·信号/数据处理· 中图分类号:TN959 文献标识码:A 文章编号:1004-7859(2009)10-0047-04

一种利用径向速度量测的航迹起始新算法

韩正国[1],江 晶[1],刘 刚[2],王家秀[2]

(1. 空军雷达学院; 武汉 430019; 2. 南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:连续波雷达的测距精度较差,只利用目标的位置量测进行航迹起始的传统方法效果有限。但连续波雷达还能提供高精度的径向速度量测,因此推导了目标径向速度与方位角和航向角之间的关系式,进而建立了2种径向速度波门,结合位置扇形波门,确定了一种利用径向速度量测的航迹起始新算法。仿真结果表明,对低测距精度的目标,该算法航迹起始效果要大大优于单一位置波门算法的航迹起始效果。

关键词: 连续波雷达;径向速度;航迹起始;波门

A Novel Track Initiation Algorithm Using Radial Velocity Measurement

HAN Zheng-guo[1], JIANG Jing[1], LIU Gang[2], WANG Jia-xiu[2]

(1. Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

(2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Range measuring precision of continuous wave radar is poor, and conventional track initiation algorithm using only position information has limited effect. But continuous wave radar can provide high precision radial velocity information, so a formula of relation between target radial velocity and its azimuth and course-angle is derived, and two kinds of radial velocity tracking gate are presented. Simulation results show that the track initiation effect of the algorithm is better than the single position gate algorithm in tracking low ranging precision target.

Key words: continues wave radar; radial velocity; track initiation; track gate

0 引 言

航迹起始是雷达数据处理中的首要问题[1-5]。由于航迹起始时,目标一般距观察站较远,传感器探测分辨率低,测量精度差,因此多目标航迹是难以处理的问题;工作于搜索/跟踪模式下的二次差频连续波雷达尤其如此,该体制雷达采用的是逐级解模糊的测距方式[6-8],即周期性地发射一组组双频信号,每组双频信号之间频差较大,但相邻两组频差的差即"二次频差"较小,而后相邻两组双频信号之间的二次频差逐步增大,每次测量均可得到无模糊距离,测距精度逐级提高。其中,检测到目标的前两次扫描的测距误差非常大,已有的航迹起始方法,如Leung在文献[1]中介绍的启发式规则方法、基于逻辑的方法、Hough变换法(HT)和改进HT法等只利用了位置信息,对低测距精度的二次差频连续波雷达而言效果有限[6]。考虑到该体制雷达能够提供精确的目标径向速度信息[9],因此可利用径向速度信息提高航迹起始性能。

具体而言,即在目标刚被检测到的第1、2次扫描的量测点,由于测距误差非常大,如测距误差分别为5 km和1.25 km,速度法或与距离相关的方法不能准确关联,可利用径向速度差值信息进行关联;同时,利用由目标的方位角、航向角和速度形成的径向速度波门剔除径向速度较小的杂波;针对二次差频连续波雷达测距精度逐级提高的特点,当测距误差非常大时采用径向速度信息进行航迹起始,当测距误差变得相对较小时,采用径向速度信息和位置扇形波门进行联合航迹起始。

基于上述,本文首先推导径向速度波门和径向速度差值波门,阐述其在航迹起始中的作用,然后介绍引入径向速度量测后的航迹起始算法,最后通过仿真验证上述算法的有效性,并与逻辑法进行航迹起始性能比较。

1 航迹起始波门

相关波门是指以被跟踪目标的预测值为中心,用来确定该目标的观测值可能出现范围的一块区域[3,10]。区域的大小由正确接收回波的概率来确定,也就是在确定波门形状和大小时,应使真实量测以很高的概率落入波门内,同时又要使相关波门内无关点迹的量测尽可能少。相关波门是用来判断量测值是否

通信作者:韩正国 Email:jiangj36@sina.com
收稿日期:2009-05-10 修订日期:2009-08-12

源自目标的决策门限,落入相关波门内的回波成为候选回波。本文建立的波门包括径向速度波门、径向速度差值波门和扇形波门。

1.1 径向速度波门

常规雷达航迹起始时,对新出现的目标点迹首先用速度法建立波门[3,11-12],该方法基于下述物体运动学原理:雷达两个相邻扫描周期的任意两个量测,若属于同一个目标,则应满足

$$V_{\min}T \leqslant D \leqslant V_{\max}T \tag{1}$$

式中:D 为两相邻扫描周期的 2 个量测之间的距离;$V_{\min}$为目标最小飞行速度;$V_{\max}$为目标最大飞行速度。

参照速度法的波门,如图 1 所示,目标速度 V 分解为切向分量 V_t 和径向分量 $\dot{r}$,其中 b 为方位角,γ 为目标飞行方向与 X 的夹角。目标的径向速度[8]为

$$\dot{r} = V\cos(b-\gamma) \tag{2}$$

由式(1)、式(2)可确定径向速度波门为

$$V_{\min}\cos(b-\gamma) \leqslant \dot{r} \leqslant V_{\max}\cos(b-\gamma) \tag{3}$$

