

弹道中段进动目标高精度平动补偿方法

贺思三* 赵会宁 张永顺

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

摘要: 该文针对中段进动目标平动补偿问题,分析了中段目标平动及进动的运动特性,指出中段目标进动具有轴对称性,并利用这一特性提出一种基于对称共轭相乘的进动目标平动参数估计方法。该方法通过对称数据的共轭相乘处理消除微动的影响,仅保留平动参数信息,然后根据共轭相乘后数据傅里叶变换的峰值信息估计平动参数,并基于所估计平动参数实现了中段进动目标平动的高精度补偿。仿真结果验证了所提算法的有效性。

关键词: 弹道目标; 平动补偿; 中心对称; 共轭相乘

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)08-1962-07

DOI: 10.11999/JEIT151231

Translation Motion High Accuracy Compensation for Precession Ballistic Target in Midcourse

HE Sisan ZHAO Huining ZHANG Yongshun

(The Aerial Defence and Antimissile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To compensate the translation motion of precession ballistic targets, the characters of translation and precession are analyzed and it is found out that the precession has the center symmetry character. Using this character, a method based on conjugate multiplication of center symmetry data is proposed to estimate the translation motion of precession ballistic target. The precession motion is canceled out due to the conjugate multiplication and the translation motion parameters can be estimated by the spectral peak position of the conjugate multiplied signal. Therefore, the translation motion can be compensated based on the estimated translation motion parameters. Simulation results verify the validity of the proposed algorithm.

Key words: Ballistic target; Translation compensation; Center symmetry; Conjugate multiplication

1 引言

中段目标一般存在自旋、进动、翻滚、章动等微动形式,且不同目标之间微动模式、微动参数存在差别,可利用弹头与诱饵之间微动模式及微动参数的差异对中段目标进行识别。微动特征是中段弹头的固有运动属性,体现了弹头与诱饵的本质差异,是中段目标识别的重要特征来源。近年来,弹道目标微动特征提取及相关技术受到了广泛关注^[1-3]。

中段目标微动是叠加在高速平动基础上的,目标回波信号在多普勒域上表现为在高速平动多普勒基础上存在小幅震荡的微多普勒信息,为了提取目标的微动特征,首先要对高速平动多普勒进行补偿。从现有文献看,中段目标平动补偿方法可分为如下3类:(1)根据多普勒频谱信息对平动进行补偿。文献

[4]首先对弹道目标平动补偿问题进行了研究,针对匀速平动目标提出了基于多普勒中心的速度估计方法;文献[5]针对匀加速平动目标提出了基于模板法的加速度估计方法。上述方法所利用信息为谱信息,基本思想是通过平动参数的搜索使得补偿后信号频谱范围最小。(2)在提取强散射中心瞬时多普勒频率信息的基础上对平动参数进行估计。通过对强散射中心多普勒频率的深入分析,文献[6]提出了基于多普勒极值点信息的平动参数估计方法;文献[7]提出了基于最强散射点多普勒信息的平动参数估计方法。文献[8]通过对强散射中心位置变化信息的分析提出了基于经验模式分解的平动参数估计方法。文献[9]通过对散射中心的跟踪获得散射中心的瞬时多普勒信息,然后通过多项式拟合得到平动参数估计。此类方法首先要获得某散射中心的瞬时多普勒信息。(3)基于目标整体信息对平动参数进行估计。文献[10]利用Randon变换对平动参数进行估计,文献[11]利用分数阶傅里叶变换对平动参数进行补偿,但这两类方法均具有一定局限性,难以在较短时间(一

收稿日期: 2015-11-03; 改回日期: 2016-04-11; 网络出版: 2016-05-24

*通信作者: 贺思三 hesisan@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501995, 61372166)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501995, 61372166)

到两个周期)内实现微动参数的高精度估计。文献[12]利用延迟共轭相乘消除微动影响,保留2次及高次平动信息,从而对目标的二阶以上平动参数进行估计,但不能对目标的速度进行估计。

本文以进动为例对弹道目标平动参数估计问题展开研究,分析了平动和旋转对称目标进动对多普勒频率的影响,根据进动的轴对称特性,提出了一种基于对称共轭相乘处理的弹道目标平动补偿方法。该方法所利用的物理基础为进动的轴对称性,利用了目标的整体回波信息,具有普适性强、适应信噪比低、估计精度高的特点。仿真结果验证了本文算法的有效性。

