

基于目标指示的两坐标警戒雷达 目标高度补偿状态估计

崔亚奇,熊 伟,何 友

(海军航空工程学院信息融合研究所,山东烟台 264001)

摘 要: 为了克服现有目标高度补偿算法存在的模型假设不合理、实际应用效果难以保证等问题,本文以目标恒海拔等速运动为前提,利用协同单元提供的目标指示信息,对两坐标雷达的空间目标跟踪问题重新进行了研究.首先根据不同坐标系间的转换关系,构建了目标高度的准确表达式.然后通过恒等变换和合理的近似,得到了目标高度的估计公式,并利用绝对值不等式和柯西-施瓦茨不等式,推导得到了高度估计公式的误差.最后联合目标高度估计公式和两坐标雷达的缺维量测方程,采用扩展卡尔曼滤波方法,实现了目标空间状态的估计.仿真结果表明:本文算法可有效地对目标高度进行补偿,获得稳定、可靠的目标空间状态估计,从而为两坐标雷达目标空间状态估计问题提供了相对有效完善的解决方法.

关键词: 目标指示; 两坐标雷达; 目标高度补偿; 空间状态估计

中图分类号: TP953, TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)03-0475-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.009

Height Compensation for 3-D Target State Estimation Using 2-D Warning Radar Based on Target Indication

CUI Ya-qi, XIONG Wei, HE You

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: There are some shortcomings in the existing target height compensation algorithms, such as unreasonable model assumptions and unstable application effect. To avoid these defects, the problem of tracking the aerial target in 3-D space with a 2-D radar was restudied under the assumption that the target flights at a constant speed and a fixed altitude and the radar can obtain the indication information of the target from other collaborative detect units. First, on the basis of the transformation relation between different coordinates, an exact formula of the target height was deduced. Then utilizing identical transformation and reasonable approximations, an approximate estimation formula of the target height was derived. And the error in the formula was calculated using absolute value inequality and Cauchy-Schwarz inequality. At last, combining the original measurement equation of the 2-D radar with the target height estimation equation and using extended Kalman filter, the target space state was estimated. The simulation result shows the proposed algorithm can effectively compensate the target height information and obtain the stable and reliable estimation of the target space state, which can be used in the actual projects as the effective and perfect method for the target space state estimate problem of the 2-D radar.

Key words: target indication; 2-D radar; target height compensation; state estimate in 3-D space

1 前言

作为多雷达组网预警系统的关键技术,两坐标雷达目标高度补偿状态估计技术得到了国内外学者的广泛关注,大量相关研究成果在国内外重要期刊上得到发表^[1~13].文献[2, 3, 11, 12]根据雷达与目标的空间几何

关系,利用同一时刻两部以上雷达对同一目标位置量测,并结合雷达自身的空间位置,可得到目标高度某时刻的估计,或在目标高度不变的假设下,得到其时间累计估计,继而得到高度补偿后的目标状态估计.该类算法虽然计算较为简单,但由于实际上不同雷达间关于同一目标的观测数据是很难关联配对的,并且时间是不同

步的,因此该类算法很难在实际工程中得到应用.文献[4~7]假设目标在直角坐标系中做匀速等高运动,以此假设为基础,以目标高度为参量,采用多假设滤波方法对目标高度进行补偿、对目标状态进行估计.虽然该类算法避免了多雷达关于同一目标量测数据的关联操作,实现起来相对简单,但由于实际空中目标一般保持等海拔高度飞行,其高度投影到直角坐标系中会随时间呈非线性变化,因而该类算法关于目标在直角坐标系中做等高运动的假设是不合理和与事实不符的,其实际运用效果也是难以预料和不可靠的.综上所述,虽然国内外学者对两坐标警戒雷达目标高度补偿状态估计技术的研究取得了一定进展,得到了一些成果,但现有算法由于前提条件不易满足,仍难以有效解决实际问题中存在的问题.

针对上述问题,考虑到目标的实际运动特点,本文以预警机与岸基雷达协同防空为研究背景,利用预警机对空中目标的指示信息,通过公式推导,对两坐标岸基警戒雷达的目标高度补偿状态估计问题进行研究.

2 系统模型

假设岸基雷达在 t_0 时刻开始对目标进行交接班跟踪,其根据预警机的目标指示,可得到 t_0 时刻目标在大地直角坐标系(以地心为坐标原点, Z 轴指向地球北极, X 轴指向地球赤道面与格林尼治子午圈的交点, Y 轴在赤道平面里并满足右手定则)中的位置坐标 $\mathbf{x}_{0e} = [x_{0e} \ y_{0e} \ z_{0e}]^T$. 假设相应时刻目标的真实坐标为 $\bar{\mathbf{x}}_{0e} = [\bar{x}_{0e} \ \bar{y}_{0e} \ \bar{z}_{0e}]^T$,考虑到预警机的跟踪误差,则可得如下关系

$$\mathbf{x}_{0e} = \bar{\mathbf{x}}_{0e} + \mathbf{w}_e \quad (1)$$

其中 $\mathbf{w}_e = [w_{xe} \ w_{ye} \ w_{ze}]^T$ 为常量,表示岸基警戒雷达与预警机交接班跟踪时,目标实际位置和预警机指示位置之间的误差,具体大小可根据预警机的跟踪误差设定.

