

# 高耦合系数条件下径向速度估计的新方法

赵 锋,王雪松,肖顺平

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文在分析了线性调频信号距离—多普勒耦合原理的基础上,提出了一种高耦合系数条件下径向速度估计的新方法.该方法利用雷达波形参数切换带来的距离信息,通过所建立的匀速模型和匀加速模型,在滤波器起始之前对径向速度进行了有效的估计,解决了高耦合系数条件下多普勒耦合测距误差修正、数据关联以及最佳滤波器起始的问题.对导弹防御雷达的仿真验证了该方法的有效性.

**关键词:** 线性调频;距离—多普勒耦合;径向速度;波形切换

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09-1571-05

## A New Method of Radial Velocity Estimation for High Coupling Coefficient

ZHAO Feng, WANG Xue-song, XIAO Shun-ping

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** On the basis of the principle of range-Doppler coupling of linear frequency modulation signal, a new method of radial velocity estimation for high coupling coefficient is presented. Using range information brought by radar waveform switching, the radial velocity is efficiently estimated through a uniform velocity model and a uniform acceleration model established in the method, which solves such problems as range measurement bias modification caused by range-Doppler coupling, data association and optimal Kalman Filter construction in the case of high coupling coefficient. The simulation result of missile defense radar verifies the efficiency.

**Key words:** linear frequency modulation; range-Doppler coupling; radial velocity; waveform switch

## 1 引言

线性调频信号由于具有脉冲压缩和使用简便等优点而被广泛运用于雷达和声纳,这种信号的一个显著特点就是具有很强的距离—多普勒耦合(Range-Doppler Coupling)效应.该特性的存在使得雷达对目标的距离测量值产生一个与径向速度成正比的偏差,在数据关联和目标跟踪时必须对该偏差进行有效的修正.

目前对距离—多普勒耦合测距误差进行修正的常用方法是将耦合系数引入 Kalman 滤波的测量方程,在滤波器中对目标的径向速度进行估计.文献[1~5]采用单坐标滤波器,利用距离测量作为观测数据,采用距离与径向速度作为状态变量进行线性滤波;文献[6~9]采用扩展 Kalman 滤波(EKF)形式将径向速度测量引入滤波器进行滤波.此外还有一种方法是先不考虑耦合的影响,让滤波器直接在有偏的条件下进行滤波和估计,然后用估计的径向速度对滤波距离进行修正.这些方法的运用在一定程度上解决了距离—多普勒耦合条件下的滤波精度问题.

但是在径向速度无法测量的情况下,滤波器起始之前如何准确地估计径向速度,进而有效地进行数据关联和滤波器起始没有涉及到.实际上,在弹道导弹突防背景下,防御雷达的距离—多普勒耦合系数一般非常大,这就使得滤波器起始

之前的径向速度估计问题显得尤为重要.

弹道导弹防御系统中的地基相控阵雷达在发现新点迹之后,通常会切换波形参数来进行确认,目的是提高作用距离和分辨率.参数的切换引起距离—多普勒耦合系数的变化,耦合引起的测距偏差也随之改变.本文即利用雷达波形参数切换带来的距离—多普勒耦合测距偏差变化信息,提出的一种估计目标径向速度的新方法,试图解决上述问题.

## 2 问题描述

### 2.1 距离—多普勒耦合距离偏差

当存在距离—多普勒耦合时,假设目标运动的径向速度为  $v_r$ ,雷达对目标的距离测量  $R_m$  可以表示为:

$$R_m = R_0 + v_r t + \tilde{R} \quad (1)$$

其中  $R_0$  为目标真实距离,  $\tilde{R}$  为由于噪声存在而引起的服从  $N(0, \frac{2}{R})$  分布的测量误差,  $t = f_0 / B$  为距离—多普勒耦合系数(Range-Doppler Coupling Coefficient),它是线性调频信号独有的特性,与目标运动状态无关.  $f_0$  为雷达的载频,  $\tau$  为脉冲宽度,  $B$  为线性调频脉冲的调制带宽.