2 弹道目标中段运动模型

弹道目标中段运动是在自由空间的6自由度运动。在仿真分析中,为了简化研究问题,常将弹道目标的运动分解为质心沿弹道的平动和目标绕质心的微动两部分。在一定假设条件下,质心的平动 $r(t)$ 可近似为椭圆弹道,对其进行多项式展开,有

$$r(t) = R_0 + \sum_{i=1}^L a_i t^i \quad (1)$$

其中, R_0 为初始时刻雷达与目标的距离, L 为多项式展开阶数。对于中段弹道目标而言,由于进动周期一般为数秒,而飞行弹道达数十分钟,在几个微动周期内,弹道的平动可用二阶多项式近似^[5,6]。此时,式(1)可简化为

$$r(t) = R_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (2)$$

其中, v 为速度, a 为加速度。

为了保证弹头再入大气层的再攻角,弹头通过自旋保持指向,而诱饵释放过程中的扰动将使得自旋目标进动。弹头目标的结构一般是类锥形的,具有旋转对称特性。旋转对称目标的散射特性只和入射方向与对称轴的夹角有关^[13],此时,目标上等等效散射中心的由于进动导致的距离变化可用式(3)描述:

$$r_{pm}(t) = x_m \cos \beta(t) + y_m \sin \beta(t) \quad (3)$$

其中, (x_m, y_m) 为第 m 个等效散射中心在目标参考坐标系中的坐标, $\beta(t)$ 为雷达视线方向与旋转对称轴的夹角,具体可表示为^[13]

$$\beta(t) = \arccos(\cos \gamma \cos \theta_p + \sin \gamma \sin \theta_p \cos(\omega_p t + \varphi)) \quad (4)$$

其中, φ 表示初始相位角, γ 表示雷达视线方向与进动轴夹角的平均值, ω_p 表示进动角速度, θ_p 为进动角。

根据上述分析,可得中段目标在脉冲多普勒雷达观测下的回波信号如式(5):

$$s(t) = \sum_{m=1}^M \sigma_m \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (r(t) + r_{pm}(t))\right] \quad (5)$$

其中, f_c 为雷达中心频率, c 为光速, σ_m 表示第 m 个散射中心的散射系数随时间的变化。 $r_{pm}(t)$ 表示微动导致的散射中心位置变化, $r(t)$ 表示弹头目标高速平动导致的位置变化, $r(t)$ 的存在将导致微多普勒频率产生平移、折叠^[4]。由于微动周期短,一般为秒级,在较短时间内可得到微多普勒信息。在短时间内,虽然平动速度绝对值很大,但其变化率较小,可在对目标进行检测跟踪的基础上根据跟踪所对应的估计速度 \tilde{v} 对回波信号进行统一的预补偿^[6]。

$$s_r(t) = s(t) \exp\left[j \frac{4\pi f_c}{c} \tilde{v} t\right] \\ = \sum_{m=1}^M \sigma_m \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (r_i(t) + r_{pm}(t))\right] \quad (6)$$

其中, $r_i(t) = r_i(t) - \tilde{v}t = R_0 + v_r t + (1/2)at^2$, v_r 对应预补偿后的剩余速度分量,在观测时间内可认为 $s_r(t)$ 没有多普勒模糊。

3 平动参数估计方法

根据式(4)可知,弹道目标微动所引起的 $\beta(t)$ 的变化具有轴对称特性,即 $\beta(t)$ 关于 $\omega_p t + \varphi = k\pi$ 是轴对称的。设 $t_{ck} = (k\pi - \varphi) / \omega_p$,可得

$$\beta(t_{ck} + \tau) = \beta(t_{ck} - \tau) \quad (7)$$

从而有

$$r_{pm}(t_{ck} + \tau) = r_{pm}(t_{ck} - \tau) \quad (8)$$

式(8)表明,对以 t_{ck} 为中心的左右两边对称数据而言,由于微动所导致的相位项是一致的,可通过对回波信号的对称共轭相乘消除微动的影响。

3.1 基于对称共轭相乘的平动参数估计原理

为了分析简单,首先假设目标只包含一个散射中心,经速度预补偿后的回波信号可表示为

$$s_r(t) = \sigma_1 \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (r_i(t) + r_{p1}(t))\right] \quad (9)$$

将 $s_r(t)$ 关于中心时刻 t_c 对称共轭相乘后的信号可表示为

$$S_c(\tau, t_c) = s_r(t_c + \tau) \cdot s_r(t_c - \tau)^* \\ = |\sigma_1|^2 \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (r_i(t_c + \tau) + r_{p1}(t_c + \tau))\right] \\ \cdot \exp\left[j \frac{4\pi f_c}{c} (r_i(t_c - \tau) + r_{p1}(t_c - \tau))\right] \\ = |\sigma_1|^2 \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (r_i(t_c + \tau) - r_i(t_c - \tau))\right] \\ \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (r_{p1}(t_c + \tau) - r_{p1}(t_c - \tau))\right] \quad (10)$$

