

LFM 雷达对临近空间高超声速目标的跟踪研究

张翔宇¹, 王国宏¹, 宋振宇², 张静¹

(1. 海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台 264001; 2. 海军航空工程学院科研部, 山东烟台 264001)

摘要: 针对临近空间高超声速目标跟踪的问题, 提出了一种 ECEF 坐标系下基于径向速度补偿和相邻时刻目标量测对消处理的高超声速目标跟踪算法. 首先, 充分分析了目标高超声速运动对雷达探测跟踪的影响, 并在此基础上合理构建了目标高超声速运动下的量测模型, 以避免模型失配所引起的滤波发散问题; 其次, 利用解模糊处理后的径向速度估计对目标高超声速运动引起的高动态偏差做近似补偿, 以将问题转换为低系统偏差下的状态估计问题, 最后, 通过基于相邻时刻目标量测对消处理的单雷达量测方程构建, 可有效回避低系统偏差存在下的航迹关联问题, 进而实现临近空间高超声速目标的可靠跟踪. 仿真结果表明, 与现有的临近空间目标跟踪算法相比, 该算法具有较高的定位跟踪精度.

关键词: 临近空间; 高超声速; 高动态偏差; 机动目标; 跟踪

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)04-0846-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.04.013

Tracking of Hypersonic Target in Near-Space with LFM Radar

ZHANG Xiang-yu¹, WANG Guo-hong¹, SONG Zhen-yu², ZHANG Jing¹

(1. Institute of Information Fusion of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Scientific Research Department of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: To improve the tracking accuracy of hypersonic target in near-space, the effect of target hypersonic movement on radar detection and tracking is analyzed, and a hypersonic target tracking algorithm is proposed based on radial velocity compensation and cancellation processing of conjoint measurements under the ECEF coordinate. Firstly, based on the analysis of effect of target hypersonic movement, measurement model is constructed to reduce the filter divergence which is caused by model mismatch. Then, the high dynamic biases due to the target hypersonic movement are approximately compensated through radial velocity estimation with ambiguity solution, to achieve the target tracking with low systematic biases in near space. Finally, the measurement equation of single radar is constructed to further achieve the robust tracking of the near-space hypersonic target, and the track association problem with lower systematic biases can be avoided at the same time. Simulation results show that near-space target tracking can be finished more effectively than existing methods by using the proposed algorithm.

Key words: near space; hypersonic; high dynamic biases; maneuvering target; tracking

1 引言

近年来,随着 X-43、X-51 等临近空间飞行器的相继试验成功,以高超声速导弹为主的全球快速打击武器的出现势不可挡. 高超声速武器所具备的高速、高突防能力将改变未来战场的作战样式,并给我国的国土安全带来新的严重威胁. 但是,现有的雷达体制以及跟踪技术对这一真空区域目标却存在一定的不适应性,并不能对其进行有效地跟踪. 因此,研究临近空间高超声

速目标的探测跟踪是当前急需解决的一个关键问题.

临近空间高超声速目标跟踪的本质是高速、高机动目标的跟踪,而对高速、高机动目标跟踪的关键却在于目标模型的构建和基于该模型滤波算法的具体实现. 在对临近空间目标跟踪的研究中,文献[1]通过对目标运动特性的合理分析,构建了目标高超声速运动下的轨迹模型,将其具体分为助推段、滑翔段和再入段三个部分. 文献[2,3]在此基础上,分别参考 X-43A 与 X-51 飞行器的试验飞行弹道,提出了基于不敏卡尔曼滤波的改进“当前”

统计模型跟踪算法与基于不敏卡尔曼滤波的 IMM 跟踪算法,但这两种算法只适合于机动性很小的目标,并不适用于临近空间目标高机动的运动特性.针对这一问题,文献[4]充分考虑了临近空间目标机动性强、飞行轨迹多变的特点,提出了一种采样时间自适应调整的 IMM 跟踪算法.文献[5]针对临近空间目标的高机动突防能力及其无规律运动轨迹,提出了一种基于衰减记忆的最小二乘算法.文献[6]为进一步解决传统单一模型对临近空间目标跟踪的不足,提出了一种基于有向图变结构的多模跟踪算法(DG-VSMM).

然而,上述文献的研究往往只考虑了目标的机动特性,并没有考虑目标高超声速对雷达探测跟踪的影响.由文献[7]可知,线性调频(LFM)信号是目前雷达最常用的信号形式之一,具有大的时宽带宽积,其接收信号进行匹配滤波处理后可显著提高信噪比,但其主要缺点是存在距离-速度的耦合现象^[8],进而引起运动目标的测距偏移问题.在径向速度较小的情况下,目标回波的这一特性通常可以不做考虑,但在目标径向向高超声速运动的情况下,其距离和速度的耦合现象将对临近空间目标的探测跟踪产生重要的影响.针对这一情况,文献[9]等方法通过对三角 LFM 信号差拍信号的配对处理,一定程度上实现了目标距离-速度的去耦合.但是,该方法在多目标情况下却存在严重的关联配对问题.

针对这一情况,本文充分分析了目标高超声速运动对雷达探测跟踪的影响,并在此基础上提出一种基于径向速度补偿和相邻时刻目标量测对消处理的高超声速目标跟踪算法,以有效实现临近空间高超声速目标的精度跟踪.

2 目标高超声速运动对雷达量测的影响

假设雷达发射 LFM 脉冲信号

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cos(2\pi f_0 t + \pi\mu t^2) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = 1, |t| \leq \frac{1}{2}\tau$, τ 是发射脉冲宽度, f_0 为中心载频, $\mu = \frac{B}{\tau}$ 为调频斜率, B 为调频带宽.

