

## 多传感器远距离空中目标跟踪精度分析<sup>1</sup>

杨春玲 刘国岁 倪晋麟\* 郑全战 顾红 苏卫民

(南京理工大学电光学院 南京 210094)

\*(南京电子技术研究所 南京 210013)

**摘 要** 本文主要研究了非线性系统中多传感器的位置对远距离空中目标跟踪精度的影响。通过理论分析和仿真发现,非线性系统中多传感器的合理放置可以大大提高对目标的跟踪精度。

**关键词** 多传感器, 目标跟踪, 数据融合

**中图分类号** TN953

### 1 引 言

在目标跟踪方面,多传感器数据融合跟踪方法可以提高跟踪精度,归根结底是因为多传感器数据融合相当于提高了融合测量值的精度<sup>[1]</sup>。在线性系统中三种融合滤波算法(并行滤波、序贯滤波、数据压缩滤波)是等效且最佳的。由数据压缩滤波算法<sup>[2]</sup>可得,当有  $N$  个同类传感器对同一个目标所测得的数据进行融合时,融合后的测量值误差方差矩阵由下式给出:

$$R_k^{-1} = \sum_{i=1}^N (R_k^i)^{-1}, \quad (1)$$

其中  $R_k^i$  表示第  $i$  个传感器在  $k$  时刻的测量误差方差矩阵,  $R_k$  表示融合后的测量值误差方差矩阵。

由上式可知  $N$  个传感器的测量数据融合后的测量值误差方差小于每一个传感器的测量误差方差。线性系统中的分布融合算法和中心融合算法是等效最优的<sup>[3-5]</sup>。由此可见在线性系统中融合算法能提高滤波跟踪精度就在于它提高了融合后的测量值精度,即减小了测量值的误差。

在线性系统中,当传感器的测量精度一定时,无论传感器和目标的相对位置如何变化,传感器对目标的跟踪精度不发生变化。但在非线性系统中,当传感器和目标的相对位置发生改变时,对目标的跟踪精度也就发生了变化。本文在理论和仿真中得出了传感器的位置对远距离空中目标(180km 以远)跟踪精度的影响。第 2 节证明了在三维空间中单传感器的位置对目标跟踪精度的影响,第 3 节证明了多传感器应如何放置能使其对目标的跟踪精度较高。第 4 节给出了仿真结果。第 5 节是结论。

### 2 单传感器的位置对目标跟踪精度的影响

在非线性系统中转换坐标卡尔曼滤波算法<sup>[6]</sup>是一种较好的滤波方法,其基本思路是:在极坐标(球坐标)系下的测量值经坐标转换到直角坐标系下(称为转换测量值),算出转换测量值误差的均值和方差,然后去偏(即减去误差均值),把此时的值叫去偏转换测量值,则此时测量方程在直角坐标系下为线性方程,就可用标准卡尔曼滤波算法进行滤波了。在此方法中当把球坐标系下的测量值转换到直角坐标系中表示后,就把非线性系统中的目标跟踪问题转变成了线性系统中的目标跟踪问题,这时就可以按线性系统中的方法来分析问题了。

<sup>1</sup> 1998-06-17 收到, 1999-01-23 定稿

设目标的状态方程由下式表示:

$$X(k) = A(k)X(k-1) + G(k-1)W(k-1), \quad (2)$$

其中  $X(k)$  为  $k$  时刻的状态矢量, 表示为:  $X(k) = [x(k), y(k), z(k), \dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)]^T$ ,  $A(k)$  为状态转移矩阵,  $G(k-1)$  为过程噪声分布矩阵,  $W(k-1)$  为过程噪声, 是零均值的高斯白噪声.

测量方程为

$$Z(k) = h(X(k)) + V(k), \quad (3)$$

其中  $h$  为非线性函数,  $V(k)$  为  $k$  时刻的测量误差, 是相互独立的零均值的高斯白噪声, 方差为

$$R_1(k) = E(V(k)V(k)^T) = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

且测量噪声和过程噪声不相关.