根据空中目标实际运动特点,可假设目标沿预先设定的大圆航线或等角航线做恒海拔等速运动.由于目标运动的弧线对应的地心角较小,因此可近似认为目标在大地直角坐标系中是做匀速直线运动的.由于大地直角坐标系与岸基雷达局部稳定坐标系之间仅存在旋转和平移等线性变换,因而可同样近似认为目标在岸基雷达局部稳定坐标系中是做匀速直线运动的.定义 k 时刻目标在岸基雷达局部稳定坐标系中的状态为 $\mathbf{x}(k) = [x(k) \ v_x(k) \ y(k) \ v_y(k) \ z(k) \ v_z(k)]^T$,根据上面的假设可得目标在岸基雷达局部稳定坐标系中的状态方程为^[14,15]

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

其中状态转移矩阵 \mathbf{F} 定义为

$$\mathbf{F} = \text{block-diag}\left(\begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right) \quad (3)$$

$\text{block-diag}(\cdot)$ 表示块对角阵, T 是离散化的采样间隔. $\mathbf{v}(k)$ 是零均值白色高斯过程噪声,其协方差为

$$\mathbf{Q} = \text{block-diag}(\mathbf{Q}_x, \mathbf{Q}_y, \mathbf{Q}_z) \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{2}T^2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_y = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{2}T^2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}_z = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{2}T^2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\tilde{q}_x, \tilde{q}_y, \tilde{q}_z$ 为噪声的功率谱密度.由于目标在岸基雷达局部稳定坐标系中是做近似匀速直线运动的,因而应在式(2)中设置较大的过程噪声,从而使其可以兼容目标实际运动中的非匀速非直线分量,以便滤波器更加准确的对目标状态进行估计.

两坐标岸基警戒雷达在极坐标系中对目标进行距离和方位量测,量测包含一定的噪声,其量测方程可表示为

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}_s(k) \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{z}(k) = [r(k) \ \theta(k)]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \arctan(\frac{y}{x}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\mathbf{w}_s(k) = [w_{sr}(k) \ w_{s\theta}(k)]^T$ 为零均值白色高斯量测噪声,其方差 $\mathbf{R}_s = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\theta^2)$.

定义目标 k 时刻在大地直角坐标系中的坐标为 $\mathbf{x}_e(k) = [x_e(k) \ y_e(k) \ z_e(k)]^T$,岸基雷达在大地直角坐标系中的坐标为 $\mathbf{x}_s = [x_s \ y_s \ z_s]^T$,其对应的经纬高地理坐标为 $\mathbf{x}_{sg} = [L_s \ B_s \ H_s]^T$.根据下式可将目标在岸基雷达局部稳定坐标系中的坐标转换到大地直角坐标系中,

$$\mathbf{x}_e(k) = \mathbf{x}_s + \mathbf{T}(\mathbf{x}_{sg})\mathbf{x}(k) \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{T}(\cdot) = \begin{bmatrix} -\cos(B)\sin(L) & -\sin(B) & \cos(B)\cos(L) \\ -\sin(B)\sin(L) & \cos(B) & \sin(B)\cos(L) \\ \cos(L) & 0 & \sin(L) \end{bmatrix} \quad (12)$$

3 目标高度补偿状态估计

本节首先利用预警机的指示信息,通过公式推导,对目标在岸基雷达局部稳定坐标系中的高度信息,即 Z 轴方向坐标,进行估计.然后通过绝对值不等式和柯西-施瓦茨不等式,求解目标高度估计的误差.最后联合岸基雷达量测方程和目标高度估计方程,构建目标新的量测方程,并通过扩展卡尔曼滤波器对目标的三维空间状态进行估计.需要说明的是在本文中目标高度是指目标在岸基雷达局部稳定坐标系中 Z 轴方向坐标.

3.1 目标高度估计

对式(11)求逆,可由目标在大地直角坐标系中的坐标,得到目标在岸基雷达局部稳定坐标系中的坐标,具体公式如下

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{T}(\mathbf{x}_{\text{sg}})^{-1}(\mathbf{x}_e(k) - \mathbf{x}_s) \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}_{\text{sg}})^{-1} = \mathbf{T}(\mathbf{x}_{\text{sg}})^T \quad (14)$$

根据式(12)、式(13)和式(14),可得目标高度为

$$z(k) = \cos(B_s)\cos(L_s)(x_e(k) - x_s) + \sin(L)(z_e(k) - z_s) + \sin(B_s)\cos(L_s)(y_e(k) - y_s) \quad (15)$$

岸基雷达的大地直角坐标和地球地理坐标之间存在如下非线性关系

$$\begin{cases} x_s = (N_R + H_s)\cos B_s \cos L_s \\ y_s = (N_R + H_s)\cos B_s \sin L_s \\ z_s = [N_R(1 - e_1^2) + H_s]\sin B_s \end{cases} \quad (16)$$

其中 $N_R = \frac{a}{\sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 B_s}}$; $e_1^2 = \frac{(a^2 - b^2)}{a^2}$ 为第一偏心率; a 为长半轴, b 为短半轴. 本文采用 WGS-84 坐标系, $a = 6378137\text{m}$, $b = 6356752\text{m}$, $e_1^2 = 0.0067$.