当目标以径向速度 v 运动时, t 时刻的雷达接受信号可表示为

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{\gamma(t-t_0)}{\tau}\right) \cos(2\pi f_0 \gamma(t-t_0) + \pi\mu\gamma^2(t-t_0)^2) \quad (2)$$

其中, $t_0 = \frac{2R_0}{c}$, R_0 为目标与雷达的初始距离, c 是光速, $\gamma = 1 + \frac{2v}{c}$.

这时,对接受信号 $s_r(t)$ 进行匹配滤波处理,其 t 时刻的滤波器输出可表示为

$$s_o(t) = (\tau - |t - t_0|) \cdot \frac{\sin[\pi(\mu|t - t_0| + f_d)(\tau - |t - t_0|)]}{\pi(\mu|t - t_0| + f_d)(\tau - |t - t_0|)} \cdot \exp\{j\pi\mu(-t^2 - t_0^2 - 2f_d t_0 t)\} \cdot \exp\left\{j2\pi(\mu(t - t_0) + f_d)\left(t_0 + \frac{t}{2}\right)\right\} \quad (3)$$

其中, $f_d = \frac{2v}{c}f_0$ 为目标的多普勒频率.这时,依据最大输出信噪比准则,信号 $s_o(t)$ 在 $t = t_0 \pm \frac{f_d}{\mu}$ 处有最值,即雷达量测不可避免的会受到距离时延偏差 Δr 的影响.

$$\Delta r = \frac{f_d}{2\mu}c = \frac{vf_0\tau}{B} = \frac{v\tau}{B\lambda}c \quad (4)$$

为有效评估目标高超声速运动对雷达探测跟踪的影响,分析如下:

(1)在高超声速运动的影响下,临近空间目标将产生远大于普通气动目标的距离时延偏差 Δr .如图 1 所示,假设目标始终以 $V = 5\text{km/s}$ 的速度运动,且在 k 时刻目标相对雷达的运动方向 $\psi_k = 10^\circ$,目标距离 $r_k = 600\text{km}$,目标飞行高度 $h_k = 20\text{km}$,雷达波长 $\lambda = 0.15\text{m}$,线性调频脉冲信号宽度为 $\tau = 600\mu\text{s}$,线性调频带宽为 $B = 1.5\text{MHz}$,则 k 时刻脉冲压缩导致的距离时延偏差可达:

$$\Delta r_k = \frac{\tau c}{B\lambda} V \cos(\psi_k) \frac{\sqrt{r_k^2 - h_k^2}}{r_k} \approx 3.9\text{km} \quad (5)$$

而常规雷达的距离测量误差通常为 100m 左右,也就是说该偏差将严重影响雷达对目标的探测跟踪,是不可忽略不计的.

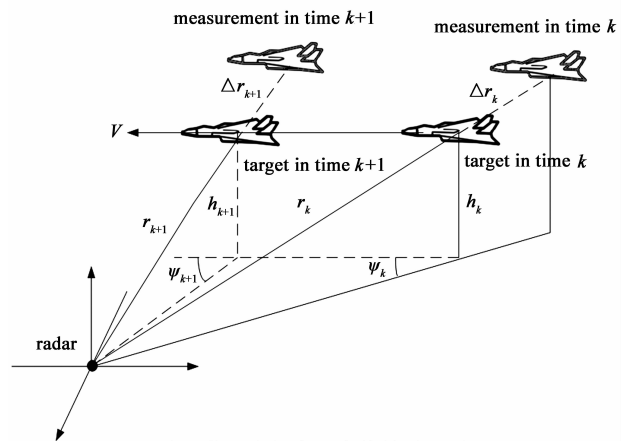


图1 临近空间高动态偏差量测图

(2)由式(4)可以看出,该偏差不同于随机测量误差,它随雷达具体参数(如雷达波长 λ 、雷达信号脉冲宽度 τ 、雷达信号带宽 B)的变化而变化.

(3)由式(4)又可以看出,目标高超声速运动所产生的距离时延偏差 Δr 是与目标径向速度 v 成正比的,且在雷达参数不变的条件下,目标径向速度越大,其回波信号的多普勒频移产生的距离时延偏差也将越大。

3 临近空间高超声速目标跟踪模型

针对高动态偏差下的临近空间高超声速目标跟踪问题,本文通过地心直角坐标系(Earth Centered Earth Fixed, ECEF)下基于径向速度补偿和相邻时刻目标量测对消处理的跟踪算法来有效解决这一问题.具体包括:(1)有偏量测方程构建;(2)基于相邻时刻对消处理的单雷达量测方程;(3)解模糊处理后的联合状态估计三个部分。

3.1 有偏量测方程构建

为消除地球曲率对临近空间高超声速目标跟踪的影响,这里选用 ECEF 坐标系对目标进行跟踪处理。

3.1.1 量测转换

假设 k 时刻的雷达目标量测由距离 $r(k)$ 、方位角 $\theta(k)$ 和俯仰角 $\varphi(k)$ 共同组成. 则其 ECEF 坐标系下的目标量测可表示为

$$\mathbf{Z}_{\text{NED}}(k) = \begin{bmatrix} \lambda_{\theta}^{-1} \lambda_{\varphi}^{-1} r(k) \sin\theta(k) \cos\varphi(k) \\ \lambda_{\theta}^{-1} \lambda_{\varphi}^{-1} r(k) \cos\theta(k) \cos\varphi(k) \\ \lambda_{\varphi}^{-1} r(k) \sin\varphi(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k) = \mathbf{M}(k) \mathbf{Z}_{\text{NED}}(k) + \mathbf{Z}_{\text{ECEF}_0} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} r(k) = \bar{r}(k) + \Delta r(k) + \delta_r(k) \\ \theta(k) = \bar{\theta}(k) + \delta_{\theta}(k) \\ \varphi(k) = \bar{\varphi}(k) + \delta_{\varphi}(k) \end{cases} \quad (8)$$