目前,根据雷达量测的信息还无法精确判断出目标的瞬时飞行方向,但目标做直线飞行时,可按以下方法近似确定 γ。设 k 时刻目标的量测为($r(k)$　$b(k)$　$\dot{r}(k)$),$k+1$ 时刻目标的量测为($r(k+1)$　$b(k+1)$　$\dot{r}(k+1)$),则

$$\gamma = \operatorname{arctg}\frac{r(k+1)\sin(b(k+1)) - r(k)\sin(b(k))}{r(k+1)\cos b(k+1)) - r(k)\cos b(k))} \tag{4}$$

除特殊情况的云雨杂波外,通常杂波的径向速度一般都很小,因此目标径向速度可用 $\dot{r} \geqslant V_{\min}\cos(b-\gamma)$ 约束,即径向速度大于某个门限值的量测才参与航迹起始,这样可以有效地剔除部分杂波点,减少虚假航迹。

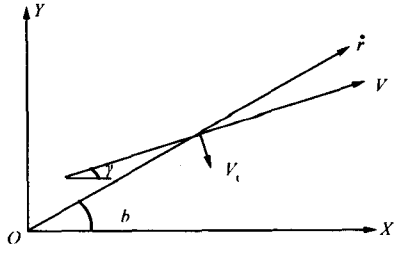

图 1　目标速度沿径向和切向分解图

1.2 相邻扫描点迹间的径向速度差值波门

假设目标做直线运动,如图 2 所示,可推导出相邻扫描点迹间的径向速度速度差值波门,设 k 时刻目标在位置 p 点,径向速度为 $\dot{r}(k)$,方位角为 $b(k)$,径向速度在 X 方向的分量为 $\dot{r}_X(k)$,在 Y 方向的分量为 $\dot{r}_Y(k)$,$k+1$ 时刻目标移动到位置 q 点,径向速度为 $\dot{r}(k+1)$,方位角为 $b(k+1)$,径向速度在 X 方向的分量为 $\dot{r}_X(k+1)$,在 Y 方向的分量为 $\dot{r}_Y(k+1)$,相邻两个时刻的径向速度差为 $\Delta\dot{r}$,则根据矢量运算法则,$k+1$ 时刻和 k 时刻径向速度在 X 方向的分量的差值 $\Delta\dot{r}_X$ 为

$$\Delta\dot{r}_X = \dot{r}(k+1)\cos b(k+1) - \dot{r}(k)\cos b(k) \tag{5}$$

代入式(2)得

$$\Delta\dot{r}_X = -V\sin(b(k+1)+b(k)-\gamma)\sin(b(k+1)-b(k)) \tag{6}$$

$k+1$ 时刻和 k 时刻径向速度在 X 方向的分量的差值 $\Delta\dot{r}_Y$ 为

$$\Delta\dot{r}_Y = \dot{r}(k+1)\sin b(k+1) - \dot{r}(k)\sin b(k) \tag{7}$$

代入式(2)得

$$\Delta\dot{r}_Y = V\cos(b(k+1)+b(k)-\gamma)\sin(b(k+1)-b(k)) \tag{8}$$

故,径向速度大小的变化量为

$$|\Delta\dot{r}| = |\dot{r}(k+1)-\dot{r}(k)| = \sqrt{\Delta\dot{r}_X^2+\Delta\dot{r}_Y^2} \tag{9}$$

将式(6)、(8)代入式(9),得相邻时刻径向速度差值大小为

$$|\Delta\dot{r}| = |V\sin(b(k+1)-b(k))| \tag{10}$$

因而,由式(1)、式(10),得径向速度差值波门为

$$|V_{\min}\sin(b(k+1)-b(k))| \leqslant |\dot{r}(k+1)-\dot{r}(k)| \leqslant |V_{\max}\sin(b(k+1)-b(k))| \tag{11}$$

在目标刚被检测到的第 1、2 次扫描的量测点时,由于测距误差非常大,如测距误差分别为5 km和1.25 km,速度法或与距离相关的方法不能准确关联,可利用径向速度差值波门进行关联。