式中, $r_i(t_c + \tau) - r_i(t_c - \tau)$ 表示平动分量对称共轭相乘结果,有

$$r_i(t_c + \tau) - r_i(t_c - \tau) = 2v_r\tau + 2at_c\tau \quad (11)$$

$r_{p1}(t_c + \tau) - r_{p1}(t_c - \tau)$ 为微动分量对称共轭相乘结果, 有

$$\begin{aligned} r_{p1}(t_c + \tau) - r_{p1}(t_c - \tau) \\ = x_1(\cos\beta(t_c + \tau) - \cos\beta(t_c - \tau)) \\ + y_1(\sin\beta(t_c + \tau) - \sin\beta(t_c - \tau)) \end{aligned} \quad (12)$$

特别地, 当 $t_c = t_{ck}$ 时, 有 $r_{p1}(t_{ck} + \tau) = r_{p1}(t_{ck} - \tau)$, 即微动导致的相位变化项是一样的。此时共轭相乘处理将抵消微动所导致的相位相, 式(10)可改写为

$$S_c(\tau, t_{ck}) = |\sigma_1|^2 \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c}(2v_r\tau + at_{ck}\tau)\right] \quad (13)$$

式(13)表明, $S_c(\tau, t_{ck})$ 可表示为一个单频信号, 对其关于 τ 进行傅里叶变换后将在 f_{ck} 处出现峰值。

$$f_{ck} = -\frac{2f_c}{c}(2v_r + 2at_{ck}) = -\frac{4(v_r + at_{ck})}{\lambda} \quad (14)$$

当 $t_c \neq t_{ck}$ 时, $r_{p1}(t_c + \tau) - r_{p1}(t_c - \tau)$ 是一个变化量, 式(10)所对应的瞬时多普勒频率是变化的, 对 $S_c(\tau, t_c)$ 进行傅里叶变换后在频谱上是展布的。因此, 对 $S_c(\tau, t_c)$ 关于 τ 进行傅里叶变换后所对应最大频率分量的幅度将远小于 $S_c(\tau, t_{ck})$ 关于 τ 进行傅里叶变换后所对应的最大频率分量幅度。根据上述性质, 可对中段目标进动所对应的对称轴位置 t_{ck} 及峰值频率 f_{ck} 进行估计。

对于中段目标而言, 在一个进动周期内有两个对称轴位置, 对包含多个进动周期的回波信号而言, 可估计出多个 t_{ck} 及对应 f_{ck} 。假设已估计出了两个轴对称位置 (t_{c1}, f_{c1}) 及 (t_{c2}, f_{c2}) , 根据式(14)可得

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_r &= \frac{f_{c1}t_{c2} - f_{c2}t_{c1}}{4(t_{c2} - t_{c1})} \lambda \\ \hat{a} &= \frac{f_{c2} - f_{c1}}{4(t_{c2} - t_{c1})} \lambda \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

从而实现了平动参数的估计。在估计出平动参数后, 可根据估计参数对平动进行补偿:

$$s_b(t) = s_r(t) \cdot \exp\left[j\frac{4\pi f_c}{c}\left(\hat{v}_r t + \frac{1}{2}\hat{a}t^2\right)\right] \quad (16)$$

根据上述分析, 可得中段目标平动补偿步骤如下:

(1) 确定 $s_r(t)$ 的中心时刻 t_0 , 设置 t_c 的搜索步长 Δt 及范围 $[-N\Delta t, N\Delta t]$, 形成 t_c 的搜索空间 $\mathbf{t}_s = [t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{s(2N+1)}]$, 其中 $t_{sn} = t_0 + (n - N - 1)\Delta t$;

(2) 针对每一个待搜索的 t_{sn} , 根据式(10)计算 $S_c(\tau, t_{sn})$, 对 $S_c(\tau, t_{sn})$ 做傅里叶变换, 记录最大频率分量的幅度 a_n 及频率 f_n ; 形成幅度向量 $\mathbf{a}_{\max} = [a_1, a_2, \dots, a_{2N+1}]$ 及对应的频率向量 $\mathbf{f}_{\max} = [f_1, f_2, \dots, f_{2N+1}]$;

(3) 根据 \mathbf{a}_{\max} 的峰值位置确定两个最大局部峰值所对应的时间 t_{c1} , t_{c2} ; 并在 \mathbf{f}_{\max} 向量中提取出其相应的频率值 f_{c1} , f_{c2} ;

(4) 根据式(15)计算目标的平动速度和加速度;

(5) 根据式(16)对目标的平动进行补偿, 得到平动补偿后的中段目标回波信号。

上述算法的运算量主要由步骤(1)和步骤(2)确定。设 t_c 搜索的点数为 $2N+1$, 在计算式(10)时关于 t_c 两端所取数据长度为 M 点, 则算法的计算复杂度为 $O((2N+1)M \log_2^M)$ 。