$(\bar{r}(k), \bar{\theta}(k), \bar{\varphi}(k))$ 为目标量测真值, $\Delta r(k)$ 为高动态的距离时延偏差, $(\delta_r(k), \delta_{\theta}(k), \delta_{\varphi}(k))$ 为随机量测噪声. $\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k)$ 和 $\mathbf{Z}_{\text{NED}}(k)$ 分别为 ECEF 坐标系和 NED 坐标系下的目标量测, $\mathbf{M}(k)$ 表示 NED 坐标到 ECEF 坐标的旋转矩阵, $\mathbf{Z}_{\text{ECEF}_0}$ 为 ECEF 坐标系下的雷达位置, λ_{θ} 和 λ_{φ} 为无偏转换系数。

3.1.2 有偏量测方程

在获得 ECEF 坐标系下目标量测的基础上,假设 k 时刻的目标状态向量为 $\mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k)$, 则其离散状态方程可表示为

$$\mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k+1) = \Phi(k) \mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k) + \mathbf{V}_{\text{ECEF}}(k) \quad (9)$$

其中

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \Phi_1(k) & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_1(k) & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_1(k) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\Phi_1(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为状态转移矩阵(这里以线性滤波模型为例), T 是采样间隔, $\mathbf{V}_{\text{ECEF}}(k)$ 为过程噪声矩阵。

在量测方程构建的过程中,由式(4)和(5)可知,目标量测存在高动态偏差 $\Delta r(k)$. 这时,为充分考虑目标高超声速运动对目标跟踪的影响,将其量测方程表示为

$$\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1) = \mathbf{H}(k+1) \mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k+1) + \mathbf{C}(k+1) \Delta r(k+1) + \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k+1) \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{C}(k+1) = \mathbf{M}(k+1) \begin{bmatrix} \lambda_{\theta}^{-1} \lambda_{\varphi}^{-1} \sin\theta(k+1) \cos\varphi(k+1) \\ \lambda_{\theta}^{-1} \lambda_{\varphi}^{-1} \cos\theta(k+1) \cos\varphi(k+1) \\ \lambda_{\varphi}^{-1} \sin\varphi(k+1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

为高动态偏差 $\Delta r(k)$ 所对应的系数矩阵, $\mathbf{H}(k+1)$ 为量测矩阵, $\mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k)$ 为量测噪声矩阵。

3.2 基于相邻时刻对消处理的单雷达量测方程

3.2.1 单雷达量测方程的构建原因

在对目标量测方程修正的基础上,为进一步消除高动态偏差 $\Delta r(k)$ 对目标跟踪的影响,一个有效的途径就是估计或者去除这一瞬时恒定偏差. 然而,由文献[10]可知,现有的恒定偏差估计方法一般采用两部雷达对消的方式,但这样不可避免地会引入不同雷达间航迹关联的问题. 而由文献[11]又可知,在恒定偏差存在的条件下,要实现不同雷达航迹的有效关联,必须先估计或者去除这一瞬时恒定偏差的影响. 这也就是说,恒定偏差估计和目标航迹关联将互为前提和条件,现有方法并不能有效消除高动态偏差 $\Delta r(k)$ 对目标跟踪的影响. 为此,本文通过构建基于观测差分法的单雷达量测方程来有效解决这一问题。

3.2.2 基于观测差分法的单雷达量测方程构建

假设相邻时刻的高动态偏差变化缓慢或近似不变,则有

$$\mathbf{C}(k+1) \Delta r(k+1) \approx \mathbf{C}(k) \Delta r(k) \quad (13)$$

这时,通过相邻时刻目标量测的对消处理,可构造不包含高动态时变偏差、但具有步时延的量测方程

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{\text{ECEF}}(k+1) &= \mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1) - \mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k) \\ &\approx \mathbf{H}(k+1) [\mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k+1) - \mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k)] \\ &\quad + \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k+1) - \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k) \\ &= \mathbf{H}(k+1) [\Phi(k) - \mathbf{I}_{9 \times 9}] \mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k) \\ &\quad + \mathbf{H}(k+1) \mathbf{V}_{\text{ECEF}}(k) + \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k+1) \\ &\quad - \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k) \end{aligned} \quad (14)$$

进一步化简可得

$$\mathbf{Y}_{\text{ECEF}}(k+1) = \tilde{\mathbf{H}}(k+1) \mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k) + \tilde{\mathbf{W}}_{\text{ECEF}}(k+1) \quad (15)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{H}}(k+1) = \mathbf{H}(k+1) [\Phi(k) - \mathbf{I}_{9 \times 9}] \quad (16)$$

$$\tilde{\mathbf{W}}_{\text{ECEF}}(k+1) = \mathbf{H}(k+1) \mathbf{V}_{\text{ECEF}}(k) + \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k+1) - \mathbf{W}_{\text{ECEF}}(k) \quad (17)$$

由式(15)可以看出,在相邻时刻高动态偏差变化较小的情况下,采用单部雷达便可有效消除高动态偏差对目标跟踪的影响,进而回避了高动态偏差下不同雷达间的关联问题。

3.2.3 基于观测差分法的单雷达量测方程误差分析

然而,在实际情况下,高动态的距离时延偏差不可能始终不变,即式(13)不可能始终成立,这时,将相邻时刻的目标量测相减可得

$$\begin{aligned} & E[\mathbf{C}(k+1)\Delta r(k+1) - \mathbf{C}(k)\Delta r(k)] \\ &= E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1) - \mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k)] \\ &\quad - \mathbf{H}(k+1) [\bar{\mathbf{X}}_{\text{ECEF}}(k+1) - \bar{\mathbf{X}}_{\text{ECEF}}(k)] \\ &= E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1)] - E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k)] \\ &\quad - \tilde{\mathbf{H}}(k+1) \bar{\mathbf{X}}_{\text{ECEF}}(k) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\bar{\mathbf{X}}_{\text{ECEF}}(k)$ 为 k 时刻的目标真实状态。

