

弹道中段目标平动径向速度估计的状态空间方法

魏少明* 王 俊 孙进平 毛士艺

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘 要: 为了分析弹道中段飞行目标的微动分量, 需要对雷达回波中的高速平动分量进行准确估计和补偿。该文建立了目标高速平动和微动共同作用下的超宽带信号模型, 提出了一种基于状态空间处理的平动径向速度高精度估计方法, 该方法可以有效抑制微动分量对平动径向速度估计的影响, 估计精度优于传统方法。同时包含高速平动分量和微动分量的超宽带信号模型, 也可直接用于后续的微动参数提取处理。仿真结果验证了文中信号模型与径向速度估计方法的有效性。

关键词: 目标检测; 弹道目标; 平动径向速度估计; 微动; 状态空间处理; 步进频信号

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0413-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01060

A State Space Method for Estimating the Translational Radial Velocity of Ballistic Targets

Wei Shao-ming Wang Jun Sun Jin-ping Mao Shi-yi

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to analyze the micro-movement component of the ballistic targets at the middle trajectory, the accurate estimation and compensation of the high-speed translational component from the radar echo are needed. The ultra-wideband signal model under the joint action of the target high-speed translational movement and micro-movement is proposed, and a state space approach based method for accurately estimating translational radial velocity is presented. This method can effectively inhibit the influence of the micro-movement component on the translational radial velocity estimation, and provide better estimation accuracy than traditional methods. The ultra-wideband signal model containing both high-speed translational components and micro-movement components can also be used directly for subsequent micro parameter extraction processing. The simulation results show the effectiveness of the signal model and the translational radial velocity estimation method presented in the paper.

Key words: Target detection; Ballistic targets; Translational radial velocity estimation; Micro-movement; State space processing; Stepping frequency signal

1 引言

弹道中段目标相对于雷达的运动可分为高速平动分量和微动分量^[1]。平动分量的存在会使微动分量产生平移、折叠或倾斜, 严重影响微动分析的结果。因此在弹道中段目标的微动分析之前, 需要对高速平动分量进行补偿^[2]。平动径向速度估计的难点在于: 目标回波中微动分量的存在, 会对平动分量的精确估计产生严重影响。

频率步进雷达信号通过多个瞬时带宽极窄的脉冲信号合成宽带信号, 在获得高距离分辨力的同时

极大地降低了对发射/接收机的处理带宽要求, 是一种实用的、易于工程实现的高分辨力超宽带(UWB)信号形式。对于采用频率步进 UWB 信号的目标平动径向速度估计问题, 国内外研究者已提出了很多方法, 归纳起来可以分为 3 类: 1 类需要先验的测速信息引导, 通过在一定速度范围内搜索评价函数的极值来获得目标径向速度估计, 如脉冲串导出值法^[3], 最小波形熵法^[4], 最小脉组误差法^[5], 最小脉组相位差分法^[6], 这类方法需要进行迭代搜索, 运算量要求很大。另 1 类则是在先验测速信息引导基础上, 利用多种波形实现速度的精确估计, 如复合测速法等^[7-9], 此类方法需要采用多波形工作方式, 缺点是增加了雷达系统实现上的复杂度。第 3 类方法无需先验测速信息引导, 通过回波数据直接估计

2012-08-17 收到, 2012-10-09 改回

国家自然科学基金(60901056, 61171122)资助课题

*通信作者: 魏少明 weishaoming@126.com

目标径向速度, 如时域互相关法、频域互相关法和估计时域压缩因子的状态空间法等^[10-12], 其中时域互相关法利用相邻回波相位间的互相关测度得到目标运动参数估值, 其精度较高、运算量小, 但速度估计的无模糊范围小, 弹道目标难以适用。以上 3 类方法均未考虑目标微动对平动径向速度估计的影响。

