

多基地雷达系统中基于距离差测量的目标跟踪分析

魏崇毓 徐善驾 王东进

摘 要：分析了用多站雷达系统跟踪近程目标的方法.将速度矢量引入到目标运动模型，从而能更好地描述机动目标.系统量测方程建立在距离差测量的基础上，使跟踪过程与发射机位置无关，因而十分适用于发射机机动的系统布局.仿真结果表明该方法是有用的，具有跟踪速度快、稳态误差小的特点，适用于多站雷达系统跟踪近程目标.

关键词：多基地雷达；目标跟踪；卡尔曼滤波

分类号：TN853.7 **文献标识码：**A

文章编号：0253-2778(2000)01-0073-07

Analysis of Target Tracking Based on Range Difference Measurement With Multistatic Radar System

WEI Chong-yu

(Department of Electronic Engineering & Information Science,
USTC, Hefei 230027, China)

XU Shan-jia

(Department of Electronic Engineering & Information Science,
USTC, Hefei 230027, China)

WANG Dong-jin

(Department of Electronic Engineering & Information Science,
USTC, Hefei 230027, China)

Abstract : An analysis is presented for target tracking with a short range multistatic radar system in this paper. The velocity vector is introduced into the model describing target motion, which depicts the target moving more precisely. The system measurement equation is constructed on the basis of range difference that makes the tracking model independent of the transmitting position. Therefore the algorithm is quite suitable for cases where the transmitter is not fixed. Simulation results show that the algorithm has the advantages of fast tracking and small steady tracking errors, and can be used for tracking targets in short range with a multistatic radar system.

Key words : multistatic radar; target tracking; Kalman filter

1 引言

目标跟踪有单探测器跟踪和多探测器跟踪.单探测器跟踪研究已获得了长足的发展,取得了大量的研究成果,提出了许多适用于跟踪机动目标的模型,如常速或常加速模型、Singer模型^[1]、Moose模型^[2~4]、Noval模型^[5]及当前模型^[6]等等.

随着军事技术的发展和现代战场电磁环境的不断恶化,近年来多探测器系统获得了人们的高度重视.然而多探测器系统比单探测器系统要复杂得多,目前对这种系统的研究还不够.文献^[7]比较全面地研究了多站雷达系统的目标跟踪问题,但其讨论是以系统获得距离和、方位以及俯仰角信息为前提的,这些信息的获取需要确知发射机位置,即此类多站雷达系统其发射机布局是固定的,不能灵活机动.以距离差测量为基础的近程多站雷达系统,其目标定位与跟踪算法都与发射机位置无关,且发射机布局灵活及抗ECM和ARM能力强.然而这种系统的目标跟踪问题较为复杂,目前对它的研究的还很成熟.

本文讨论多基地雷达基于距离差测量的目标跟踪问题.由于多站雷达系统能够测量目标的三维速度矢量,而三维矢量速度能更全面准确地描述目标的机动状态.本文将这一参数引入多站雷达系统的目标跟踪模型,所作的分析表明效果很好.

2 目标运动模型

近程多基地雷达的探测对象是高速高机动目标,但是当这类目标飞入近程雷达系统的威力范围后,机动性将大大降低,甚至可以看作匀速直线运动目标,并且由于系统测量周期短,在一个测量周期内可以认为目标速度是不变的.在这种情况下,可以将目标在一个测量周期中的运动看作匀速直线运动.目标的状态变量仍可只选目标的空间坐标,速度矢量只作为确定性输入量加入状态方程,而不是作为目标的状态变量引入.该处理方法的优点是在不升高状态变量维数的情况下更精确地描述了目标状态,既能改善跟踪性能,又不增加计算量.另外,考虑到环境因素和测量误差的影响,目标速度将在某一均值附近浮动,本文将它看作具有随机特性的扰动输入,即模型噪声,假设其服从零均值的正态分布.根据以上分析,并选择直角坐标系为跟踪坐标系(地理坐标系),则可以写出如下的状态方程:

$$R_k = R_{k-1} + V_{k-1}T + \quad_{k-1} \quad (1)$$

式中 $R_k = [x_k \ y_k \ z_k]^T$ 表示目标的状态向量, $V_k = [V_{xk} \ V_{yk} \ V_{zk}]^T$ 为目标速度向量, T

为系统的采样周期, $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为状态转移矩阵, $\Gamma = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix}$ 为表示模型

噪声对状态估计影响的转移矩阵, $k = [x_k \ y_k \ z_k]^T$ 为模型噪声向量,其协方差 p 矩阵为 Q_k .

