

## 针对机动目标跟踪的雷达发射波形选择

靳标<sup>\*①</sup> 纠博<sup>①</sup> 苏涛<sup>①</sup> 刘宏伟<sup>①</sup> 张龙<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

**摘要:** 该文首先在交互多模型(Interacting Multiple Model, IMM)算法的框架下, 选择常速模型和自适应加速度模型作为状态模型, 以应对实际中非合作目标的非机动与机动状态, 并将此算法称为自适应IMM算法。然后针对机动目标跟踪时, 雷达发射波形的选择需要兼顾测距测速性能与多普勒容忍性的问题, 提出将V型调频(V-Linear Frequency Modulated, V-LFM)信号作为发射波形。通过分析多脉冲线性调频信号, V-LFM信号和M序列3种信号对目标距离和速度估计性能的克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)与多普勒容忍性表明, V-LFM信号可以在较少多普勒容忍性损失的情况下, 有效提升对目标距离和速度的估计精度。仿真结果表明: 发射多脉冲V-LFM信号并采用自适应IMM算法, 可以明显提高雷达系统的跟踪性能。

**关键词:** 机动目标跟踪; 波形选择; 交互多模型算法; 克拉美罗下界

**中图分类号:** TN953

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)08-1912-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.01744

## Radar Transmitted Waveform Selection for Maneuvering Target Tracking

Jin Biao<sup>①</sup> Jiu Bo<sup>①</sup> Su Tao<sup>①</sup> Liu Hong-wei<sup>①</sup> Zhang Long<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Firstly, in the framework of the Interacting Multiple Model (IMM) algorithm the constant-velocity model and the adaptive constant acceleration model are selected as the dynamic models for the un-maneuvering and maneuvering states of the un-cooperative target, which is called the adaptive IMM algorithm. Then since it is necessary to consider the performance of estimating range/velocity and Doppler tolerance for tracking a maneuvering target, the V-Linear Frequency Modulated (V-LFM) signal is selected as the transmitted signal in the radar system. The analysis on the Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) for estimating the range/velocity and Doppler tolerance of three signals (LFM, V-LFM and M sequence) shows that the V-LFM waveform can effectively improve the performance of estimating the target range and velocity in the case of a bit loss in the Doppler tolerance. The simulations demonstrate that the tracking performance is apparently improved, when multiple pulses of V-LFM waveform is transmitted and the adaptive IMM algorithm is utilized in the radar system.

**Key words:** Maneuvering target tracking; Waveform selection; Interacting Multiple Model (IMM) algorithm; Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)

### 1 引言

众所周知, 影响雷达系统跟踪性能的因素主要有两个方面: 一是对目标运动状态的预测精度, 这主要由跟踪算法及其利用的状态模型决定; 二是对目标运动状态的观测精度, 这主要由雷达发射波形

和信噪比等方面决定。因此要提高系统的整体跟踪性能, 一方面需要选择良好的跟踪算法以及与目标实际运动状态尽可能接近的状态模型, 另一方面需要选择合理的发射波形和参数估计方法。这两方面相辅相成, 缺一不可。跟踪算法方面, 交互多模型(Interacting Multiple Model, IMM)算法因为其在运算量和跟踪性能等方面的优势, 得到了广泛的研究与应用<sup>[1-4]</sup>, 是目前机动目标跟踪领域的主流算法。本文在IMM算法的基础上, 重点讨论针对机动目标跟踪的发射波形选择问题。

近年来, 针对目标跟踪的发射波形选择得到了

2013-11-07 收到, 2014-01-17 改回

国家自然科学基金(61271291, 61201285), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0630), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JM8015), 陕西省教育厅专项计划项目(12JK0530, 12JK0557)和中国博士后科学基金(2013M542329)资助课题