本文针对同时存在微动分量和高速平动分量的弹道中段目标步进频率 UWB 回波, 提出了一种基于状态空间处理的平动径向速度估计方法。该方法基于几何绕射(GTD)模型, 首先采用状态空间法对高速平动和微动共同作用下的目标 UWB 回波进行建模, 然后通过推导相邻两个脉组回波的归一化采样序列的互相关函数与目标径向速度之间的对应关系, 得出了目标径向速度的估计式。通过对存在典型平动和微动分量的弹道中段高速运动目标仿真, 与已有方法进行性能对比分析, 验证了本文方法的有效性。

2 目标 UWB 信号建模

在弹道目标微动分析的研究中, UWB 信号建模基于精确的 GTD 模型^[13]。在此基础上引入径向距离 R 和平动径向速度 V , 并且假设短时间内散射中心的平动径向速度和微动径向速度均保持不变,

$$\hat{g}(f, t) = \sum_s \Gamma_s \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_s} e^{-2\pi j f \frac{2}{c}(r_s + \dot{r}_s t + R + Vt)} + v(f) \quad (1)$$

其中 s 为目标散射中心数目, Γ_s 为散射中心的散射强度, f_c 为宽带信号的中心频率, r_s 和 \dot{r}_s 为微动分量中的径向距离和径向速度, 显然有 $R \gg r_s$ 及 $V \gg \dot{r}_s$, $v(f)$ 为噪声, α 为 GTD 模型的频率依赖因子。

对频率步进雷达信号, 将 f 用 f_n 表示, 设步进间隔为 Δf , 则 $f_n = n\Delta f$, 其中 $n \in \{n_0, n_0 + 1, \dots, n_0 + N - 1\}$, N 为一个脉冲串里频率步进的点数; 将 t 用 t_k 表示, 设脉冲串重复频率为 PRF, 则 $t_k = k\Delta t$, 这里 $\Delta t = 1/\text{PRF}$, $k \in \{k_0, k_0 + 1, \dots, k_0 + K - 1\}$, K 为一次处理的脉冲串个数或者称为时间窗长度。则式(1)的离散形式为

$$\hat{g}_{n,k} = \sum_s \Gamma_s \left(j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_s} e^{-j4\pi \frac{n\Delta f}{c}(r_s + \dot{r}_s k\Delta t + R + V k\Delta t)} + v(n) \quad (2)$$

参照 ARMA 模型的单位冲击响应 $y(n) = \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}$ ^[13], 可以将式(2)改写为状态空间形式,

$$\begin{aligned} \hat{g}_{n,k} &= \sum_s \Gamma_s \left(j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_s} e^{-j4\pi \frac{n\Delta f}{c} r_s} e^{-j4\pi \frac{n\Delta f k\Delta t}{c} \dot{r}_s} \\ &\cdot e^{-j4\pi \frac{n\Delta f}{c} R} e^{-j4\pi \frac{n\Delta f k\Delta t}{c} V} = e^{-j4\pi \frac{n\Delta f}{c} R} e^{-j4\pi \frac{n\Delta f k\Delta t}{c} V} \\ &\cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \Gamma_1 \left(j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_1} & \Gamma_2 \left(j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_2} & \dots \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \\ &\cdot \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-\frac{j4\pi r_1 \Delta f}{c}} & 0 & \dots \\ 0 & e^{-\frac{j4\pi r_2 \Delta f}{c}} & \\ \dots & & \ddots \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}^n} \\ &\cdot \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-\frac{j4\pi \Delta f \Delta t \dot{r}_1}{c}} & 0 & \dots \\ 0 & e^{-\frac{j4\pi \Delta f \Delta t \dot{r}_2}{c}} & \\ \dots & & \ddots \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_r^{nk}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

