

弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法

罗迎^{*①} 柏又青^② 张群^{①③} 段艳丽^① 朱丰^①

^①(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

^②(空军工程大学理学院 西安 710051)

^③(复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室 上海 200433)

摘要: 针对传统逆合成孔径雷达(ISAR)成像中的平动补偿方法并不适用于弹道目标平动补偿的问题, 该文提出了一种弹道目标平动补偿与微多普勒(m-D)特征提取方法。在分析有翼弹道目标未完成平动补偿时的 m-D 效应的基础上, 首先采用形态学中的骨架提取方法抑制 1 维距离像旁瓣, 再在快时间频率(距离)-慢时间平面上搜索分离各散射点的 m-D 特征曲线, 然后对其进行经验模式分解(EMD)分解, 利用分解结果中的趋势项分量完成目标回波的平动补偿, 并通过分析 EMD 分解结果获得了目标的自旋频率、锥旋频率等特征信息。仿真实验验证了所提方法的有效性与鲁棒性。

关键词: 目标识别; 弹道目标; 微多普勒(m-D); 经验模式分解(EMD)

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)03-0602-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607

Translational Motion Compensation and Micro-Doppler Feature Extraction of Ballistic Targets

Luo Ying^① Bai You-qing^② Zhang Qun^{①③} Duan Yan-li^① Zhu Feng^①

^①(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

^③(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The translational motion compensation methods for conventional Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) are not suitable for ballistic targets. In the paper, an algorithm for ballistic targets' translational motion compensation and micro-Doppler (m-D) feature extraction is proposed. Based on the analysis of m-D effect of ballistic targets with tails without translational motion compensation, the skeleton extraction algorithm in morphology image processing is firstly utilized to suppress the sidelobes of range profile, and then the m-D curves on the range-slowtime plane are separated. The Empirical-Mode Decomposition (EMD) algorithm is then utilized to obtain the translational motion component from the m-D curves for translational motion compensation. The micro-motion features of target such as spinning frequency and coning frequency are also obtained from the EMD results. Simulations are given to validate the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Key words: Target recognition; Ballistic targets; micro-Doppler (m-D); Empirical-Mode Decomposition (EMD)

1 引言

弹道目标在平动飞行过程中, 为了保持姿态稳定, 需绕自身对称轴作自旋运动, 同时由于弹箭分离以及诱饵释放时形成的横向作用力, 目标还将绕空间某定向轴进行进动, 这些精细运动特征为弹道目标识别提供了重要特征信息。“微多普勒(micro-

Doppler, m-D)特征”正是反映目标精细运动特征的一个物理概念^[1,2], 可为完成对特殊目标的分类、识别、成像提供重要信息^[3,4]。因此, 基于 m-D 效应的弹道目标识别近年来得到了广泛深入的研究^[5-7]。

从公开文献来看, 现有的弹道目标 m-D 特征提取方法研究大多是在假设目标平动已被准确补偿的基础上开展的, 在这种假设条件下, 目标的 m-D 效应通常表现为正弦曲线(如锥顶散射点的锥旋运动引起的 m-D 效应)^[5]或多个正弦分量的合成(如旋转对称体弹头的不连续圆环处散射点的 m-D 效应)^[6],

2011-06-20 收到, 2011-11-18 改回

国家自然科学基金(60971100, 61172169)和国家自然科学基金(61102109)资助课题

*通信作者: 罗迎 luoying2002521@163.com

有翼弹头尾翼散射点进动引起的 m-D 效应^[7]等), 现有的一些 m-D 特征提取方法如经验模式分解 (Empirical-Mode Decomposition, EMD)^[3], 扩展 Hough 变换^[8]等方法都可以取得较好的效果。但在实际情况中, 目标的平动参数难以准确估计, 必然存在估计误差, 这将导致观测到的 m-D 特征曲线附加了平动引起的调制项, 从而与理论的 m-D 特征曲线存在差异, 给特征提取与成像带来了困难, 必须研究有效的平动补偿方法来解决该问题。

本文重点针对宽带信号条件下的有翼弹道目标平动补偿与 m-D 特征提取展开研究。由于弹道目标的自旋与锥旋运动, 其散射点距离走动现象十分严重, 因此传统的基于包络对齐与相位校正的平动补偿方法无法适用于弹道目标的回波信号处理。针对该问题, 本文提出了一种弹道目标平动补偿方法, 完成了对回波信号的平动补偿, 同时还获得了目标的自旋频率、锥旋频率等微动特征信息。