设  $R$  为此时距离测量的总误差,则有:

$$R = R_m - R_0 = v_r t + \tilde{R} \quad (2)$$

可以看出,在距离—多普勒耦合存在的条件下,距离测量的误

差分为两部分,一部分为距离—多普勒耦合引起的系统偏差,另一部分则是由于噪声影响而引起的随机误差.显然,在随机误差一定的情况下, $t$ 的大小决定了测距误差矛盾的主要方面,同时也决定了距离—多普勒耦合引起的距离偏差对径向速度的敏感程度.当 $t$ 很小时,距离偏差对径向速度不敏感,此时耦合引起的偏差不是测距误差的主要部分;反之距离偏差对径向速度敏感,即在高耦合系数条件下,微小的径向速度误差能够带来较大的距离偏差,且此时耦合引起的偏差已经远比噪声引起的测量误差大,这将带来数据处理上的一系列问题,下面进行分析.

## 2.2 高耦合系数条件下的问题分析

对于作用距离比较近的雷达系统(例如防空雷达),距离—多普勒耦合系数一般在 ms 量级,耦合效应引起的测距偏差很小,且对径向速度不敏感.例如,某型防空雷达发射脉冲的载频为 5 GHz,脉冲宽度为 6  $\mu$ s,调制带宽为 1 MHz,目标的径向速度为 100 m/s,则距离—多普勒耦合系数为  $t = f_0 / B = 0.03$ s,由其引起的距离偏差为  $R_D = v_r t = 3$ m,该偏差与噪声引起的随机测距误差水平相当,甚至小于后者,因此不会影响数据关联和滤波器的起始.在滤波器成功建立之后,即可利用径向速度的滤波估计值对其进行有效的修正.

但是在弹道导弹突防背景下,用于弹道导弹防御的远程预警雷达和跟踪制导雷达为了实现 3000 ~ 4000 km 的作用距离,发射脉冲宽度增加到了 ms 量级,引起距离—多普勒耦合系数成数量级的增大;加之导弹目标的径向速度很大,导致距离—多普勒耦合所引起的距离偏差变得非常严重,且对径向速度敏感.例如,某防御雷达搜索时发射脉冲的载频为 10 GHz,脉冲宽度为 6 ms,调制带宽为 100 kHz,目标的径向速度为 500 m/s,则距离—多普勒耦合系数为  $t_1 = f_0 / B_1 = 600$ s,由此引起的距离偏差达到  $R_{D1} = v_{r1} t_1 = 300$ km.显然,耦合系数及其引起的偏差均远大于低耦合系数的情况.

距离差分是比较常见的估计径向速度的方法,可以表示为

$$v_r = \frac{R_{m2} - R_{m1}}{T_{12}} = v_{r0} + \frac{\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1}{T_{12}} \quad (3)$$

$T_{ij}$ 表示第 $i$ 点与第 $j$ 点的时间间隔,此时为两次照射的时间间隔,它是确认数据率的倒数,一般小于 1s.由前面对 $\tilde{R}$ 的分析知,该方法估计出的径向速度误差标准差为  $(\tilde{v}_r) = \frac{2}{T_{12}}$ .再根据式(1)知,由该径向速度误差引起的测距误差标准差为

$$(\tilde{R}_m) = \frac{2}{T_{12}} \frac{R}{T_{12}} \quad (4)$$

显然此时由于径向速度估计不准而引起的测距误差已经远大于噪声引起的测距误差.

另外一般情况下,弹道导弹防御雷达在搜索到目标之后,会增大信号能量和距离分辨力来对目标进行确认,即波形切换,这将带来更为严重的问题.例如,假设确认时脉冲宽度增大为 12 ms,调制带宽增加到 1 MHz,则此时的距离—多普勒耦合系数为  $t_2 = f_0 / B_2 = 120$ s,由其引起的距离偏差变为  $R_{D2} = v_{r2} t_2 = 60$ km.考虑目标运动,由式(1)及上述假定可

以求得两次测量值的差

$$R_m = R_{m2} - R_{m1} = \bar{v}_r T + R_{D2} - R_{D1} + \tilde{R}_2 - \tilde{R}_1 \quad (5)$$

其中 $\bar{v}_r$ 为两点间的平均径向速度, $\bar{v}_r T$ 为目标运动产生的两个时刻距离的差.此时两点之间的测量距离差已经远大于实际目标运动形成的距离差,距离差分估计径向速度已经不能适用.

