

识别空间旋转目标的尺度模型¹

刘永祥 黎 湘 庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 国防重点实验室 长沙 410073)

摘 要: 由于空间目标旋转速率和雷达采样周期的不确定, 雷达回波数据与模板数据存在着采样率不一致, 影响匹配效果. 该文通过多抽样率下自回归滑动平均 (ARMA) 混合模型建模, 得到回波数据在模板尺度下的模型参数, 实现同一尺度下的信号匹配. 实验结果表明了该方法的有效性.

关键词: 多抽样率, 雷达目标识别, 自回归滑动平均混合模型 (ARMA)

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1509-04

Scaled Model for Recognizing the Spatial Rotating Target

Liu Yong-xiang Li Xiang Zhuang Zhao-wen

(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Considering the uncertain for rotating velocity of spatial target and sample period of radar observation, there exists sampling rate variance between radar returns and template data, which decreases the degree of matching. In this paper, the ARMA model in multirate is provided, through which the model parameters of radar turns in the scale of template data can be gotten, and then data can be matched in the same scale. Experimental result shows the validity of proposed method.

Key words Multirate, Radar target recognition, ARMA

1 引言

在导弹防御系统中, 地基雷达需要从众多诱饵、碎片构成的威胁云中真弹头识别出来. 在目标群中, 旋转目标是其中重要一类, 包括碎片、弹头 (突防设计) 等. 目标旋转引起雷达回波周期性变化, 使得低分辨雷达识别旋转类目标成为可能, 其中一种思路就是利用 RCS 回波周期序列与目标全姿态模板数据进行匹配进而实现识别. 但是在实际的数据处理过程中, 由于旋转类目标旋转速率以及雷达观测周期的不确定, 回波数据与模板数据采样率不能保证一致, 影响匹配效果.

由于杂波和噪声的影响, 雷达回波数据是一随机过程. 自回归滑动平均 (ARMA) 混合模型作为以参数模型为基础的时间序列分析方法, 适合于功率谱既含有尖峰又有凹谷的随机过程, 可以根据有限个模型参数, 求出回波数据的功率谱. 针对上述不同尺度信号的匹配问题, 本文通过多抽样率下的 ARMA 建模, 得到回波信号在模板数据尺度下的变尺度信号, 实现回波数据与模板数据在同一尺度下进行匹配.

2 多抽样率下的 ARMA 建模

2.1 多抽样率处理及 ARMA 建模

离散信号 $\{x(n), n = 1, \dots, N\}$, 通过多抽样率处理可得到不同尺度下的信号, 如图 1 所示. 其中, \uparrow 表示内插算子, \downarrow 表示抽取算子, H_1, H_2 为低通滤波器, H_1 用于消除内插引起

¹ 2003-05-23 收到, 2003-09-19 改回

国家自然科学基金 (No.69901005)、国家部级资助项目

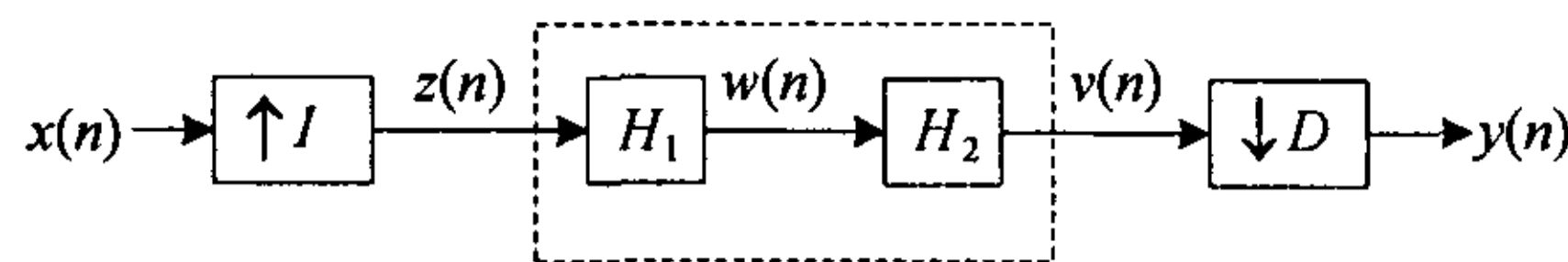


图 1 多抽样率处理模型

的频谱镜像, H_2 防止抽取引起频谱混叠^[1]. $w(n)$ 为 $x(n)$ 的 I 倍内插结果, $y(n)$ 为 $w(n)$ 的 D 倍抽取结果, $x(n)$ 与 $y(n)$ 之间的抽样率之比为 D/I .