\*通信作者: 靳标 jinpuresky@hotmail.com

广泛的关注<sup>[5-11]</sup>。已有的针对目标跟踪的波形选择方法可以分为两大类：(1)直接法，即以整个系统的跟踪性能最优为目标，对某特定发射波形的参数进行寻优<sup>[5-10]</sup>，从而找到使跟踪误差最小的发射波形。其中又可细分为：(a)从控制论角度出发，以最小跟踪误差方差为代价函数进行发射波形选择<sup>[5-8]</sup>。文献[5]首次在传统的雷达目标跟踪系统中增加了波形自适应选择模块，基于Kalman滤波并面向单目标背景，利用参数估计理论中Fisher信息矩阵的逆作为观测噪声协方差，建立了发射波形与跟踪滤波之间的联系，通过波形选择及参数寻优使得跟踪误差达到最小。文献[6-8]利用文献[5]的观测模型，即发射波形估计目标距离和速度的克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)，分别研究了基于粒子滤波和容积Kalman滤波(Cubature Kalman Filter, CKF)等非线性跟踪算法的波形自适应问题。但是这类方法所利用的波形选择的代价函数非线性度较高，难以给出最优发射波形的闭式解。(b)从信息论角度出发，以最大化目标状态的预测值与观测值之间的互信息为代价函数进行发射波形选择<sup>[9,10]</sup>。文献[9]和文献[10]分别基于标准IMM算法和多项式预测模型，利用分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FrFT)来旋转模糊函数，从而完成观测误差椭圆与预测误差椭圆正交，使得跟踪误差达到最小。此方法虽然可以得到解析解，但是得到的波形幅度却不是恒定的，而雷达发射机一般工作在饱和状态，不能对发射波形进行幅度调制。(2)间接法，即从发射波形的观测性能出发，在现有的发射波形库中寻找观测性能最优的发射波形<sup>[11]</sup>。观测性能提升后，跟踪性能自然也会得到相应的提升。文献[11]基于粒子滤波，提出利用恒模零自相关(Constant Amplitude Zero Auto Correlation, CAZAC)序列进行发射，可以得到较好的跟踪性能。因为CAZAC序列的模糊函数图接近于图钉状，具有良好的测距和测速性能，但是其多普勒容忍性极差，对运动目标的脉冲压缩性能难以保证<sup>[12]</sup>。尤其在机动状态下，对目标速度的估计误差较大，即使利用速度补偿的办法，也很难得到较好的脉冲压缩结果，从而使雷达系统的检测性能和测距精度受到损失。

本文针对机动目标跟踪时发射波形选择所存在的问题，首先将常速(Constant Velocity, CV)模型<sup>[13]</sup>和自适应加速度模型<sup>[14]</sup>应用到IMM算法中，得到自适应IMM算法。在此基础上，采用间接法的思路，避开波形优化方法难以得到解析解、优化波形非恒模等问题，综合考虑发射波形测距测速精度和多普勒容忍性两个方面，提出采用多脉冲V型调频

(V-Linear Frequency Modulated, V-LFM)信号进行发射。V-LFM信号估计目标距离和速度时不存在耦合，在多普勒容忍性存在较少损失的情况下具有良好的测距测速精度。仿真结果验证了本文方法的有效性。

## 2 自适应 IMM 跟踪算法

目标的运动状态可以简单地分为非机动状态和机动状态。本文中非机动状态模型采用 CV 模型，机动状态模型采用自适应加速度模型。将这两个模型应用于 IMM 框架，可以较好地适应目标的各种运动状态。自适应 IMM 算法中，状态噪声方差是自适应变化的，这是其与传统 IMM 算法的最大区别。这种两模型的 IMM 算法一方面由于模型个数少，可以减少跟踪算法的运算量；另一方面由于状态噪声方差的自适应变化，可以提高系统的跟踪性能。

### 2.1 状态模型

目标的状态方程为

$$\mathbf{x}_{k+1|k}^{(i)} = \mathbf{F}_{k+1|k}^{(i)} \mathbf{x}_{k|k}^{(i)} + \mathbf{w}_k^{(i)} \quad (1)$$

其中， $i=1$  表示非机动运动模型， $i=2$  表示机动运动模型。

在非机动情况下，采用标准的 CV 模型，目标的状态向量为  $\mathbf{x}_k^{(1)} = [x_k, \dot{x}_k, y_k, \dot{y}_k]^T$ ，包括目标在  $x$  方向的位置  $x_k$  和速度  $\dot{x}_k$  以及  $y$  方向的位置  $y_k$  和速度  $\dot{y}_k$ 。状态转移矩阵为

$$\mathbf{F}_{k+1|k}^{(1)} = \mathbf{I}_{2 \times 2} \otimes \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{I}_{2 \times 2}$  为 2 维的单位矩阵， $\otimes$  代表 Kronecher 积， $\Delta t$  为观测间隔。状态噪声  $\mathbf{w}_k^{(1)} \sim N(0, \mathbf{Q}^{(1)})$ ，其中

$$\mathbf{Q}^{(1)} = \mathbf{I}_{2 \times 2} \otimes q_1 \begin{bmatrix} \Delta t^4/3 & \Delta t^3/2 \\ \Delta t^3/2 & \Delta t^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $q_1$  为状态噪声强度，用来表征状态模型与目标实际运动状态的差别。

在机动情况下，采用自适应加速度模型<sup>[14]</sup>，目标的状态向量为  $\mathbf{x}_k^{(2)} = [x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k]^T$ ，包括目标  $x$  方向的位置  $x_k$ ，速度  $\dot{x}_k$  和加速度  $\ddot{x}_k$  以及  $y$  方向的位置  $y_k$ ，速度  $\dot{y}_k$  和加速度  $\ddot{y}_k$ 。状态转移矩阵为

$$\mathbf{F}_{k+1|k}^{(2)} = \mathbf{I}_{2 \times 2} \otimes \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