由于 e_1^2 较小,则由式(16)可得如下近似等式

$$\begin{cases} \cos B_s \cos L_s \approx \frac{x_s}{r_s} \\ \cos B_s \sin L_s \approx \frac{y_s}{r_s} \\ \sin B_s \approx \frac{z_s}{r_s} \end{cases} \quad (17)$$

$$r_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} \quad (18)$$

代入式(17)到式(15),并在不发生歧义的情况下省去时间标签 k ,可得

$$\tilde{z} \approx \frac{x_s}{r_s}(x_e - x_s) + \frac{y_s}{r_s}(y_e - y_s) + \frac{z_s}{r_s}(z_e - z_s) \quad (19)$$

对上式进行展开,并进行恒等变形,可得

$$\tilde{z} = \frac{2x_s x_e - 2x_s^2 + 2y_s y_e - 2y_s^2 + 2z_s z_e - 2z_s^2}{2r_s}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2x_s x_e - x_s^2 + 2y_s y_e - y_s^2 + 2z_s z_e - z_s^2 - r_s^2}{2r_s} \\ &= \frac{x_e^2 - x_e^2 + 2x_s x_e - x_s^2 + y_e^2 - y_e^2 + 2y_s y_e}{2r_s} \\ &\quad + \frac{-y_s^2 + z_e^2 - z_e^2 + 2z_s z_e - z_s^2 - r_s^2}{2r_s} \\ &= \frac{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2 - (x_e - x_s)^2 - (y_e - y_s)^2}{2r_s} \\ &\quad + \frac{-(z_e - z_s)^2 - r_s^2}{2r_s} \\ &= \frac{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2 - r^2 - r_s^2}{2r_s} \end{aligned} \quad (20)$$

由于假设目标等海拔飞行,因此可近似认为目标距地心的距离是不变的,即 $x_e(k)^2 + y_e(k)^2 + z_e(k)^2$ 近似为常量.又由于岸基雷达通过预警机可得到目标某一时刻的空间位置,则 $x_e(k)^2 + y_e(k)^2 + z_e(k)^2$ 又是已知的.令 $\bar{r}_e^2 = \bar{x}_{0e}^2 + \bar{y}_{0e}^2 + \bar{z}_{0e}^2 = x_e(k)^2 + y_e(k)^2 + z_e(k)^2$,可得目标高度的近似公式为

$$z(k) \approx \tilde{z}(k) = \frac{\bar{r}_e^2 - \bar{r}(k)^2 - r_s^2}{2r_s} \quad (21)$$

利用存在误差的 $r_e^2 = x_{0e}^2 + y_{0e}^2 + z_{0e}^2$ 和雷达距离量测 $r(k)$,分别代替 $\bar{r}_e, \bar{r}(k)$,可得最终的估计为

$$z(k) \approx \tilde{z}(k) = \frac{r_e^2 - r(k)^2 - r_s^2}{2r_s} \quad (22)$$

由于 r_e, r_s 为已知常量, $r(k)$ 为岸基雷达对目标的距离量测,也是已知的,因此根据式(22),可到目标的高度估计.

3.2 目标高度估计误差

由式(17)和式(22)可知,目标高度估计共存在两类误差,其中第一类误差 err1 是由式(17)中的近似产生的,第二类误差 err2 是由式(22)中预警机指示误差和雷达距离量测误差引起的.

目标高度估计的最终误差 err 和两类误差 $\text{err1}, \text{err2}$ 之间存在如下的数学关系,

$$\begin{aligned} \text{err} &= |z(k) - \tilde{z}(k)| = |z(k) - \tilde{z}(k) + \tilde{z}(k) - \tilde{z}(k)| \\ &\leq |z(k) - \tilde{z}(k)| + |\tilde{z}(k) - \tilde{z}(k)| \\ &= \text{err1} + \text{err2} \end{aligned} \quad (23)$$

根据上式,可通过分别求取 $\text{err1}, \text{err2}$ 来获得目标高度估计误差 err .

联合式(15)和式(19),可得目标高度估计第一类误差为

$$\begin{aligned} \text{err1} &= |z(k) - \tilde{z}(k)| \\ &= \left| \left(\cos(B_s)\cos(L_s) - \frac{x_s}{r_s} \right) (x_e - x_s) + \left(\sin(L) - \frac{z_s}{r_s} \right) \cdot (z_e - z_s) + \left(\sin(B_s)\cos(L_s) - \frac{y_s}{r_s} \right) (y_e - y_s) \right| \end{aligned} \quad (24)$$

根据柯西-施瓦茨不等式,可得第一类目标高度估计误差上限为

$$\begin{aligned} \text{err1} &= |z(k) - \tilde{z}(k)| \\ &\leq \sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2 + (z_e - z_s)^2} \cdot \\ &\quad \sqrt{\left(\cos B_s \cos L_s - \frac{x_s}{r_s}\right)^2 + \left(\sin B_s \cos L_s - \frac{y_s}{r_s}\right)^2 + \left(\sin L - \frac{z_s}{r_s}\right)^2} \\ &\leq cr(k) \end{aligned} \quad (25)$$

其中

$$c = \sqrt{\left(\cos B_s \cos L_s - \frac{x_s}{r_s}\right)^2 + \left(\sin B_s \cos L_s - \frac{y_s}{r_s}\right)^2 + \left(\sin L - \frac{z_s}{r_s}\right)^2} \quad (26)$$

对于某一部确定的岸基雷达,系数 c 为已知常量.