不把目标速度作为状态变量,该方程实际上相当于已做了状态约减(降维).这将大大减少计算量,有利于提高跟踪系统的实时性,缺点是等式右边出现了确定性输入项 $V_k T$,为了利用标准形式的卡尔曼滤波,需要对此式进行适当的变换,消去确定性输入项.

3 雷达系统量测模型

在本文所讨论的多站雷达系统中,量测方程的获取可以有两种方式.一是以最大似然估计定位法^[8,9]求得的目标位置向量作为量测向量,此时的量测方程为

$$Y_k = H_k R_k + v_k \quad (2)$$

式中 Y_k 为 k 时刻的三维量测向量,其元素为 k 时刻以最大似然估计法求得的目标坐标值. H_k 为 3×3 维量测矩阵, v_k 为3维量测噪声向量,其统计特性为以最大似然估计法求得的目标坐标误差的统计特性.由于最大似然估计法对目标坐标的估计是有偏的,故 Y_k 的元素必须是经过校偏的,否则式中的 v_k 就不是零均值的.另外,在系统测量误差服从零均值正态分布的假设下,经过最大似然估计法处理估计出目标的定位坐标之后,其定位坐标就不能保证还是正态分布,故而也就不再满足标准卡尔曼滤波的假设,因此不便于利用卡尔曼滤波.

另一种获取量测数据的方法就是直接利用系统测得的目标距接收站 S_i 及 S_{N+1} 的距离差 $T_i - T_{N+1}$, $i = 1, 2, \dots, N$. 此时的量测方程为

$$D_k = F(R_k) + n \quad (3)$$

式中量测向量 D_k 的元素就是接收站 S_i 所测到的距离和 T_i (即发射站经目标到接收站 S_i 的距离和)与 S_{N+1} 所测到的距离和 T_{N+1} 之差,即 $D_{ik} = T_i - T_{N+1}$, $i = 1, 2, \dots, N$, (D_k 实际上就是目标距接收站 S_i 及 S_{N+1} 的距离差构成的向量).量测噪声向量 n 元素为 $n_i = T_i - T_{N+1}$, $i = 1, 2, \dots, N$. 根据前面的假设 n 服从零均值的正态分布,可求得其协方差矩阵为

$$\Omega = H\Omega_\epsilon H^T = \sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (4)$$

其中 σ^2 为接收机距离测量误差的方差.

在式(3)中,量测噪声向量 n 服从卡尔曼滤波的假设,但是式中的函数 $F(R_k)$ 是非线性的,为了利用卡尔曼滤波,还要对其作线性化处理.而线性化处理会带来线性化误差.

式(2)和式(3)给出了两种形式的量测方程,它们各有优缺点.为了利用标准形式的卡尔曼滤波,都需要对方程作进一步的处理,对于式(2)来说需要对量测噪声作白化处理,对于式(3)来说则需要做线性化处理,但一般说来线性化处理要简便一些,即根据文献^[10]的介绍量测方程线性化后所产生的线性化误差可以忽略.另一方面,选用量测方程(3)还具备另一优越性.因为采用式(3)时实际上已经将目标定位与跟踪滤波一次完成了.简化了处理步

骤,有利于节省计算时间,提高系统实时性.故而对于本文所讨论的系统,式(3)是一个很好的选择.

4 模型变换

模型变换一是要消去状态方程中的确定性输入项,其次是要将量测方程线性化,将目标模型变为适合卡尔曼滤波的标准形式.

设第 $k-1$ 时刻实际状态估值为 $\hat{\mathbf{R}}_{k-1}$,并令 \mathbf{R}_{ek} 为 k 时刻目标实际状态的预测值,则

$$\mathbf{R}_{ek} = \Phi \hat{\mathbf{R}}_{k-1} + \mathbf{V}_{k-1} T, \quad (5)$$

式(1)与式(5)相减有

$$\Delta \mathbf{R}_k = \Phi \Delta \mathbf{R}_k + \Gamma \omega_{k-1}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_k - \mathbf{R}_{ek}$, $\mathbf{R}_{k-1} = \mathbf{R}_{k-1} - \hat{\mathbf{R}}_{k-1}$.式(6)已变为所要求的标准形式.