与此同时,联立式(6)~(8)和(12)又可得

$$\begin{aligned} & E[\mathbf{C}(k+1)\Delta r(k+1) - \mathbf{C}(k)\Delta r(k)] \\ &= \mathbf{M}(k+1) \begin{bmatrix} \lambda_\theta^{-1} \lambda_\varphi^{-1} \sin\theta(k+1) \cos\bar{\varphi}(k+1) \\ \lambda_\theta^{-1} \lambda_\varphi^{-1} \cos\theta(k+1) \cos\bar{\varphi}(k+1) \\ \lambda_\varphi^{-1} \sin\bar{\varphi}(k+1) \end{bmatrix} \Delta r(k+1) \\ &\quad - \mathbf{M}(k) \begin{bmatrix} \lambda_\theta^{-1} \lambda_\varphi^{-1} \sin\theta(k) \cos\bar{\varphi}(k) \\ \lambda_\theta^{-1} \lambda_\varphi^{-1} \cos\theta(k) \cos\bar{\varphi}(k) \\ \lambda_\varphi^{-1} \sin\bar{\varphi}(k) \end{bmatrix} \Delta r(k) \\ &= \frac{\Delta r(k+1)}{r(k+1) + \Delta r(k+1)} E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1)] \\ &\quad - \frac{\Delta r(k)}{r(k) + \Delta r(k)} E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k)] \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)代入(18)可得

$$\begin{aligned} & E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1)] \\ &= \left[1 + \frac{\Delta r(k+1)}{r(k+1)} \right] \tilde{\mathbf{H}}(k+1) \bar{\mathbf{X}}_{\text{ECEF}}(k) \\ &\quad + \left[1 + \frac{\Delta r(k+1)}{r(k+1)} \right] \left[1 - \frac{\Delta r(k)}{r(k) + \Delta r(k)} \right] E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k)] \end{aligned} \quad (20)$$

将式(19)代入(18)又可得

$$\begin{aligned} & E[\mathbf{C}(k+1)\Delta r(k+1) - \mathbf{C}(k)\Delta r(k)] \\ &= a(k+1) \tilde{\mathbf{H}}(k+1) \bar{\mathbf{X}}_{\text{ECEF}}(k) + b(k+1) E[\mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k)] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{其中} \quad a(k+1) = \frac{\Delta r(k+1)}{r(k+1)} \quad (22)$$

$$b(k+1) = \frac{\Delta r(k+1)\bar{r}(k) - \Delta r(k)\bar{r}(k+1)}{\bar{r}(k+1)(\bar{r}(k) + \Delta r(k))} \quad (23)$$

由式(21)~(23)可以看出,在 $E[\Delta r(k)] = 0$ 和

$E[\Delta r(k+1)] = 0$ 成立的情况下, $a(k+1)$ 和 $b(k+1)$ 的取值近似为 0 即 $\mathbf{C}(k+1)\Delta r(k+1) \approx \mathbf{C}(k)\Delta r(k)$, 这时可利用上述方法构建基于一歩时延的目标量测方程。

而在 $E[\Delta r(k)] \neq 0$ 和 $E[\Delta r(k+1)] \neq 0$ 的情况下, $E[\mathbf{C}(k+1)\Delta r(k+1) - \mathbf{C}(k)\Delta r(k)]$ 的取值并不为 0。这时,如果直接采用式(15)所述的观测差分法去构建单雷达量测方程,不可避免地会引入较大的跟踪测量误差。

3.3 解模糊处理后的联合状态估计

3.3.1 基于径向速度补偿的联合状态估计

针对这一情况,为实现临近空间高超声速目标的可靠跟踪,拟在状态向量中引入径向速度分量 $v(k)$, 并结合式(4)对高动态的距离时延偏差 $\Delta r(k)$ 进行补偿,以将问题转换为 $\Delta r(k)$ 较小时的联合状态估计问题。

假设 k 时刻的目标状态向量为

$$\mathbf{X}(k) = [\mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k)^T, v(k)]^T \quad (24)$$

则其联合状态方程可表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{X}(k+1) = f(\mathbf{X}(k)) \\ &= \begin{bmatrix} \Phi(k)\mathbf{X}_{\text{ECEF}}(k) \\ \frac{x(k+1)\dot{x}(k+1) + y(k+1)\dot{y}(k+1) + z(k+1)\dot{z}(k+1)}{\sqrt{x^2(k+1) + y^2(k+1) + z^2(k+1)}} \end{bmatrix} \\ &\quad + \mathbf{V}(k) \end{aligned} \quad (25)$$

对应地,引入径向速度量测 $\dot{r}(k)$ 后的单雷达量测方程可表示为

$$\mathbf{Y}(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{ECEF}}(k+1) \\ \dot{r}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k+1) \quad (26)$$

其中, $\mathbf{V}(k)$ 和 $\mathbf{W}(k+1)$ 分别为联合过程噪声和量测噪声。

与此同时,由式(4)可知,高动态的距离时延偏差 $\Delta r(k)$ 可近似表示为

$$\Delta r(k) \approx \hat{v}(k) \frac{\tau c}{B\lambda} \quad (27)$$

其中, $\hat{v}(k)$ 为 k 时刻的目标径向速度估计。这时,式(15)所示的单雷达量测方程可进一步修正为

$$\mathbf{Y}(k+1) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Y}}_{\text{ECEF}}(k+1) \\ \dot{r}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k+1) \quad (28)$$

其中

$$\hat{\mathbf{Y}}_{\text{ECEF}}(k+1) = \mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k+1) - \mathbf{Z}_{\text{ECEF}}(k) - \hat{v}(k+1) \frac{\tau c}{B\lambda} + \hat{v}(k) \frac{\tau c}{B\lambda} \quad (29)$$

3.3.2 速度解模糊处理

然而,在目标高超声速运动的条件下,雷达量测会存在一定的多普勒速度模糊特性。这时,要想利用目标的径向速度量测对高动态的距离时延偏差 $\Delta r(k)$ 做近

似补偿,首先需对其进行速度解模糊处理.