2 宽带信号下有翼弹道目标 m-D 效应

弹道目标的外形一般近似于锥体, 对于有翼弹道目标, 其等效多散射中心主要包括锥顶散射点与尾翼边缘散射点, 由此可以构建弹道目标的散射模型如图 1 所示, 目标主要由位于锥顶的 A 点、位于底面边缘的尾翼散射点 B 和 C 构成(为了画图清晰起见, 假设目标只包括两个尾翼)。弹道目标以角速度 ω_s 绕自身对称轴 $O'z$ 自旋的同时, 以角速度 ω_c 绕空间某定向轴作锥旋运动, 自旋轴与锥旋轴的交点为 O' 。(U, V, W) 为雷达坐标系, 其坐标原点为 O , 雷达位于坐标原点; (x, y, z) 为目标本地坐标系, 也称为弹体坐标系, 其坐标原点为 O' , 本地坐标系随目标的运动而运动; (X, Y, Z) 为参考坐标系, 其坐标原点也为 O' , 参考坐标系 (X, Y, Z) 与雷达坐标系 (U, V, W) 平行, 只随目标的平动而运动。弹道目标在大气层外通常近似为平稳飞行, 因此采用匀加速运动模型就可以较好地描述目标的平动, 设径向初始速度为 v , 径向加速度为 a 。

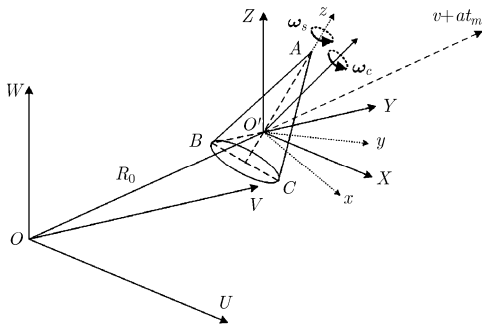


图1 弹道目标运动示意图

设雷达发射信号为线性调频信号, 在慢时间 t_m 时刻, 目标上某散射点的回波信号可表示为

$$s_r(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau(t_m)}{T_p}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c(t - \tau(t_m)) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau(t_m))^2\right)\right] \quad (1)$$

其中 t 为快时间, T_p 为脉冲宽度, f_c 为起始载频, μ 为调频斜率, $\tau(t_m) = 2R(t_m)/c$ 为 t_m 时刻散射点到雷达的距离延时, 且有 $R(t_m) \approx R_0 + R_1 + vt_m + at_m^2/2$, 其中 R_0 为初始时刻 O' 点到雷达位置 O 点的距离, R_1 为该散射点到 O' 点的距离在雷达视线方向 (LOS) 的投影值。在理想条件下, 为了完成准确的运动补偿, 取 O' 点的回波信号为参考信号, 其回波延迟时间为 $\tau_{\text{ref}}(t_m) = 2R_{\text{ref}}(t_m)/c$, 且有 $R_{\text{ref}}(t_m) = R_0 + vt_m + at_m^2/2$ 。将该参考信号与目标回波信号进行“dechirp”处理, 然后在快时间域进行傅里叶变换, 并去除剩余视频相位 (RVP) 项和包络斜置项后得到

$$S_c(f, t_m) = T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c}R_1\right)\right) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_1\right] \quad (2)$$

可见完成距离压缩后回波信号在距离向上聚焦为 sinc 函数, 其峰值位置 $f = -2\mu R_1/c$ 反映了散射点与参考点到雷达之间的距离差。

但在实际应用中, O' 点的回波信号是无法准确获得的, 因为 $R_{\text{ref}}(t_m)$ 无法准确得到, 通常只能通过测距得到 R_0 的估计值 R'_0 , 以及通过测速得到 v 的估计值 v' , 所以构造出的参考信号的距离延迟为 $R_{\text{ref}}(t_m) = R'_0 + v't_m$, 距离压缩后得到的距离像为

$$S'_c(f, t_m) = T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c}\Delta R(t_m)\right)\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right] \quad (3)$$

其中 $\Delta R(t_m) = R_1 + (R_0 - R'_0) + (v - v')t_m + at_m^2/2$ 。

若式(1)为锥顶散射点 A 的回波, 设线段 $O'A$ 在本地坐标系中对应的矢量为 \mathbf{r}_A , 则有

$$R_1 = (\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_A)^T \mathbf{n} \quad (4)$$

其中 \mathbf{n} 为雷达视线方向单位矢量, \mathbf{R}_{init} 为初始旋转矩阵; $\mathbf{T}_{\text{coning}}$ 为散射点锥旋对应的旋转矩阵, 当锥旋角速度 $\omega_c = [\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}]^T$, $\Omega_c = \|\omega_c\|$, $\omega'_c = [\omega'_{cx}, \omega'_{cy}, \omega'_{cz}]^T = \omega_c / \|\omega_c\|$ 时, 可以得到^[1]

$$\mathbf{T}_{\text{coning}} = \mathbf{I} + \hat{\omega}'_c \sin \Omega_c t_m + \hat{\omega}'_c{}^2 (1 - \cos \Omega_c t_m),$$

$$\hat{\omega}'_c = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_{cz} & \omega'_{cy} \\ \omega'_{cz} & 0 & -\omega'_{cx} \\ -\omega'_{cy} & \omega'_{cx} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 I 为单位矩阵。由式(3), 式(4)可知, 在由式(3)确定的 $f-t_m$ 平面上, 利用 $\Delta R(t_m) = -cf/(2\mu)$ 进行距离定标后, 距离像峰值位置即为由 $\Delta R(t_m)$ 确定的曲线。分析式(3)中的 $\Delta R(t_m)$, 右边第 1 项 R_1 随慢时间 t_m 作正弦形式的变化, 变化周期为锥旋运动的周期 $T_c = 2\pi/\Omega_c$, 此即目标微多普勒效应在宽带信号形式下的表现形式; 其余项为参考信号的距离延迟误差引起的平动项。