3.2 交叉项对估计结果的影响

3.1节分析是在单散射中心假设条件下进行的, 当目标包含多个等效散射中心时, 共轭相乘处理将产生交叉项。将式(6)代入式(10), 可得

$$\begin{aligned} S_c(\tau, t_c) \\ = \sum_{m=1}^M \sigma_m \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c}(r_i(t_c + \tau) + r_{pm}(t_c + \tau))\right] \\ \cdot \sum_m^* \sigma_m^* \exp\left[j\frac{4\pi f_c}{c}(r_i(t_c - \tau) + r_{pm}(t_c - \tau))\right] \\ = \sum_{m=1}^M \sigma_m \sigma_m^* \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c}(r_i(t_c + \tau) - r_i(t_c - \tau) \right. \\ \left. + r_{pm}(t_c + \tau) - r_{pm}(t_c - \tau))\right] \\ + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M \sigma_i \sigma_j^* \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c}(r_i(t_c + \tau) \right. \\ \left. - r_i(t_c - \tau) + r_{pi}(t_c + \tau) - r_{pj}(t_c - \tau))\right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\sum_{m=1}^M \sigma_m \sigma_m^* \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c}{c}(r_i(t_c + \tau) - r_i(t_c - \tau) + r_{pm}(t_c + \tau) - r_{pm}(t_c - \tau))\right\}$ 和 $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M \sigma_i \sigma_j^* \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c}{c}(r_i(t_c + \tau) - r_i(t_c - \tau) + r_{pi}(t_c + \tau) - r_{pj}(t_c - \tau))\right\}$

分别表示各散射中心的自项和与交叉项。根据式(3), 式(4)可知, 各散射中心位置变化的对称轴均由 $\beta(t)$ 的对称轴确定, 当 $t_c = t_{ck}$ 时, 对每个散射中心而言均有 $r_{pm}(t_{ck} + \tau) = r_{pm}(t_{ck} - \tau)$ 。因此, 当 $t_c = t_{ck}$ 时各散射中心的自项都只与平动参数有关, 表现为参数一致的线性相位信号分量, 它们对应信号在频域上是叠加在一起的。而交叉项不能用线性相位信号模型描述, 且各交叉项所对应多普勒频率不一致, 它们的能量在频域上是分散的。因此, 当目标包含多个散射中心时, $S_c(\tau, t_{ck})$ 能量最大信号分量仍对应为自项, 对 $S_c(\tau, t_{ck})$ 进行傅里叶变换后仍将在 f_{ck} 处出现峰值。

设目标仅包含一个散射中心, 根据 3.1 节估计

步骤得到不同 t_c 情况下 $S_c(\tau, t_c)$ 的最大谱分量幅度所组成的向量 \mathbf{a}_{\max} 如图 1 (a)所示; 增加目标等效散射中心至 3 个, 其它不变, 得到 \mathbf{a}_{\max} 如图 1(b)所示。可以看出, 在多散射中心情况下 \mathbf{a}_{\max} 所对应噪声基底增加, 但局部峰值明显, 且峰值位置与单散射中心所对应情况一致。因此仍可基于 3.1 节分析结果对中段目标平动进行补偿。

4 仿真分析

4.1 算法性能分析

设目标进动周期为 1 s, 进动角为 $\theta_p = 10^\circ$, $\gamma = 25^\circ$ 。目标平动速度为 2 m/s, 加速度为 1.1 m/s², 雷达中心频率为 3 GHz, 脉冲重复频率为 500 Hz。弹头目标为如图 2(a)所示的平底锥, 参数为 $R=0.64$ m, $r_c=0.005$ m, $\alpha = 12^\circ$ 。根据文献[14]所推导的公式计算不同时刻所对应姿态角的雷达静态回波, 在此基础上根据准静态法[15]叠加弹道平动信息, 可得到中段目标动态回波。加入噪声直到信噪比为

0 dB, 对信号进行时频分析的结果如图 2(b)所示。根据本文算法得到 \mathbf{a}_{\max} 向量如图 2(c)所示, 得到两个最大峰值所对应时刻分别为 0.830 s 和 1.331 s, 在这两个时刻所对应的最大谱分量的频率分别为 116.466 Hz 和 138.554 Hz, 最后计算得到速度估计结果为 1.9968 m/s, 加速度估计为 1.1022 m/s², 与实际值相差很小。根据估计速度与加速度对信号平动进行补偿, 得到补偿后信号时频分析结果如图 2(d)所示, 可见补偿后信号的瞬时多普勒信息中不包含平动多普勒频率。