状态噪声  $\mathbf{w}_k^{(2)} \sim N(0, \mathbf{Q}^{(2)})$ ，其中

$$\mathbf{Q}^{(2)} = \mathbf{I}_{2 \times 2} \otimes q_2 \begin{bmatrix} \Delta t^5/20 & \Delta t^4/8 & \Delta t^3/6 \\ \Delta t^4/8 & \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^3/6 & \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $q_2 = C_q \Psi[A_{\max} - |\hat{x}_{k|k}|]$ , 其中  $A_{\max}$  为目标可能的最大机动加速度值;  $\hat{x}_{k|k}$  为  $k$  时刻加速度的估计值;  $\Psi(\cdot)$  为某简单的非负函数, 如  $\Psi(x) = |x|$ ,  $\Psi(x) = x^2$  等;  $C_q$  为大于零的量纲变换系数, 可根据  $\Psi(\cdot)$  的函数形式和仿真计算进行调整。文献[14]详细分析了自适应加速度模型的稳态精度、状态性能和一致性检验, 并在多种机动场景下将其与常用的机动模型“当前”统计模型<sup>[13,15]</sup>进行对比, 结果表明自适应加速度模型的机动跟踪性能较好。

### 2.2 观测模型

目标的观测方程为

$$z_k = h(x_k) + v_k = \begin{bmatrix} \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \\ \sqrt{\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2} \end{bmatrix} + v_k \quad (6)$$

其中  $z_k$  为目标的观测向量, 包括目标的径向距离和径向速度。传统的雷达系统只使用距离的观测数据进行跟踪, 文献[16]指出引入速度观测之后, 会明显提高雷达的跟踪性能, 因此本文考虑目标的距离和速度共同观测的情况。观测噪声  $v_k$  与  $x_{k|k-1}^{(i)}$ ,  $w_k^{(i)}$  ( $i=1,2$ ) 不相关, 且  $v_k \sim N(0, R_k)$ , 其中  $R_k$  为观测噪声的协方差。在目标完全检测的情况下,  $R_k$  可以用  $k$  时刻发射波形估计目标距离和速度的 CRLB 进行近似<sup>[5-8]</sup>, 这样就建立起了跟踪系统与发射波形之间的联系。关于针对机动目标跟踪的发射波形选择问题, 将在第 3 节详细讨论。

当跟踪系统的状态模型和观测模型确定之后, 将其代入 IMM 框架即得自适应 IMM 跟踪算法, 详细的算法流程可以参考文献[1,14]。

### 3 针对机动目标跟踪的发射波形选择

针对机动目标跟踪的发射波形选择, 需要重点考虑两个方面的问题: (1)测距测速精度, 即观测精度, 这直接关系到对目标的跟踪精度; (2)多普勒容忍性。如果单纯从测距测速精度方面考虑, 模糊函数为冲激函数的发射波形是最好的<sup>[12,17]</sup>。但是此类信号的多普勒容忍性极差, 对机动目标的脉冲压缩性能难以保证, 从而使检测性能受到损失。如果检测性能无法保证, 则无法谈及跟踪性能。本文针对机动目标跟踪的发射波形选择问题, 避开直接以目标跟踪性能最优作为代价函数进行波形优化时, 存在的无解析解、得到的波形非恒模等问题, 综合考虑波形的测距测速性能和多普勒容忍性等方面的要求, 选择 V-LFM 信号作为发射波形。下面首先介绍 V-LFM 信号及其模糊函数, 然后重点从波形测距测速精度和多普勒容忍性两方面, 将 V-LFM 信号与雷达系统中常用的线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)信号和二相编码信号(以码长为 127 的 M 序列为例)进行对比。

### 3.1 V-LFM 信号与其模糊函数

V-LFM 信号属于非线性调频信号的一种, 其在同一个时宽内, 前半部分为负调频率的 LFM, 后半部分为正调频率的 LFM。如图 1 所示, 其频率调制图类似大写字母“V”, 故命名为 V 型调频信号。其时域表达式为

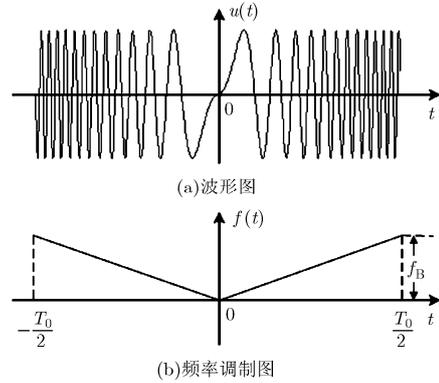


图 1 V-LFM 信号的波形与时频关系

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_0}} \exp(-j\pi\mu t^2), & -\frac{T_0}{2} \leq t < 0 \\ \frac{1}{\sqrt{T_0}} \exp(j\pi\mu t^2), & 0 \leq t \leq \frac{T_0}{2} \end{cases} \quad (7)$$