3 平动径向速度估计

3.1 平动径向速度估计的理论推导

由式(3), 可得到 k 时刻与 $k+1$ 时刻相邻脉组回波的互相关函数为

$$\begin{aligned} h_{n,k} &= \text{conj}(\hat{g}_{n,k}) \cdot \hat{g}_{n,k+1} \\ &= e^{-j4\pi \frac{n\Delta f \Delta t}{c} V} \underbrace{\begin{bmatrix} \Gamma_1 \left(-j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_1} & \Gamma_2 \left(-j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_2} & \dots \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}'} \\ &\cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots \\ 1 & 1 & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Gamma_1 \left(j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_1} \\ \Gamma_2 \left(j \frac{n\Delta f}{f_c} \right)^{\alpha_2} \\ \vdots \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_1} \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $*$ 为取共轭, 由于 $(jn\Delta f/f_c)^{\alpha_s} = j^{\alpha_s} (n\Delta f/f_c)^{\alpha_s} = j^{\alpha_s} e^{\alpha_s \ln(n\Delta f/f_c)}$, 应用 Taylor 展开式

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{n\Delta f}{f_c} \right) &= \ln \left(1 + \frac{n'\Delta f}{f_c} \right) = \left(\frac{n'\Delta f}{f_c} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{n'\Delta f}{f_c} \right)^2 \\ &+ \dots + (-1)^n \frac{1}{n+1} \left(\frac{n'\Delta f}{f_c} \right)^{n+1} + \dots \quad (5) \end{aligned}$$

其中 $n' = -(N-1)/2, \dots, (N-1)/2$ (N 为奇数), 或 $n' = -N/2, \dots, N/2$ (N 为偶数); 忽略二次及高次项

的影响，可得近似 $(jn\Delta f/f_c)^{\alpha_s} \simeq j^{\alpha_s} e^{\alpha_s n' \Delta f/f_c}$ 。因此， $\Gamma_s(jn\Delta f/f_c)^{\alpha_s} = \Gamma'_s e^{\alpha_s n \Delta f/f_c}$ ，其中 $\Gamma'_s = \Gamma_s j^{\alpha_s} e^{-\alpha_s}$ ，同理， $\Gamma_s(-jn\Delta f/f_c)^{\alpha_s} = \Gamma''_s e^{\alpha_s n \Delta f/f_c}$ ，其中 $\Gamma''_s = (-1)^{\alpha_s} \Gamma'_s$ 。

$$h_{n,k} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Gamma''_1 & \Gamma''_2 & \dots \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_4}$$

$$\cdot \underbrace{\begin{bmatrix} e^{2\alpha_1 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_1 + \mathbf{V})}{c}} & e^{(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{j4\pi\Delta f[(r_1 - r_2) - \hat{r}_2\Delta t - \Delta t\mathbf{V}]}{c}} & \dots & e^{(\alpha_1 + \alpha_s) \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{j4\pi\Delta f[(r_1 - r_s) - \hat{r}_s\Delta t - \Delta t\mathbf{V}]}{c}} \\ e^{(\alpha_2 + \alpha_1) \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{j4\pi\Delta f[(r_2 - r_1) - \hat{r}_1\Delta t - \Delta t\mathbf{V}]}{c}} & e^{2\alpha_2 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_2 + \mathbf{V})}{c}} & \dots & e^{(\alpha_2 + \alpha_s) \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{j4\pi\Delta f[(r_2 - r_s) - \hat{r}_s\Delta t - \Delta t\mathbf{V}]}{c}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{(\alpha_s + \alpha_1) \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{j4\pi\Delta f[(r_s - r_1) - \hat{r}_1\Delta t - \Delta t\mathbf{V}]}{c}} & \dots & e^{2\alpha_s \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_s + \mathbf{V})}{c}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_4^n} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \Gamma'_1 \\ \Gamma'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_4 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_4} \quad (6)$$

化简 \mathbf{A}_4 的特征方程 $|\lambda \mathbf{E}_n - \mathbf{A}_4| = 0$ 为

$$\lambda^s - \lambda^{s-1} \left(e^{2\alpha_1 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_1 + \mathbf{V})}{c}} + e^{2\alpha_2 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_2 + \mathbf{V})}{c}} + \dots + e^{2\alpha_s \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_s + \mathbf{V})}{c}} \right) = 0 \quad (7)$$