在不同信噪比下, 得到速度及加速度的均方根误差如表 1 所示, 从表 1 可以看出, 当信噪比大于等于 -5 dB 时, 本文算法能够实现对速度与加速度的高精度估计。为了与其它算法对比, 表 1 还给出了利用文献[6]及文献[5]方法所得参数估计性能。从结果可以看出, 文献[5]所提方法的估计精度最低, 这是由于文献[5]利用多普勒中心信息对速度进行估

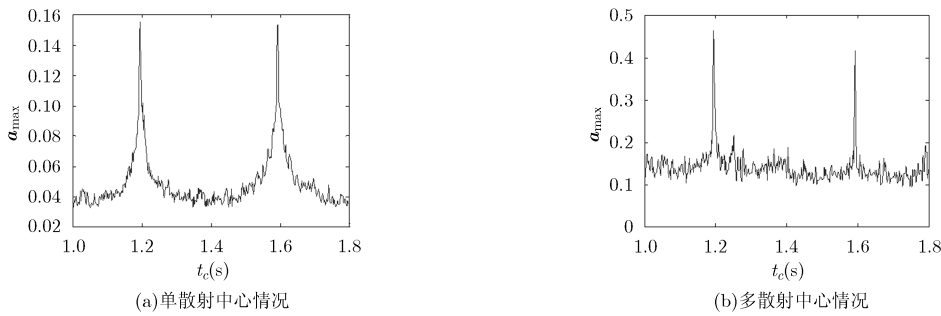


图 1 多散射中心情况下交叉项对 \mathbf{a}_{\max} 影响

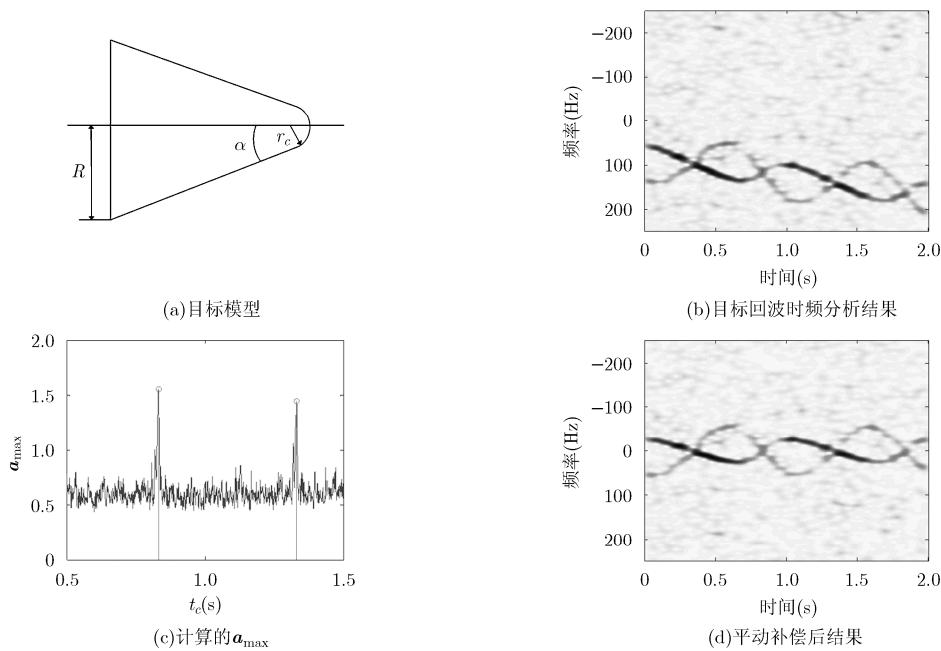


图 2 平动补偿仿真

表 1 不同信噪比下的估计性能

SNR (dB)	速度估计的 RMES(m/s)		加速度估计的 RMES(m/s ²)			
	本文方法	文献[6]	文献[5]	本文方法	文献[6]	文献[5]
2	0.0018	0.0742	0.2084	0.0018	0.0592	0.3375
1	0.0026	0.0779	0.2306	0.0023	0.0688	0.3499
0	0.0049	0.0812	0.3136	0.0036	0.0850	0.4075
-1	0.0061	0.0918	0.5433	0.0056	0.0972	0.6015
-2	0.0091	0.1292	0.6189	0.0084	0.1229	0.7369
-3	0.0128	1.1696	0.9292	0.0116	1.1572	0.9313
-4	0.0171	1.6954	0.9970	0.0154	1.9850	1.0424
-5	0.0278	2.1973	1.7418	0.0231	2.2675	1.0316
-6	2.3079	2.5321	1.8389	1.7988	2.6744	1.0624