其中调频率  $\mu = f_B / T_0$ ,  $T_0$  为信号时宽,  $f_B$  为信号带宽。

V-LFM 信号的模糊函数为<sup>[12,17]</sup>

$$\chi(\tau, f_d) = \chi_{11}(\tau, f_d) + \chi_{22}(\tau, f_d) + \chi_{12}(\tau, f_d) + e^{-j2\pi f_d \tau} \chi_{12}^*(\tau, f_d) \quad (8)$$

其中  $\tau$  为时延,  $f_d$  为多普勒频率,

$$\begin{aligned} \chi_{11}(\tau, f_d) &= \chi_{22}^*(-\tau, f_d) \\ &= \begin{cases} \left(1 - \frac{|\tau|}{T_0}\right) \frac{\sin[\pi(f_d - \mu\tau)(T_0 - |\tau|)]}{\pi(f_d - \mu\tau)(T_0 - |\tau|)}, & |\tau| < T_0 \\ 0, & |\tau| > T_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\chi_{12}(\tau, f_d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{4\mu}} \exp\left[-j\pi\left(f_d\tau + \frac{\mu\tau^2}{2} - \frac{f_d^2}{2\mu}\right)\right] \cdot \{[c(x_1) + c(x_2)] - j[s(x_1) + s(x_2)]\}, & 0 < \tau < 2T_0 \\ 0, & \tau < 0, \tau > 2T_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中  $c(\cdot)$  和  $s(\cdot)$  为菲涅尔积分公式。

$$c(y) = \int_0^y \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx, \quad s(y) = \int_0^y \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx \quad (11)$$

当  $0 < \tau < T_0$  时,

$$x_1 = 2\sqrt{\mu} \left( \frac{\tau}{2} - \frac{f_d}{2\mu} \right), \quad x_2 = 2\sqrt{\mu} \left( \frac{\tau}{2} + \frac{f_d}{2\mu} \right) \quad (12)$$

当  $T_0 < \tau < 2T_0$  时,

$$x_1 = 2\sqrt{\mu} \left( T_0 - \frac{\tau}{2} - \frac{f_d}{2\mu} \right), \quad x_2 = 2\sqrt{\mu} \left( T_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{f_d}{2\mu} \right) \quad (13)$$

图 2 给出 V-LFM 信号的模糊函数图。从图中可以看出：V-LFM 信号的模糊图接近图钉型，距离和速度不存在耦合，这样可以将距离和速度的观测误差进行去相关，使二者互不影响，可以独立地得到距离和速度较为精确的估计。而 LFM 信号的模糊函数图为斜刀型，对目标距离和速度的估计存在耦合，对于距离和速度都未知的目标，只能测出其联合值；对于斜刀刃附近的多目标，则完全无法分辨<sup>[12]</sup>。

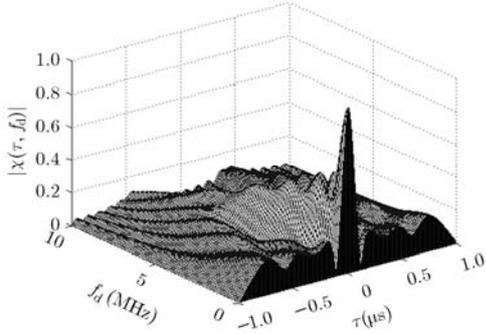


图 2 V-LFM 信号的模糊函数图

### 3.2 估计距离和速度的 CRLB

发射信号估计目标距离和速度的 CRLB 为<sup>[5,18]</sup>

$$\text{CRLB} = \begin{bmatrix} \text{CRLB}_{rr} & \text{CRLB}_{r\dot{r}} \\ \text{CRLB}_{r\dot{r}} & \text{CRLB}_{\dot{r}\dot{r}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\eta} \mathbf{T} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{T} \quad (14)$$

其中  $\eta$  表示信噪比； $\mathbf{T} = \text{diag}(c/2, c/4\pi f_c)$ ， $c$  为电磁波传播速度， $f_c$  为雷达载频； $\mathbf{J}$  为目标时延和多普勒频率估计的 Fisher 信息矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial \tau^2} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} & \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial \tau \partial f_d} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} \\ \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial \tau \partial f_d} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} & \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial f_d^2} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中

$$J_{11} = - \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial \tau^2} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |S(\omega)|^2 d\omega \quad (16)$$

$$\begin{aligned} J_{12} = J_{21} &= - \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial \tau \partial f_d} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} t \varphi'(t) |s(t)|^2 dt \quad (17) \end{aligned}$$

$$J_{22} = - \left. \frac{\partial^2 |\chi(\tau, f_d)|^2}{\partial f_d^2} \right|_{\substack{\tau=0 \\ f_d=0}} = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |s(t)|^2 dt \quad (18)$$