文献[10]给出了一种目标航迹起始的算法,算法使用前两点的位置观测形成暂时航迹的状态估计,并以此对第三个点进行预测,以预测点为中心确定关联区域.由上述推导结果不难看出,在距离—多普勒耦合系数很大的情况下,尤其当雷达进行波形切换时,如果不能对径向速度进行有效的估计,航迹预测值势必会严重偏离目标的实际位置,这将直接造成暂时航迹关联的失败,雷达丢失目标.此时为了关联成功,必须将暂时航迹的关联波门设得很大,这在目标比较密集或者类似于目标分裂的环境下显然是不能接受的,这就造成了航迹数据关联与目标分辨之间矛盾的加剧.

本文下面叙述的方法正是利用了雷达搜索和确认之间波形切换带来的距离变化信息,在滤波器起始之前分别建立匀速模型和匀加速模型估计径向速度,来对距离测量进行修正,试图解决上述问题.

## 3 径向速度估计方法

### 3.1 匀速模型

当雷达对目标第一次确认成功时,可以得到两点测量,即搜索发现目标时的点迹( $T_1$ 时刻)和第一次确认关联上的点迹( $T_2$ 时刻),两点的距离关系如下图1所示

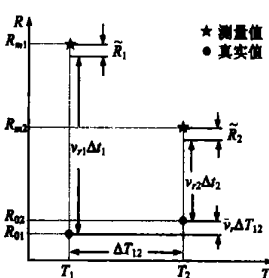


图1 两点测量距离关系

以写出两点距离测量的方程

$$\begin{cases} R_{m1} = R_{01} + (\bar{v}_r - \frac{a}{2} \frac{T_{12}}{2}) t_1 + \tilde{R}_1 \\ R_{m2} = R_{01} + \bar{v}_r T_{12} + (\bar{v}_r + \frac{a}{2} \frac{T_{12}}{2}) t_2 + \tilde{R}_2 \end{cases} \quad (6)$$

$R_{01}$ 为发现目标时目标的真实距离, $a$ 为目标的径向加速度.取下式(7)作为两点径向速度估计

$$\hat{v}_{r1} = \hat{v}_{r2} = \frac{R_{m2} - R_{m1}}{T_{12} + t_2 - t_1} \quad (7)$$

式(7)忽略了加速度影响,为匀速模型的表达式.根据方程组(6)知,式(7)估计的两点径向速度的误差分别为

$$\begin{cases} \tilde{v}_{r1} = \frac{\frac{a}{2} \frac{T_{12}}{2} (2 t_2 + T_{12}) + \tilde{R}_2 - \tilde{R}_1}{T_{12} + t_2 - t_1} \\ \tilde{v}_{r2} = \frac{\frac{a}{2} \frac{T_{12}}{2} (2 t_1 - T_{12}) + \tilde{R}_2 - \tilde{R}_1}{T_{12} + t_2 - t_1} \end{cases} \quad (8)$$

对  $\tilde{v}_{r1}$  的均值进行分析有

$$|E(\tilde{v}_{r1})| = \left| \frac{\frac{a}{2} T_{12} (2 t_2 + T_{12})}{T_{12} + t_2 - t_1} \right| \left| \frac{a}{t_2 - t_1} \frac{T_{12} t_2}{T_{12} + t_2 - t_1} \right| \quad (9)$$

类似的有

$$|E(\tilde{v}_{r2})| = \left| \frac{\frac{a}{2} T_{12} (2 t_1 - T_{12})}{T_{12} + t_2 - t_1} \right| \left| \frac{a}{t_2 - t_1} \frac{T_{12} t_1}{T_{12} + t_2 - t_1} \right| \quad (10)$$

另外,对匀速模型估计误差的均方差进行分析有

$$(\tilde{v}_{r1}) = (\tilde{v}_{r2}) = \frac{2 R}{T_{12} + t_2 - t_1} \left| \frac{2 R}{t_2 - t_1} \right| \ll \frac{2 R}{T_{12}} \quad (11)$$

由式(10)和(11)可以看出,匀速模型估计误差的均方差远小于距离差分估计径向速度时的误差均方差,也就是说高耦合系数条件下利用波形切换估计的径向速度精度远远优于无切换时距离差分的精度。而由式(9)知,由于忽略了加速度的影响,匀速模型对径向速度的估计产生了一个与加速度成正比的偏差,该偏差与两点间的径向速度差同量级。

显然,相对于无径向速度估计和距离差分径向速度估计,用通过上述模型估计出的径向速度对两点距离测量进行距离—多普勒耦合测距偏差的修正,再用修正以后的距离测量形成暂时航迹的状态估计和下一点的预测,可以使得第二次成功确认的关联波门大幅度减小,更加有利于航迹的起始和多目标处理。后面的仿真结果将给出上述结论的验证。