对于底面边缘的尾翼散射点 B 或 C , 其运动表现为自旋运动和锥旋运动的合成, 以散射点 B 为例, 在不考虑散射点遮挡效应时, 有

$$R_1 = [\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{T}_{\text{spinning}} \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_B]^T \mathbf{n} \quad (6)$$

其中 \mathbf{r}_B 为 $\overline{O'B}$ 在本地坐标系中对应的向量, $\mathbf{T}_{\text{spinning}}$ 为自旋对应的旋转矩阵, 当自旋角速度 $\boldsymbol{\omega}_s = [\omega_{sx}, \omega_{sy}, \omega_{sz}]^T$, $\Omega_s = \|\boldsymbol{\omega}_s\|$, $\boldsymbol{\omega}'_s = [\omega'_{sx}, \omega'_{sy}, \omega'_{sz}]^T = \boldsymbol{\omega}_s / \|\boldsymbol{\omega}_s\|$ 时, 可以得到

$$\mathbf{T}_{\text{spinning}} = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}'_s \sin \Omega_s t_m + \hat{\boldsymbol{\omega}}'^2_s (1 - \cos \Omega_s t_m),$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}'_s = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_{sz} & \omega'_{sy} \\ \omega'_{sz} & 0 & -\omega'_{sx} \\ -\omega'_{sy} & \omega'_{sx} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

同样地, 将式(6)代入式(3)中的 $\Delta R(t_m)$ 进行分析, 可知 $\Delta R(t_m)$ 右边第 1 项 R_1 对应于散射点 B 的微多普勒效应, 与散射点 A 的微多普勒效应相比, 散射点 B 的微多普勒效应在 $f-t_m$ 平面上的变化曲线不再是简单的正弦曲线, 而是表现为更为复杂的曲线形式, 但容易证明该曲线的周期为锥旋周期和自旋周期的最小公倍数; 其余项为参考信号的距离延迟误差引起的平动项。

平动项的存在使得由式(3)确定的微多普勒特征曲线呈现为不规则曲线, 必须采取一定的措施予以消除。由于弹头目标各次回波的距离像峰值在平动补偿后表现为式(4)或式(6)所示的曲线变化特征, 因此传统 ISAR 中的基于包络对齐和相位校正的平动补偿方法在此难以适用, 必须寻求新的适合弹头目标的平动补偿方法。

3 m-D 曲线分离

3.1 1 维距离像旁瓣抑制

在数字信号处理中, 式(3)中的 $|S'_c(f, t_m)|$ 实质上被表示为一个实矩阵, 因此图像处理中的一些算法可被用来对 $|S'_c(f, t_m)|$ 进行处理, 如形态学图像处理中的骨架提取算法。通过提取 $|S'_c(f, t_m)|$ 中 m-D 曲线的骨架, 就可达到抑制距离像旁瓣引起的曲线变“粗”的现象。根据形态学图像处理理论, $|S'_c(f, t_m)|$ 的骨架提取可由“腐蚀”运算和“开”运算实现,

即表示为^[9]

$$S(|S'_c(f, t_m)|) = \bigcup_{k=0}^K S_k(|S'_c(f, t_m)|) \quad (8)$$

其中

$$S_k(|S'_c(f, t_m)|) = (|S'_c(f, t_m)| \ominus kB) - (|S'_c(f, t_m)| \ominus kB) \circ B \quad (9)$$

其中 B 为结构元素, “ \ominus ”表示“腐蚀”运算, “ \circ ”表示“开”运算, $(A \ominus kB)$ 表示连续 k 次用 B 对 A 腐蚀, 即

$$(|S'_c(f, t_m)| \ominus kB) = (\dots(|S'_c(f, t_m)| \ominus B) \ominus B) \ominus \dots) \ominus B \quad (10)$$

K 为将 A 腐蚀成空集前的最后 1 次迭代次数, 即

$$K = \max \{k \mid (|S'_c(f, t_m)| \ominus kB) \neq \emptyset\} \quad (11)$$

通常情况下, 由于旁瓣的影响, $f-t_m$ 平面上的 m-D 曲线并不理想光滑, 为了避免曲线“毛刺”对骨架提取的不利影响, 可先对 $|S'_c(f, t_m)|$ 进行高斯平滑处理, 并设置合适阈值将其转化为二值图像, 在此基础上再提取曲线骨架。

3.2 $f-t_m$ 平面上 m-D 曲线分离

抑制 m-D 曲线的距离像旁瓣并提取其骨架后, 再进一步对各条 m-D 曲线进行分离处理。由式(3)中的 $\Delta R(t_m)$ 确定的 m-D 曲线方程的导函数是关于 t_m 的连续函数, 这说明各散射点对应的 m-D 曲线是光滑的, 因此可利用曲线的光滑性来实现各条 m-D 曲线的分离。设式(3)中的 $|S'_c(f, t_m)|$ 表示为 $M \times N$ 的矩阵 \mathbf{M}_S , M 为距离向的采样点数, N 为方向向采样点数, 从 \mathbf{M}_S 中分离各条 m-D 曲线的算法步骤如下:

