

doi: 10.7690/bgzd.2018.09.005

对搜索雷达不等间隔采样问题的分析

张晨¹, 毛征¹, 杨俊强², 曲劲松², 王朋月¹, 张广申¹

(1. 北京工业大学信息学部, 北京 100124; 2. 中国兵器装备研究院总体所, 北京 102209)

摘要: 在对搜索雷达采样数据的使用过程中, 通常认为数据是基于等间隔采样得到的, 但实际采样过程中, 由于目标与搜索雷达间存在相对位移, 使得搜索雷达针对某一目标的采样数据间隔并不相等, 将不等间隔采样数据近似为等间隔采样数据处理会造成原理性误差。为得到实际的采样间隔, 提出利用迭代算法计算不同航迹运动目标的实际采样间隔。在分析搜索雷达对目标进行搜索和对目标信息进行采样处理过程的基础上, 仿真分析不等间隔采样对运动目标速度信息提取产生的影响, 并以一匀速运动目标为例讨论将实际非等间隔采样数据近似为等间隔处理对目标速度的影响。计算结果表明: 搜索雷达对目标的实际采样间隔与目标飞行方向、目标与雷达距离以及目标速度等存在一定的关联。该分析计算方法对于提高搜索雷达对运动目标的测量精度有一定参考价值。

关键词: 搜索雷达; 不等间隔采样; 雷达航迹; 迭代算法

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Analysis of Unequal Interval Sampling for Search Radar

Zhang Chen¹, Mao Zheng¹, Yang Junqiang², Qu Jinsong², Wang Pengyue¹, Zhang Guangshen¹

(1. Department of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. General Office, China Ordnance Equipment Research Academy, Beijing 102209, China)

Abstract: In the search radar sampling using the process data that is based on the data are usually of the sampling interval, but the actual sampling process due to the existence of the relative displacement between the target and the search radar, search radar for a target of the sampled data are not equal, not equal interval sampling data approximately equal interval sampling data processing will be by the principle of error. In order to obtain the actual sampling interval, an iterative algorithm is proposed to calculate the actual sampling interval of different moving targets. In the analysis of search radar target search and target information sampling process based on the simulation analysis of unequal interval sampling to extract moving target velocity information of the impact, and a moving target as an example to discuss the actual non equal interval sampling data approximate to the equal interval of target speed. The results show that the actual sampling interval of target radar is related to target flight direction, target and radar distance, target speed and so on. The analysis and calculation method presented in this paper can be used as a reference to improve the measurement accuracy of moving radar.

Keywords: search radar; unequal interval sampling; radar track; iterative algorithm

0 引言

搜索雷达在武器系统中担负着发现来袭目标, 并获取目标类型、坐标以及运动参数等数据的功能。由于搜索雷达获取的坐标数据主要应用于航迹融合、威胁度判断和航迹预测等对于数据精度有严格要求的场合, 因此其数据的精度会对整个系统造成较大影响^[1]。在实际扫描过程中, 由于目标是运动的, 在雷达对同一目标的采样过程中, 目标与雷达间会产生相对运动, 每次采样时目标相对于雷达的位置都不同, 所以导致相邻数据间的采样间隔不同。对于采样数据, 在使用过程中通常认为其采样间隔是相等的, 这会导致采样数据的精度有一定程度的降低, 同时随着采样周期数的增加会产生累积误差,

最终导致系统误差增大。

近年来, 出现了许多应用于搜索雷达数据处理的方法。文献[2]提出了一种利用目标运动的状态方程及最优控制理论来进行航迹模拟的方法; 文献[3]考虑地球曲率的影响, 提出了一种适合雷达组网系统航迹仿真的方法; 文献[4]基于多段航迹组合生成航迹的思想, 建立了目标的运动模型和航迹模型。上述文献中提到的方法均未考虑数据不等间隔采样问题, 以及由不等间隔采样带来的累积误差。忽略由于采样间隔不同带来的误差而近似为等间隔采样的做法, 可以使相关算法的实现更为简单, 但仅适用于对雷达数据精度要求不高的场合^[5]。