则可以解得 \mathbf{A}_4 的特征值为

$$\lambda_1 = e^{2\alpha_1 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_1 + \mathbf{V})}{c}} + e^{2\alpha_2 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_2 + \mathbf{V})}{c}} + \dots + e^{2\alpha_s \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t(\hat{r}_s + \mathbf{V})}{c}},$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_s = 0 \quad (8)$$

由于 $\mathbf{V} \gg \hat{r}_s$ ，所以

$$\lambda_1 \simeq e^{2\alpha_1 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t\mathbf{V}}{c}} + e^{2\alpha_2 \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t\mathbf{V}}{c}} + \dots + e^{2\alpha_s \frac{\Delta f}{f_c} + \frac{-j4\pi\Delta f\Delta t\mathbf{V}}{c}}$$

$$= \left(e^{2\alpha_1 \frac{\Delta f}{f_c}} + e^{2\alpha_2 \frac{\Delta f}{f_c}} + \dots + e^{2\alpha_s \frac{\Delta f}{f_c}} \right) e^{\frac{-j4\pi\Delta f\Delta t\mathbf{V}}{c}} \quad (9)$$

从而可得平动速度的估计为

$$\hat{\mathbf{V}} = \text{angle}(\lambda_1) \left/ \left(\frac{-4\pi\Delta f\Delta t}{c} \right) \right. \quad (10)$$

3.2 平动径向速度估计的直接状态空间平衡法实现

由式(6)可以看出， k 时刻与 $k+1$ 时刻相邻脉组回波的互相关函数与 ARMA 模型的单位冲击响应 $y(n) = \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}$ 相似，因此可采用直接状态空间平衡法^[13,14]估计平动速度。

首先将一次相邻脉组回波的脉冲响应数据放到两个等大的 Hankel 矩阵中，其中每个矩阵的采样点

由于平动速度的估计只用到相邻两个时刻的回波数据，所以式(4)中 k 可以用 0 代替，则式(4)可以改写为

数都比总的采样点数少一个，同时选择 Hankel 矩阵的行数为 $N_R = 2N/3$ ，

$$\mathbf{H}_0 \triangleq \begin{bmatrix} h_{n_0,k} & h_{n_0+1,k} & \dots & h_{n_0+N-N_R-1,k} \\ h_{n_0+1,k} & h_{n_0+2,k} & & \dots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{n_0+N_R-1,k} & \dots & & h_{n_0+N-2,k} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_4 \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+0} \\ \mathbf{C}_4 \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+0} \mathbf{B}_4 & \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+1} \mathbf{B}_4 & \dots \end{bmatrix}$$

$$= \mathbf{\Omega} \mathbf{\Theta} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_1 \triangleq \begin{bmatrix} h_{n_0+1,k} & h_{n_0+2,k} & \dots & h_{n_0+N-N_R,k} \\ h_{n_0+2,k} & h_{n_0+3,k} & & \dots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{n_0+N_R,k} & \dots & & h_{n_0+N-1,k} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_4 \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+0} \\ \mathbf{C}_4 \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \mathbf{A}_4 \begin{bmatrix} \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+0} \mathbf{B}_4 & \mathbf{A}_4^{\frac{n_0}{2}+1} \mathbf{B}_4 & \dots \end{bmatrix}$$

$$= \mathbf{\Omega} \mathbf{A}_4 \mathbf{\Theta} \quad (12)$$

接着对 \mathbf{H}_0 进行奇异值分解， $\mathbf{H}_0 = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$ 。由上节的分析可知 \mathbf{A}_4 中含有信号分量的特征值数目为 1，所以 $\mathbf{\Sigma}$ 中对应于信号分量的奇异值数目也为 1(其余的奇异值都对应于噪声分量)，由此可以获得截断的信号分量矩阵 \mathbf{U}_{tr} ， $\mathbf{\Sigma}_{tr}$ 和 \mathbf{V}_{tr} ，并得到观测矩