步骤 1 初始化: 令 $i=1$, $d=0$, $\mathbf{c}^{N \times 1}$ 为零向量;

步骤 2 求 \mathbf{M}_S 中第 i 列中大于阈值 ε 的局部极大值, 这些极大值点在 \mathbf{M}_S 中的行序号构成序列 \mathbf{r}_m , 设 \mathbf{r}_m 中共包括 p 个元素, 并令 $i_p=1$, $\mathbf{c}(1) = \mathbf{r}_m(i_p)$ 。建立零矩阵 $\mathbf{C}^{N \times p}$;

步骤 3 $i=i+1$, 搜索 \mathbf{M}_S 中第 i 列中大于阈值 ε 的点, 其行序号构成序列 \mathbf{r}'_m , 序列中元素序号为 i'_p 。若 \mathbf{r}'_m 中元素个数大于 0, 转步骤 4, 若 \mathbf{r}'_m 中元素个数等于 0, 则 $d=d+1$, 并转步骤 5;

步骤 4 判断: 当 $i=2$ 时,

$$\mathbf{c}(i) = \arg \min_{i'_p} |\mathbf{r}'_m(i'_p) - \mathbf{c}(i-1)| \quad (12)$$

当 $2 < i < i_0$ 时, 令

$$c(i) = \arg \min_{i_p} \left| \left[r'_m(i'_p) - c(i-1) \right] - \frac{1}{i-2} \sum_{i_d=3}^i [c(i_d-1) - c(i_d-2)] \right| \quad (13)$$

当 $i_0 \leq i \leq N$ 时, 令

$$c(i) = \arg \min_{i_p} \left| \left[r'_m(i'_p) - c(i-1) \right] - \frac{1}{i_0-2} \sum_{i_d=i-i_0+3}^i [c(i_d-1) - c(i_d-2)] \right| \quad (14)$$

然后转步骤6;

步骤5 判断: 当 $d \geq D$ 时, 终止该条曲线的搜索, 转步骤7; 当 $d < D$ 时, 令 $r'_m = [1, 2, \dots, M]$, 转步骤4;

步骤6 判断: 当 $i < N$, 转步骤3; 当 $i = N$, 转步骤7;

步骤7 令 $C^{N \times p}$ 中的第 i_p 列等于 $c^{N \times 1}$, $M_S(i_d, c(i_d))$ ($i_d = 1, 2, \dots, N$) 即为提取到的一条 m-D 曲线。令 $M_S(i_d, c(i_d)) = 0$, $i_p = i_p + 1$, $i = 1$, $d = 0$, $c^{N \times 1}$ 中所有元素归零。当 $i_p \leq p$ 时, 令 $c(1) = r'_m(i_p)$, 然后转步骤3;

步骤8 当 $i_p > p$ 时, 终止搜索, 得到的矩阵 $C^{N \times p}$ 中的每一列代表一条 m-D 曲线。

由以上步骤可以看出, 在分离 M_S 中的 m-D 曲线时, 采用了“清除(Clean)”的思想, 即每提取到1条 m-D 曲线, 就将该曲线从 M_S 中剔除(见步骤7), 以尽量避免曲线之间的相互影响。算法中设置 i_0 的目的是考察曲线在长度为 i_0 区间内的光滑性, 由该区间内的曲线各点上导数的均值来预测下一个点的位置; 设置参数 d 的目的是为了克服清除操作后曲线可能出现的不连续性, 当 $d \geq D$, 即曲线的不连续点数超过阈值 D 后才判定已搜索到该曲线的末端; 设置阈值 ε 的目的是保证搜索过程中只搜索具有较大能量的点, 以避免旁瓣和杂波的影响, 阈值 ε 的大小可根据实际应用情况来确定, 若在骨架提取步骤中已将图像转化为二值图像, 则设置 $\varepsilon = 0$ 即可。

4 平动补偿与 m-D 曲线特征提取

4.1 经验模式分解(EMD)

经验模式分解(EMD)^[10]将具有如下两条性质的信号 $a(t)$ 定义为 IMF(Intrinsic Mode Function): (1) 该信号的极大值点和极小值点的个数与过零点的个数相等或至多相差1; (2) 它的极大值点包络与极小值点包络关于 t 轴对称。对于 IMF, 用 Hilbert 变换求出其相位函数后, 对相位求导即可得到其瞬时频