(1) 速度解模糊

在距离不模糊的假设下,假设相邻的距离量测分别为 r_1, r_2, \dots, r_n , 则利用多个相邻的距离量测相减可得平均速度估计

$$\bar{v}_r = \left(\frac{r_2 - r_1}{\Delta t_1} + \frac{r_3 - r_2}{\Delta t_2} + \dots + \frac{r_n - r_{n-1}}{\Delta t_{n-1}} \right) / (n-1) \quad (30)$$

其中, $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ 为相邻距离量测间的时间间隔.

在获得目标平均速度估计的条件下,由于 k 时刻的模糊速度与真实速度的关系为

$$v_{\text{模糊}}(k) = \dot{r}(k) - \text{mod} \left(\frac{\dot{r}(k)}{v_{\text{max}}} \right) v_{\text{max}} \quad (31)$$

其中

$$v_{\text{max}} = \frac{\lambda f_r}{2} \quad (32)$$

为最大不模糊速度, λ 为波长, f_r 为脉冲重复频率, $\dot{r}(k)$ 为真实速度, $\text{mod}(\cdot)$ 表示对括号里的数值取整数. 这时,以平均速度估计 \bar{v}_r 代替真实径向速度 $\dot{r}(k)$, 可进一步得到速度解模糊下的目标径向速度量测估计

$$\hat{\dot{r}}(k) = v_{\text{模糊}}(k) + \text{mod} \left(\frac{\bar{v}_r}{v_{\text{max}}} \right) v_{\text{max}} \quad (33)$$

(2) 速度解模糊的适用性分析

为使问题简化,假设相邻目标量测的采样间隔 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n = T$, 则

$$D(\bar{v}_r) = \frac{1}{[T(n-1)]^2} D(r_2 - r_1 + r_3 - r_2 + \dots + r_n - r_{n-1}) = \frac{(\Delta r_n - \Delta r_1)^2 + 2(n-1)\sigma_r^2}{[T(n-1)]^2} \quad (34)$$

即

$$\sqrt{D(\bar{v}_r)} = \frac{\sqrt{(\Delta r_n - \Delta r_1)^2 + 2(n-1)\sigma_r^2}}{T(n-1)} \quad (35)$$

而由文献[12]可知,最大不模糊速度

$$v_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4} \text{PRF} \quad (36)$$

这时,为充分分析上述距离差分法求解速度模糊的适用性,假设雷达测距误差 $\sigma_r = 100\text{m}$, 脉冲重复频率 $\text{PRF} = 12\text{kHz}$, 雷达波长 $\lambda = 0.15\text{m}$, 采样间隔 $T = 1\text{s}$, 距离量测数 $n = 5$, 高动态偏差的变化 $\Delta r_n - \Delta r_1 = 400\text{m}$, 则对比式(35)和(36)可知

$$\sqrt{D(\bar{v}_r)} < v_{\text{max}} \quad (37)$$

这也就是说,在现有雷达体制下,利用距离差分法求解速度模糊是可行的.

3.4 目标跟踪

在对目标量测方程修正的基础上,将现有的机动目标跟踪模型和上述具有一步延迟的量测方程相结

合,可进一步实现临近空间高超声速目标的可靠跟踪.

4 仿真验证与分析

4.1 仿真环境设置

临近空间飞行器的真实轨迹在地理坐标系下构建,量测在雷达所处位置的极坐标系获得,跟踪在 ECEF 坐标系下进行.

(1) 真实轨迹构建

临近空间飞行器的真实轨迹依据 Sanger 弹道^[13]构建,飞行器在推力、阻力、升力和重力的共同作用下做高超声速滑跃式轨迹运动. 其高超声速滑跃式轨迹如图 2 所示.

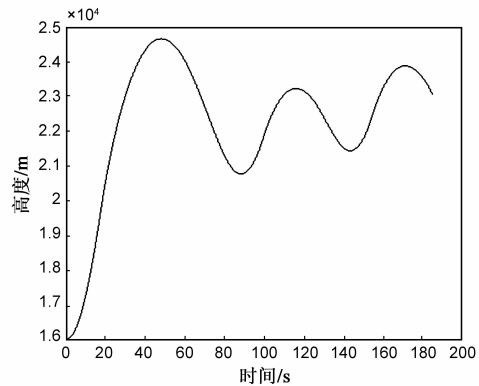


图2 临近空间目标真实轨迹

(2) 仿真条件设置

假设临近空间飞行器的初始地理位置为 $[32^\circ\text{N}, 132^\circ\text{E}, 16\text{km}]$, 初始速度为 $v = \text{Ma}5$, 初始质量为 3600kg , 初始航向角为 260° , 初始航迹倾角为 0° , 初始攻角为 1° . 对应地,采用脉冲压缩雷达来获取临近空间高超声速目标的量测. 假设观测雷达的地理位置为 $[35^\circ\text{N}, 131.5^\circ\text{E}, 0\text{km}]$, 雷达波长为 $\lambda = 0.15\text{m}$, 线性调频脉冲信号宽度为 $\tau = 800\mu\text{s}$, 线性调频带宽为 $B = 1\text{MHz}$, 雷达的测距、测角和测速误差分别为 100m 、 0.2° 和 100m/s , 观测周期为 1s . 在上述条件下,进行了 100 次蒙特卡洛仿真.