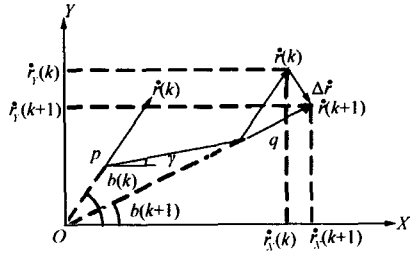

图 2　径向速度差值推导图

1.3 扇形波门

二次差频连续波雷达在第3、4次扫描时测距误差相对较小,此时可利用位置信息建立扇形波门,与径向速度配合进行联合航迹起始,提高航迹起始性能。

在极坐标系下,传感器测得的目标量测值 r、b 若满足[3,13]

$$|r(k+1)-\hat{r}(k+1|k)|\leqslant K_r\sqrt{(\sigma_r^2+\sigma_{r(k+1|k)}^2)} \tag{12}$$

$$|b(k+1)-\hat{b}(k+1|k)|\leqslant K_b\sqrt{(\sigma_b^2+\sigma_{b(k+1|k)}^2)} \tag{13}$$

则称量测值 r、b 落入扇形波门内,该量测为候选回波。其中,可通过查 χ^2 分布表获得参数平方根 K_r 和 K_b,$\hat{r}(k+1|k)$ 和 $\hat{b}(k+1|k)$ 分别为在 $k+1$ 时刻径向距离和方位角的预测值,$\sigma_{r(k+1|k)}^2$ 和 $\sigma_{b(k+1|k)}^2$ 分别为对应的预测值的方差。

2 引入径向速度的航迹起始算法

根据上述,可建立如下航迹起始新方法:

步骤1:用第1次扫描中得到的量测为初始航迹点。

步骤2:如果第2次扫描径向速度量测满足径向速度波门,第1次扫描和第2次扫描的径向速度量测差值满足径向速度差值波门,则建立可能航迹。

步骤3:对每个可能的航迹直线,采用径向速度波门和径向速度差值波门对第3次扫描的量测进行筛选,满足条件的可能航迹进行直线外推,求取新息和新息协方差,以外推点为中心建立扇形波门,若第3次扫描的量测落入波门者给予互联,若相关波门没有量测,则用直线外推的预测值代替,建立临时航迹,如果连续2次都为预测值则取消该航迹。

步骤4:继续上述步骤,直到形成稳定航迹,航迹起始方算完成,转入跟踪环节。

步骤5:在历次扫描中,均未落入相关波门参与数据互联判别的那些量测均作为新的航迹头,转步骤1。

3 仿真分析

二次差频连续波雷达工作环境为弱杂波环境,为了检验本方法的性能,在杂波环境下进行仿真验证。仿真环境如下:

假定目标做匀速直线运动,使用一个2D雷达对目标进行跟踪,5个目标的初始位置为:(50 km,36 km)、(40 km,45 km)、(35 km,35 km)、(25 km,45 km)、(15 km,45 km),同时假定雷达的采样周期 $T=10$ s,雷达的测向误差 $\sigma_b=0.3°$,测距误差 $\sigma_r=[5\ 000\quad 1\ 250\quad 312.5\quad 78]$ m,并依次循环,径向速度误差 $\sigma_r=2$ m/s,杂波的最大径向速度为 $v_c=50$ m/s,取门限概率为0.999 7,自由度为2,可查表得 $K_r=4$,$K_b=4$。

每个周期的杂波个数是根据文献[4]中所述方法按泊松分布确定的,即给定参数 λ,首先产生(0,1)区间上均匀分布产生的随机数 ε,然后由

$$e^{-\lambda}\sum_{j=0}^{J-1}\frac{\lambda^j}{j!}<\varepsilon\leqslant e^{-\lambda}\sum_{j=0}^{J}\frac{\lambda^j}{j!}\quad J=1,2,\cdots$$

确定出 J,则 J 就是要产生的杂波个数。在确定出 J 后,每个周期的 J 个杂波按均匀分布随机分布在雷达威力范围内。

取 $\lambda=30$,在连续4个扫描周期内产生的杂波点与目标真实点的态势如图3所示。其中:O 代表真实的量测航迹点;* 代表第1次扫描时的杂波点;□代表第2次扫描时的杂波点;+代表第3次扫描时的杂波点;·代表第4次扫描时的杂波点。