考虑到目标由于运动与搜索雷达间存在相对位

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-06-30

作者简介: 张晨(1992—), 男, 江苏人, 硕士, 从事数据融合与航迹处理技术研究。

移, 为得到实际的采样间隔, 笔者提出了使用迭代法计算目标实际采样间隔的方法。通过在迭代过程中不断地修正来得到较为准确的采样间隔。同时分别针对目标运动方向、目标与雷达间的距离以及目标运行速度对采样间隔的影响进行对比仿真。以一匀速运动目标为例, 讨论将实际非等间隔采样数据近似为等间隔, 处理对目标速度所产生的影响。

1 搜索雷达采样

1.1 站心坐标系

站心坐标系是指以观测站点为中心的坐标系。本文中的观测站点为搜索雷达^[6]。该坐标系的 3 个坐标轴 x 、 y 、 z 分别指向相互垂直的东向、北向和天向, 因而站心坐标系又称东北天坐标系。观测出的坐标大多是在极坐标系的基础上, 为了更好地进行研究, 通常会将极坐标转换为直角坐标。图 1 是一个以搜索雷达为中心的坐标系。

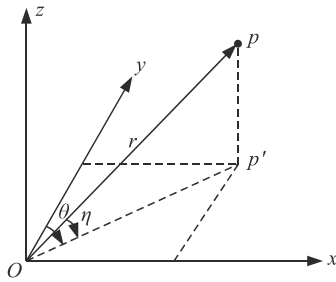


图 1 站心坐标系

已知目标的极坐标为 (r, θ, η) , 则其相应的直角坐标 (x, y, z) 为:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos \eta \sin \theta \\ y &= r \cos \eta \cos \theta \\ z &= r \sin \eta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于是基于 2 维搜索雷达进行分析, 故平面中某点的位置由坐标 (x, y) 确定。

1.2 搜索雷达采样过程

搜索雷达的采样过程如图 2 所示。图中 P_t 为 t 时刻扫描线与目标相交时目标所在位置^[7]。已知雷达的扫描周期为 T , 则雷达扫描线在 t 时刻后经过 T 会再次回到 P_t 位置, 而目标从 t 时刻起经过 T 运动到 P_{t+T} 位置。 α 为 t 时刻目标与雷达连线与正北方向的夹角, β 为 $t+T$ 时刻目标与雷达连线与正北方向的夹角。 t 时刻目标的坐标为 (x_t, y_t) , $t+T$ 时刻目标的坐标为 (x_{t+T}, y_{t+T}) , 目标的速度为 (v_x, v_y) , 则有如下关系:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_t}{y_t}\right); \quad (2)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{x_t + v_x T}{y_t + v_y T}\right). \quad (3)$$

此时雷达扫描线经过 T 后并未与目标相遇。

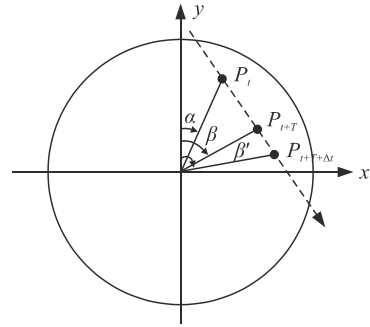


图 2 搜索雷达采样

假设再经过 Δt 后, 雷达扫描线与目标再次相遇于位置 $P_{t+T+\Delta t}$, $t+T+\Delta t$ 时刻目标与雷达连线和正北方向的夹角为 β' , 扫描线转动的角速度为 ω , 则 Δt 需满足如下关系:

$$\beta' = \arctan\left(\frac{x_t + v_x(T + \Delta t)}{y_t + v_y(T + \Delta t)}\right); \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad (5)$$

$$\beta' - \alpha = \omega(T + \Delta t) - 2\pi = \omega\Delta t. \quad (6)$$

2 实际采样间隔计算

2.1 实际采样间隔

在雷达扫描过程中, 由于目标与雷达间存在相对位移, 导致相邻采样数据间的时间间隔为 $T + \Delta t$ 。其中 Δt 为

$$\Delta t = \left[\arctan\left(\frac{x_t + v_x(T + \Delta t)}{y_t + v_y(T + \Delta t)}\right) - \arctan\left(\frac{x_t}{y_t}\right) \right] / \omega. \quad (7)$$