$$z(n) = \begin{cases} x(n/I), & n = 0, \pm I, \pm 2I, \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

$$y(n) = v(Dn) \tag{2}$$

设信号 $\{x(n)\}$ 服从 ARMA(p, q) 模型, 即

$$x(n) = \sum_{j=1}^p a_j x(n-j) + \sum_{j=0}^q b_j \omega(n-j), \quad n = 1, \dots, N \tag{3}$$

其中 $\{\omega(j)\}$ 是零均值, 方差为 σ_w^2 的白噪声序列, a_j 和 b_j 是实数. 式 (3) 可写为

$$A_p(\delta)x(n) = B_q(\delta)\omega(n), \quad n = 1, \dots, N \tag{4}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A_p(\delta) &= 1 - a_1\delta^1 - a_2\delta^2 - \dots - a_p\delta^p \\ B_q(\delta) &= 1 + b_1\delta^1 + b_2\delta^2 + \dots + b_q\delta^q \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

δ 是单位延时因子, $A_p(\delta)$ 和 $B_q(\delta)$ 的根在单位圆内, 以保证模型的稳定和可逆.

定理 1^[2] 当信号 $\{x(n)\}$ 服从 ARMA(p, q) 模型时, D 倍抽取 (h 点长 FIR 低通滤波器) 结果服从 ARMA(p, q^*) 模型, AR 阶数为 p , MA 阶数为 $q^* = [p(D-1) + h + q - 1]/D$, 且模型参数由 $x(n)$ 确定: 其 AR 多项式 $C_p(\delta) = (1 - r_1^D\delta)(1 - r_2^D\delta) \dots (1 - r_p^D\delta)$, 其中 r_1, \dots, r_p 是式 (5) 中 $A_p(\delta)$ 的根, MA 多项式为 $D_{q^*}(\delta) = 1 + d_1\delta^1 + d_2\delta^2 + \dots + d_{q^*}\delta^{q^*}$.

2.2 多抽样率下的 ARMA 建模

由定理 1 可知, 在图 1 所示的多抽样率处理中, $x(n)$ 与 $y(n)$ 之间的变尺度 ARMA 建模关键是要实现 $x(n)$ 与内插结果 $w(n)$ 之间的 ARMA 建模.

设 $x(n)$ 服从 ARMA(p, q) 模型, 由定理 1 的逆定理可知, I 倍内插结果 $w(n)$ 也服从 ARMA 模型, 设其 AR 模型阶数为 p , MA 模型阶数小于等于 p . 设 $A_p(\delta) = \prod_{j=1}^p (1 - r_j\delta)$ 是 $x(n)$ 的 AR 多项式, $C_p(\delta) = \prod_{j=1}^p (1 - s_j\delta)$ 是 $w(n)$ 的 AR 多项式, 由定理 1 的逆定理可确定 $A_p(\delta)$ 与 $C_p(\delta)$ 的根具有 I 次幂关系: $s_j = r_j^{1/I} (j = 1, 2, \dots, p)$, 则 $x(n)$ 内插结果 $w(n)$ 的 AR 多项式 $C_p(\delta)$ 为

$$C_p(\delta) = \prod_{j=1}^p (1 - r_j^{1/I}\delta) = 1 - t_1\delta^1 - t_2\delta^2 - \dots - t_p\delta^p \tag{6}$$

下一步则根据 $w(n)$ 的相关函数 $R_{ww}(k)$ 确定其 MA 多项式 $D_{q^*}(\delta)$. 由图 1 可知, $w(n)$ 经 $x(n)$ 内插获得, 等价于 $x(n)$ 为 $w(n)$ 的 I 倍抽取结果. 设 h_1 点长 FIR 滤波器 H_1 的单位取样响应为 $H_1(\delta)$, 则

$$x(n) = H_1(\delta)w(nI), \quad n = 1, \dots, N \tag{7}$$

相关函数

$$R_{xx}(k) = H_1(\delta)H_1(\delta^{-1})R_{ww}(Ik) \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} R_{xx}(0) \\ R_{xx}(1) \\ \vdots \\ R_{xx}(p) \end{bmatrix} = G_{h_1}(p) \begin{bmatrix} R_{ww}(0) \\ R_{ww}(1) \\ \vdots \\ R_{ww}(Dp + h_1 - 1) \end{bmatrix}, \quad p \geq 0 \tag{9}$$