设  $[r, \beta, \theta]^T$  为目标相对于传感器的真实位置, 其中  $r$  为目标到传感器的距离,  $\beta$  为目标相对于传感器的俯仰角,  $\theta$  为目标相对于传感器的方向角;  $[r_m, \beta_m, \theta_m]^T$  为传感器对目标的测量值. 经坐标转换, 得直角坐标系下的转换测量值  $[x_m, y_m, z_m]^T$ , 设目标的真实位置在直角坐标系下为  $[x, y, z]^T$ , 则转换测量值的误差为:  $[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]^T = [x_m, y_m, z_m]^T - [x, y, z]^T$ , 转换测量值减去其误差均值得去偏转换测量值, 去偏转换测量值的误差协方差矩阵定义为:  $R \triangleq E\{[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]^T[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]\}$ ,  $R$  中的元素<sup>[7]</sup> 为

$$R_{11} = \frac{1}{4} (r^2 + \sigma_r^2) (1 - e^{-2\sigma_\theta^2}) (1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta) + \left[ \frac{1}{2} (r^2 + \sigma_r^2) e^{-2\sigma_\theta^2} (1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta) - r^2 e^{-\sigma_\theta^2} e^{-\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta \right] \cos^2 \theta, \quad (5)$$

$$R_{22} = \frac{1}{4} (r^2 + \sigma_r^2) (1 - e^{-2\sigma_\theta^2}) (1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta) + \left[ \frac{1}{2} (r^2 + \sigma_r^2) e^{-2\sigma_\theta^2} (1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta) - r^2 e^{-\sigma_\theta^2} e^{-\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta \right] \sin^2 \theta, \quad (6)$$

$$R_{33} = \frac{1}{2} (r^2 + \sigma_r^2) (1 - e^{-2\sigma_\theta^2}) + \left[ r^2 (1 - e^{-\sigma_\beta^2}) + \sigma_r^2 \right] e^{-2\sigma_\beta^2} \sin^2 \beta, \quad (7)$$

$$R_{12} = \left[ \frac{1}{2} (r^2 + \sigma_r^2) e^{-2\sigma_\theta^2} (1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta) - r^2 e^{-\sigma_\theta^2} e^{-\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta \right] \cos \theta \sin \theta, \quad (8)$$

$$R_{13} = \left( -r^2 e^{-(1/2)\sigma_\theta^2 - \sigma_\beta^2} + (r^2 + \sigma_r^2) e^{-(1/2)\sigma_\theta^2 - 2\sigma_\beta^2} \right) \cos \beta \sin \beta \cos \theta, \quad (9)$$

$$R_{23} = \left( -r^2 e^{-(1/2)\sigma_\theta^2 - \sigma_\beta^2} + (r^2 + \sigma_r^2) e^{-(1/2)\sigma_\theta^2 - 2\sigma_\beta^2} \right) \cos \beta \sin \beta \sin \theta. \quad (10)$$

从 (5) 式-(10) 式可见, 去偏转换测量值的误差协方差矩阵中各元素与目标和传感器的相对位置有关, 改变传感器的位置就相当于改变了去偏转换测量值误差协方差矩阵.

我们知道在卡尔曼滤波算法中, 传感器的测量误差方差矩阵  $R$  对滤波精度有直接的影响. 文献 [8] 中, 通过大量的仿真已证明: 在卡尔曼滤波算法中当只考虑测量误差的影响时, 对目标的跟踪精度主要受测量位置误差的影响, 即主要受测量误差各分量的方差和的影响. 因此在分析非线性系统中传感器的位置对目标跟踪精度的影响时主要考虑传感器的位置对去偏转换测量值的误差各分量方差和的影响.