阵 $\tilde{\Omega}$ 和控制矩阵 $\tilde{\Theta}$

$$\tilde{\Omega} = U_{tr} \sqrt{\Sigma_{tr}}, \quad \tilde{\Theta} = \sqrt{\Sigma_{tr}} V_{tr}^H \quad (13)$$

其中 U_{tr} 是矩阵 U 的第 1 列; Σ_{tr} 是矩阵 Σ 的第 1 特征值; V_{tr} 是矩阵 V 的第 1 列。

利用观测矩阵 $\tilde{\Omega}$ 和控制矩阵 $\tilde{\Theta}$ 即可从矩阵 H_1 中分解出 \tilde{A}_4 矩阵

$$\tilde{A}_4 = \tilde{\Omega}^+ H_1 \tilde{\Theta}^+ \quad (14)$$

令 λ_A 为矩阵 \tilde{A}_4 的特征值, 由式(10), 则平动径向速度的估计为

$$\hat{V} = \frac{c}{-4\pi\Delta f\Delta t} \cdot \angle(\lambda_{A1}) \quad (15)$$

4 仿真实验

仿真目标选取锥形弹头, 其散射中心位置如图 1 所示, 其中顶点、基底散射中心的散射强度分别设为 4, 1, 类型参数设为 0, -0.5。仿真目标的微动参数^[15], 设置初始角为 $\phi=30^\circ$, $\theta=40^\circ$, $\psi=50^\circ$, 进动角为 10° , 自旋频率为 2 Hz, 进动频率为 0.2 Hz。

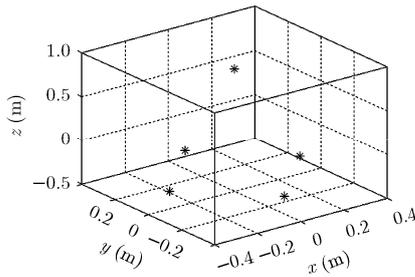


图1 锥形弹头的散射中心分布

仿真的弹道参数中, 发射点经纬度为 $(34.3775^\circ, 28.6479^\circ)$, 落点的经纬度为 $(114.5916^\circ, 28.6479^\circ)$, 助推段的飞行时间为 178.9 s, 助推段的关机点高度为 220 km, 再入段飞行时间为 33.8 s, 再入点的高度为 80 km。设置雷达站址的经纬高为 $(74.4845^\circ, 28.6479^\circ, 100 \text{ m})$ 。在雷达直角坐标系下的目标飞行轨迹和飞行特性如图 2 所示, 以下从整个飞行轨迹