为了将量测方程线性化,将式(3)中的非线性项 (\mathbf{R}_k) 在 k 时刻的状态预测值 \mathbf{R}_{ek} 附近展为Taylor级数,并仅保留一阶偏微分项得到

$$\mathbf{D}_k - \mathbf{F}(\mathbf{R}_{ek}) = \mathbf{B}_k(\mathbf{R}_{ek})(\mathbf{R}_k - \mathbf{R}_{ek}) + n$$

式中 $\mathbf{B}_k(\Delta \mathbf{R}_{ek}) = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{R}} \right|_{\mathbf{R} = \mathbf{R}_{ek}}$.令 $\mathbf{D}_k = \mathbf{D}_k - \mathbf{F}(\mathbf{R}_{ek})$,则上式变为

$$\mathbf{D}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{B}_k \mathbf{R}_k + n \quad (7)$$

式(6)与式(7)就构成了不包含确定性输入的且与线性系统完全对应的递推状态估值问题,可以应用卡尔曼滤波的标准公式.

5 卡尔曼滤波

将标准形式的卡尔曼滤波公式^[7]应用于式(6)和(7),并注意 $\Delta \hat{\mathbf{R}}_{k-1} = \hat{\mathbf{R}}_{k-1} - \hat{\mathbf{R}}_{k-1} = 0$,从而求得它们的解为

$$\Delta \hat{\mathbf{R}}_k = \Phi \Delta \hat{\mathbf{R}}_{k-1} + K_k (\Delta D_k - B_k \Phi \Delta \hat{\mathbf{R}}_{k-1}) \quad (8)$$

式中 K_k 为卡尔曼滤波的最佳增益矩阵.

将 \mathbf{R}_k , D_k 代入(8), 即得到含有确定性输入的, 非线性系统的卡尔曼滤波递推公式

$$\hat{\mathbf{R}}_k = \Phi \mathbf{R}_{k-1} + \mathbf{V}_{k-1} T + K_k [D_k - F(\mathbf{R}_{ek})] \quad (9)$$

第一次迭代时 $k=1$, $\mathbf{R}_0, \mathbf{V}_0$ 均可以取为解析法^[9]算出的结果, 此时的状态预测值为

$$\mathbf{R}_{el} = \Phi \hat{\mathbf{R}}_0 + \mathbf{V}_0 T$$

最佳增益矩阵的表示式为

$$K_k = P'_k B_k^T [B_k P'_k B_k^T + \Omega]^{-1} \quad (10)$$

式中 $P'_k = P_{k-1} + Q_{k-1}$ 为状态预测误差的协方差矩阵, $P_k = (I - K_k B_k) P'_k$ 为滤波误差方差矩阵. 反映噪声特性的矩阵

$$\Omega = E[v_k v_k^T] = E[nn^T] = \sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & \cdots & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & 1 & \cdots & \cdots & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & 2 \end{bmatrix}_{N \times N}$$

式中 σ^2 为雷达站距离测量误差的均方差,

$$Q_k = E[\omega_k \omega_k^T] = (\Theta^T H^T Q_V H \Theta)^{-1}$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cos \alpha_{N+1} & \cos \beta_{N+1} & \cos \gamma_{N+1} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{N \times (N+1)}$$

$$Q_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)}$$

式(9)、(10)构成了非线性系统的卡尔曼滤波算法公式,虽然在式(9)中没有表现出线性化的关系,但在计算过程的每一递推步骤中,为了计算 K_k 都需要计算 B_{k-1} ,从而包含着在 R^{\wedge}_{k-1} 附近的局部线性化.由于计算过程中做了线性化处理,式(9)给出的结果将是有偏的.

6 计算机仿真

假设多站雷达系统布局7个接收站,即 $N=6$,第7个站布在系统的参考点,即坐标原点.其余6个站分别布在两个圆周上,布站圆的半径分别为1km和2km.每个布站圆上均匀地布三个站,布站形式如图1所示.仿真中 R_0, P_0 参照解析法仿真结果给出,输入的量测数据加入了服从零均值正态分布的随机噪声.程序中应用了一个产生正态分布随机序列的子程序,该程序产生7个相互无关的零均值正态分布随机序列,这7个随机序列对应7个量测数据序列,实际的量测数据就是由数据标准值加上随机误差产生的.程序中假定的数据采样周期是2ms.

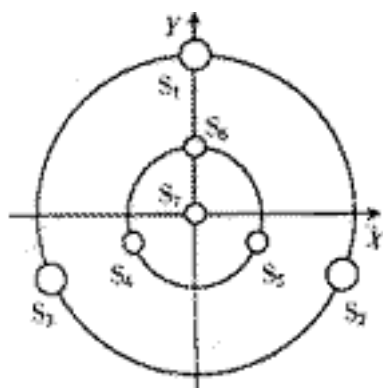


图1 多站系统布站示意图
Fig.1 System arrangement

图2、图3是目标作匀速直线运动情况的仿真结果，目标速度取为500m/s，X，Y，Z坐标的初始误差分别取为3m、5m、-6m，并假定目标始终指向坐标原点.由图看出，由于量测方程的线性化处理，系统跟踪目标达到稳态后，所有的跟踪参数都有偏移量，Y坐标的偏移量接近于0，X坐标偏移量也很小，距离跟踪误差主要是Z坐标误差的贡献.这与解析法分析的结果是一致的.此外，系统跟踪目标的速度是很快的.跟踪几米的距离后就达到了稳态.

