

## 某型超近程主动防护雷达跟踪滤波算法研究

李德世, 李 涛

(总装驻黄河厂军代室, 陕西 西安 710043)

**摘 要:** 为了研究某型超近程主动防护雷达跟踪滤波算法方案, 建立了仿真分析模型并提出了拦截点预测误差椭圆的方法, 仿真对比了基于卡尔曼滤波、 $\alpha-\beta$ 滤波和最小二乘法滤波三种算法的效果, 并结合主动防护系统的工作特点, 提出雷达跟踪滤波算法方案的建议。

**关键词:** 主动防护系统; 雷达跟踪滤波算法; 误差; 仿真

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2010)11-0086-05

## The Research on Tracking Filter Algorithm of a Certain Type of Short-range Active Defense Radar System

LI De-shi, LI Tao

(Military Representative Office in Huanghe Factory of GAD, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Aiming at the research of tracking filter algorithm for a certain type of radar of short-range active defense system, motion model. And the model of establishment of interception point prediction error ellipsoid. are given. Based on the collection, the application of Kalman filter,  $\alpha-\beta$  filter and least square filter algorithm is simulated respectively for a certain type of radar system. According to the comparison of simulation results and the characteristics analysis of active defense system, the method is adopted to measure data filtering.

**Key words:** active defense system; radar tracking filter algorithm; error; simulation

### 1 引言

末端超近程主动防护系统的主要作用是对敌方来袭弹药实施拦截, 保护重要的军事装备、军事设施等的安全。作为反导体系的最后一道屏障, 具有重要的军事意义, 目前许多国家都在积极研究。

某型超近程主动防护系统由雷达系统、火控系统和多个火工单元组成。当雷达系统探测到有导弹攻击, 进行扫描跟踪后对目标未来的航迹数据进行预测外推, 将目标的相关信息传送到火控系统, 火控系统根据来袭弹的信息计算高精度的拦截距离、角度等拦截参数, 指挥火工单元进行拦截。能否提供目标拦截点信息将对提高主动防护系统拦截概率起到至关重要的作用, 数据处理的算法更为重要。

### 2 仿真分析模型建立

为了对雷达数据处理系统的跟踪滤波算法研究分析, 首先需要进行数学分析模型的建立, 以下给出了来袭目标运动模型、雷达测量误差模型的数学模型。

#### 2.1 来袭目标运动模型

对于重要的军事设施, 敌方一般使用命中精度较高的导弹进行攻击。自海湾战争爆发以来, 各国装备的导弹数量激增, 制导方式也各有不同, 较典型的几种型号如表 1 所示<sup>[1]</sup>。

由表 1 可知, 以上几种导弹的飞行速度在 1 马赫左右, 当进入末端超近程主动防护系统的防护范围之内时, 距离要打击的重要军事设施仅有几公里的距离, 在几秒钟内完成从发现到拦截的过程中, 这

时导弹一般不会作大的机动,但可能会根据制导系统对飞行航迹做一些方位修正,以确保精确攻击.同时考虑发动机推力的短时间不规则性或气流等外界干扰因素影响,会有小的运动状态干扰.因此,可将来袭导弹的运动认为是小机动的运动模式.

表 1 国外几种较典型导弹的基本参数

| 型号       | 重量/<br>kg | 直径/<br>mm | 长度/<br>m | 飞行速度/<br>Ma |
|----------|-----------|-----------|----------|-------------|
| GBU-10   | 900       | 460       | 4.39     | 0.5         |
| GBU-28/B | 2 130     | 370       | 5.84     | 1.5         |
| AGM-130E | 1 364     | 457       | 3.95     | 1.6         |
| AGM-86C  | 1 500     | 690       | 6.32     | 0.9         |

根据以上分析,可以假设来袭导弹在超近程主动防护系统的作用范围内按照以下的运动模型飞行.

X轴方向(Y轴方向模型一样,表达形式略有区别):

假设运动模型为带有小状态干扰噪声和某时刻小机动调整的匀速直线运动.

$$\begin{cases} X(k+1) = X(k) + V_{x1}(k)T + 0.5a(k)T^2 \\ V_{x1}(k+1) = V_{x1}(k) + a(k)T \end{cases}$$
$$(t_0 \leq kT \leq t_1)$$

(1)

$$\begin{cases} X(k+1) = X(k) + V_{x2}(k)T + 0.5a(k)T^2 \\ V_{x2}(k+1) = V_{x2}(k) + a(k)T \end{cases}$$
$$(t_1 \leq kT \leq t_2)$$

(2)

(1)  $T$  为采样间隔,  $t_0$  为雷达发现导弹时刻,  $t_1$  为导弹飞行航迹机动调整时刻,  $t_2$  为导弹预计击中目标时刻.