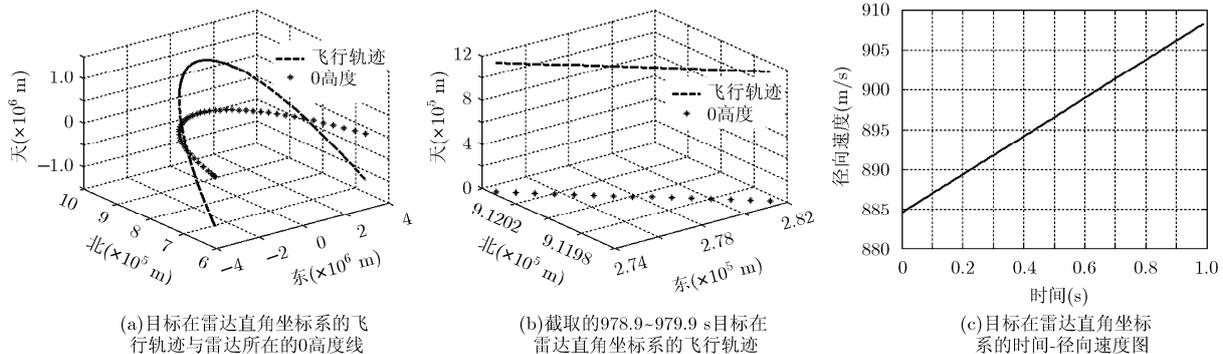


图2 雷达直角坐标系下的飞行轨迹与飞行特性

中截取 978.9~979.9 s 的数据进行平动速度的估计。

对于频率步进雷达波形, 由文献[7]知其对平动径向速度最大测量范围为 $[-c/(4\Delta f\Delta t), c/(4\Delta f\Delta t)]$, 径向速度的分辨率为 $c/(2\Delta f\Delta tN_{\text{fft}})$ 。由图 2(c)知, 目标的最大径向速度范围为 $[-1000 \text{ m/s}, 1000 \text{ m/s}]$ 。仿真中选择信号采样间隔 Δt (脉冲串重复周期)为 0.01 s, 起始频率为 9 GHz, 频率步进间隔为 $\Delta f = 5 \text{ MHz}$, 频率点数为 801 个, 则平动径向速度的最大测量范围为 $[-1500 \text{ m/s}, 1500 \text{ m/s}]$, 满足对目标平动径向速度的测量需要。仿真中设置信噪比为 10 dB。

采用本文提出的直接状态空间平衡法和传统的互相关 FFT 方法^[1]对目标的平动径向速度进行估计, 图 3 给出了平动和微动分量共同作用下两种方法对平动径向速度的估计误差。

由图 3 可以看出, 状态空间平衡法对平动径向速度估计误差基本在零附近波动, 而互相关 FFT 方法的估计结果则大部分在零的上方波动, 同时波动误差远大于状态空间平衡法。为了定量分析两种方法的性能优劣, 在表 1 中给出了不同 SNR(dB)下, 状态空间平衡法(SS)和互相关 FFT 方法(FFT)对径向速度估计误差 ΔV 的均值 $\overline{\Delta V}$ (m/s)和标准差 σ (m/s)的变化。

由表 1 可以看出, 状态空间平衡法和互相关 FFT 方法对平动径向速度估计误差的均值和标准差随 SNR 的提升不断改善, 同时状态空间平衡法的估计结果较互相关 FFT 方法改善了一个数量级。其中当 SNR 大于等于 0 dB 时, 状态空间平衡法对平动径向速度估计误差的均值在 10^{-2} 的量级, 标准差在 10^{-1} 的量级, 可以满足平动补偿的需要。

5 结束语

针对同时存在微动分量和高速平动分量的弹道中段目标步进频率 UWB 回波, 本文提出了一种基

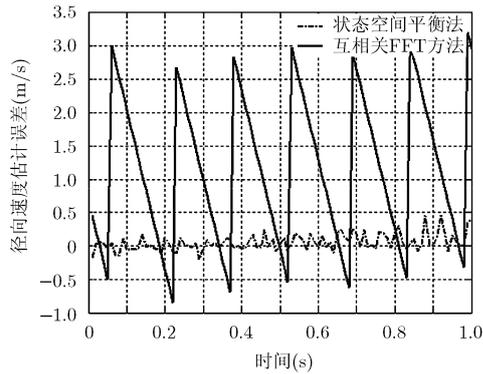


图3 状态空间平衡法和互相关FFT方法
对平动径向速度估计误差的比较

表1 状态空间平衡法和互相关FFT方法
平动径向速度估计误差随信噪比的变化(m/s)

估计 误差	SNR				
	-5 (dB)	0 (dB)	5 (dB)	10 (dB)	15 (dB)
$\overline{\Delta V_{SS}}$	-0.211	0.037	0.047	0.048	0.048
$\overline{\Delta V_{FFT}}$	-2.205	1.095	1.133	1.170	1.170
σ_{SS}	2.480	0.173	0.134	0.125	0.117
σ_{FFT}	30.278	1.114	1.117	1.113	1.113