由 (5) 式-(7) 式可计算得

$$R_{11} + R_{22} + R_{33} = r^2 \left[ 1 - e^{-\sigma_\theta^2} \left( e^{-\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta + \sin^2 \beta \right) \right] + \sigma_r^2. \quad (11)$$

由 (11) 式可见,  $R_{11} + R_{22} + R_{33}$  的大小和方向角  $\theta$  无关. 利用几何知识得

$$R_{11} + R_{22} + R_{33} = d^2 \left( 1 - e^{-\sigma_\theta^2} e^{-\sigma_\beta^2} \right) + d^2 \left( 1 - e^{-\sigma_\beta^2} \right) \operatorname{tg}^2 \beta + \sigma_r^2. \quad (12)$$

由 (12) 式可知传感器到目标的水平距离越大,  $R_{11} + R_{22} + R_{33}$  的值越大; 当传感器到目标的水平距离一定时, 俯仰角越小则测量的位置误差越小. 这样我们就得出在三维空间中单传感器的位置对目标跟踪精度的影响是: 跟踪精度主要受传感器到目标的水平距离和目标相对于传感器的俯仰角的影响, 水平距离越近则对目标的跟踪精度越高, 俯仰角越小精度越高; 与方向角基本上无关.

### 3 两传感器的位置对目标跟踪精度的影响

本文主要考虑两部同类型同精度的传感器对远距离目标跟踪问题, 即目标到传感器的水平距离在 180km 以远, 目标的高度为十几千米. 在下面的分析中假设两传感器离目标的水平距离相等不失一般性.

由上一节的分析可知, 当传感器和目标的相对位置发生变化时, 去偏转换测量值误差协方差矩阵  $R$  (其中的元素由 (5) 式-(10) 式示出) 也发生变化. 我们知道在线性系统中测量误差各分量的方差和  $R_{11} + R_{22} + R_{33}$  越大则滤波跟踪精度越差; 否则精度就高. 因此在考虑多传感器的位置对目标的融合跟踪精度的影响时主要考虑各传感器的位置发生变化时, 融合去偏转换测量值误差协方差阵中  $R_{11}^c + R_{22}^c + R_{33}^c$  的大小的变化. 为了分析问题的方便, 令

$$x = \frac{1}{4} (r^2 + \sigma_r^2) \left( 1 - e^{-2\sigma_\theta^2} \right) \left( 1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta \right), \quad (13)$$

$$y = \frac{1}{2} (r^2 + \sigma_r^2) e^{-2\sigma_\theta^2} \left( 1 - e^{-2\sigma_\beta^2} + 2e^{-2\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta \right) - r^2 e^{-\sigma_\theta^2} e^{-\sigma_\beta^2} \cos^2 \beta, \quad (14)$$

$$z = \frac{1}{2} (r^2 + \sigma_r^2) \left( 1 - e^{-2\sigma_\theta^2} \right) + \left[ r^2 \left( 1 - e^{-\sigma_\theta^2} \right) + \sigma_r^2 \right] e^{-2\sigma_\theta^2} \sin^2 \beta, \quad (15)$$

$$w = \left( -r^2 e^{-(1/2)\sigma_\theta^2 - \sigma_\beta^2} + (r^2 + \sigma_r^2) e^{-(1/2)\sigma_\theta^2 - 2\sigma_\beta^2} \right) \cos \beta \sin \beta, \quad (16)$$

则传感器的去偏转换测量值误差协方差阵  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} x + y \cos^2 \theta & y \cos \theta \sin \theta & w \cos \theta \\ y \cos \theta \sin \theta & x + y \sin^2 \theta & w \sin \theta \\ w \cos \theta & w \sin \theta & z \end{bmatrix}, \quad (17)$$

设目标相对于传感器 1 的距离、俯仰角、方向角分别为  $r_1, \beta_1, \theta_1$ , 相对于传感器 2 的距离、俯仰角、方向角分别为  $r_2, \beta_2, \theta_2$ . 分别把  $r_1, \beta_1, \theta_1$  和  $r_2, \beta_2, \theta_2$  代入 (13) 式-(16) 式, 并把 (13) 式-(16) 式代入 (17) 式可得传感器 1 和传感器 2 的去偏转换测量值误差协方差矩阵  $R^1$  和  $R^2$ . 把  $R^1$  和  $R^2$  代入 (1) 式可得融合去偏转换测量值误差协方差矩阵:

$$R^{2c} = \begin{bmatrix} R_{11}^{2c} & R_{12}^{2c} & R_{13}^{2c} \\ R_{21}^{2c} & R_{22}^{2c} & R_{23}^{2c} \\ R_{13}^{2c} & R_{23}^{2c} & R_{33}^{2c} \end{bmatrix}.$$