计, 利用多普勒宽度信息对加速度进行估计, 多普勒谱的中心及宽度主要由左右边缘确定, 而边缘的确定受噪声影响较大, 从而导致估计结果误差较大。相对与文献[6]所提方法而言, 本文算法估计精度更高, 这主要是由于文献[6]所提算法所利用信息为强散射中心的多普勒极值信息, 所利用的时刻点少; 而本文算法利用了每个采样时刻点各个散射中心的多普勒信息, 因此本文算法所利用信息更多, 估计更准确。通过表 1 还可看出, 本文算法相对于文献[6]方法而言更稳健, 这主要是由于本文算法利用了各个散射中心对称共轭相乘后的自项能量; 而文献[6]方法所利用的是强散射中心的极值多普勒信息, 当信噪比降低时将导致部分极值点提取错误, 从而导致平动参数估计错误。在计算时间上, 对于上述数据, 在同一电脑上文献[5]方法平均耗时 0.359 s,

文献[6]所提算法得到估计结果的平均耗时为 1.239 s, 本文所提算法耗时为 0.137 s。仿真时所用电脑 CPU 为 Interl Core i3 3.2 GHz, 内存为 2 GB。

4.2 弹道目标平动补偿仿真

设导弹关机点高度为 150 km, 关机点速度为 4 km/s, 以最佳速度倾角飞行, 雷达处于弹道落地点附近, 根据文献[15]得到弹道及导弹相对雷达的距离、速度、加速度变化曲线如图 3 所示。整个导弹的飞行时间为 633 s, 在 600 s 附近导弹离地面高度接近 80 km, 此时可认为再入大气层, 在 0~600 s 范围内可认为弹头处于中段。图 3(b)-图 3(d)显示了在中段弹头相对雷达的距离、速度及加速度变化, 从图可以看出, 在中段弹头相对雷达的运动相对平稳, 在短时间内可用匀加速模型近似, 且加速度变化不大于 5 m/s²。

在仿真弹道基础上叠加进动。设进动周期为 2.8 s, 进动角为 10°, 自旋周期为 1 s, 雷达频率为 6 GHz, 重频为 2 kHz, 其它参数与 3.1 节一致。根据准静态法产生回波信号, 在此基础上加入噪声到总体信噪比水平为 -5 dB。第 300~306 s 数据平动补偿前后回波时频分析结果如图 4 所示, 从图 4 可以看出, 通过本文算法可对中段目标的平动进行补偿, 补偿后信号仅反映了微多普勒信息。

为了验证本文算法对整个弹道中段平动补偿的有效性, 对中段弹道(0~600 s)回波数据进行分段处理, 以 6 s 为间隔对数据进行等间隔采样, 得到 100 组数据。在利用式(6)对每一组数据进行速度预补偿