4.2 仿真结果与分析

实验 1 为分析目标高超声速运动对雷达探测跟踪的影响,将下述两种算法进行对比分析. 其中,模型①为不考虑高动态偏差下的 Singer 模型跟踪算法,模型②为高动态偏差存在下的 Singer 模型跟踪算法,其仿真结果如图 3 和 4 所示.

图 3 为临近空间高超声速目标跟踪轨迹图. 由图 3 可以看出,两种算法在一定程度上都实现了对临近空间高超声速目标的跟踪,但是模型②相对于目标真实轨迹存在较大的跟踪偏差,这是由目标高超声速运动所带来的高动态偏差引起的.

图 4 为不同跟踪算法下的临近空间目标跟踪误差图. 由图 4(a)可以看出,模型①相对于模型②具有较小的距离估计误差和较快的收敛速度;且经相邻时刻目标量测的对消处理,其距离跟踪误差相对于模型 4 减小了 2000m 左右. 由图 4(b)和图 4(c)可以看出,模型①的速度估计误差和加速度估计误差与模型②相比相差不大.

由此可见,目标高超声速运动严重影响雷达对目标的距离估计精度,而对速度和加速度估计的影响相对较小.

实验 2 在高动态偏差存在的条件下,为验证对相邻时刻目标量测进行对消处理有效性,将下述两种算法进行对比分析. 其中,模型③为基于观测差分法的单

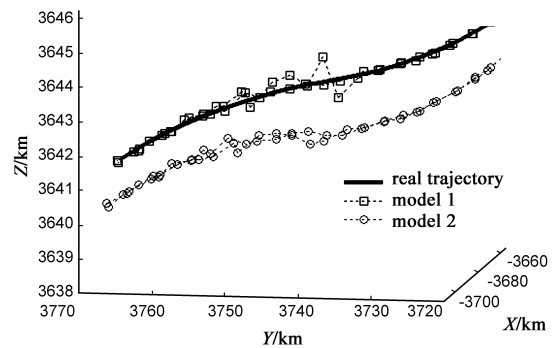


图3 目标高超声速运动下的跟踪轨迹图

雷达 Singer 模型跟踪算法,模型②为高动态偏差下的 Singer 模型跟踪算法,其仿真结果如图 5 所示.

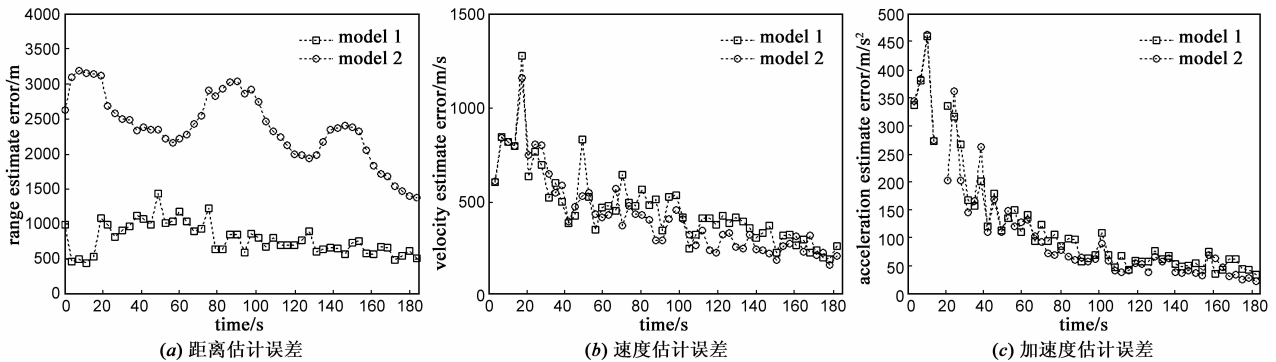


图4 不同跟踪算法下的目标状态估计误差图

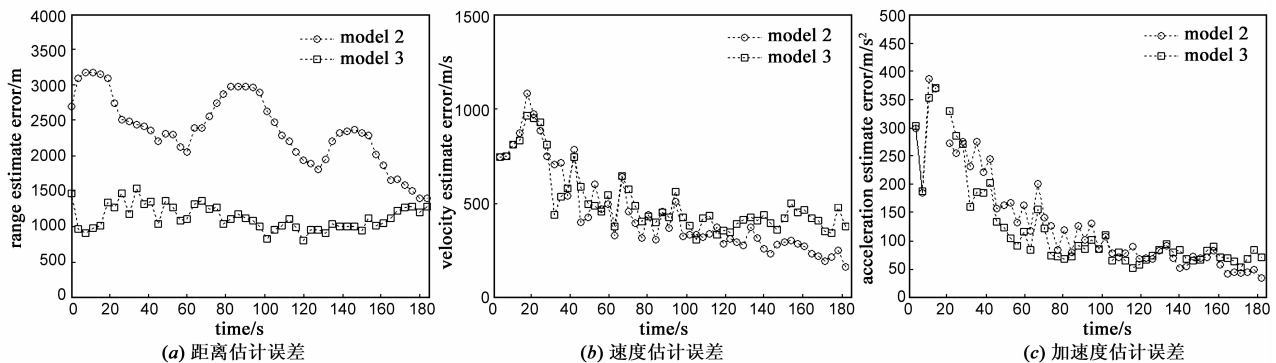


图5 不同跟踪算法下的目标状态估计误差图

图 5 为不同跟踪算法下的临近空间目标跟踪误差图. 由图 5(a)可以看出,模型③相对于模型②具有较小的距离估计误差,且其距离跟踪精度相对于模型 2 有较大的提高;但是,在 100s 后,模型③的距离跟踪误差呈增大的趋势变化,这是由于在目标相距雷达较近的情况下,目标径向速度变化较大,相邻时刻目标量测的对消并不能有效消除高动态偏差对目标跟踪的影响. 由图 4(b)和图 5(c)可以看出,模型③和模型②的速度和加速度估计误差相差不大,但在 120s 后,模型③相对于模型②的速度和加速度估计误差相对较大,且呈增

大的趋势变化.