由上式可知,第一类误差上限仅与雷达量测距离有关,同三坐标雷达中的俯仰角量测误差具有相似的影响,即目标离雷达越近,误差下限越小,目标高度的估计越准确.

下面通过公式推导,求取系数 c 的上限最大值.

根据式(16),可得

$$\begin{cases} \cos B_s \cos L_s < \frac{x_s}{r_s} \\ \cos B_s \sin L_s < \frac{y_s}{r_s} \\ \sin B_s > \frac{z_s}{r_s} \end{cases} \quad (27)$$

这里通过分别求取 $\frac{x_s}{r_s} - \cos B_s \cos L_s$, $\frac{y_s}{r_s} - \cos B_s \sin L_s$, $\sin B_s - \frac{z_s}{r_s}$ 的最大值,来求取系数 c 的上限.

根据式(16),可得

$$\begin{aligned} r_s^2 &= (N_R + H_s)^2 \cos^2 B_s + [N_R(1 - e_1^2) + H_s]^2 \sin^2 B_s \\ &= (N_R + H_s)^2 \cos^2 B_s + [(N_R + H_s) - N_R e_1^2]^2 \sin^2 B_s \\ &= (N_R + H_s)^2 - N_R e_1^2 (2(N_R + H_s) - N_R e_1^2) \sin^2 B_s \\ &\geq (N_R + H_s)^2 - N_R e_1^2 (2(N_R + H_s) - N_R e_1^2) \\ &= (N_R + H_s)^2 \left(1 - \frac{N_R e_1^2}{N_R + H_s}\right)^2 \\ &\geq (N_R + H_s)^2 (1 - e_1^2)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

根据式(28),可得

$$\begin{aligned} \frac{x_s}{r_s} - \cos B_s \cos L_s &= \frac{(N_R + H_s) \cos B_s \cos L_s}{r_s} - \cos B_s \cos L_s \\ &\leq \frac{(N_R + H_s) \cos B_s \cos L_s}{(N_R + H_s)(1 - e_1^2)} - \cos B_s \cos L_s \\ &= \cos B_s \cos L_s \left(\frac{e_1^2}{(1 - e_1^2)} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

同理可得

$$\frac{y_s}{r_s} - \cos B_s \sin L_s \leq \cos B_s \sin L_s \left(\frac{e_1^2}{(1 - e_1^2)} \right) \quad (30)$$

令 $N = N_R(1 - e_1^2) + H_s$,则同样由式(16),可得

$$\begin{aligned} r_s^2 &= (N + N_R e_1^2)^2 \cos^2 B_s + N^2 \sin^2 B_s \\ &= N^2 + (2NN_R e_1^2 + N_R^2 e_1^4) \cos^2 B_s \\ &\leq N^2 + 2NN_R e_1^2 + N_R^2 e_1^4 \\ &= N^2 \left(1 + \frac{N_R e_1^2}{N}\right)^2 \\ &= N^2 \left(1 + \frac{(N - H_s) e_1^2}{N(1 - e_1^2)}\right)^2 \end{aligned} \quad (31)$$

由于岸基雷达架的越高,视距越远,探测范围越大,因此通常情况下 $H_s > 0$,上式可进一步简化为

$$\begin{aligned} r_s^2 &\leq N^2 \left(1 + \frac{(N - H_s) e_1^2}{N(1 - e_1^2)}\right)^2 \leq N^2 \left(1 + \frac{e_1^2}{(1 - e_1^2)}\right)^2 \\ &= N^2 \left(\frac{1}{1 - e_1^2}\right)^2 \end{aligned} \quad (32)$$

根据上式,可得

$$\begin{aligned} \sin B_s - \frac{z_s}{r_s} &= \sin B_s - \frac{[N_R(1 - e_1^2) + H_s] \sin B_s}{r_s} \\ &\leq \sin B_s - (1 - e_1^2) \sin B_s \\ &= e_1^2 \sin B_s \end{aligned} \quad (33)$$

由于 $\frac{e_1^2}{(1 - e_1^2)} - e_1^2 \approx 4.5 \times 10^{-5}$,因此上式可进一步写为

$$\sin B_s - \frac{z_s}{r_s} \leq e_1^2 \sin B_s \leq \frac{e_1^2}{(1 - e_1^2)} \sin B_s \quad (34)$$

代入式(29)、式(30)和式(34)到式(26),可得

$$c \leq \frac{e_1^2}{(1 - e_1^2)} \approx 0.0067 \quad (35)$$

由上式可知,无论岸基雷达布置在什么位置,系数 c 的最大值都不会超过 0.0067,相当于 0.38° 的俯仰角量测误差.实际上布置在我国境内的警戒雷达,其系数 c 会更小一些.