其中 $G_{h_1}(p)$ 为 $H_1(\delta)H_1(\delta^{-1})$ 的系数矩阵, 阶数为 $p \times (Dp + h_1)$ 。因为 $w(n)$ 的 MA 模型阶数小于等于 p , 所以当 $k > p$ 时, $R_{xx}(k) = \sum_{j=1}^p t_j R_{xx}(k-j)$, 其中, $t_j (1 \leq j \leq p)$ 为式 (6) 中 $w(n)$ 的 AR 多项式系数, 则

$$\begin{bmatrix} R_{ww}(0) \\ R_{ww}(1) \\ \vdots \\ R_{ww}(Dp + h_1 - 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ f_{p+1} \\ \vdots \\ f_{Dp+h_1-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{ww}(0) \\ R_{ww}(1) \\ \vdots \\ R_{ww}(p) \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中 I 是 $(p+1) \times (p+1)$ 阶单位矩阵, 矢量 $f_{p+1}, \dots, f_{Dp+h_1-1}$ 是由 $w(n)$ 的 AR 参数递归求得, $f_{p+1} = [0 \ t_p \ t_{p-1} \ \dots \ t_1]$, 对于 $k > 1$, $f_{p+k} = \sum_{i=1}^{k-1} t_i f_{p+k-i} + [0 \ \dots \ t_p \ \dots \ t_k]$ 。

令 $F = G_{h_1}(p)[I \ f_p^T \ \dots \ f_{Dp+h_1-1}^T]^T$, 如果 F 非奇异, $w(n)$ 的相关函数 $R_{ww}(k)$ 可由 $x(i)$ 的相关函数 $R_{xx}(k)$ 获得^[3]。

$$\begin{bmatrix} R_{ww}(0) \\ R_{ww}(1) \\ \vdots \\ R_{ww}(p) \end{bmatrix} = F^{-1} \begin{bmatrix} R_{xx}(0) \\ R_{xx}(1) \\ \vdots \\ R_{xx}(p) \end{bmatrix} \tag{11}$$

对 $k > p$ 时, 相关值 $R_{ww}(k)$ 由式 (10) 求得, 至此, $x(n)$ 内插结果 $w(n)$ 的 MA 参数可以全部求出。根据 $w(n)$ 的 ARMA 参数, 利用定理 1 可得到 $y(n)$ 的 ARMA 模型参数。

由此可知, 如果观测信号服从 ARMA 模型, 根据在抽取和内插下的模型参数, 可以得到信号在多抽样率下的 ARMA 模型, 实现信号的变尺度。

3 仿真实验及结果分析

从数学角度看, 平稳随机过程主要通过功率谱密度来描述其统计特性, ARMA 模型参数仅依赖于均值和相关系数具有平移不变性, 则 ARMA 模型参数计算出的功率谱密度也具有平移不变性。通过多抽样率 ARMA 建模, 计算回波数据在模板尺度下的 ARMA 模型参数, 得到模板尺度下回波数据的功率谱密度, 此时尺度匹配回波数据的功率谱密度相对于模板数据功率谱密度应具有平移不变性和尺度不变性。

图 2 中, 以锥体目标为例, 给出了雷达观测空间旋转目标的示意图, 在目标运动过程中 (图 2(a)), 雷达波会在目标 A, B, C 方向产生镜面反射 (图 2(b)), 雷达目标周期回波中会有 3 个明显的波峰, 如图 3。