2.2 迭代法计算采样间隔

为确定 Δt , 笔者采用迭代法进行计算^[8]。设相邻采样数据间的时间间隔为 $t^i(k)$, 其中, 迭代次数 $i=0, 1, 2, 3, \dots$, 扫描周期数 $k=1, 2, 3, \dots$, 则:

$$\Delta t = \left[\arctan\left(\frac{x_t + v_x t^i(k)}{y_t + v_y t^i(k)}\right) - \arctan\left(\frac{x_t}{y_t}\right) \right] / \omega; \quad (8)$$

$$t^{i+1}(k) = T + \Delta t. \quad (9)$$

当 $i=0$ 时, 将雷达扫描周期 T 赋给 $t^0(k)$, 即 $t^0(k)=T$, 将 $t^0(k)$ 代入式(8)计算 Δt , 通过式(9)可得到 $i=1$ 时的目标探测间隔 $t^1(k)$ 。将迭代出的新值 $t^{i+1}(k)$

与旧值 $t^i(k)$ 进行比较：

$$|t^{i+1}(k) - t^i(k)| < \varepsilon, \quad (10)$$

ε 为设定的阈值，若不满足则：

$$t^{i+1}(k) = [t^{i+1}(k) + t^i(k)] / 2. \quad (11)$$

将 $t^{i+1}(k)$ 再次代入式(8)重复上述过程，直到满足式(10)或迭代次数 i 超过限定值，完成迭代后进入下一个扫描周期计算 $t^i(k+1)$ 。算法实现流程如图 3 所示。