其中  $s(t)$ ,  $S(\omega)$  分别为发射信号的时域形式和频域形式， $\varphi(t)$  为信号的相位。

多脉冲 LFM 信号的表达式为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_1(t - nT_R) \quad (19)$$

其中  $s_1(t) = 1/\sqrt{T_0} \exp(j\pi\mu t^2)$ ， $-T_0/2 \leq t \leq T_0/2$ ； $N$  为脉冲个数， $T_R$  为脉冲重复周期。

将式(19)代入式(14)，可得 LFM 信号估计目标距离和速度的 CRLB：

$$\text{CRLB}_{rr}^{\text{LFM}} = \frac{c^2}{4} \frac{3}{2\pi^2 f_B^2 N \eta_1} \left[ 1 + \frac{1}{N^2 - 1} \left( \frac{T_0}{T_R} \right)^2 \right] \quad (20a)$$

$$\text{CRLB}_{r\dot{r}}^{\text{LFM}} = - \frac{c^2 f_B T_0}{8 f_c \eta_1 N (N^2 - 1) T_R^2} \quad (20b)$$

$$\text{CRLB}_{\dot{r}\dot{r}}^{\text{LFM}} = \frac{c^2}{4 f_c^2} \frac{6}{N \eta_1 (N^2 - 1) T_R^2} \quad (20c)$$

同样令  $s_1(t) = u(t)$ ，将式(19)代入式(14)，可得多脉冲 V-LFM 信号估计目标距离和速度的 CRLB：

$$\text{CRLB}_{rr}^{\text{V-LFM}} = \frac{c^2}{4} \frac{6}{5\pi^2 N \eta_1 f_B^2} \quad (21a)$$

$$\text{CRLB}_{r\dot{r}}^{\text{V-LFM}} = 0 \quad (21b)$$

$$\text{CRLB}_{\dot{r}\dot{r}}^{\text{V-LFM}} = \frac{c^2}{4 f_c^2} \frac{6}{N \eta_1 [T_0^2 + T_R^2 (N^2 - 1)]} \quad (21c)$$

其中  $\eta_1$  为单脉冲的信噪比。

由于 M 序列为离散信号，无法根据式(14)得到其估计目标距离和速度的 CRLB 的解析式，因此本文利用数值方法进行近似。图 3 对比了 LFM 信号，V-LFM 信号和 M 序列估计目标距离和速度的 CRLB。仿真参数：雷达载频  $f_c=10.4$  GHz，脉冲个数  $N=8$ ，脉冲重复周期  $T_R=1$  ms，LFM 和 V-LFM 信号的时宽  $T_0=10$   $\mu$ s，带宽  $f_B=5$  MHz；M 序列的码长为 127，子码宽度为  $T_0/127$ 。注意：在相同时宽相同带宽的条件下，LFM 和 V-LFM 信号的调频率之间的关系为： $\mu_{\text{V-LFM}} = 2\mu_{\text{LFM}}$ 。从图中可以看出，M 序列的测距测速精度要明显好于 LFM 信号和 V-LFM 信号。而与时宽带宽相同的 LFM 信号相比，V-LFM 信号的测距性能较好，测速性能二者则几乎相同。通过对比式(20c)和式(21c)可以发现，二者在分母上相差  $N\eta_1 T_0^2$ ，而雷达系统中信号时宽  $T_0$  一般都在  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  s 量级，所以一般情况下 LFM 信号和 V-LFM 信号测速精度相差无几，但在时宽较大的情况下(如声呐场景<sup>[5]</sup>)，V-LFM 信号的优势则比