由此可见,在径向速度变化较小的情况下,通过相邻时刻目标的量测的对消处理,可有效提高临近空间目标的跟踪精度;但在径向速度变化较大的情况下,该方法对目标跟踪精度的改进相对较小.

实验 3 在高动态偏差存在的条件下,为进一步验证利用径向速度估计对目标量测进行补偿的必要性,将下述两种算法进行对比分析. 其中,模型④为基于径向速度补偿和观测差分法的 Singer 模型跟踪算法,模型③为基于观测差分法的 Singer 模型跟踪算法,其仿真结

果如图 6 所示.

图 6 为不同跟踪算法下的临近空间目标跟踪误差图. 由图 6(a)可以看出,本文算法相对于模型③具有较小的距离估计误差,且在 120s 后本文算法的距离跟踪精度相对于模型③有较大的提高. 由图 6(b)和图 6(c)可以看出,在 120s 前本文算法与模型③的速度和加速度估计误差相差不大,但在 120s 后其速度和加速度的跟踪精度相对于模型③有较大提高.

由此可见,利用径向速度估计对目标量测进行补

偿是必要的,可进一步弥补相邻时刻目标量测对消技术的不足.

实验 4 为进一步验证速度解模糊处理对临近空间目标跟踪的必要性,将下述两种算法进行对比分析. 其中,模型⑤为本文算法,模型④为速度解模糊下的基于径向速度补偿和观测差分法的目标跟踪算法. 在上述仿真条件不变的情况下,假设脉冲重复频率为 $f_p = 10\text{kHz}$,则最大不模糊速度 $v_{\max} = 750\text{m/s}$,这时仿真结果如图 7 所示.

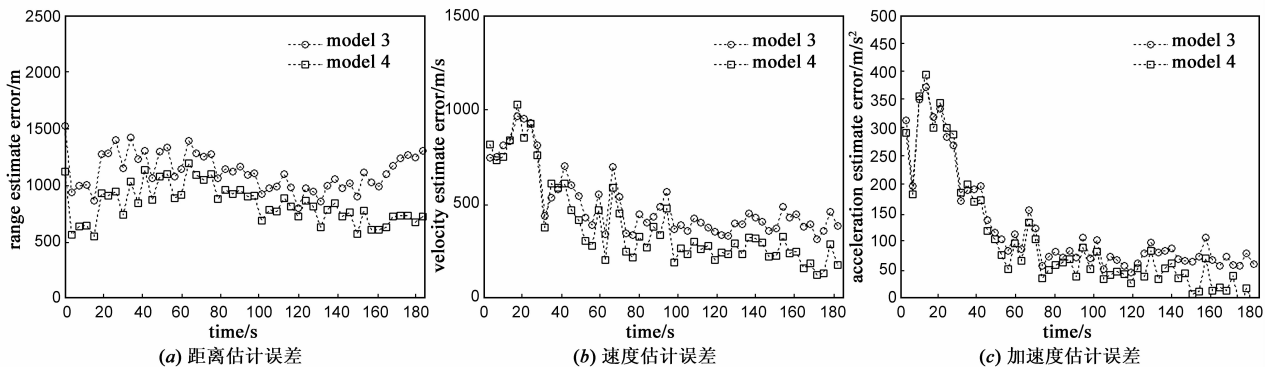


图 6 不同跟踪算法下的目标状态估计误差图

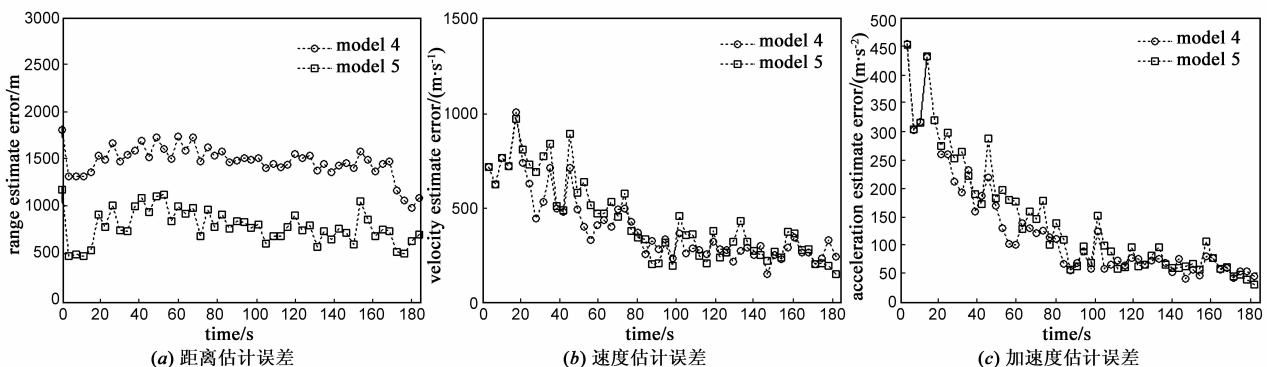


图 7 不同跟踪算法下的目标状态估计误差图

图 7 为不同跟踪算法下的临近空间目标跟踪误差图. 由图 7(a)可以看出,本文算法相对于模型④具有较小的距离估计误差,且其跟踪精度相对于模型④提高了 1000m 左右. 由图 7(b)和图 7(c)可以看出,本文算法与模型④的速度和加速度估计误差相差不大,但在 120s 后其速度和加速度的跟踪精度相对于模型③有较大提高.