(2)  $a(k)$  为运行加速度的干扰量,是一个随机变量,可以看作是服从  $(0, \delta a)$  的正态分布.由于弹体重量较大,所以  $\delta a$  的值将会很小.

(3)  $V_{x1}(k)$ 、 $V_{x2}(k)$  分别是导弹飞行航迹机动调整前后的在  $X$  轴的速度分量.

Z轴方向:

由于导弹自身重力因素,假设运动规律符合小状态干扰噪声的匀加速直线运动.数学表达式如下式,各参数的基本含义和前类似.

$$\begin{cases} Z(k+1) = Z(k) + V_{z1}(k)T + 0.5a_z(k)T^2 \\ V_{z1}(k+1) = V_{z1}(k) + a_z(k)T \\ a_z(k) = 9.8 + a(k) \end{cases}$$
$$(t_0 \leq kT \leq t_2)$$

(3)

2.2 雷达测量误差模型

在拦截过程中,从发现来袭弹到发射拦截弹及拦截弹爆炸后破片杀伤来袭弹的各个环节都存在一系列的误差.在这些误差的综合作用下,使得拦截时拦截弹的炸点对目标产生误差,称之为拦截误差.误差产生的原因主要来自于雷达测量误差和火工单元误差,由于雷达的测量、计算后提供的拦截点坐标与目标实际航迹的坐标之间的误差称为拦截点预测误差,可以通过在雷达数据处理机采用滤波的方法减小影响,而由于火工单元发射点火时间、发射角、弹丸发射初速等误差造成的拦截点误差称为拦截点射击误差,需通过提高火工单元的战技指标解决.

雷达测量误差主要包括以下几个方面:距离测量误差、方位角测量误差、俯仰角测量误差、速度测量误差<sup>[2]</sup>.可以把其测量误差看成高斯白噪声,并根据设计初步方案确定的参数估算标准差取值.

3 各种跟踪滤波算法仿真对比

3.1 基于卡尔曼滤波的雷达目标跟踪滤波仿真

3.1.1 极坐标转直角坐标的卡尔曼滤波分析

由于目标在直角坐标系下的状态方程为线性,而对雷达对目标的观测是在极坐标系下进行,观测结果为径向距离、方位角和俯仰角,两坐标系之间存在非线性的变换关系,因此不能直接进行卡尔曼滤波.采用转换坐标法将极坐标系下的观测结果通过坐标变换转换到直角坐标系下,并用统计方法计算出转换量测噪声方差,然后用标准卡尔曼滤波算法进行滤波.

关于转换量测噪声方差有很多文献提出了计算方法<sup>[3-4]</sup>,但是过于复杂,计算量大,不利于实时性.针对主动防护雷达采样间隔很小的特点(几毫秒~十几毫秒)提出一种简化的近似转换量测噪声方差的算法如下:

$$x = R \times \cos\beta \times \cos\alpha$$

如果忽略高阶偏导分量成分,则得到关于  $x$  的近似全微分展开式:

$$\Delta x \approx \frac{\partial x}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial x}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial x}{\partial \alpha} \Delta \alpha$$

得到

$$\delta_x^2 = (\cos\alpha \times \cos\beta)^2 \times \delta_R^2 + (\sin\alpha \times \cos\beta \times R)^2 \times \delta_\alpha^2 + (\cos\alpha \times \sin\beta \times R)^2 \times \delta_\beta^2$$

(4)

同理有

$$\delta_y^2 = (\sin\alpha \times \cos\beta)^2 \times \delta_R^2 + (\cos\alpha \times \cos\beta \times R)^2 \times \delta_\alpha^2 + (\sin\alpha \times \sin\beta \times R)^2 \times \delta_\beta^2$$

(5)

$$\delta_z^2 = \sin\beta^2 \times \delta_R^2 + (\cos\beta \times R)^2 \times \delta_\beta^2 \quad (6)$$

### 3.1.2 对各坐标轴下测量结果的滤波算法

在滤波计算时,考虑采用 X、Y、Z 轴独立解耦滤波的方法,这样可以大大减少运算量,提高数据的实时性.虽然会对跟踪精度有所影响,但在工程实际应用中,可以对其所产生的误差忽略不计,这样对工程实现有利.下面分析一下各坐标轴下的状态方程和量测方程表达式.对于 X 轴而言,根据式(1)可以得到状态转移矩阵  $\Phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,系统干扰矩

$$\text{阵 } G(k) = \begin{bmatrix} T^2 \\ 2 \\ T \end{bmatrix}, T \text{ 为雷达采样间隔. 其量测方程}$$

为  $CX(k) = X(k) + VX(k)$ ,其中,  $CX(k)$  是量测输出向量,即 X 轴的坐标和速度分量的量测值.量

测矩阵  $H(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $VX(k)$  为量测噪声,其协

方差矩阵为  $\begin{bmatrix} \delta_x^2 & \delta_x\delta_{vx} \\ \delta_x\delta_{vx} & \delta_{vx}^2 \end{bmatrix}$ . 这里:  $\delta_{vx}^2 = \delta_v^2 \times$

$\frac{x^2(k)}{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)}$ . 同理可以得到 Y 轴的状态方程和量测方程.