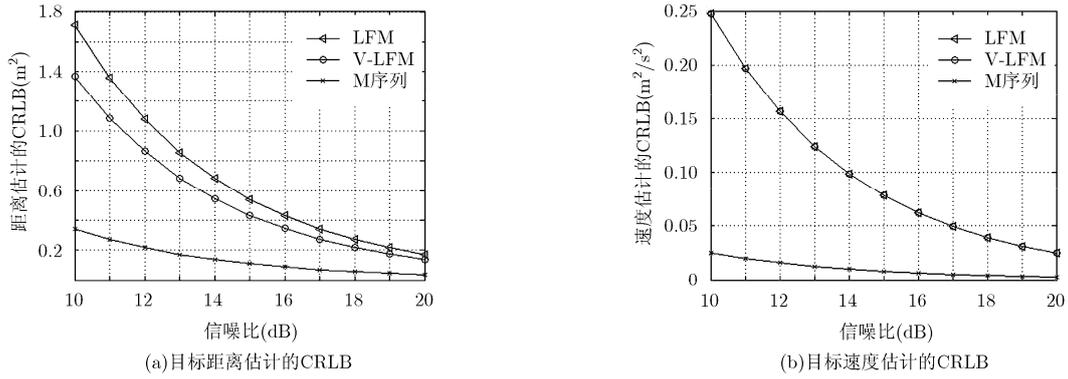


图 3 波形估计目标距离和速度的 CRLB

较明显。另外，从式(20b)可以看出，当时宽带宽积越大时，LFM 信号估计目标距离和速度的耦合越严重，而 V-LFM 信号在测距和测速时不存在耦合(由式(21b)可以看出)，单脉冲即可实现对目标距离和速度的联合观测。

3.3 多普勒容忍性

图 4(a)对比了在雷达载频  $f_c=2$  GHz 时，LFM, V-LFM 信号和 M 序列对低速运动目标的归一化脉冲压缩峰值。从图中可以看出，当目标速度小于 80 m/s 时，LFM 信号和 V-LFM 信号的脉冲压缩性能基本没有损失，而 M 序列的脉冲压缩损失则相当严重。由 3.2 节可知，如果单纯从测距测速精度考虑，M 序列是一个理想的选择，但是其多普勒容忍性太差，尤其是当目标发生机动时，很难得到其速度的精确估计值，即使利用速度补偿的方法也很难保证脉冲压缩结果，从而使检测性能受到损失。如果检测性能无法保证，更无法谈及跟踪性能。图 4(b)对比了 LFM 信号和 V-LFM 信号对高速运动目标的多普勒容忍性。从图 4(b)可以看出，只有当目标速度大于 386 m/s 时，V-LFM 信号才与 LFM 信号存在较大差距。综合图 4(a)和图 4(b)，V-LFM 信号对低速目标的脉冲压缩性能与 LFM 信号一样基本没有损失，对高速机动目标的脉冲压缩损失实际中也可

以通过速度补偿的方法予以解决。

表 1 对比了 M 序列, V-LFM 和 LFM 信号的距离和速度的估计性能及多普勒容忍性。从表 1 中可以看出，综合考虑距离速度的估计性能和多普勒容忍性，选取 V-LFM 信号作为目标跟踪的发射波形较为合适。

表 1 各种波形测距测速性能和多普勒容忍性的比较

| 对比性能   | M 序列 | V-LFM | LFM |
|--------|------|-------|-----|
| 测距测速精度 | 好    | 较好    | 一般  |
| 多普勒容忍性 | 较差   | 较好    | 好   |

4 仿真实验与结果分析

由于 M 序列的多普勒容忍性很差，即对机动目标的脉冲压缩结果损失较为严重，无法保证检测性能，因此这里仅通过仿真对比在完全检测的情况下，利用标准 IMM 算法和自适应 IMM 算法时分别发射多脉冲 LFM 及 V-LFM 信号的跟踪效果。目标在总观测时间 100 s 内经历了 5 个不同的运动状态，分别对应 5 个不同的平均加速度  $\mathbf{a}_t = [-\bar{a}, -\frac{\bar{a}}{2}, 0, \frac{\bar{a}}{2}, \bar{a}]^T$ ，其中  $\bar{a} = 10$  m/s²。每个运动状态的持续时间为 20 s。

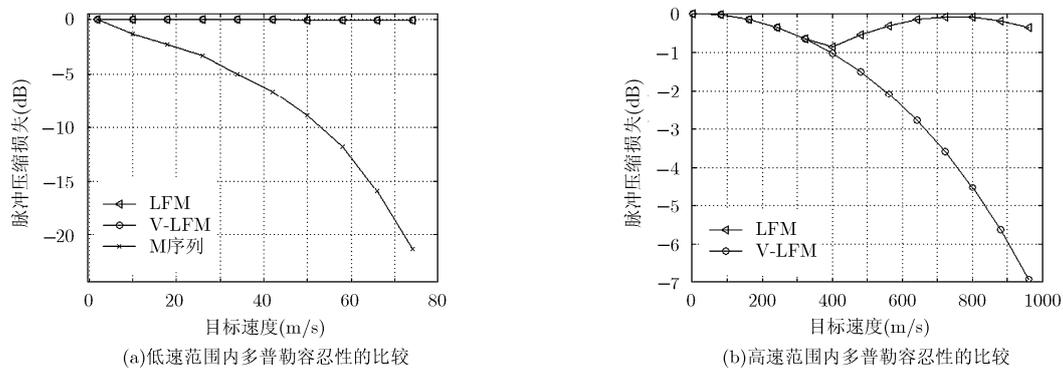


图 4 多普勒容忍性的对比结果

标准 IMM 跟踪算法采用 CV 和常加速(Constant Acceleration, CA)<sup>[13]</sup>两个状态模型, 状态噪声协方差分别为