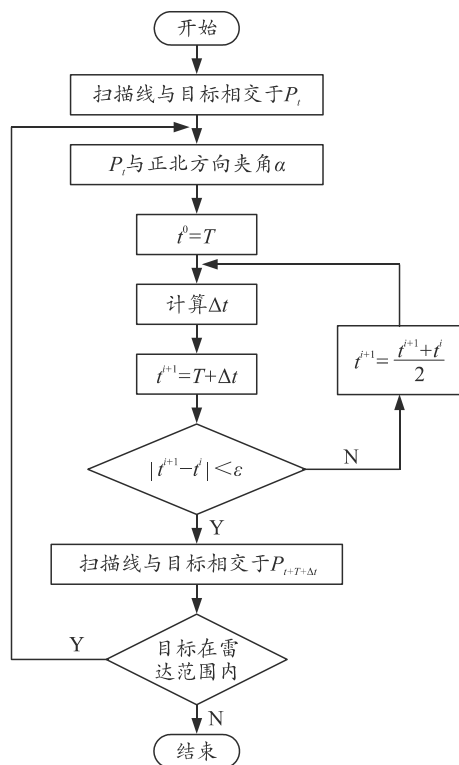


图 3 算法流程

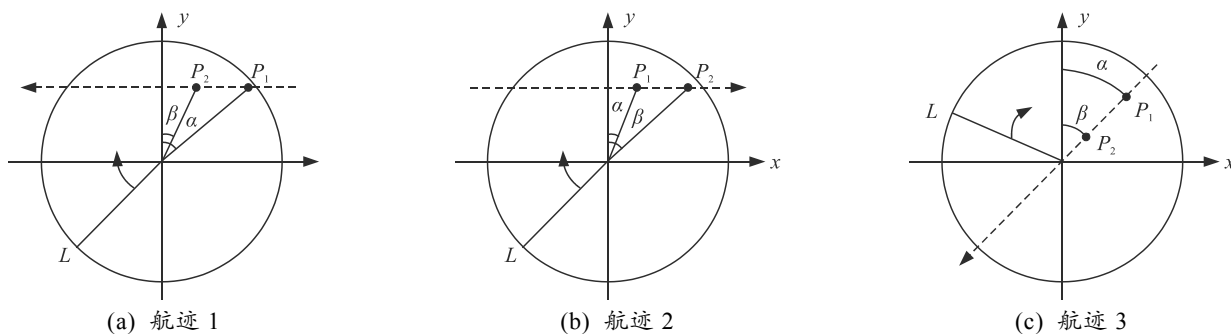


图 4 目标运行方向

不失一般性，笔者选取的航路如图 5(a)所示，由式(12)设定他们的初始状态向量分别为：

$$\mathbf{X}_1 = [10\ 000\ -300\ 2\ 000\ 0]^T,$$

$$\mathbf{X}_2 = [-10\ 000\ 320\ 2\ 600\ 0]^T,$$

$$\mathbf{X}_3 = [1\ 0000\ -190\ 1\ 0000\ -190]^T.$$

图 5(b)中显示了搜索雷达对 3 个目标的采样间

3 仿真结果与分析

3.1 目标航迹

假设目标在搜索雷达覆盖的 2 维平面中做匀速直线运动，则定义 i 时刻目标运动的状态向量为

$$\mathbf{X}(i) = [x(i)\ v_x(i)\ y(i)\ v_y(i)]^T. \quad (12)$$

其中： $x(i)$ 、 $y(i)$ 为 i 时刻目标在扫描平面的位置坐标； $v_x(i)$ 、 $v_y(i)$ 分别为沿 x 轴及 y 轴的速度^[8-9]。目标的状态方程为：

$$\mathbf{X}(i+1) = \mathbf{F}\mathbf{X}(i); \quad (13)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中： \mathbf{F} 为状态转移矩阵； T 为雷达采样间隔。

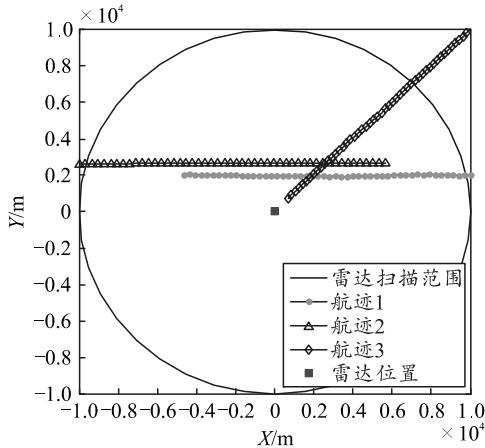
3.2 目标运行方向对扫描间隔的影响

如图 4(a)所示， L 为雷达扫描线，沿顺时针方向扫描雷达的覆盖区域。目标从 P_1 位置运动到 P_2 位置， P_1 与正北方向的夹角为 α ， P_2 与正北方向的夹角为 β ，目标沿逆时针方向运动，在这种情况下雷达对于目标的采样间隔会小于雷达的扫描周期。图 4(b)中，雷达沿顺时针方向扫描，目标同样沿顺时针方向运动，此时雷达对于目标的采样间隔会大于雷达的扫描周期。图 4(c)展示了一种特殊情况，即目标航迹正好穿过雷达所在的原点，目标与雷达间并未产生相对运动，此时目标采样间隔等于雷达扫描周期。

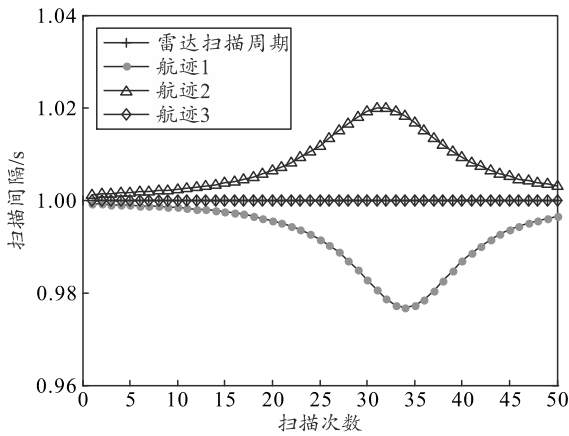
隔。仿真过程中设定雷达的扫描周期为 1 s。航迹 1 由第一象限进入到第二象限符合图 4(a)描述的情况，雷达对该目标的采样间隔小于 1 s。航迹 2 由第二象限进入到第一象限符合图 4(b)描述的情况，雷达对该目标的采样间隔大于 1 s。航迹 3 符合图 4(c)描述的情况，即目标在运动过程中相对于雷达并未

产生角度偏差，雷达对该目标的采样间隔等于 1 s。

与等间隔采样得到的目标位置间距离的偏差。从图中可以看到，随着扫描次数的增加，目标偏差距离经累积逐渐增大。最终 3 个目标累积的偏差依次为 165.94、141.14 和 119.16 m。