### 3.2 匀加速模型

匀速模型估计方法在雷达对目标第一次确认关联成功后利用两点观测对目标的径向速度做了初步的估计,该模型由于忽略了加速度的影响而使得估计出的径向速度存在一定的偏差。当第二次确认成功关联上第三个点( $T_3$ 时刻)之后,则可以运用以下描述的匀加速模型,在滤波器起始之前对前后三点的径向速度进行无偏的估计。三点的距离关系如下图2所示。

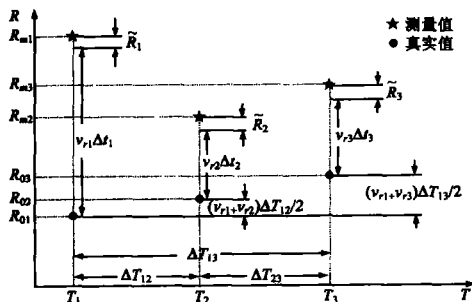


图2 三点测量距离关系

根据图2可以得出三点的距离测量方程组

$$\begin{cases} R_{m1} = R_{01} + v_{r1} t_1 + \tilde{R}_1 \\ R_{m2} = R_{01} + (v_{r1} + v_{r2}) T_{12}/2 + v_{r2} t_2 + \tilde{R}_2 \\ R_{m3} = R_{01} + (v_{r1} + v_{r3}) T_{13}/2 + v_{r3} t_3 + \tilde{R}_3 \\ v_{r2} = v_{r1} + a T_{12} \\ v_{r3} = v_{r1} + a T_{13} \end{cases} \quad (12)$$

雷达在进行确认时的脉冲参数相同,因此  $t_2 = t_3$ 。根据上述方

程组,可以得到匀加速模型径向速度估计及其误差的表达式

$$\begin{cases} \hat{v}_{r1} = \frac{f_{11} R_{m31} - f_{12} R_{m21}}{f_{10}} \\ \hat{v}_{r2} = \frac{f_{21} R_{m32} - f_{22} R_{m21}}{f_{20}} \\ \hat{v}_{r3} = \frac{f_{31} R_{m32} - f_{32} R_{m31}}{f_{30}} \\ \tilde{v}_{r1} = \frac{(f_{11} + f_{12}) \tilde{R}_1 + f_{12} \tilde{R}_2 - f_{11} \tilde{R}_3}{f_{10}} \\ \tilde{v}_{r2} = \frac{-f_{22} \tilde{R}_1 + (f_{22} + f_{21}) \tilde{R}_2 - f_{21} \tilde{R}_3}{f_{20}} \\ \tilde{v}_{r3} = \frac{-f_{32} \tilde{R}_1 + (f_{31} \tilde{R}_2 + (f_{32} - f_{31}) \tilde{R}_3)}{f_{30}} \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} R_{mij} &= R_{mi} - R_{mj} \\ f_{10} &= (T_{12}^2 + 2 T_{12} t_2) (T_{13} + t_2 - t_1) \\ &\quad - (T_{13}^2 + 2 T_{13} t_3) (T_{12} + t_2 - t_1) \\ f_{11} &= T_{12}^2 + 2 T_{12} t_2 \\ f_{12} &= T_{13}^2 + 2 T_{13} t_3 \\ f_{20} &= (2 T_{12} t_1 - T_{12}^2) T_{23} - (T_{23}^2 + 2 T_{23} t_3) \\ &\quad \cdot (T_{12} + t_2 - t_1) \\ f_{21} &= 2 T_{12} t_1 - T_{12}^2 \quad f_{22} = T_{23}^2 + 2 T_{23} t_3 \\ f_{30} &= (2 T_{13} t_1 - T_{13}^2) T_{23} - (2 T_{23} t_2 - T_{23}^2) \\ &\quad \cdot (T_{13} + t_2 - t_1) \\ f_{31} &= 2 T_{13} t_1 - T_{13}^2 \quad f_{32} = 2 T_{23} t_2 - T_{23}^2 \end{aligned}$$