图4、图5是目标作匀加速运动的情况，图中目标速度和加速度都在原点与目标的连线上，并沿离开原点的方向，目标速度初值取为300m/s，加速度取为10000m/s².在此情况下，目标跟踪效果匀速直线情况基本相同.

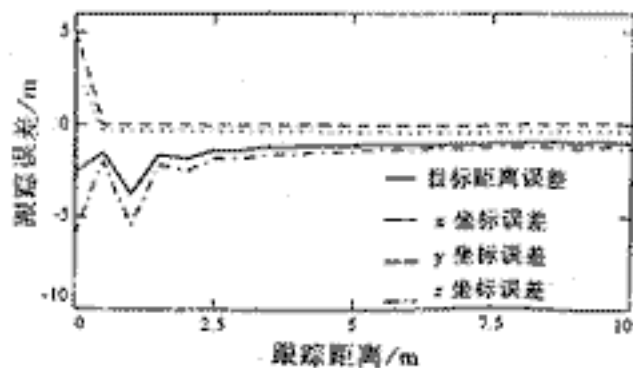


图2 目标匀速直线运动时的仿真结果
Fig.2 Tracking errors for target of constant velocity

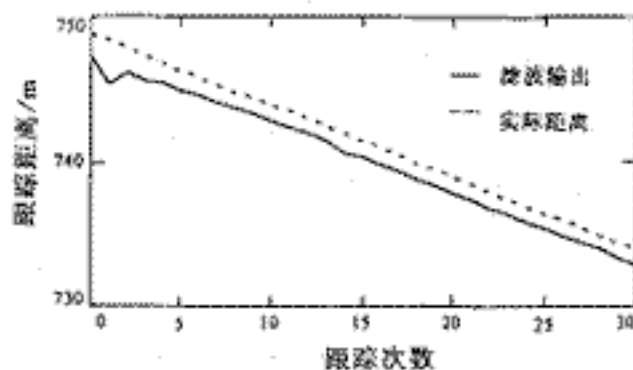


图3 速度为常数时的距离跟踪曲线
Fig.3 Range tracking for target with constant velocity

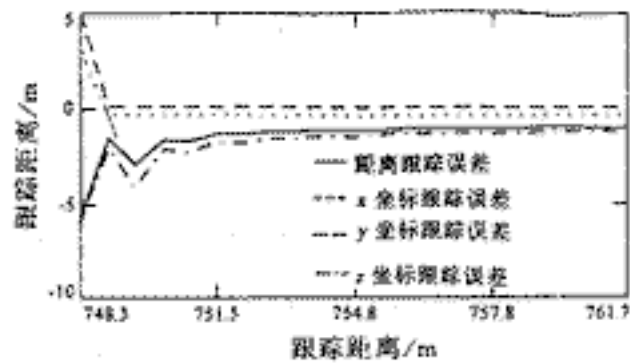


图4 匀加速运动时的跟踪误差曲线

Fig.4 Tracking errors for target with constant acceleration

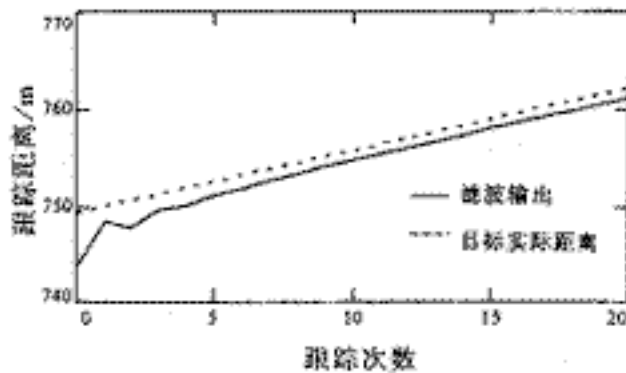


图5 匀加速运动时的距离跟踪曲线

Fig.5 Range tracking for target with constant acceleration

为进一步检验本文算法的性能,对按图6轨迹作机动飞行的目标进行跟踪模拟,该目标在三个坐标轴上的加速度分量都是时变的,目标初始速度值200m/s,对目标的测量周期2ms,跟踪200个测量周期后,目标速度值726m/s.初始坐标分别为 $X=530\text{m}$, $Y=550\text{m}$, $Z=400\text{m}$,初始坐标误差分别为: $x=20\text{m}$, $y=20\text{m}$, $z=-10\text{m}$.图7给出的是目标作机动曲线运动时的跟踪情况.仿真结果表明,目标跟踪效果很好,跟踪速度快且不发生丢失.