(a) 目标航迹仿真



(b) 不同航迹的扫描间隔

图 5 方向对扫描间隔的影响

3.3 目标与雷达距离对扫描间隔的影响

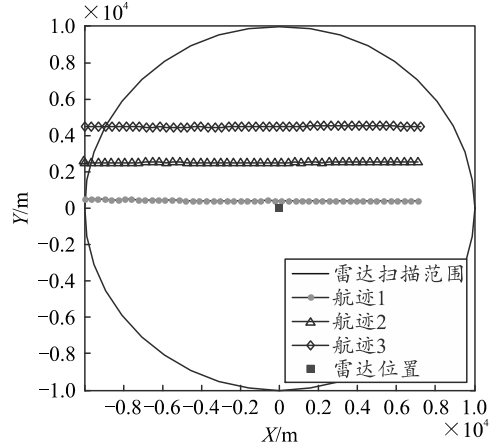
假定 3 个目标在 x 轴方向的速度均为 350 m/s，在 y 轴方向的速度为 0 m/s，起始位置分别为(-10 000, 500)、(-10 000, 2 500)和(-10 000, 4 500)，它们的初始状态向量可表示为：

$$X_1 = [-10\ 000\ 350\ 500\ 0]^T,$$

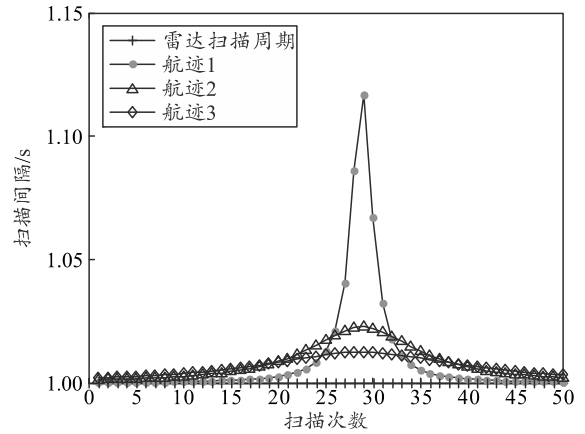
$$X_2 = [-10\ 000\ 350\ 2\ 500\ 0]^T,$$

$$X_3 = [-10\ 000\ 350\ 4\ 500\ 0]^T.$$

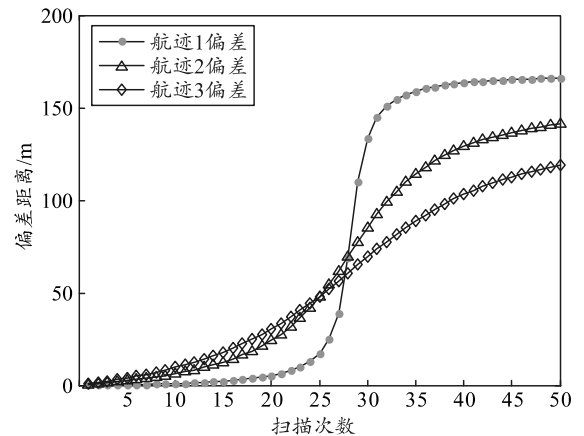
由于 3 个目标的运动方向相同，均由第二象限进入第一象限，如图 6(a)所示，即目标沿顺时针方向运动，故由 3.2 节的分析可得：搜索雷达对 3 个目标的采样间隔均大于搜索雷达扫描周期，如图 6(b)所示。同时由于 3 个目标在 y 轴方向上的速度均为 0，当它们通过过航点时，所对应的扫描间隔分别为 1.117、1.022 7 和 1.012 5 s。由此可以得出：在速度相等的情况下，目标与雷达间的距离与采样间隔呈反比，即距离越近，采样所用时间越长，反之则越短。图 6(c)显示了由非等间隔采样得到的目标位置