率, 而一般信号通常不满足 IMF 条件, 因此可用 EMD 方法将信号的 IMF 分量筛分出来。首先根据 $a(t)$ 的极大值点和极小值点求出其上包络 $v_1(t)$ 和下包络 $v_2(t)$ 的平均值 m :

$$m = \frac{1}{2}(v_1(t) + v_2(t)) \quad (15)$$

然后考察 $a(t)$ 与 m 的差 h , 将 h 视为新的 $a(t)$, 重复以上操作, 直到 h 满足 IMF 条件时, 记 $\text{IMF}_1 = h$ 。令 $r(t) = a(t) - \text{IMF}_1$, 视 $r(t)$ 为新的 $a(t)$, 重复以上过程, 依次得到 $\text{IMF}_2, \text{IMF}_3, \dots$, 直到 $r(t)$ 基本呈单调趋势或 $|r(t)|$ 很小时停止分解。因此, 原信号已被分解为多个 IMF 分量和一个剩余分量 $r(t)$, 即

$$a(t) = \sum_{l=1}^L \text{IMF}_l + r(t) \quad (16)$$

对信号 $a(t)$ 完成上述 EMD 分解后, 得到的第1个 IMF 分量 IMF_1 为 $a(t)$ 中频率最高的成分, 随着 IMF 阶数的增加, 对应的频率成分越低, 余量 $r(t)$ 为频率最低的成分, 即为信号的趋势项。

4.2 平动补偿与 m-D 分量分析

由式(3)中的 $\Delta R(t_m)$ 确定的 m-D 曲线可知, m-D 曲线包括趋势项 $(R_0 - R'_0) + (v - v')t_m + at_m^2/2$ 和振荡项 R_1 , 因此对 m-D 曲线做 EMD 分解后, 得到的余量 $r(t_m)$ 即为平动分量。由于无论对于锥顶散射点还是锥底边缘的尾翼散射点, 其 m-D 曲线的趋势项都是相同的, 因此可对各条 m-D 曲线分解得到的余量 $r(t_m)$ 进行平均以提高平动分量的估计精度, 并可在一定程度上克服 EMD 分解中求取信号包络时采用三次样条函数拟合带来的边界效应。求得平动分量 $r(t_m)$ 后, 借助傅里叶变换的移位特性来完成距离像包络补偿, 即

$$S'_{c1}(f, t_m) = \text{IFFT}_F \left\{ \text{FFT}_f \left[S'_c(f, t_m) \right] \cdot \exp[-j2\pi F \cdot r(t_m)] \right\} \quad (17)$$

其中 FFT_f 为 f 域的傅里叶变换算子, IFFT_F 为 F 域的逆傅里叶变换算子。完成包络补偿后, 再根据式(18)进行相位校正:

$$S'_{c2}(f, t_m) = S'_{c1}(f, t_m) \cdot \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} r(t_m) \right] \quad (18)$$

至此完成平动补偿处理。在此基础上, 就可进一步采用已有的一些微多普勒特征提取方法来实现微动特征重构和目标散射分布重构, 如扩展 Hough 变换法^[8]等。

由于 EMD 分解得到的 IMF 分量一般都具有明确的物理意义, 因此在理想条件下, 从 EMD 分解结果里, 我们可以得到目标的一些微动特征参数。比如, 对于锥顶散射点, 由式(3)与式(4)可知, 其

m-D 曲线由一个正弦信号分量与平动分量组成, 因此 EMD 分解得到的 IMF_1 即为锥旋微多普勒分量, 该分量的周期即为弹头目标的锥旋周期。对于锥底边缘的尾翼散射点, 由式(5)和式(7)可以得到

$$\begin{aligned} T_{\text{coning}} T_{\text{spinning}} = & \left(\mathbf{I} + \hat{\omega}_c'^2 \right) \left(\mathbf{I} + \hat{\omega}_s'^2 \right) + \left(\hat{\omega}_s' + \hat{\omega}_c'^2 \hat{\omega}_s' \right) \\ & \cdot \sin(\Omega_s t_m) - \left(\hat{\omega}_s'^2 + \hat{\omega}_c'^2 \hat{\omega}_s'^2 \right) \cos(\Omega_s t_m) \\ & + \left(\hat{\omega}_c' + \hat{\omega}_c' \hat{\omega}_s'^2 \right) \sin(\Omega_c t_m) + \hat{\omega}_c' \hat{\omega}_s' \\ & \cdot \sin(\Omega_c t_m) \sin(\Omega_s t_m) - \hat{\omega}_c' \hat{\omega}_s'^2 \\ & \cdot \sin(\Omega_c t_m) \cos(\Omega_s t_m) - \left(\hat{\omega}_c'^2 + \hat{\omega}_c'^2 \hat{\omega}_s'^2 \right) \\ & \cdot \cos(\Omega_c t_m) - \hat{\omega}_c'^2 \hat{\omega}_s' \cos(\Omega_c t_m) \\ & \cdot \sin(\Omega_s t_m) + \hat{\omega}_c'^2 \hat{\omega}_s'^2 \cos(\Omega_c t_m) \cos(\Omega_s t_m) \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)代入式(6), 经过化简后可知, 式(6)右边主要包括 4 种频率成分的信号, 即 $\Omega_c + \Omega_s$, Ω_c , Ω_s 和 $|\Omega_c - \Omega_s|$ 。因此, 对尾翼散射点的 m-D 曲线做 EMD 分解时, 得到的 IMF_1 分量即为频率成分为 $\Omega_c + \Omega_s$ 的分量, IMF_2 分量为 Ω_c 与 Ω_s 中较大的频率成分, IMF_3 分量为 Ω_c 与 Ω_s 中较小的频率成分, IMF_4 分量为频率成分为 $|\Omega_c - \Omega_s|$ 的分量。由于根据锥顶散射点 m-D 曲线的 EMD 分解结果已获得了锥旋频率 Ω_c , 因此根据锥底边缘的尾翼散射点的 IMF_1 分量即可求得自旋频率 Ω_s 。