根据式(1)和(13)对该模型误差均值进行分析有

$$\begin{cases} E(\tilde{v}_{r1}) = \frac{f_{12} E(\tilde{R}_2) - f_{11} E(\tilde{R}_3)}{f_{10}} = 0 \\ E(\tilde{v}_{r2}) = \frac{f_{22} E(\tilde{R}_2) - f_{21} E(\tilde{R}_3)}{f_{20}} = 0 \\ E(\tilde{v}_{r3}) = \frac{f_{32} E(\tilde{R}_3) - f_{31} E(\tilde{R}_2)}{f_{30}} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)知利用匀加速模型估计出的径向速度误差统计是无偏的。对误差的标准差进行分析有

$$\begin{cases} (\tilde{v}_{r1}) = \frac{|f_{11} - f_{12}| + |f_{12}| + |f_{11}|}{|f_{10}|} R \\ \frac{2 T_{13} R}{T_{23} |t_2 - t_1|} \ll \frac{2 R}{T_{12}} \\ (\tilde{v}_{r2}) = \frac{|f_{21} + f_{22}| + |f_{22}| + |f_{21}|}{|f_{20}|} R \\ \frac{(T_{12} t_1 + T_{23} t_2) 2 R}{T_{23} t_2 |t_2 - t_1|} \ll \frac{2 R}{T_{23}} \\ (\tilde{v}_{r3}) = \frac{|f_{32} - f_{31}| + |f_{32}| + |f_{31}|}{|f_{30}|} R \\ \frac{(T_{13} t_1 + T_{23} t_2) 2 R}{T_{23} t_2 |t_2 - t_1|} \ll \frac{2 R}{T_{23}} \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)知该方法估计的精度同样远优于距离差分估计的精度。另外,将上述标准差与匀速模型估计误差的标准差进行比较有

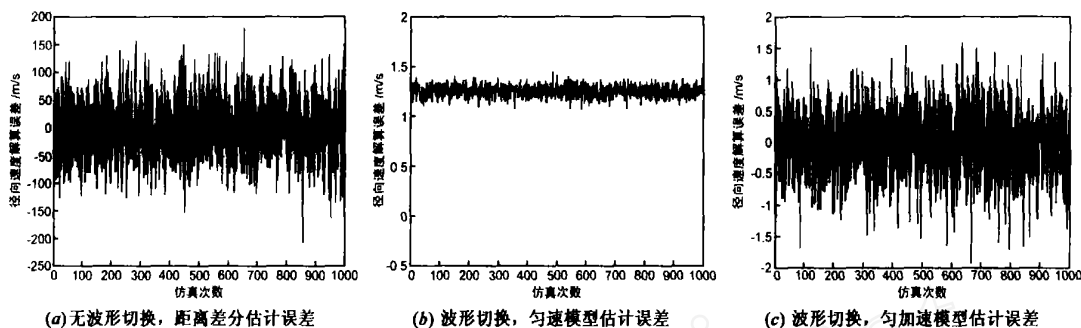


图3 径向速度估计误差蒙特卡洛分布

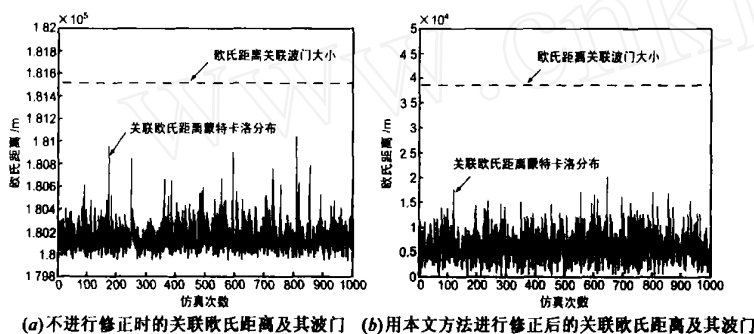


图4 关联欧氏距离以及关联波门大小

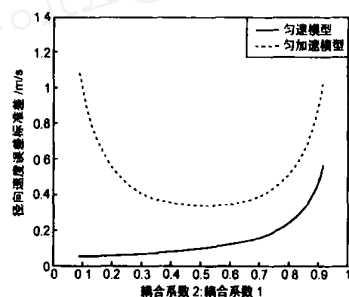


图5 估计精度随耦合系数变化曲线

$$\left\{ \begin{array}{l} (\tilde{v}_{r1}) \quad \frac{2}{T_{23}} \frac{T_{12} R}{|t_2 - t_1|} + \frac{2 R}{|t_2 - t_1|} > \frac{2 R}{|t_2 - t_1|} \\ (\tilde{v}_{r2}) \quad \frac{2}{T_{23}} \frac{T_{12} t_1 R}{|t_2 - t_1|} + \frac{2 R}{|t_2 - t_1|} > \frac{2 R}{|t_2 - t_1|} \\ (\tilde{v}_{r3}) \quad \frac{(T_{13} t_1 + T_{23} t_2 + |T_{13} t_1 - T_{23} t_2|) R}{T_{23} |t_2 - t_1|} > \frac{2 R}{|t_2 - t_1|} \end{array} \right. \quad (16)$$