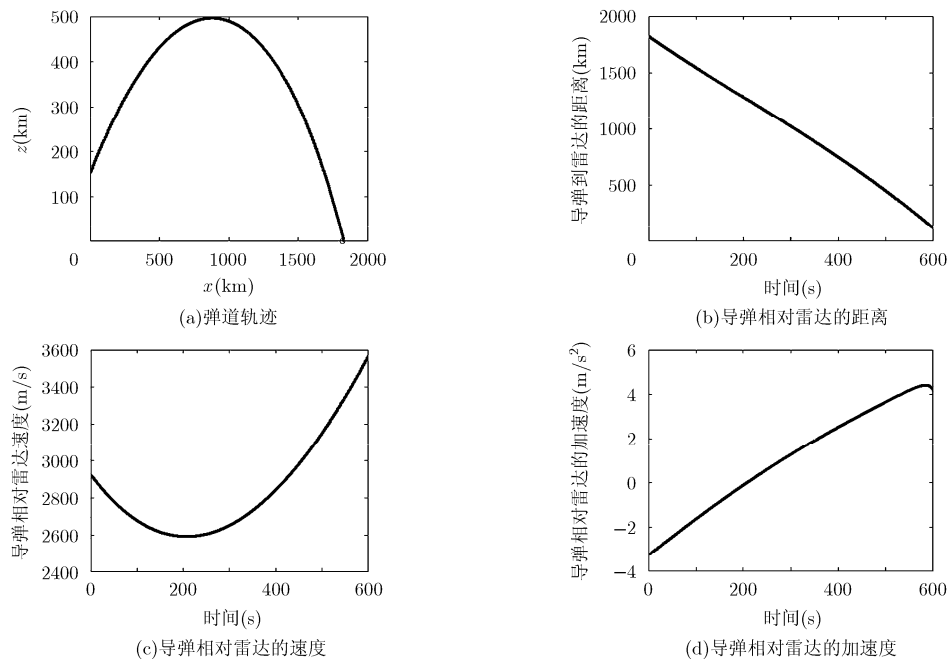


图 3 弹道仿真结果

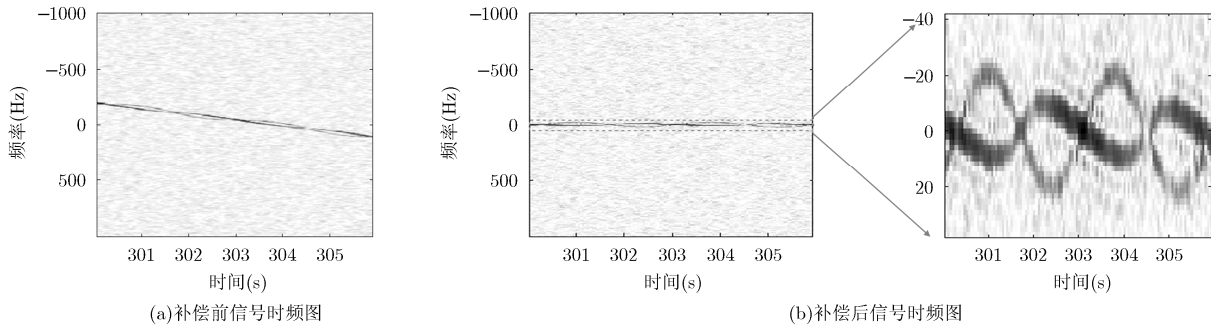


图4 300~306 s 平动补偿结果

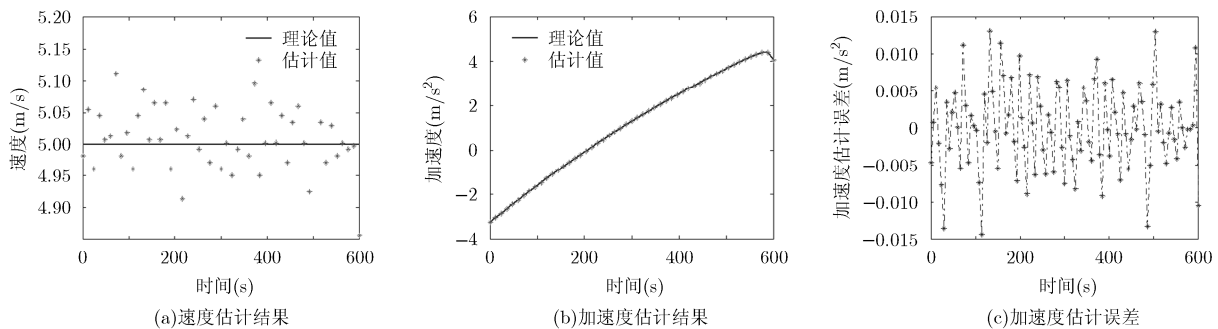


图5 中段平动参数估计性能

时假设补偿速度与实际速度的误差为 5 m/s。根据本文算法, 得到补偿后信号速度及加速度估计如图 5 所示, 从图可以看出, 在中段弹道范围内, 本文算法均能对中段目标的速度及加速度进行准确估计, 速度估计误差 δ_v 不大于 0.05 m/s, 加速度估计误差 δ_a 不大于 0.015 m/s²。

5 结束语

本文对中段目标平动及进动的运动特性进行了分析, 指出进动具有轴对称性, 取对称轴左右两边对称数据进行共轭相乘处理可消除进动对回波信号的相位调制, 使得处理后信号相位参数仅与平动参数有关。基于上述特性, 提出了基于对称共轭相乘的平动补偿方法。仿真结果表明, 所提算法能够对中段目标平动进行高精度补偿。