以上分析是基于提取到的 m-D 曲线十分准确的理想情况展开的, 但在实际应用中, 由于距离向采样引入的量化误差, 提取到的 m-D 曲线并非理想光滑, $c^{N \times 1}$ 具有由距离向采样单元长度决定的量化误差, 导致曲线局部呈现为阶梯形状, 从而引入了高频分量。因此, 在对其做 EMD 分解时, 首先分解得到的 IMF 分量将是这些无用的高频分量, 其次才能获得有用的目标微多普勒信号分量。提高距离向采样率, 并对提取到的 m-D 曲线做平滑处理, 可一定程度上降低量化误差对 EMD 分解的负面影响, 但由于高频分量难以完全消除, 在 EMD 分解时, 有可能导致较低频率成分如 $|\Omega_c - \Omega_s|$ 分量无法提取,

但只要能够提取到锥顶散射点的锥旋分量和尾翼散射点的 $\Omega_c + \Omega_s$ 频率分量, 即可求得自旋频率 Ω_s 。

5 仿真分析

设目标底面半径为 0.5 m, 点 O' 到底面的距离为 0.5 m, 到锥顶的距离为 1.5 m, 目标长度为 2 m。自旋角速度大小为 6π rad/s, 锥旋角速度矢量为 $\omega_c = [9.7081, 0, 29.8783]^T$, 其大小为 $\Omega_c = 10\pi$ rad/s。初始时刻 O' 点在雷达坐标系中的坐标为 (100 km, 300 km, 500 km), O' 点到雷达的距离 $R_0 = 591608$ m, 目标本地坐标系与参考坐标系之间的 Euler 角为 $(\pi/3, \pi/4, \pi/5)$ 。目标径向平动初始速度 $v = 7000$ m/s, 径向加速度 $a = -1$ m/s²。估计的初始时刻 O' 点到雷达的距离 $R_0' = 591607$ m, 目标径向平动速度为 $v' = 7001$ m/s。雷达辐射信号脉宽为 0.5 μ s, $f_c = 12$ GHz, 带宽为 3 GHz。脉冲重复频率为 400 Hz, 回波信号时长为 6 s。图 2(a)给出了采用估计的 R_0' 和 v' 构造参考信号后, 处理得到的 $f-t_m$ 平面上的 m-D 曲线。采用一个 3×3 像素的高斯空间掩模对图 2(a)进行平滑处理, 并转化为二值图像, 再提取曲线的骨架如图 2(b)所示。设置 $i_0 = 10$, $D = 10$, $\varepsilon = 0$, 提取到的 m-D 曲线如图 2(c)所示, 可见准确地提取到了 3 条 m-D 曲线。

对分离出来的 3 条 m-D 曲线进行平滑, 再做 EMD 分解, 其中散射点 A 和 B 的 m-D 曲线 EMD 分解结果分别如图 3 和图 4 所示。图 3 中 IMF_1 分量和 IMF_2 分量是由于曲线的不光滑性导致的高频分量; IMF_3 分量为锥旋运动对应的微多普勒分量, 其频率为 5 Hz; 余量 $r(t_m)$ 为 m-D 曲线中的平动项。图 4 中的 IMF_1 分量是由于曲线的不光滑性导致的高频分量; IMF_2 分量的频率为 8 Hz, 即 $\Omega_c + \Omega_s$ 分量; IMF_3 分量的频率为 5 Hz, 即锥旋微多普勒分量; IMF_4 分量的频率为 3 Hz, 即自旋微多普勒分量; 余量 $r(t_m)$ 为 m-D 曲线中的平动项。将各条 m-D 曲线分解得到的余量 $r(t_m)$ 进行平均后再按照式(19)和式(20)进行平动补偿, 结果如图 5 所示, 可见取