联合式(1)、式(8)、式(21)和式(22),可得目标高度估计第二类误差 err2 为

$$\begin{aligned} \text{err2} &= |\tilde{z}(k) - \bar{z}(k)| = \left| \frac{r_e^2 - \bar{r}_e^2 - (r(k)^2 - \bar{r}(k)^2)}{2r_s} \right| \\ &\leq \frac{1}{2r_s} (|r_e^2 - \bar{r}_e^2| + |r(k)^2 - \bar{r}(k)^2|) \\ &\leq \frac{1}{2r_s} |x_{0e}^2 - (x_{0e} - w_{xe})^2| + \frac{1}{2r_s} |y_{0e}^2 - (y_{0e} - w_{ye})^2| \\ &\quad + \frac{1}{2r_s} |z_{0e}^2 - (z_{0e} - w_{ze})^2| + \frac{1}{2r_s} |r(k)^2 - (r(k) - w_{sr}(k))^2| \\ &\leq \frac{1}{r_s} (|x_{0e} w_{xe}| + |y_{0e} w_{ye}| + |z_{0e} w_{ze}| + |r(k) w_{sr}(k)|) \\ &\quad - \frac{1}{2r_s} (w_{xe}^2 + w_{ye}^2 + w_{ze}^2 + w_{sr}^2(k)) \end{aligned} \quad (36)$$

由于 $r_s \gg (w_{xe}^2 + w_{ye}^2 + w_{ze}^2 + w_{sr}^2(k))$, 因此上式可进一步简化为

$$\text{err2} \leq \frac{|x_{0e}| w_{xe}}{r_s} + \frac{|y_{0e}| w_{ye}}{r_s} + \frac{|z_{0e}| w_{ze}}{r_s} + \frac{r(k) w_{sr}(k)}{r_s} \quad (37)$$

实际计算表明 err2 在 100m 级别, 与第一类误差相比较小.

综上目标高度估计误差的上限为

$$\text{err} \leq cr(k) + \frac{|x_{0e}| w_{xe}}{r_s} + \frac{|y_{0e}| w_{ye}}{r_s} + \frac{|z_{0e}| w_{ze}}{r_s} + \frac{r(k) w_{sr}(k)}{r_s} \quad (38)$$

3.3 目标状态估计

由于目标高度估计误差中的第一类误差不具有高斯随机特性, 然而采用粒子滤波等非高斯蒙特卡罗类算法所需计算机资源太大, 综合考虑实际工程应用对算法计算量和实时性等方面的要求, 本文通过稍微增大第一类误差来消除模型不匹配对扩展卡尔曼滤波器的影响, 使算法的结果满足实际工程的需求.

联合式(8)和式(22), 可得目标高度补偿后, 雷达新的量测方程为

$$\hat{\mathbf{z}}(k) = \hat{\mathbf{h}}(x(k)) + \hat{\mathbf{w}}_s(k) \quad (39)$$

其中

$$\hat{\mathbf{z}}(k) = [r(k) \quad \theta(k) \quad \tilde{z}(k)]^T \quad (40)$$

$$\hat{\mathbf{h}}(x) = \begin{bmatrix} \tilde{r} \\ \tilde{\theta} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \\ z \end{bmatrix} \quad (41)$$

$\hat{\mathbf{w}}_s(k) = [w_{sr}(k) \quad w_{s\theta}(k) \quad w_{sz}(k)]^T$ 为零均值白色高斯量测噪声, 其方差 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & a \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ a & 0 & b \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$a = \frac{r^2(k)}{r_s^2} \sigma_r^2 \quad (43)$$

$$b = \epsilon \left((cr(k))^2 + \frac{x_{0e}^2 w_{xe}^2 + y_{0e}^2 w_{ye}^2 + z_{0e}^2 w_{ze}^2 + r^2(k) w_{sr}^2(k)}{r_s^2} \right) \quad (44)$$

ϵ 在 1.05 ~ 1.1 之间取值.

采用扩展卡尔曼滤波技术对由目标状态转移方程式(2)和岸基雷达量测方程式(39)构成的系统进行滤波, 对目标状态进行估计^[16~21], 其中非线性方程 $\hat{\mathbf{h}}(x(k))$ 关于目标状态 $\mathbf{x}(k)$ 的雅可比矩阵 $\mathbf{H}(k)$ 为

$$\mathbf{H}(k) = \text{diag}\left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}, 1\right)$$

$$\cdot \begin{bmatrix} x & 0 & y & 0 & z & 0 \\ -y & 0 & -x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

在实际运算中可通过如下近似, 来求取 $\mathbf{H}(k)$ 矩阵.

$$\begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \approx r(k) \\ \sqrt{x^2 + y^2} \approx \sqrt{r^2(k) - \tilde{z}^2(k)} \\ x \approx \sqrt{r^2(k) - \tilde{z}^2(k)} \times \cos(\theta(k)) \\ y \approx \sqrt{r^2(k) - \tilde{z}^2(k)} \times \sin(\theta(k)) \\ z \approx \tilde{z}(k) \end{cases} \quad (46)$$

在岸基雷达开始对目标进行跟踪时, 可利用预警机对目标的指示信息, 对目标的初始状态和初始协方差进行合理地估算, 来实现目标跟踪滤波器的初始化, 从而为后续目标状态的有效跟踪奠定基础.

4 算法仿真验证与分析

为验证本文所推导算法的有效性, 本文进行如下仿真.