(a) 目标航迹仿真



(b) 不同航迹的采样间隔



(c) 目标位置偏差对比

图 6 距离对采样间隔的影响

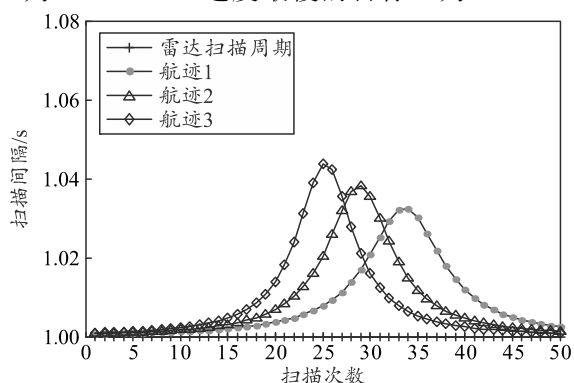
3.4 目标速度对扫描间隔的影响

假定 3 个目标的运行轨迹相同，均由第二象限进入第一象限，根据前面的分析可知，搜索雷达对这 3 个目标的采样间隔均大于雷达的扫描周期。为

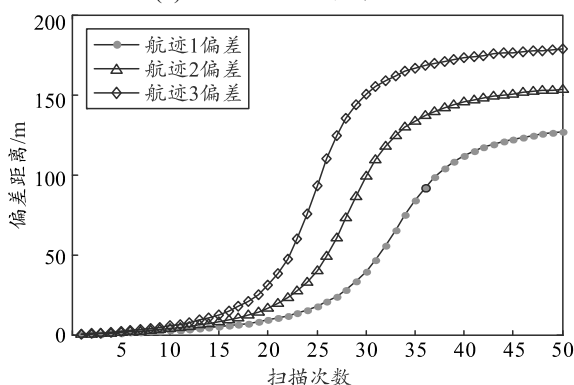
了验证目标速度对雷达采样间隔的影响，笔者将 3 个目标在 x 轴方向的速度分别设置为 300、350 和 400 m/s， y 轴方向的速度均为 0，它们的初始状态向量分别为：

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= [-10\ 000 \quad 300 \quad 1\ 500 \quad 0]^T, \\ \mathbf{X}_2 &= [-10\ 000 \quad 350 \quad 1\ 500 \quad 0]^T, \\ \mathbf{X}_3 &= [-10\ 000 \quad 400 \quad 1\ 500 \quad 0]^T. \end{aligned}$$

由于速度不同的 3 个目标先后通过航点由第二象限进入第一象限，且在通过时达到与雷达的最短距离 1 500 m。图 7(a)显示，目标 1 以 300 m/s 通过时，采样间隔为 1.032 5 s。目标 2 通过时，速度为 350 m/s 采样间隔为 1.038 2 s。目标 3 以速度 400 m/s 通过时，零点采样间隔为 1.043 7 s。综上可得：目标速度与采样间隔呈正比，即目标速度越快，采样所用时间越长，反之则越短。图 7(b)显示了由非等间隔采样造成的目标位置偏差。在 3 个目标中，由于目标 3 的速度最快，相邻数据间的采样间隔最长，因此其累积误差也最大，达到了 178.39 m，目标 2 为 153.47 m，速度最慢的目标 1 为 127.09 m。



(a) 不同航迹的采样间隔



(b) 目标位置偏差对比

图 7 速度对采样间隔的影响

3.5 非等间隔采样数据等间隔处理对速度的影响

以 3.4 节航迹 1 为例，目标的初始状态向量为：

$$\mathbf{X}_1 = [-10\ 000 \quad 300 \quad 1\ 500 \quad 0]^T.$$

目标在 x 轴方向速度为 $v_x=300$ m/s，在 y 轴方向速度为 0 m/s，初始位置为 $(-10\ 000, 1\ 500)$ 。设搜索雷达对该目标第 k 次采样时目标的 x 轴坐标为 $x(k)$ ，第 $k+1$ 次采样坐标为 $x(k+1)$ ，搜索雷达扫描周期为 T ，实际的采样间隔为 $T+\Delta t$ ，则基于搜索雷达采集的数据，计算目标在 x 轴方向的速度为：

$$v'_x = \frac{x(k+1) - x(k)}{T + \Delta t}. \quad (15)$$

由于航迹 1 沿顺时针方向运动，故 $T+\Delta t > T$ 。由式(15)计算得到 v'_x 应等于目标的实际速度 300 m/s。若忽略 Δt 的影响，即为等间隔采样，计算得到 v'_x 会大于目标实际速度 v_x 。仿真结果如图 8 所示。同理，当目标沿逆时针方向运动时，忽略 Δt 的影响，计算得到 v'_x 会小于目标实际速度 v_x 。当目标航迹穿过雷达所在位置时， $\Delta t=0$ 。