于状态空间平衡法的平动径向速度估计方法，通过对高速平动和微动共同作用下的目标 UWB 回波进行建模，从理论上推导了目标径向速度估计的状态空间表达式。对存在典型平动和微动分量的弹道中段高速运动目标的仿真结果表明，本文方法在较宽的信噪比范围内，对平动径向速度的估计性能较传统估计方法有明显改善。

参考文献

- [1] 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.
Luo Y, Bai Y Q, Zhang Q, et al. Translational motion compensation and micro-Doppler feature extraction of ballistic target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 602-608.
- [2] 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.
Yang Y C, Tong N N, Feng C Q, et al. Translation compensation and micro-Doppler extraction of ballistic target in midcourse[J]. *Journal of Astronautic*, 2011, 32(10): 2235-2241.
- [3] Bocker R P and Jones S A. ISAR motion compensation using the burst derivative measure as a focal quality indicator[J]. *International Journal of Imaging and Technology*, 1992, 4(4): 285-297.
- [4] Flores B C, Tariq S, and Son J S. Image focus quality indicators for efficient inverse synthetic aperture radar phase correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2757: 2-13.
- [5] 刘铮, 张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 43-46.
Liu Z and Zhang S H. Estimation of target motion parameter in a stepped-frequency pulses radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(3): 43-46.
- [6] 牛涛, 陈卫东. 脉冲步进频率雷达的一种运动补偿新方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(2): 161-166.
Niu T and Chen W D. A new method of motion compensation for pulse stepped-frequency radars[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2005, 35(2): 161-166.
- [7] 王桂丽, 李兴国. 频率步进和脉冲多普勒复合测速研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3): 190-192.
Wang G L and Li X G. Compound approach of measuring velocity based on step-frequency and pulse Doppler system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(3): 190-192.
- [8] 袁昊天, 文树梁, 程臻. 调频步进信号高速运动目标径向速度精确测量技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 649-653.
Yuan H T, Wen S L, and Cheng Z. Accurate velocity measurement of high speed moving target about stepped-frequency chirp signal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 649-653.
- [9] 孙慧霞, 刘峥. 毫米波调频步进雷达复合测速方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 539-543.
Sun H X and Liu Z. Compound velocity measurement based on modulated frequency stepped radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(3): 539-543.
- [10] 蒋楠稚, 王毛路, 李少洪, 等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析[J]. 电子科学学刊, 1999, 21(5): 665-670.
Jiang N Z, Wang M L, Li S H, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR imaging[J]. *Journal of Electronics*, 1999, 21(5): 665-670.
- [11] 田进军, 刘林, 薛明华. 一种频率步进雷达目标径向速度估计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6): 673-676.
Tian J J, Liu L, and Xue M H. New estimation method of target's radial velocity for stepped-frequency radar[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(6): 673-676.
- [12] 杨利民, 苏卫民, 顾红, 等. 状态空间法在超宽带雷达目标速度及距离像估计中的应用[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1051-1056.
Yang L M, Su W M, Gu H, et al. Application of state-space method to velocity and range profile estimation of moving target for ultra-wide band radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1051-1056.

- [13] Wang J, Wei S M, Sun J P, *et al.* A GTD model and state space approach based method for extracting the UWB scattering center of moving target[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2011, 54(1): 182-196.
- [14] David J H. State-space approaches to ultra-wideband Doppler processing[D]. [Ph.D. dissertation], Worcester, MA, Worcester Polytechnic Institute, 2007.
- [15] 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 and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- 魏少明: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为超宽带目标散射参数高精度提取、数据关联、目标三维重构等.
- 王 俊: 男, 1972 年生, 教授, 研究方向为雷达实时信号处理、微多普勒处理、雷达系统仿真等.
- 孙进平: 男, 1975 年生, 教授, 研究方向为高分辨率雷达信号处理、压缩感知等.
- 毛士艺: 男, 1935 年生, 教授, 研究方向为雷达信号处理、数据融合、模式识别等.