假设系统由一架预警机、一部岸基雷达和一架敌方飞机构成. 岸基雷达的量测噪声 $\mathbf{w}_s(k)$ 为零均值高斯白色噪声, 其协方差为 $\mathbf{R}_s = \text{diag}(50\text{m}, 0.0087\text{rad})^2$.

仿真数据的时间间隔为 1s, 仿真环境经纬图如图 1 所示. 预警机在海拔 10000m 高空进行巡航预警, 敌方飞机在 10000m 的海拔高度以恒定的速度向我方逼近, 并在第 103s 进入预警机的警戒范围. 预警机探测到敌方飞机目标后, 开始对敌方飞机进行跟踪, 并形成航迹. 随着目标向岸基雷达靠近, 一段时间后, 在第 1402s, 目标进入岸基雷达的探测范围. 随后, 在第 1420s, 岸基雷达根据预警机的目标指示, 开始对目标进行跟踪. 预警机和敌方飞机的航迹以及岸基雷达的位置如图 1 所示.

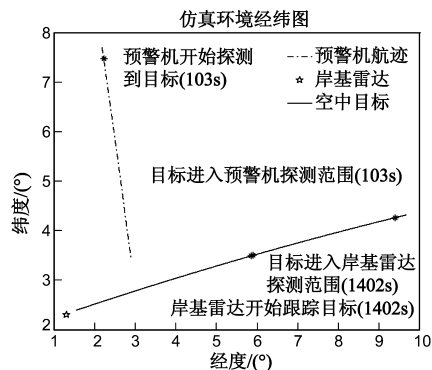


图1 仿真环境经纬图

本文主要对两坐标岸基雷达的三维跟踪过程进行研究, 不再对预警机的跟踪过程进行具体仿真, 并且为了避免预警机跟踪算法对本文算法的影响, 本文仅通过在目标位置真值上添加高斯噪声的方式, 模拟产生

预警机传递给岸基雷达的目标指示信息,其中高斯噪声的标准差设置为 $\text{diag}(70\text{m } 70\text{m } 70\text{m})$,据此可得 $w_e = [70\text{m } 70\text{m } 70\text{m}]'$. 另外,岸基雷达滤波方程中的过程噪声功率谱密度设置为 $\tilde{q}_x = \tilde{q}_y = \tilde{q}_z = 8\text{m}^2/\text{s}^3$. 岸基雷达的目标高度补偿状态单次估计结果如图 2、图 3 所示.

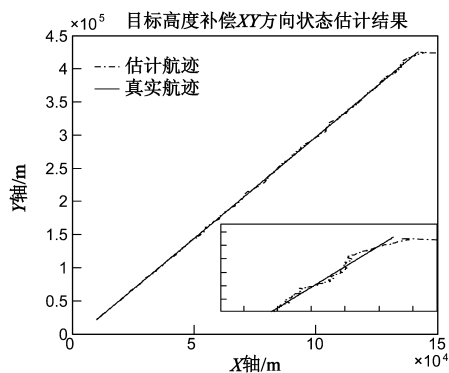


图2 目标高度补偿后XY方向目标状态估计比较

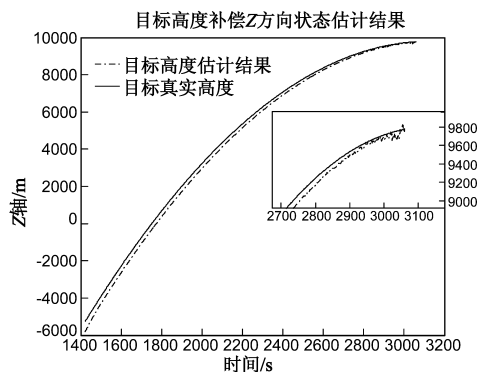


图3 目标高度补偿后Z方向目标状态估计比较

由图 2 和图 3 可知,在大地直角坐标系中以恒海拔等速飞行的敌方目标,投影到岸基雷达局部稳定坐标系中,在 XY 平面表现为近似匀速直线运动,如图 2 实线所示,在 Z 方向随时间呈近似线性关系,如图 3 实线所示.虽然目标的状态方程不能很好的描述目标在 Z 方向上的变化(可以兼容这种变化),但本文基于目标高度补偿建立的雷达量测方程却可以很好地量测目标在 Z 方向上的变化,因此综合来看,本文建立的目标状态方程和目标量测方程是可以很好地对目标的状态进行估计的.岸基雷达目标高度补偿状态估计结果如图 2、图 3 虚线所示,由图可见:本文提出的目标高度补偿状态估计技术很好地解决了两坐标岸基雷达信息缺维问题,可以稳定地对目标进行跟踪、有效地对目标的三维空间状态进行估计.

下面对目标状态估计的均方根误差进行分析,并通过对两坐标岸基雷达目标状态直接估计方法进行比较,来对本文算法进行定量研究.目标状态估计的均方根误差通过 50 次蒙特卡罗仿真来求取.仿真结果如图

4、图 5 和图 6 所示.