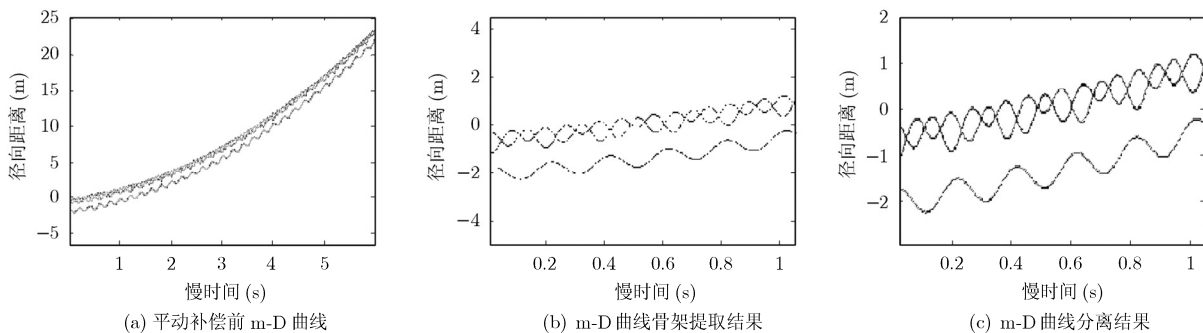


图 2 m-D 曲线旁瓣抑制与分离结果

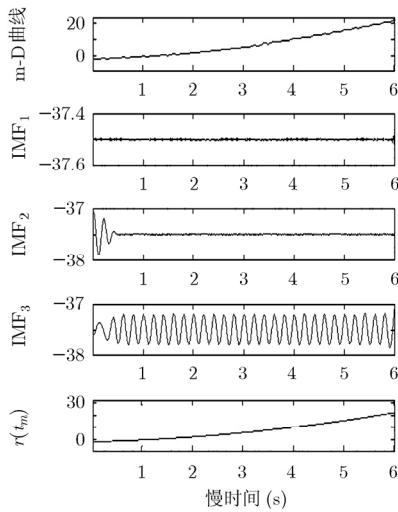


图3 散射点 A 的 m-D 曲线 EMD 分解结果

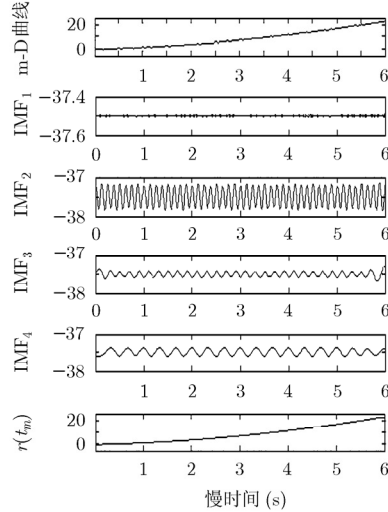


图4 散射点 B 的 m-D 曲线 EMD 分解结果

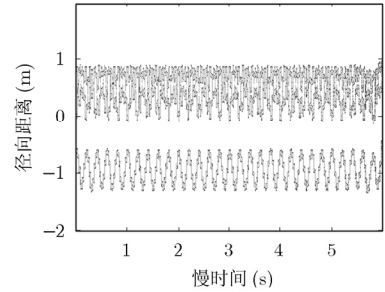


图5 平动补偿结果

得了较好的补偿效果。

接下来考察本文所提算法在噪声条件下的性能表现。假设回波中噪声服从高斯分布，图 6 给出了信噪比为-15 dB 时的处理结果，其中图 6(a)为 $f-t_m$ 平面上的 m-D 曲线；图 6(b)为对图 6(a)做高斯空间掩模平滑后并二值化处理后的结果，由于平滑处理抑制了大量无规则分布的噪声峰值，此时图像的信噪比已大幅提高；图 6(c)为提取到的曲线骨架；图

6(d)为 m-D 曲线分离结果；图 6(e)为散射点 A 的 m-D 曲线的 EMD 分解结果，其中 IMF₃ 分量的频率为 5 Hz，即为锥旋微多普勒分量；图 6(f)为散射点 B 的 m-D 曲线的 EMD 分解结果，其中 IMF₂ 分量为 $\Omega_c + \Omega_s$ 分量，IMF₃ 分量为锥旋微多普勒分量，IMF₄ 分量为自旋微多普勒分量；图 6(g)为经过平动补偿后的 m-D 曲线。由该仿真可以看出，本文所提算法具有良好的抗噪性能，其原因有二：一是在“dechirp”