由式(16)知,匀加速模型估计误差的标准差较匀速模型估计的标准差要稍大.实际上,对方程组(12)进行变换可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{m1} = R_{01} + v_{r1} t_1 + \tilde{R}_1 \\ R_{m2} = R_{01} + (v_{r1} + a_{12}/2) t_2 + \tilde{R}_2 \\ R_{m3} = R_{01} + (v_{r1} + a_{13}/2) t_3 + \tilde{R}_3 \\ a = 2 \frac{R_{m2} - R_{m1} + (t_1 - t_2 - T_{12}) v_{r1} + \tilde{R}_1 - \tilde{R}_2}{T_{12}^2 - 2 T_{12} t_2} \end{array} \right. \quad (17)$$

方程组(17)中前三个方程和匀速模型方程组(6)具有相同的形式,再结合第四个方程可以看出,匀加速模型实质上是先利用三点测量对加速度进行估计,然后再代入匀速模型对径向速度进行估计.加速度的估计误差为:

$$\begin{aligned} \tilde{a} &= 2 \frac{T_{12} + t_2 - t_1}{f_{10}} (\tilde{R}_3 - \tilde{R}_1) \\ &\quad - 2 \frac{T_{13} + t_3 - t_1}{f_{10}} (\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1) \\ \tilde{a} &= \frac{(T_{12} + t_2 - t_1)(\tilde{R}_3 - \tilde{R}_1)}{(T_{13}^2/2 + T_{13} t_3)(T_{12} + t_2 - t_1)} - \\ &\quad \frac{(T_{13} + t_3 - t_1)(\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1)}{(T_{12}^2/2 + T_{12} t_2)(T_{13} + t_3 - t_1)} \end{aligned} \quad (19)$$

显然将加速度估计代入径向速度估计必然引入加速度的估计误差,这就使得匀加速模型的估计误差标准差大于匀速模型.

#### 4 仿真结果与分析

以上对运用匀速模型和匀加速模型估计径向速度的方法及其精度在理论上进行了分析,从理论推导的结果看出,此方法有效地利用了雷达发射脉冲的参数切换所带来的距离信息,估计出的径向速度精度远大于无切换条件下直接利用距离差分计算的精度,能够有效地对距离—多普勒耦合引起的距离偏差进行修正.下面给出一个仿真实例的结果.

##### 4.1 径向速度估计误差

仿真中假设雷达发射脉冲的载频为 10GHz,搜索时的脉冲宽度为 6ms,调制带宽 100kHz,确认时脉冲宽度为 12ms,调制带宽 1MHz,搜索时目标径向速度 - 500m/s,径向加速度 - 1m/s<sup>2</sup>,确认数据率为 2Hz,噪声引起的测距误差标准差为 20m,仿真 1000 次,误差分布如图 3 所示.

从结果可以验证,波形切换条件下无论是匀速模型还是匀加速模型,估计的径向速度误差都远远小于无切换条件下直接利用距离差分估计的误差;同时可以验证,匀速模型估计误差标准差比匀加速模型要小,但是存在一定的统计偏差.

##### 4.2 暂时航迹关联波门

本文引言中提到了高耦合系数会给数据关联带来困难.3.1 在理论上论述了匀速模型估计的径向速度对距离—多普勒耦合引起的距离偏差进行修正可以大大减小暂时航迹关联的波门.图 4 分别给出了不进行修正和用匀速模型估计的径向速度进行修正两种情况下预测点与第三个测量点之间的欧氏距离蒙特卡洛分布,并取  $E + 10$  作为具体的值给出了关联波门的大小,其中  $E$  为欧氏距离分布的统计平均,欧氏距离分布的统计均方差.