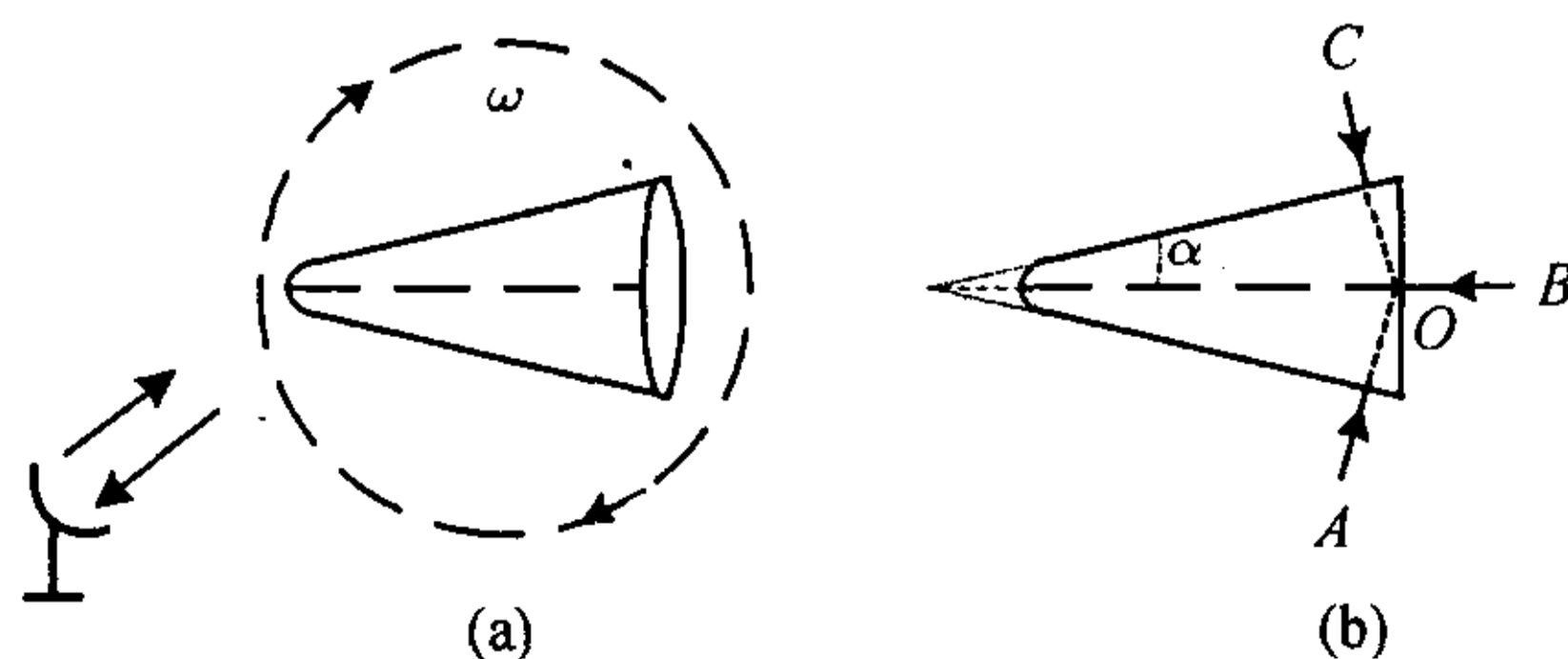


图 2 雷达观测空间旋转目标示意图

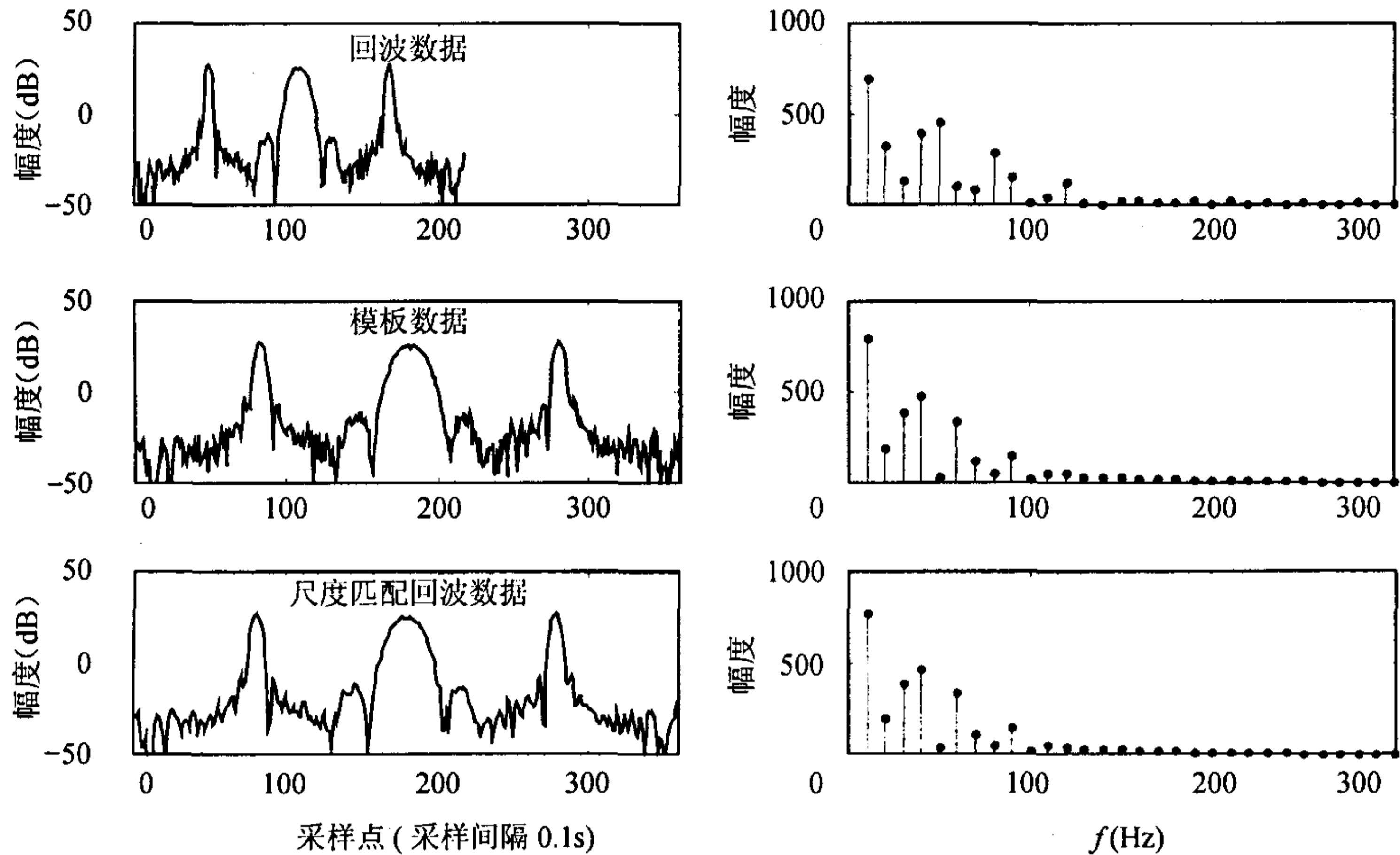


图 3 回波数据、模板数据和尺度匹配回波数据与相应功率谱密度比较

图 3 中, 左侧分别为空间旋转目标 RCS 的一个回波周期、模板数据以及多抽样率 ARMA 建模得到的尺度匹配回波数据, 右侧是各数据对应的功率谱密度。根据图 3 可以看出, 由于目标旋转速率或雷达观测周期的不确定, 使得回波数据与模板数据采样率不一致, 相应的功率谱密度差别明显。在尺度匹配过程中, 首先计算相同姿态角范围下回波数据与模板数据的采样率比值, 确定多抽样率 ARMA 建模中的内插倍数和抽取倍数, 然后确定对回波数据 ARMA 建模的阶数, 实验中采用了 ARMA(15, 10)。根据实验结果可以看出, 由于多抽样率处理过程中采用了低通滤波器, 尺度匹配回波数据相对于原始数据失去部分高频分量, 但尺度匹配数据与模板数据的功率谱密度近似程度很高。

4 结论

本文提出了多抽样率 ARMA 建模方法, 基于此实现了空间旋转目标观测数据与模板数据在同一尺度下进行匹配。文中给出了多抽样率下 ARMA 建模的一般过程, 结合实际数据特点, 也可采用 AR 模型、MA 模型等。实验过程中发现, 由于低通滤波器的影响, 对于高频分量丰富的信号, 多抽样处理后易出现较大失真。

参 考 文 献

- [1] 宗孔德. 多抽样率信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1996: 21-31.
- [2] Wei W W S, Stram D O. Disaggregation of time series models. *J. Royal Stat. Soc.*, 1990, 52(2): 453-467.
- [3] Eom M B, Chellappa R. Noncooperative target classification using hierarchical modeling of high-range resolution radar signatures. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 24(9): 2318-2327.

刘永祥: 男, 1976 年生, 博士生, 曾获 1998 年国际数学建模竞赛一等奖, 已发表学术论文 5 篇. 研究领域包括雷达目标识别、信息融合等.

黎 湘: 男, 1967 年生, 博士, 教授, 已发表学术论文二十余篇. 目前主要从事精确制导、信息融合、非线性信号处理等领域的研究工作.

庄钊文: 男, 1958 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 电子科学与工程学院院长. 从事信号处理、自动目标识别、模糊技术等领域的研究工作.