$$Q_{CV} = I_{2 \times 2} \otimes 0.01 \cdot \begin{bmatrix} \Delta t^4/3 & \Delta t^3/2 \\ \Delta t^3/2 & \Delta t^2 \end{bmatrix},$$

$$Q_{CA} = I_{2 \times 2} \otimes 100 \cdot \begin{bmatrix} \Delta t^5/20 & \Delta t^4/8 & \Delta t^3/6 \\ \Delta t^4/8 & \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^3/6 & \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (22)$$

标准 IMM 算法和自适应 IMM 算法的状态转移概率矩阵相同, 即

$$M_1 = M_2 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中矩阵中第  $i$  行第  $j$  列元素表示状态  $i$  到状态  $j$  的转移概率。自适应 IMM 算法包括 CV 模型和自适应加速度模型, 两个模型的状态噪声协方差参数分别为  $q_1=0.1$ ,  $C_q=1$ ,  $\Psi(x) = x^2$ ,  $A_{\max}=30 \text{ m/s}^2$ 。雷达系统的信噪比为 26 dB, 载频  $f_c=10.4 \text{ GHz}$ 。LFM 信号和 V-LFM 信号的时宽  $T_0=10 \mu\text{s}$ , 带宽  $f_b=5 \text{ MHz}$ , 脉冲个数  $N=4$ , 脉冲重复周期  $T_R=1 \text{ ms}$ 。对目标距离和速度进行联合观测, 观测间隔  $\Delta t = 1 \text{ s}$ , 观测噪声的协方差可由波形估计目标距离和速度的 CRLB, 即式(20)和式(21)进行近似。仿真结果由 100 次 Monte-Carlo 实验统计平均得到。

图 5 对比了利用标准 IMM 算法和自适应 IMM 算法时, 分别发射 LFM 和 V-LFM 信号, 对目标  $x$  方向的距离和速度跟踪的均方根误差。目标  $y$  方向的位置和速度均方根误差与图 5 的结果类似, 限于

篇幅的原因, 这里予以省略。从图 5 中可以看出, 当发射波形相同时, 自适应 IMM 算法的跟踪性能要好于标准 IMM 算法。这是因为自适应 IMM 算法的状态噪声协方差是随着目标的运动状态不断变化的, 而标准 IMM 每个模型的状态噪声协方差则是预先设定的, 不发生变化的。当跟踪算法相同时, 发射 V-LFM 信号的距离跟踪性能要好于发射 LFM 信号, 但是二者的速度跟踪性能则相差不大。这是因为如图 3 所示, 相同参数的 V-LFM 信号测距性能要好于 LFM 信号, 而二者的测速性能却几乎相同, 所以二者对速度的跟踪性能相差不大。综合跟踪算法和发射波形两方面因素, 采用自适应 IMM 算法并且发射多脉冲 V-LFM 信号, 可以明显提高雷达系统的跟踪精度。

### 5 结束语

本文首先将 CV 模型和自适应加速度模型应用到 IMM 算法中, 得到自适应 IMM 算法。然后综合考虑测距测速性能和多普勒容忍性, 提出采用 V-LFM 信号作为针对机动目标跟踪的发射波形。V-LFM 信号对目标距离和速度联合估计时不存在耦合, 测距测速性能较好, 其多普勒容忍性较 LFM 信号略有损失, 但并不影响检测性能。仿真结果表明: 发射多脉冲 V-LFM 信号同时采用自适应 IMM 算法, 可以显著提高雷达系统的跟踪精度。由于本文只研究了完全检测的情况下, 针对机动目标跟踪的发射波形选择问题, 但实际上经常遇到存在杂波或者信噪比很低的情况, 所以在不完全观测即检测概率小于 1 的场景下针对目标跟踪的波形选择, 将是下一步重点研究的内容。