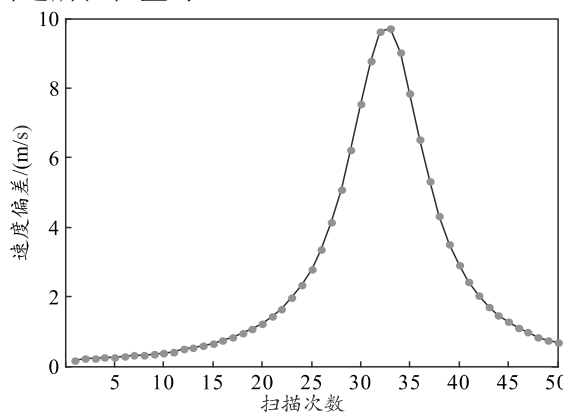


图 8 目标速度偏差

4 结论

笔者通过对搜索雷达采样过程的分析，得到了采样间隔不等的原因是由于目标与雷达间存在相对运动，同时提出了将迭代法应用于计算搜索雷达实际采样间隔的具体实现方法。基于上述方法，笔者对影响扫描间隔的目标运动方向、目标与雷达间的距离以及目标速度分别进行了仿真对比。仿真结果表明：当目标运动方向与搜索雷达扫描方向一致时，目标采样间隔大于雷达的扫描周期；反之，则小于雷达扫描周期。目标航迹穿过雷达所在位置时，目标采样间隔等于雷达扫描周期；目标与雷达间的距离与采样间隔呈反比；目标速度与采样间隔呈正比。最后将实际非等间隔采样数据近似为等间隔处理，对目标速度产生的影响进行了讨论。综上所述，该分析结果可为后续的改进与研究提供工作提供参考。

- al. Cultural scene detection using reverse Louvain optimization[Z]. *Science of Computer Programming* 95, 2014: 44–72.
- [2] REN G, WANG X. Epidemic spreading in time-varying community networks[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2014, 24(2): 068701–4251.
- [3] CANTINI L, MEDICO E, FORTUNATO S, et al. Detection of gene communities in multi-networks reveals cancer drivers[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17386.
- [4] YANG J, LESKOVEC J. Community-affiliation graph

 (上接第19页)
- 参考文献:**
- [1] HE B L, MAO Z. A Track-to-track Association Algorithm with Chaotic Neural Network[C]. *Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings*. IEEE PRESS, 2009: 788–791.
- [2] 金宏斌, 徐毓. 基于状态方程的雷达目标航迹模拟方法[J]. *航空计算技术*, 2003, 33(2): 34–36.
- [3] 郭锐, 崔爱国, 杨大志. 一种航迹仿真方法及其在雷达组网系统中的应用[J]. *雷达与对抗*, 2006(3): 50–53.
- [4] 李欣, 彭世蕤. 一种空间三维航迹建模新方法[J]. *雷达科学与技术*, 2007, 5(5): 365–370.
- [5] 陈敏, 王晓亮, 汪万维, 等. 不等间隔时间采样高精度雷达数据仿真方法[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(2): 111–114, 118.
- [6] 杨俊强, 毛征, 张志, 等. 雷达航迹融合算法验证系统设计[J]. *国外电子测量技术*, 2009, 28(11): 63–66.
- [7] 郭吉成. 高炮火控系统射击问题算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 20–24.
- [8] 李文才, 张翼. 近似计算求解高炮相遇问题[J]. *兵工自动化*, 2011, 30(4): 8–9, 11.
- [9] 高萌. 雷达航迹处理算法及仿真平台设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 29–30.
- model for overlapping network community detection[J]. *Proc. IEEE Int. Conf. Data Min.*, 2013, 5(1): 1170–1175.
- [5] LANCICHINETTI A, FORTUNATO S, KERTÉSZ J. Detecting the overlapping and hierarchical community structure in complex networks[J]. *New J. Phys.*, 2008, 11(3): 19–44.
- [6] 刘世超, 朱福喜, 甘琳. 基于标签传播概率的重叠社区发现算法[J]. *计算机学报*, 2016, 39(4): 717–729.
- [7] GIRVAN M, NEWMAN M E. Community structure in social and biological networks[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2002, 99(12): 7821–7826.