由上图可知,本文提出的算法相对于直接跟踪算法,在 X 和 Y 方向上的估计精度都提高了大约 200m 左右.在 2000s 以后,此后目标距离小于 300km,本文算法对目标状态的跟踪精度在 X 方向达到 400m、 Y 方向达到 200m、 Z 方向达到 300m;在 2780s 以后,此后目标距离小于 100km,本文算法对目标状态的跟踪精度在 X 方向达到 200m、 Y 方向达到 100m、 Z 方向达到 150m.可见,相对于直接跟踪算法,本文提出的算法在补充目标高度信息的同时,有效地提高了目标在 XY 平面的状态估计精度,使其能达到工程要求、满足作战目的.

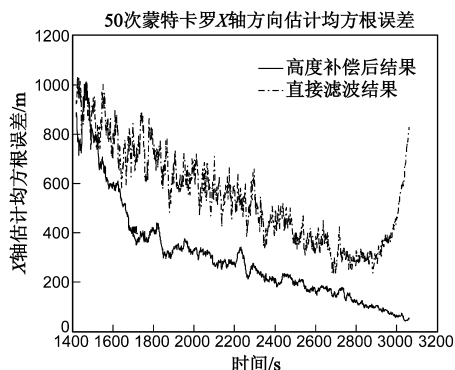


图4 50次蒙特卡罗X轴仿真结果比较

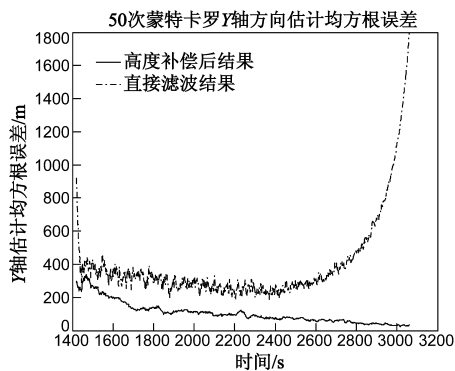


图5 50次蒙特卡罗Y轴仿真结果比较

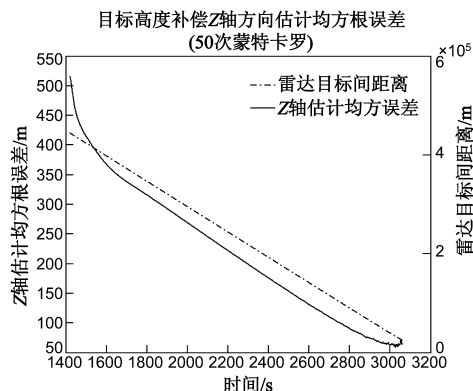


图6 50次蒙特卡罗Z轴估计均方根误差

综上所述,本文提出的目标高度补偿状态估计算法在有效提高目标状态估计精度的同时,很好地解决了近距离情况下直接跟踪算法精度下降问题,为两坐标岸基雷达目标空间状态估计问题提供了相对完善的解决方案。

5 结论

本文主要对两坐标岸基雷达的目标三维空间状态估计问题进行研究。针对现有算法存在的模型假设不合理、实际应用效果难以保证等问题,根据空中目标长距离奔袭作战的飞行特点,本文以目标的等海拔恒速运动为前提假设,以预警机与岸基雷达协同防空预警体系为背景依托,对两坐标岸基雷达的空间目标跟踪问题开展了研究。本文所得算法在补充目标高度信息的同时,有效地提高了目标在 XY 平面的状态估计精度,并且避免了目标近距离环境下直接跟踪算法的精度下降问题,无论目标距离远近,都能实现目标状态的平稳有效估计,为两坐标岸基雷达目标空间状态估计问题提供了相对完善的解决方案。

另外需要进步一说明的是虽然本文是以预警机与岸基雷达协同作战为背景依托来进行目标高度补偿算法研究的,但最终得到的算法结构却不受研究背景的限制,可广泛应用于两坐标雷达基于目标指示的目标高度补偿问题,譬如,岸基两坐标雷达基于舰艇三坐标雷达指示的目标高度补偿估计问题、远洋训练中舰艇两坐标雷达基于预警机目标指示的目标高度补偿问题等。

此外,本文前提假设是目标做等海拔恒速运动,虽然该假设与大部分空中目标的运动航迹是相符的,但却不能涵盖对战略要地有较大威胁的机动、大机动目标的运动航迹。由于机动、大机动目标对战略要地、协同防空系统有较大威胁,本文下一步将重点对机动、大机动目标的两坐标岸基雷达状态估计问题进行研究。