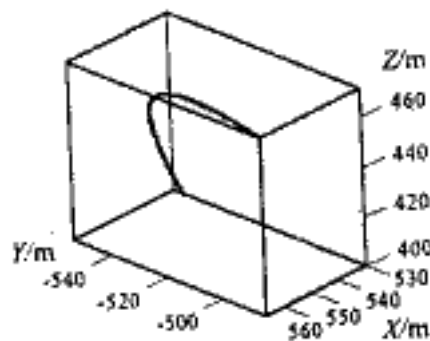


图6 变加速机动目标飞行轨迹

Fig.6 Target trail

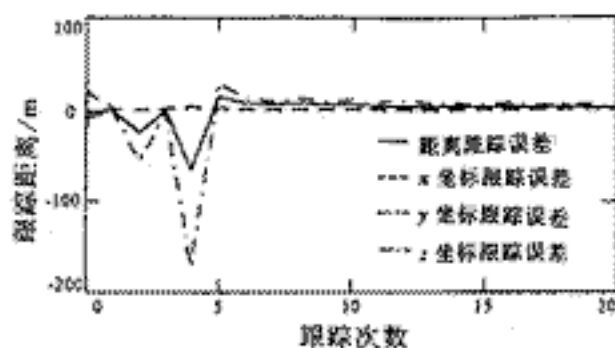


图7 变加速运动时的跟踪误差曲线

Fig.7 Tracking errors for target with varying acceleration

7 结论

本文将多站雷达系统中的速度矢量引入到机动目标的运动模型中,使得模型描述运动过程更加精确.利用目标轨道差分概念对目标模型进行了降维处理,大大缩短了处理时间.系统的量测方程建立在多站雷达距离差测量基础上,使得距离算法与发射机位置无关,其结果对于发射机的机动布局十分有利,大大提高了多站雷达系统的抗干扰和抗反辐射导弹的能力.计算机仿真结果表明,该方法是具有跟踪速度快、稳态误差小的特点.这一方法的建立为近程多基地雷达系统对快速机动目标的跟踪提供了有价值的解决方案.

作者简介:魏崇毓,男,1957年生,博士.

作者单位:魏崇毓(中国科技大学电子工程与信息科学系,安徽合肥 230027)

徐善驾(中国科技大学电子工程与信息科学系,安徽合肥 230027)

王东进(中国科技大学电子工程与信息科学系,安徽合肥 230027)

参考文献:

- [1] Singer R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets [J]. IEEE Trans. on AES, 1970, AES-6(4):473 ~ 483.
- [2] Moose R L. An adaptive state estimation solution to the maneuvering target problem [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984, 20(6):359 ~ 362.
- [3] Gholson N H, Moose R L. Maneuvering target tracking using adaptive state estimation [J]. IEEE Trans. on AES, 1977, AES-13(3): 310 ~ 316.
- [4] Moose R L, Vanlandingham H F, Mecabe D H. Modeling and estimation for tracking maneuvering targets [J]. IEEE Trans. on AES, 1979, AES-15(3): 448 ~ 456.
- [5] Kendric J D, Maybeck P S, Reid J G. Estimation of aircraft target motion using orientation measurements [J]. IEEE Trans. on AES, 1981, AES-17(2): 254 ~ 259.
- [6] 周宏仁.机动目标当前统计模型与自适应跟踪算法[J].航空学报, 1980, 4(1): 73 ~ 86.
- [7] Farina A. Tracking function in bistatic and multistatic radar systems [J]. IEE Proceedings,

1986 , 133(7) : 630 ~ 637.

[8] 贾沛璋.最优估计及其应用 [M] .北京 : 科学出版社 , 1984 , 88 ~ 119.

[9] Jorrieri D J. Statistical theory of passive location system [J] . IEEE Transactions on AES, 1984 , 20(2) : 183 ~ 198.

[10] 周宏仁, 靳忠良, 王培德. 机动目标跟踪 [M] .北京 : 国防工业出版社, 1991.

收稿日期 : 1999-04-05

[请看PDF全文](#)