可以看出,在高耦合系数条件下,如果不对耦合引起的偏差进行修正,成功关联上第三个点的欧氏距离波门大小约为180km,不利于新点迹的发现;而利用匀速模型估计径向速度来对耦合引起的偏差进行修正,则可以将关联波门减小为不到40km,有利于在不影响暂时航迹关联的前提下最大可能地发现相邻的新目标。

#### 4.3 径向速度解算精度与参数切换的关系

仿真中假设目标径向速度加速度 $-1\text{m/s}$ ,噪声引起的测距误差标准差为20m,耦合系数1(搜索)为600,两种模型估计径向速度的精度随耦合系数2的变化结果如图5所示。可以看出匀速模型估计误差的标准差始终小于匀加速模型;匀加速模型估计径向速度精度随耦合系数2的变化存在一个最小值,可以根据最小值对应的耦合系数比设计出径向速度估计精度最高的波形。

#### 5 结束语

本文针对弹道导弹突防背景下雷达耦合系数极高这一突出特点,通过对线性调频信号距离—多普勒耦合效应原理的研究,提出了在无法进行径向速度测量条件下利用雷达脉冲参数切换精确估计径向速度的方法,解决了高耦合系数条件下目标径向速度估计、雷达的数据关联、滤波器起始等问题。如何将该方法同目标跟踪和航迹滤波相结合,通过滤波获得更加精确的径向速度值,将是后续需要研究的问题。

#### 参考文献:

- [1] Fitzgerald R J. Effect of range-Doppler coupling on chirp radar tracking accuracy[J]. IEEE Trans on AES, 1974, AES-10(43): 528 - 532.
- [2] Wong W, Blair W D. Steady state tracking with LFM waveforms[J]. IEEE Trans on AES, 2000, AES-36(2): 701 - 709.
- [3] Niu R, Willett P, Bar-Shalom Y. From the waveform through the resolution cell to the tracker[A]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference [C]. Snowmass, CO, USA: IEEE Incorporated, 1999, 4: 371 - 385.
- [4] Rago C, Willett P, Bar-Shalom Y. Detection-tracking performance with combined waveforms[J]. IEEE Trans on AES, 1998, AES-2(34): 612 - 623.
- [5] Bar-Shalom Y. Negative correlation and optimal tracking with Doppler measurements[J]. IEEE Trans on AES, 2001, AES-37(3): 1117 - 1120.
- [6] Farina A, Pardini S, Barontini G. Application of nonlinear filtering theory to a track-while-scan problem[A]. 1st Int Conf Information Sciences and Systems[C]. Patras: CISS, 1976.
- [7] Farina A, Pardini S. Tracking-while-scan algorithm in a clutter environment[J]. IEEE Trans on AES, 1978, AES-14(5): 769 - 778.
- [8] 王建国, 何佩琨, 龙腾. 径向速度测量在 Kalman 滤波中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(2): 225 - 227.  
WANG Jian-guo, HE Pei-kun, LONG Teng. Use of radial velocity measurements in kalman filter[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(2): 225 - 227. (Chinese Source)
- [9] 王建国, 龙腾, 何佩琨. 一种线性调频波形下的目标跟踪算法[J]. 现代雷达, 2003, 2(25): 26 - 29.  
WANG Jian-guo, HE Pei-kun, LONG Teng. A target tracking algorithm with LFM waveform[J]. Modern Radar, 2003, 2(25): 26 - 29. (Chinese Source)
- [10] 罗鹏飞, 张文明. 一种多目标跟踪航迹起始新算法及其性能评估[J]. 国防科技大学学报, 1999, (6): 51 - 54.  
LUO Peng-fei, ZHANG Wen-ming. A new algorithm of track initiation for multiple target tracking and performance evaluation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1999, (6): 51 - 54. (Chinese Source)

#### 作者简介:



赵 峰 男, 1978 年出生于江苏, 2001 年毕业于国防科技大学电子工程专业, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 研究兴趣包括雷达电子战建模仿真与评估、分布式仿真和弹道导弹突防对抗。E-mail: zhfbec@tom.com.



王雪松 男, 1972 年 10 月出生于内蒙古包头市, 现为国防科技大学教授, 中国电子学会高级会员, 三遥分会委员, 1994 年 7 月毕业于国防科技大学电子技术系, 1999 年 6 月获博士学位, 主要从事雷达极化信息处理、信号处理与目标检测及识别、弹道导弹攻防对抗电子战等领域的研究, 合作出版专著 2 部, 在国际、国内期刊及学术会议上发表论文 70 余篇, 其中 30 多篇进入 SCI 和 EI 等国际著名检索。E-mail: wxsl019@sina.com.