对于 Z 轴而言,根据式(3)可以得到状态转移

$$\text{矩阵 } \Phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{系统干扰矩阵 } G(k)$$

$$= \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix}, T \text{ 为雷达采样间隔. 量测矩阵 } H(k) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{量测噪声, 其协方差矩阵}$$

$$Q(k) = \begin{bmatrix} \delta_z \\ \delta_{vz} \\ \delta_{az} \end{bmatrix} \times [\delta_z \quad \delta_{vz} \quad \delta_{az}]. \text{这里 } \delta_z \text{ 为前面讨}$$

论所得值,

$$\delta_{vz}^2 = \delta_v^2 \times \frac{z^2(k)}{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)},$$

$$\delta_{az} = \frac{1.4 \times \delta_{vz}}{T}.$$

各坐标轴下的状态方程和量测方程建立后,按照卡尔曼滤波的标准算法编写 Matlab 仿真程序.为了进行仿真计算,先做如下假设,在以雷达为坐标圆点的直角坐标系中,来袭导弹初始坐标为(1 299, -750, 2 598),导弹运行起始参数  $R_0 = 3\ 000\text{ m}$ ,  $\alpha_0$

$= 30^\circ$ ,  $\beta_0 = 60^\circ$ . 雷达的采样周期  $T = 15\text{ms}$ . 导弹初始飞行速度  $v_0 = 144\text{m/s}$ . 在各坐标轴的速度分量为  $v_{0x} = -80\text{m/s}$ ,  $v_{0y} = 66.7\text{m/s}$ ,  $v_{0z} = 100\text{m/s}$ ,  $a(k)$  为运行加速度的干扰量,可以看作是服从(0,  $\delta a$ )的正态分布随机变量.由于弹体重量较大,所以  $\delta a$  的值将会很小,本文设  $\delta a = 0.3\text{m/s}^2$ . 航行 0.75s 后进行航迹修正,然后航行到实际攻击目标点(200, 300, 0). 火力单元置于  $xoy$  平面(377.7, 130.2, 0).

### 3.2 基于 $\alpha - \beta$ 滤波的雷达目标跟踪滤波仿真

事实上  $\alpha - \beta$  滤波不需要用到量测方程和状态方程中相关参数,所以可以不进行像卡尔曼滤波那样的坐标转换,直接在极坐标系下对距离 R、方位角和俯仰角进行滤波.本文中为了便于和其他滤波效果直观对比,所以也在直角坐标系下进行滤波.为了保证滤波的精度,滤波系数  $\alpha$ 、 $\beta$  需选择小系数的,工程实现时其最佳取值需要在工程实践中大量试验摸索后设定.本文仿真时取  $\alpha = 0.2$ ,  $\beta = 0.022$ . 对于 Z 轴,由于其运动模型为匀加速的模型,滤波算法有些不同之处,需要用  $\alpha - \beta$  滤波的扩维算法即  $\alpha - \beta - \gamma$  滤波.

### 3.3 基于最小二乘法的雷达目标跟踪滤波仿真

由于需要实时获得目标当前点的坐标,保证雷达跟踪结果.所以在运用最小二乘法跟踪滤波时,采用边拟合边外推的方法实现跟踪滤波.就是要获得第  $n$  拍的滤波值时,需要对前  $n - 1$  拍的测量数据进行拟合,然后外推出第  $n$  拍的数据作为滤波结果.

当然因为当  $n$  很大时,运用最小二乘法拟合的运算量将会很大,不利于实时跟踪.所以这里采用了带滑动窗的最小二乘法.滑动窗的宽度设为 30 个采样周期,即当  $n < 31$  时,用前  $n - 1$  拍的测量数据进行拟合.当  $n \geq 31$  时,用第  $(n - 30) \sim$  第  $(n - 1)$  拍的测量数据作为拟合数据,然后进行 1 步外推,其结果作为滤波结果.