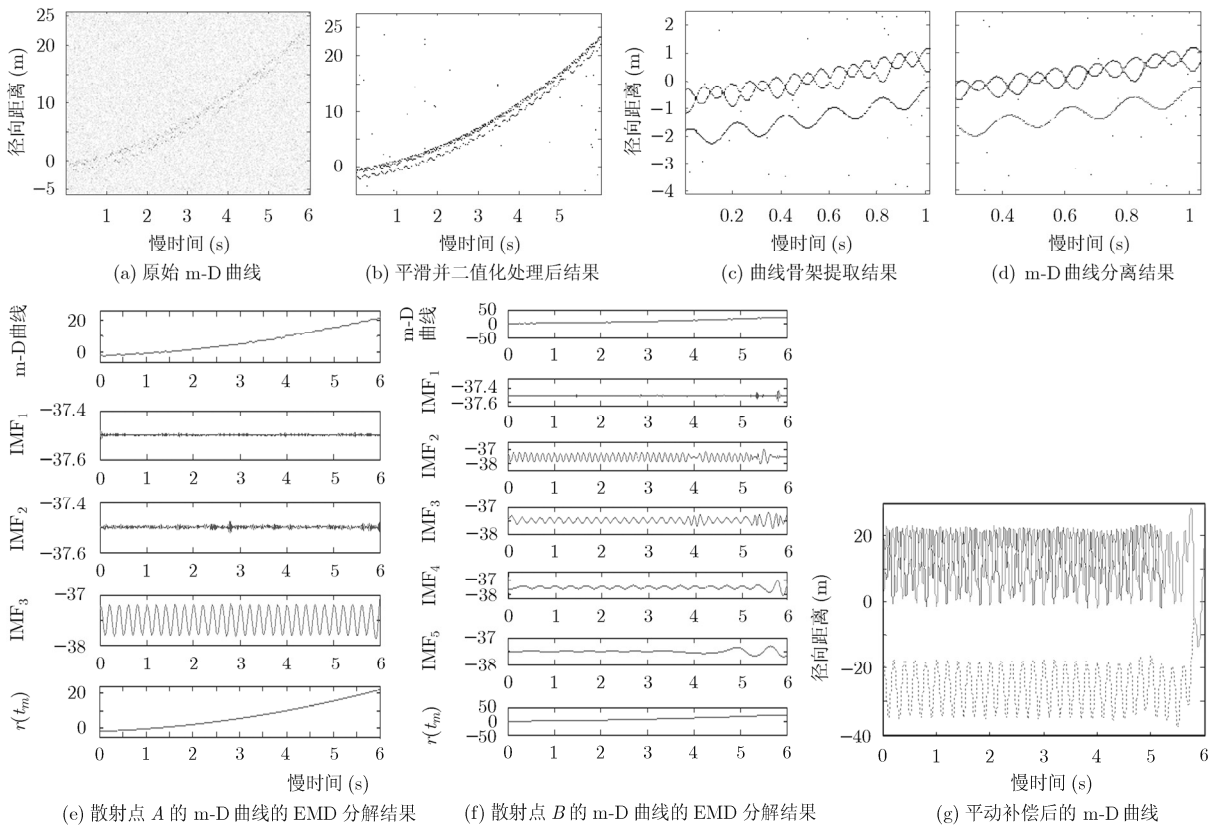


图6 信噪比-15 dB 条件下处理结果

处理获得一维距离像时, 脉冲压缩带来了较高的处理增益; 二是对 $f-t_m$ 平面做高斯平滑可以将大量不规则的噪点滤除, 再设置合适阈值将图像二值化时可显著抑制噪声的影响。

6 结束语

由于弹道目标的自旋与锥旋运动, 传统 ISAR 成像中的运动补偿方法并不适用于宽带条件下弹道目标的平动补偿。本文在分析平动对有翼弹道目标 m-D 特征的影响的基础上, 提出了一种弹道目标平动补偿与 m-D 特征提取的方法, 取得了较好的效果。尽管本文主要是以有翼弹道目标为例进行阐述, 但所提算法同样适用于具有旋转对称性的无翼弹道目标, 因为其锥顶散射点的 m-D 特征曲线为正弦形式, 而据文献[6]报道的最新研究成果, 其锥底边缘散射点的 m-D 特征曲线为多个正弦分量的叠加, 这与有翼弹道目标的 m-D 特征并无本质上的区别。在下一步的研究工作中, 我们将进一步将本文算法拓展到无翼弹道目标平动补偿与 m-D 特征提取方面的应用中。

参考文献

- [1] Chen V C, Li F, Ho S S, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 张群, 罗迎, 何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 22-26.
Zhang Qun, Luo Ying, and He Jin. Review of researches on micro-Doppler effect of radar targets [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2011, 12(2): 22-26.
- [3] Bai Xue-ru, Xing Meng-dao, Zhou Feng, *et al.* Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [4] Luo Ying, Zhang Qun, Qiu Cheng-wei, *et al.* Micro-Doppler effect analysis and feature extraction in ISAR imaging with stepped-frequency chirp signals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2087-2098.
- [5] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 弹道导弹目标微动特性的微多普勒分析与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 954-957.
Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, *et al.* Micro-Doppler analysis and simulation study of micro-motion performance of ballistic missile targets [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(4): 954-957.
- [6] 马梁, 刘进, 王涛, 等. 旋转对称目标滑动型散射中心的微多普勒特性[J]. 中国科学(信息科学), 2011, 41(5): 605-616.
Ma Liang, Liu Jin, Wang Tao, *et al.* Micro-Doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target[J]. *Science in China Ser. F Information Sciences*, 2011, 41(5): 605-616.
- [7] 孙照强, 李宝柱, 鲁耀兵. 弹道中段进动目标的微多普勒研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 538-540.
Sun Zhao-qiang, Li Bao-zhu, and Lu Yao-bing. Research on micro-Doppler of ballistic midcourse target with precession [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(3): 538-540.
- [8] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, *et al.* Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299.
- [9] Gonzalez R C and Woods R E. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. USA, Prentice-Hall, 2002: 543-544.
- [10] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London A-Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.

罗迎: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别。

柏又青: 女, 1959年生, 副教授, 研究方向为应用数学、雷达信号处理等。

张群: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗。

段艳丽: 女, 1963年生, 副教授, 研究方向为信号与信息处理。

朱丰: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别。