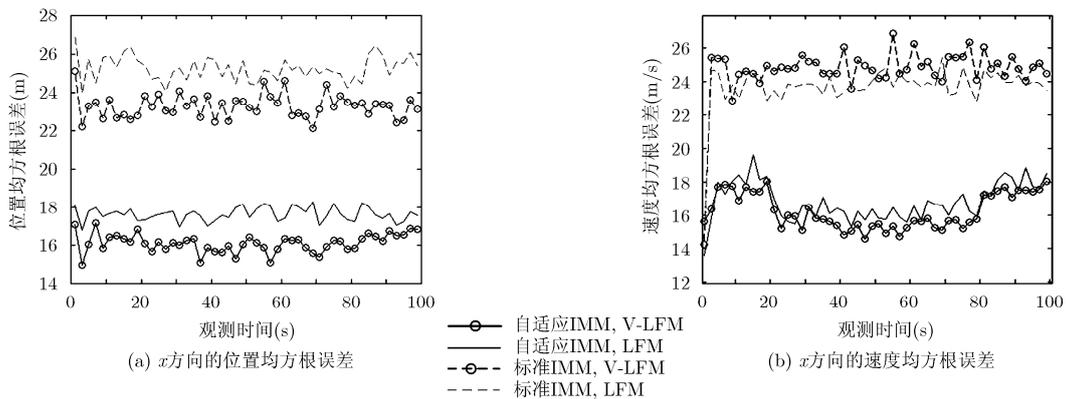


图 5 不同跟踪算法发射不同波形的对比结果

### 参考文献

[1] Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: a survey[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(1): 103-123.

[2] Lan J, Li X R, and Jilkov V P. Second-order Markov chain based multiple-model algorithm for maneuvering target tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 3-19.

- [3] Laneville D and Bar-Shalom Y. Maneuvering target tracking: a Gaussian mixture based IMM estimator[C]. Proceedings of IEEE/AIAA Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2012: 1-12.
- [4] 熊波, 甘露. MM-CBMeMBeR 滤波器跟踪多机动目标[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 238-245.  
Xiong Bo and Gan Lu. Multiple maneuvering targets tracking using MM-CBMeMBeR filter[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 238-245.
- [5] Kershaw D J and Evans R J. Optimal waveform selection for tracking systems[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1994, 40(5): 1536-1550.
- [6] Sira S P, Papandreou-Suppappola A, and Morrell D. Dynamic configuration of time-varying waveforms for agile sensing and tracking in clutter[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(7): 3207-3217.
- [7] Haykin S, Zia A, Arasaratnam I, et al. Cognitive tracking radar[C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Washington, DC, 2010: 1467-1470.
- [8] Haykin S, Zia A, Xue Y, et al. Control theoretic approach to tracking radar: first step towards cognition[J]. *Digital Signal Processing*, 2011, 21(6): 576-585.
- [9] Savage C O and Moran B. Waveform selection for maneuvering targets within an IMM Framework[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1205-1214.
- [10] 檀甲甲, 张建秋. 跟踪机动目标的雷达波形选择新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 515-522.  
Tan Jia-jia and Zhang Jian-qiu. New waveform selection approach to tracking maneuver targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(3): 515-522.
- [11] Kyriakides I, Konstantinidis I, Morrell D, et al. Target tracking using particle filtering and CAZAC sequences[C]. Proceedings of the International Conference on Waveform Diversity and Design, Big Sky, MT, 2007: 367-371.
- [12] 陈伯孝, 朱伟, 孙光才, 等. 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: 193-198.  
Chen Bai-xiao, Zhu Wei, Sun Guang-cai, et al. *Modern Radar System Analysis and Design*[M]. Xi'an: Xidian University Press House, 2012: 193-198.
- [13] Li X R and Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking. Part I: dynamic models[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(4): 1333-1364.
- [14] 潘泉, 梁彦, 杨峰, 等. 现代目标跟踪与信息融合[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 39-61.  
Pan Quan, Liang Yan, Yang Feng, et al. *Modern Target Tracking and Information Tracking*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 39-61.
- [15] 钱广华, 李颖, 骆荣剑. 机动目标跟踪中一种机动频率和方差自适应滤波算法[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 257-264.  
Qian Guang-hua, Li Ying, and Luo Rong-jian. One maneuvering frequency and the variance adaptive filtering algorithm for maneuvering target tracking[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 257-264.
- [16] 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 Huai-gen, Zhang Lin-rang, and Wu Shun-jun. The use of the radial velocity to improve the performance of target tracking[J]. *Journal of Xidian University*, 2005, 32(5): 667-670.
- [17] 朱晓华. 雷达信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 145-149.  
Zhu Xiao-hua. *Radar Signal Analysis and Processing*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 145-149.
- [18] Dogandžić A and Nehorai A. Cramér-Rao bounds for estimating range, velocity, and direction with an active array[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(6): 1122-1137.
- 靳 标: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号检测与参数估计、认知雷达.
- 纠 博: 男, 1982 年生, 副教授, 研究方向为雷达自动目标识别技术、认知雷达、自适应信号处理等.
- 苏 涛: 男, 1968 年生, 教授, 研究方向为面向雷达、声呐、通信的高速实时信号处理、认知雷达.
- 刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 研究方向为雷达自动目标识别、宽带雷达信号处理、网络化雷达技术、自适应和阵列信号处理及目标检测.