### 3.4 三种算法的滤波结果对比

通过实时滤波结果的对比观察(见图 1),发现以下特点:

(1) 最小二乘法的收敛速度较慢,在约 0.2s(十几拍)后趋于稳定.

(2)  $\alpha - \beta$  滤波对噪声的变化较敏感,而卡尔曼滤波则比较稳健.

(3) 三者总体滤波结果差距不是很大,包括在 0.75s 时,目标由方位调整带来的小机动调整也未对三者产生大的影响.这主要是由于这里目标属于很弱的机动特性,加之采样间隔  $T$  很小,更弱化了这

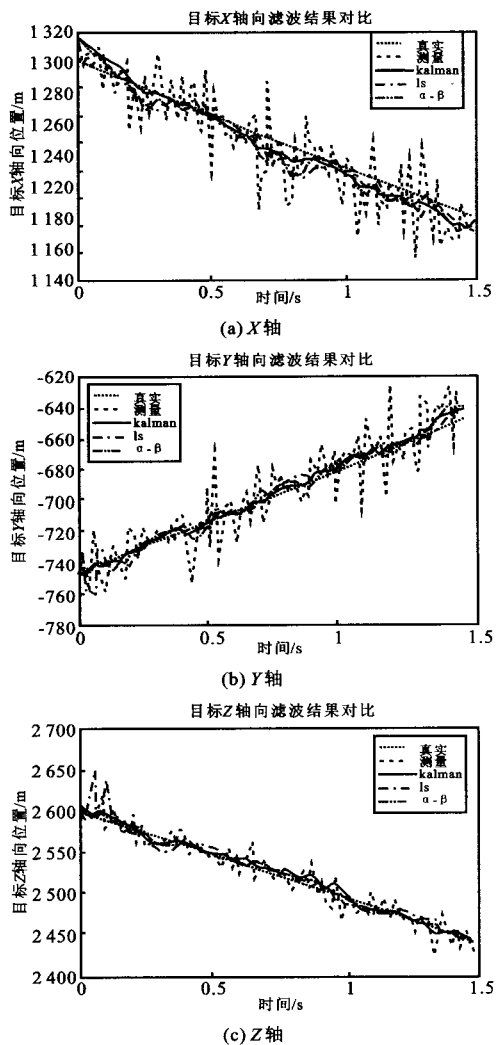


图1 三种滤波结果对比图

种机动. 卡尔曼滤波对于机动目标效果优越, 而在这里优越性不是很显著.

### 3.5 拦截点预测误差分布对比

由于主动防护雷达目标跟踪滤波的结果是为保证提供准确的拦截点信息, 所以还要观察对比各种滤波结果后提供的拦截点误差情况.

由于拦截弹飞行到预定拦截点大概需要 1s 的时间, 这段时间内火控单元对雷达的数据信息已不接收, 所以要提供拦截点信息, 需要提前根据跟踪滤波结果进行航迹拟合和外推, 由于外推的拍数  $L$  较大, 这里最小二乘法无意是最好的选择, 以最后  $N$  个滤波后的样本作为拟合样本, 外推  $L$  拍后得到的数据作为拦截点预测值  $(x_l, y_l, z_l)$ . 然后和目标真实运动航迹对应时刻的理想拦截点  $E$  的坐标  $(X_E, Y_E, Z_E)$  比较, 得到拦截点预测误差,

$$r = \sqrt{(x_l - X_E)^2 + (y_l - Y_E)^2 + (z_l - Z_E)^2}$$

目标运行初始参数设定同上节, 令拟合样本数  $N = 150$ . 将以上过程仿真 100 次, 在空间坐标系中绘制外推预测的拦截点误差分布椭球, 并给出误差的均值  $Mr$  和标准差  $Sr$ .

图 2 是三种滤波后航迹外推后得到的拦截点预测误差分布情况. 三个坐标轴分别是  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向上的拦截点预测误差分量.