由此可见,对目标的径向速度量测进行解速度模糊是必要的,可有效实现对临近空间目标速度模糊情况下的可靠跟踪.

5 结论

本文对临近空间高超声速跨越式轨迹目标跟踪的问题进行了研究,充分分析了目标高超声速运动对雷

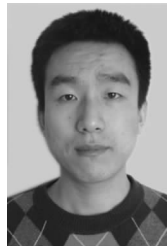
达探测跟踪的影响,提出了一种 ECEF 坐标系下基于径向速度补偿和相邻时刻目标量测对消处理的高超声速目标跟踪算法. 该算法通过相邻时刻目标量测的对消处理,有效减小了目标高超声速运动所引起的高动态距离时延偏差,并在此基础上通过具有一步延迟的单雷达量测方程的合理构建有效实现了高动态偏差下临近空间高超声速目标的可靠跟踪. 与此同时,与现有的临近空间目标跟踪算法相比,本文所提算法的估计误差相对较小,在跟踪上有着较明显的优势.

参考文献

- [1] Li X L. Survey of maneuvering target tracking. Part II: motion models of ballistic and space targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46

- (1): 96 - 115.
- [2] 李昌玺, 毕红葵, 等. 一种临近空间高超声速目标跟踪算法[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(4): 10 - 13.
Li Chang-xi, Bi Hong-kui, et al. A target tracking algorithm for hypersonic aircraft in near space[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2012, 28(4): 10 - 13. (in Chinese)
- [3] 张燕鹏, 李晓波, 薛俊诗. 对高超声速目标的跟踪及算法研究[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(5): 19 - 22.
Zhang Yan-peng, Li Xiao-bo, Xue Jun-shi. Research on tracking and algorithm of hypersonic aircraft[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(5): 19 - 22. (in Chinese)
- [4] 李昌玺, 毕红葵, 许文杰, 吴恒. 一种自适应高超声速目标跟踪算法[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(1): 48 - 51.
Li Chang-xi, Bi Hong-kui, Xu Wen-jie. Algorithm for adaptive tracking hypersonic targets[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2013, 27(1): 48 - 51. (in Chinese)
- [5] 吴超, 单奇, 邵俊伟. 跟踪临近空间目标的衰减记忆最小二乘算法[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(3): 69 - 72.
Wu Chao, Shan Qi, Shao Jun-wei. Fading memory least square algorithm for tracking targets in near - space[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2013, 36(3): 69 - 72. (in Chinese)
- [6] 李昌玺, 毕红葵, 张兵. 一种改进的高超声速目标跟踪算法[J]. 空军工程大学学报, 2012, 13(5): 50 - 54.
Li Chang-xi, Bi Hong-kui, Zhang Bing. An improved tracking algorithm for hypersonic targets[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2012, 13(5): 50 - 54. (in Chinese)
- [7] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
Chen B X. Modern Radar System Analysis and Design[M]. Xian: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [8] 刘高辉, 高勇. 一种基于分时发射技术的双线性间断调频连续波雷达的研究[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 696 - 699.
Liu Gao-hui, Gao Yong. A new type quasi-continuous radar employed the double linearly frequency interrupted modulation signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 696 - 699. (in Chinese)
- [9] 张容权, 杨建宇, 熊金涛. 对称三角线性调频连续波信号模糊函数分析[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 353 - 355.
Zhang Rong-quan, Yang Jian-yu, Xiong Jin-tao. Analysis of ambiguity function of symmetrical triangular linear frequency modulation continuous wave signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 353 - 355. (in Chinese)
- [10] Makitalo M, Foi A. A closed-form approximation of the exact unbiased inverse of the anscombe variance-stabilizing transformation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(9): 2697 - 2698.
- [11] 何友, 宋强, 熊伟. 基于相位相关的航迹对准关联技术[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2718 - 2722.
He You, Song Qiang, Xiong Wei. Track alignment-correlation technique based on phase correlation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2718 - 2722. (in Chinese)
- [12] 吴良, 魏玺章, 杨德贵. 调频步进信号高速目标精确运动估计[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2832 - 2836.
Wu Liang, Wei Xi-zhang, Yang De-gui. Accurate motion estimation of high speed moving target about stepped-frequency chip signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2832 - 2836. (in Chinese)
- [13] 宗群, 田苓, 窦立谦. 基于 Gauss 伪谱法的临近空间飞行器上升段轨迹优化[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1776 - 1781.
Zong Qun, Tian Ling, Dou Li-qian. Ascent phase trajectory optimization for near space vehicle based on gauss pseudospectral method[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1776 - 1781. (in Chinese)

作者简介



张翔宇 男, 1986 年 8 月出生, 山西太原人. 2009 年毕业于海军航空工程学院电子与信息工程系. 现为博士研究生, 从事机动目标跟踪方面的有关研究.
E-mail: zxy627289467@sina.com



王国宏 男, 1963 年 10 月出生, 山西沁水人, 教授、博士生导师. 主要从事信息融合、机动目标跟踪等方面的研究.

宋振宇 男, 1961 年 8 月出生, 山西太原人, 副教授. 主要从事信息融合、机动目标跟踪等方面的研究.

张静 女, 1976 年 4 月出生, 山东潍坊人, 副教授. 主要从事信息融合、机动目标跟踪等方面的研究.