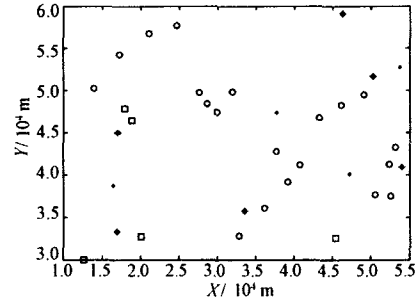

图3　杂波点与真实点的态势图

按本文所述的航迹起始方法起始用3/4滑窗法后,航迹起始的确认航迹如图4所示。

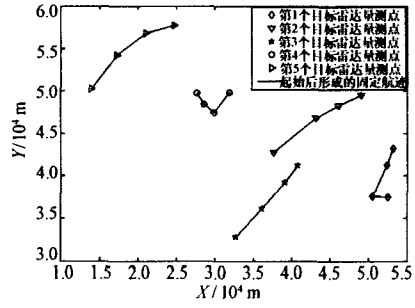

图4　航迹起始后的确认航迹图

通过图4可以看出,径向速度限制条件可以很好地剔除杂波,同时也能充分看出径向速度差值波门可以较准确地对第1、2次扫描点进行关联。

为更好地说明该航迹起始算法的性能,假定目标

做匀速直线运动,使用一个2D雷达对目标进行跟踪,目标初始位置为:(30 km,30 km),其他仿真条件同上,运用Monte Carlo进行了1 000次仿真,引入径向速度的航迹起始算法的正确起始概率与逻辑法的正确起始概率比较结果如表1所示。

表1　有无径向速度的航迹起始算法性能比较表

	正确起始概率%
引入径向速度的航迹起始方法	94.5
逻辑法	81.4

4　结束语

根据二次差频连续波雷达的特点,本文将径向速度量测用于多目标航迹起始,建立了径向速度波门和径向速度差值波门,并提出了利用径向速度量测的航迹起始新算法。仿真结果表明,利用径向速度信息可以有效地抑制杂波,并对第1、2次扫描的量测点进行有效地关联,该方法较好地解决了大测距误差量测的航迹起始难题,有望应用于工程实际。

参考文献

[1] Leung H,Hu Z. Evaluation of multiple target tracking initiation techniques in real radar tracking environment [J]. IEE Proc-Radar,Sonar Nuvig,1996,143(4):246 - 254.

[2] Bar shalom Y. Multitarget-multisensor tracking:applications and advances, volume3[M]. Dedham,MA:Artech House, 2000.

[3] 何　友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
He You, Xiu Jianjuan, Zhang Jingwei, et al. Radar data processing with application[M]. Beijing:Electronic Industry Publishing House, 2006.

[4] 蔡庆宇,薛　毅,张伯彦. 相控阵雷达数据处理及仿真技术[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
Cai Qingyu, Xue Yi, Zhang Boyan. Phase array radar data processing and its simulation techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1997.

[5] 苏　峰,王国宏. 修正的逻辑航迹起始算法[J]. 现代防御技术,2004,32(5):66 - 68.
Su Feng, Wang Guohong. Track initiation algorithm based n the modified logic[J]. Modern Defense Technology, 2004, 32(5):66 - 68.

[6] 曹延伟,程　翥,皇甫堪. 多频连续波雷达两种测距算法研究[J]. 电子信息学报,2005,27(5):789 - 792.
Cao Yanwei, Cheng Zhu, Huang Fukan. The research on two algorithms for multiple frequency CW radar ranging[J]. Journal of Electronics and information technology, 2005,27 (5):789 - 792.

[7] 袁俊泉,龚享铱,皇甫堪. 基于二次差频的多频连续波测距方法研究[J]. 电子学报,2004,32(12):2056 - 2058.
Yuan Junquan, Gong Xiangyi, Huang Fukan. Study on multiple frequency CW ranging method based quadric difference frequency[J]. Acta Electronical Sinica, 2004, 32 (12): 2056 - 2058.

[8] 贾兴泉. 连续波雷达雷达数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
Jia Xingquan. Continuous wave radar data processing[M]. Beijing:National Defense Industry Publishing House, 2005.

[9] 张怀根,张林让,吴顺君. 利用径向速度观测值提高目标跟踪性能[J]. 西安电子科技大学学报, 2005,32(5): 667 - 670.
Zhang huaigen, Zhang Linrang, Wu Shunjun. The use of the radial velocity to improve the performance of target tracking [J]. Journal of Xi Dian University, 2005,32(5):667 - 670.

[10] 费利那. 雷达数据处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
Farina. Radar data processing[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1998.

[11] 董志荣. 论航迹起始方法[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,1999,2(2):1 - 6.
Dong Zhirong. Discussing track initiation algorithm[J]. Information Commanding Control System and Simulation techniques, 1992,2(2):1 - 6.

[12] 刘　盼,刘　峥. 一种适合多频连续波体制雷达的航迹起始算法[J]. 火控雷达技术,2007,36(1):21 - 23.
Liu Pang, Liu Zheng. A track in itiation algorithm for multi-frequency continuous wave system radar [J]. Fire Control Radar Technology, 2007,36(1):21 - 23.

[13] 孙龙祥,张祖稷. 雷达数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
Sun Longxiang, Zhang Zuji. Radar data processing[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1992.

韩正国　男,1979年生,硕士研究生。研究方向为连续波雷达数据处理。

江　晶　男,1964年生,教授,博士生导师。研究方向为现代数字信号处理、雷达信号与信息处理等。