本文算法所利用物理基础为进动的轴对称特性, 因此, 该算法可推广到其它具有轴对称特性的微动目标的平动补偿中。

参考文献

- [1] 束长勇, 陈世春, 吴洪骞, 等. 基于 ISAR 像序列的锥体目标进动及结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(5): 1078-1084. doi: 10.11999/JEIT141061. SHU Changyong, CHEN Shichun, WU Hongqian, et al. Precession and structure parameters estimation of precession cone target based on ISAR image sequence[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1078-1084. doi: 10.11999/JEIT141061.
- [2] 张栋, 冯存前, 贺思三, 等. 组网雷达弹道目标三维进动特征提取[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 146-151. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.02.024. ZHANG Dong, FENG Cunqian, HE Sisan, et al. Extraction of three-dimensional precession features of ballistic targets in netted radar[J]. *Journal of Xidian University*, 2015, 42(2): 146-151. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.02.024.
- [3] 孙永健, 穆贺强, 程臻, 等. 基于四元数矩阵奇异值的目标特征提取与识别[J]. 电波科学学报, 2015, 30(1): 160-166. doi: 10.13443/j.cjors.2014010501. SUN Yongjian, MU Heqiang, CHENG zhen, et al. Ballistic targets feature extraction and recognition based on QMSVD [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(1): 160-166. doi: 10.13443/j.cjors.2014010501.
- [4] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 速度对微多普勒的影响及其补偿研究[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(4): 46-50. GAO Hongwei, XIE Lianggui, WEN Shuliang, et al. Research on the influence of velocity on micro-Doppler and its compensation[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2008, 24(4): 46-50.
- [5] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 加速度对微多普勒的影响及其补偿研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 705-711. doi: 10.3837/j.issn.1000-1328.2009.00.053. GAO Hongwei, XIE Lianggui, WEN Shuliang, et al. Research on the influence of acceleration on micro-Doppler and its

- compensation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 705-711. doi: 10.3837/j.issn.1000-1328.2009.00.053.
- [6] 杨有春, 童宁宁, 冯存前, 等. 弹道目标中段平动补偿与微多普勒提取[J]. 宇航学报, 2011, 32(10): 2235-2241. doi: 10.3837/j.issn.1000-1328.2011.10.022.
- YANG Youchun, TONG Ningning, FENG Cunqian, *et al.* Translation compensation and micro-Doppler extraction of ballistic target in midcourse[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(10): 2235-2241. doi: 10.3837/j.issn.1000-1328.2011.10.022.
- [7] 杨有春, 童宁宁, 冯存前, 等. 利用最强散射点信息的平动补偿与微多普勒提取[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(6): 147-153. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.06.024.
- YANG Youchun, TONG Ningning, FENG Cunqian, *et al.* Translation compensation and micro-doppler extraction by using the information on the strongest scatter[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(6): 147-153. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.06.024.
- [8] 罗迎, 柏又青, 张群, 等. 弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 602-608. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607.
- LUO Ying, BAI Youqing, ZHANG Qun, *et al.* Translational motion compensation and micro-Doppler feature extraction of ballistic targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 602-608. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607.
- [9] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 空间锥体目标的平动补偿与微动特征提取方法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(5): 815-820. doi: 10.13443/j.cjors.2013090302.
- HAN Xun, DU Lan, and LIU Hongwei. Translation compensation and micro-motion feature extraction of space cone-shaped target[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(5): 815-820. doi: 10.13443/j.cjors.2013090302.
- [10] 胡晓伟, 童宁宁, 董会旭, 等. 弹道中段群目标平动补偿与分离方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 291-296. doi: 10.11999/JEIT140494.
- HU Xiaowei, TONG Ningning, DONG Huixu, *et al.* Translation compensation and resolution of multi-ballistic targets in midcourse[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 291-296. doi: 10.11999/JEIT140494.
- [11] 孙永健, 穆贺强, 程臻, 等. 中段弹道目标宽带回波仿真与速度补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1255-1262. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.07.06.
- SUN Yongjian, MU Heqiang, CHENG Zhen, *et al.* Wideband echo simulation and velocity compensation of midcourse ballistic target[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(7): 1255-1262. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.07.06.
- [12] 贺思三, 赵会宁, 张永顺. 基于延迟共轭相乘的弹道目标平动补偿[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 505-510. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.14087.
- HE Sisan, ZHAO Huining, and ZHANG Yongshun. Translation motion compensation for ballistic targets based on delayed conjugated multiplication[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 505-510. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.14087.
- [13] 姚辉伟, 魏玺章, 徐少坤, 等. 弹道中段进动目标非理想散射中心微动特性研究[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1844-1851. doi: 10.3969/j.issn.0372.2112.2012.09.022.
- YAO Huiwei, WEI Xizhang, XU Shaokun, *et al.* Micro-motion characteristics of non-ideal scattering centers of midcourse targets with precession[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(9): 1844-1851. doi: 10.3969/j.issn.0372.2112.2012.09.022.
- [14] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 86-99.
- [15] 金光虎, 高勋章, 黎湘, 等. 中段目标微运动建模方法与宽带雷达回波仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 867-871.
- JIN Guanghu, GAO Xunzhang, LI Xiang, *et al.* Micro-motion modeling and wideband radar echo simulation of midcourse target[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(4): 867-871.
- 贺思三: 男, 1981年生, 讲师, 博士, 研究方向为弹道目标识别、非平稳信号处理.
- 赵会宁: 女, 1979年生, 讲师, 硕士, 研究方向为高分辨雷达信号处理及雷达电子对抗.
- 张永顺: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多基地雷达信号处理及雷达电子对抗.