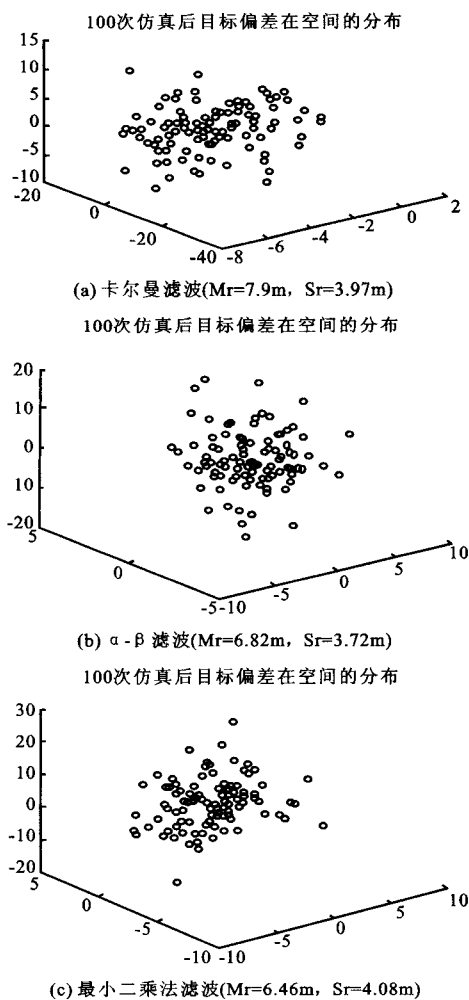


图2 基于三种滤波算法得到的拦截点预测误差分布仿真结果分析:

通过观察, 基于卡尔曼滤波的算法在拦截点预测误差上并没有明显的精度优势, 相反其他两种算法也能满足系统使用要求.

原因分析起来主要有以下几个方面. 一是如上一节仿真结果分析的那样, 对于超近程主动防护雷达而言, 来袭目标在这段时间内机动性很小, 卡尔曼滤波算法在此情况下相对于其他两种算法已没有优越性. 二是由于跟踪滤波的最后阶段还要用最小二乘法进行一次航迹拟合和外推, 相当对测量数据点进行二次平滑滤波.

由此看来,卡尔曼滤波算法在这里并不优越,同时由于其算法复杂,状态噪声方差和量测噪声的估计难度大,而其他两种算法比较简便、实现容易,精度也能保证.所以该雷达系统不宜选用卡尔曼滤波作为目标跟踪滤波的算法,适合选用 $\alpha-\beta$ 滤波或最小二乘法滤波进行测量数据滤波,然后用最小二乘法进行航迹拟合外推拦截点的方法作为雷达跟踪滤波的基本算法方案.

#### 4 结束语

本文通过仿真研究分析,表明对于超近程主动防护雷达而言,由于其所需侦察目标距离近、跟踪时间短和小机动等特点,卡尔曼滤波算法并不适合作为其跟踪滤波算法,相反 $\alpha-\beta$ 滤波和最小二乘法滤波完全能够满足系统要求.当然由于是仿真分析,在实际应用中还需对算法和参数的选取作进一步修正

和实践验证.研究结果对某型超近程主动防护系统的方案设计、误差指标分配等具有一定的指导意义,具有一定的军事应用前景.

#### 参考文献:

- [1] 王学斌. 反导防空导弹拦截效能的研究[J]. 航空计算技术, 2003,33(3):29-32.
- [2] Merrill I Skolnik. 雷达手册[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 贺明科,王正明. 去偏转换坐标卡尔曼滤波器的雷达目标跟踪[J]. 国防科技大学学报,2002,24(5):57-61.
- [4] 冯昆林. 对匀速直线运动目标跟踪的转换坐标卡尔曼滤波算法[J]. 太原师范学院学报,2005(2):15-19.

#### 作者简介:

李德世 男,(1972-),硕士,工程师.研究方向为通信与电子系统.

(上接第 85 页)

#### 参考文献:

- [1] 张公礼. 全数字接收机理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2005:61-85.
- [2] 谷莢柯,白国强,陈弘毅. FIPS 乘加器架构的 VLSI 实现研究[J]. 微电子学与计算机,2008,25(12):50-54.
- [3] 刘壹,邱昕. OFDM 分组检测算法的研究及其 VLSI 实现[J]. 微电子学与计算机,2008,25(12):161-164.
- [4] Floyd M Gardner, Interpolation in digital modems part I: fundamentals[J]. IEEE Trans Comm., 1993,41(3):501-507.
- [5] Erup L, Gardner F M, Harris R A. Interpolation in digital modems part II: implementation and performance[J]. IEEE Trans Comm., 1993, 41(6):501-507.
- [6] Zhiliang Qin, Kah Chan. A low-complexity soft-input/soft output multiuser detector based on local search algo-

rithms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2008,7(12):5257-5263.

- [7] Polpo A, Pereira C A B. Reliability nonparametric bayesian estimation in parallel system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009,58(2):364-373.
- [8] Keshab K Parhi. VLSI 数字信号处理系统:设计与实现[M]. 陈弘毅,白国强,吴行军,译. 北京:机械工业出版社,2004:47-65.

#### 作者简介:

邓 军 男,(1976-),博士研究生,高级工程师.研究方向为通信、数字信号处理的 VLSI 实现.

杨银堂 男,(1962-),教授,博士生导师.研究方向为微电子学与固体电子学.