参考文献

- [1] 谢俊好,李波. T/R-R 高频地波雷达球面定位算法研究[J]. 电子学报,2012(03):435-440.
XIE Jun-hao, LI Bo. Sphere positioning algorithm for T/R-R high frequency surface wave radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2012(03):435-440. (in Chinese)
- [2] 雷雨,冯新喜,朱灿彬,等. 2D 雷达情报组网目标高度估计[J]. 火力与指挥控制,2011(12):157-159.
LEI Yu, FENG Xin-xi, Zhu Can-lin. Estimation of aircraft altitude with 2D radar intelligence networking[J]. Fire Control & Command Control, 2011(12):157-159. (in Chinese)
- [3] 王国宏,许建峰,毛士艺,等. 2D 雷达组网中目标高度估计误差的 Cramér-Rao 限[J]. 航空学报,2004(01):66-68.
WANG Guo-hong, XU Jian-feng, MAO Shi-yi, et al. On the CRLB of height estimation in a 2-dimensional-radar-based network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004(01):66-68. (in Chinese)
- [4] 赵孔瑞,于长军,权太范,等. 高频地波雷达飞行目标高度估计[J]. 系统工程与电子技术,2012(08):1571-1575.
ZHAO Kong-jian, YU Chang-jun, QUAN Tai-fan, et al. Estimation of flight altitude in high frequency surface wave radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012(08):1571-1575. (in Chinese)
- [5] 张硕,金永镐,于长军,等. 高频地波雷达目标高度估计起始的 HPEKF 算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007(05):725-729.
ZHANG Shuo, JIN Yong-gao, YU Chang-jun, et al. HPEKF algorithm of target altitude estimation initializing in HF surface wave radar[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(05):725-729. (in Chinese)
- [6] 游伟,何子述,胡进峰. 基于匹配场处理的天波雷达高度估计算法[J]. 电子与信息学报,2013(02):401-405.
YOU Wei, HE Zi-shu, HU Jin-feng. Skywave radar altitude estimation algorithm based on matched-field Processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013(02):401-405. (in Chinese)
- [7] Rakvongthai Y, Jifeng R, Sivananthan S, et al. Altitude estimation for 3-D tracking with two 2-D radars[A]. Information Fusion, 2011 Proceedings of the 14th International Conference on [C]. Chicago, USA: IEEE, 2011. 1-8.
- [8] Poullin D, Flecheux M. Passive 3D tracking of low altitude targets using DVB (SFN Broadcasters)[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Transactions on, 2012, 27(11):36-41.
- [9] Jing S, She S, Jia-Dong X. 3D shape reconstruction from 2D ISAR measurements[A]. Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP), 2012 International Conference on [C]. Chengdu, China: IEEE, 2012. 25-28.
- [10] Rosebrock J. Absolute attitude from monostatic radar measurements of rotating objects[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2011, 49(10):3737-3744.
- [11] Luo Z, He J. ML Estimation of true height in 2-D radar network[A]. Information Fusion, 2007 10th International Conference on [C]. Quebec, Canada: IEEE, 2007. 1-7.
- [12] de Marina H G, Pereda F J, Giron-Sierra J M, et al. UAV Attitude estimation using unscented Kalman filter and TRIAD[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2012, 59(11):4465-4474.
- [13] Lu K Y, Kiang J F. Stereo-synthetic aperture radar technique with bias correction to estimate terrain height[J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2013, 7(3):313-320.

- [14] Dongliang H, Leung H, Bosse E. A pseudo-measurement approach to simultaneous registration and track fusion [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2012, 48(3): 2315 – 2331.
- [15] Bae S H, Kim D Y, Yoon J H, et al. Automated multi-target tracking with kinematic and non-kinematic information [J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2012, 6(4): 272 – 281.
- [16] Sukhvasi R T, Hassibi B. The kalman-like particle filter: optimal estimation with quantized innovations/measurements [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2013, 61(1): 131 – 136.
- [17] Lubin C, Baiqing H, An L, et al. Transformed unscented kalman filter [J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2013, 58(1): 252 – 257.
- [18] 罗迎, 张群, 李松, 等. 基于分布式组网雷达的弹道目标三维进动特征提取 [J]. 电子学报, 2012(06): 1079 – 1085. LUO Ying, ZHANG Qun, LI Song, et al. Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets in distributed radar networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2012 (06): 1079 – 1085. (in Chinese)
- [19] 卢策吾, 刘小军, 方广有. 基于感知压缩的探地雷达数据压缩采集 [J]. 电子学报, 2011(09): 2204 – 2206. LU Ce-wu, LIU Xiao-jun, FANG Guang-you. Compressive sensing for GPR data acquisition [J]. Acta Electronica Sinica, 2011 (09): 2204 – 2206. (in Chinese)
- [20] 赵艳丽, 王雪松, 王国玉, 等. 多假目标欺骗干扰下组网雷达跟踪技术 [J]. 电子学报, 2007(03): 454 – 458.

ZHAO Yan-li, WANG Xue-song, WANG Guo-yu, et al. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range-false-target deception jamming [J]. Acta Electronica Sinica, 2007 (03): 454 – 458. (in Chinese)

- [21] 吴伟, 吴耀云, 王东进. 利用信号幅度信息的多基地雷达系统多目标跟踪算法 [J]. 电子学报, 2007(06): 1193 – 1198.

WU Wei, WU Yao-yun, WANG Dong-jin. Multi-Target Tracking Algorithm for Multi-Static Radar Assisted by Signal Amplitude [J]. Acta Electronica Sinica, 2007 (06): 1193 – 1198. (in Chinese)

作者简介



崔亚奇(通信作者) 男, 1987 年出生, 海军航空工程学院在读博士研究生, 从事雷达数据处理、雷达组网方面的研究工作。

E-mail: cui_yaqi@126.com

熊伟 男, 1977 年出生, 海军航空工程学院副教授, 从事雷达数据处理、雷达组网方面的研究工作。

何友 男, 1956 年出生, 海军航空工程学院教授, 从事雷达数据处理、雷达组网、战场模拟等方面的研究工作。