h_{m,n}$  的色高斯噪声信号可由通过二维 FIR 色滤波器的复白高斯噪声所得. 本文使用的滤波器为

$$f_{m,n} = 0.56 \delta_{m,n} + 0.17 \times (0.86)^{m+n} \cos[2\pi(0.32m + 0.47n)] \quad (14)$$

经过表 1 中的步骤 ii—vii, 目标 A 的特征矢量能被提取出来. 然后, 它在频带 2.55G~8GHz 和方位角  $4^\circ \sim 20^\circ$  的散射场能够通过已知数据外延得到. 然而, 在本文的外延处理中, 目标原始信号在低频带上按每个波长进行 10 基离散. 当该原始信号被外延到高频端时, 采样将不再满足 Nyquist 准则而导致空间模糊, 最终无法准确预测目标特征. 一种可能的克服方法是在外延前将频带 2G~2.5GHz 上的测量响应进行密集内插(本文为 6 倍). 其中, 目标 A 在  $\theta = 3^\circ$  处使用内插前后实际场和预测场一致度的比较如图 2 中所示.

在完成表 1 中最后一步后, ATR 的结果如图 3 中所示. 图 3 显示: 识别的最大相关因子 0.9476 出现在方位  $10^\circ$  处, 而其理论值应为 1. 该偏差可能由式(1)建模误差、 $h(f, \theta)$  测量误差、低信噪比条件下目标特征参数估计误差、或者外延预测精度等诸多因素所造成. 但由于识别率(图 3 中的最高峰值与次高峰值之比)明显大于 1, 因此, 上述这些因素并不影响本文提出的识别器在恶劣噪声环境中将未知目标识别为  $10^\circ$  方位角处的目标 A.

并且, 在表 1 中第 iii 步时, 目标 A 模型阶数的估计值为

5. 于是, 图 3 中的结果还表明: 与存储在数据基中的  $121 \times 101$  维高保真原始数据相比, 提取得到的  $4 \times 5$  维目标特征矢量具

有 94.76% 的保真度. 因此, 与文[4] 中的讨论相同, 参数化建模对数据压缩的作用又得到了充分证明.

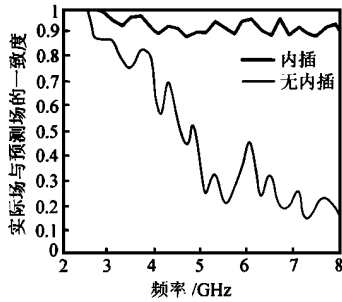


图 2 目标 A 在  $0 = 3^\circ$  处使用内插前后预测精度的比较

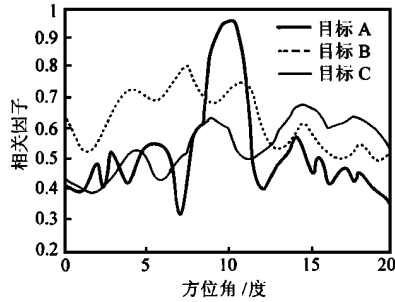


图 3 SNR= 5dB 时的识别结果比较

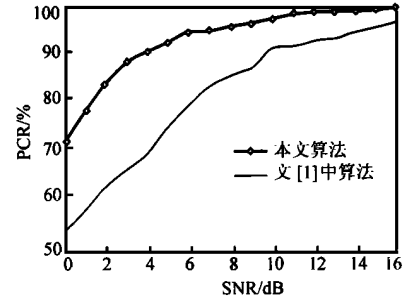


图 4 Monte Carlo 仿真结果

在  $0 \sim 16$  dB 之间的 8 个等间隔 SNR, 本文还分别对使用所给出的混合算法和文献[1] 中的算法识别目标 A 时的正确识别概率(PCR) 进行评估. 500 次 Monte Carlo 仿真的结果如图 4 中所示. 图 4 表明混合算法在 4dB 信噪比时的 PCR 开始接近 90%. 然而, 由于该混合算法中逐一使用了三个高级估计器, 因此它比文献[1, 2, 4, 7] 中的算法要消耗更多的计算时间.

## 4 结论

本文给出了一种物理含义更贴切、简明的雷达目标参数化模型, 它可广泛应用于 ATR、数据压缩和散射研究. 例如, 该模型适用于聚束式合成孔径雷达的 ATR(其雷达中心频率大于带宽). 鉴于模型误差可能决定恶劣噪声条件下自动目标识别性能的好坏, 因此, 如何描述同时以雷达频率和方位为结构性特征函数的(尤其是对分布式散射中心而言)、鲁棒的目标参数化模型及其有效的参数估计器是下一步研究工作的重点.

## 参考文献:

- [ 1 ] A Gallego, D P Ruiz, M C Carrion. F pulse scheme based on Hos for radar target discrimination in the presence of CGN [J]. Electron. Lett., 1996, 32(4): 396- 397.
- [ 2 ] M W Tu, I J Gupta, E K Walton. Application of ML estimation to radar imaging [J]. IEEE Trans. on AP, 1997, 45(1): 20- 27.

- [ 3 ] D A Aushman, A Kazma, J L Walker. Developments in radar imaging [J]. IEEE Trans. on AES, 1984, 20(4): 363- 398.
- [ 4 ] J Wang. High resolution parametric modeling for two dimensional radar target using Prony algorithm [J]. Journal of Electronics, 2000, 17(1): 38- 45.
- [ 5 ] L C Potter, D M Chiang, R Carniere. A GTD-based parametric model for radar scattering [J]. IEEE Trans. on AP, 1995, 43(10): 1058- 1067.
- [ 6 ] T M Mendel. Tutorial on Hos in signal processing and theory [J]. Proc. IEEE, 1991, 79(5): 278- 305.
- [ 7 ] J S Lim, K M Sung. Prony based radar modeling using modified regularized SVD [J]. Electron. Lett., 1996, 32(1): 64- 65.
- [ 8 ] A Sabharwal, L Potter. Model order selection for nested model classes with cost constraints [C]. Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Workshop Statistical Signal Array Processing, Poland, OR, Sept. 1998: 84- 87.
- [ 9 ] C J Ying, L C Potter. Minimum variance linear estimation of amplitudes for exponential signal models [J]. IEEE Trans. on SP, 1999, 47(9): 2522- 2525.

## 作者简介:



王 军 男. 1970 年出生, 博士后, 副研究员, 中国电子学会高级会员. 主要研究方向为: 微弱信号检测理论、随机数字信号处理.