经计算得:

$$\begin{aligned}
 R_{11}^{2c} + R_{22}^{2c} + R_{33}^{2c} = & \{(x_1 + x_2)[(x_1 + y_1 + z_1)(x_2 z_2 + y_2 z_2 - w_2^2) \\
 & + (x_2 + y_2 + z_2)(x_1 z_1 + y_1 z_1 - w_1^2)] + x_1 x_2 [(x_1 + y_1 + x_2 + y_2)(z_1 + z_2) - w_1^2 - w_2^2] \\
 & - 2x_1 x_2 w_1 w_2 \cos \theta_{12} + (y_2 z_2 - w_2^2)(y_1 z_1 - w_1^2) \sin^2 \theta_{12}\} / \\
 & \{(x_1 + x_2 + y_1)(x_1 z_2 + x_2 z_2 + y_2 z_2 - w_2^2) + (x_1 + x_2 + y_2)(x_1 z_1 + x_2 z_1 + y_1 z_1 - w_1^2) \\
 & - 2w_1 w_2 (x_1 + x_2) \cos \theta_{12} - (y_1 y_2 (z_1 + z_2) - y_2 w_1^2 - y_1 w_2^2) \cos^2 \theta_{12}\}, \quad (18)
 \end{aligned}$$

其中  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$ 、 $w_1$  是把  $r_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\theta_1$  代入 (13) 式 - (16) 式得到的;  $x_2$ 、 $y_2$ 、 $z_2$ 、 $w_2$  是把  $r_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\theta_2$  代入 (13) 式 - (16) 式得到的。  $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$  为两传感器与目标所成的方向夹角, 即两传感器和目标在水平面上的投影所成的夹角。

由 (13) 式 - (16) 式和 (18) 式可见, 两传感器跟踪目标时, 对目标的跟踪精度主要受两传感器与目标所成的方向夹角  $\theta_{12}$ 、传感器到目标的水平距离和目标相对于两传感器的俯仰角的影响。显然目标到传感器的水平距离越近则对目标的跟踪精度越高, 而当对远距离的目标进行跟踪时, 经常是目标到传感器的水平距离不能进一步减小, 此时只能通过调整两传感器与目标的方向夹角和俯仰角来提高对目标的跟踪精度。下面用仿真的方法来分析: 当目标到传感器的水平距离一定时, 两传感器与目标所成方向夹角和目标相对于两传感器的俯仰角对目标跟踪精度的影响。

本文主要考虑远距离空中目标跟踪, 所以在仿真中假设  $r_i^2 \gg \sigma_r^2$ , 不失一般性。另外当传感器的测角误差用弧度表示时有  $\sigma_\beta^2 \ll 1$ ,  $\sigma_\theta^2 \ll 1$ , 而通常角度是用弧度表示的。

### 3.1 方向夹角 $\theta_{12}$ 对目标跟踪精度的影响

考虑两传感器放置在地面上, 则此时目标相对于两传感器的距离及俯仰角是相等的, (18) 式可进一步简化为

$$\begin{aligned}
 R_{11}^{2c} + R_{22}^{2c} + R_{33}^{2c} = & [4x(x + y)(2zx + zy - w^2) + 4zx(zx + zy - w^2) \\
 & - 2w^2 x^2 (1 + \cos \theta_{12}) + (w^2 - zy)^2 \sin^2 \theta_{12}] / \\
 & [8zx(x + y) - 4w^2 x (1 + \cos \theta_{12}) - 2y(w^2 - zy) \sin^2 \theta_{12}], \quad (19)
 \end{aligned}$$

设目标在 10km 的高度上沿  $x$  轴方向向着坐标原点作匀速直线运动, 速度为 300m/s, 初始位置为 [200km 0 10km], 动态噪声为  $\sigma_q = 1\text{m/s}^2$ 。传感器放在坐标原点附近, 即目标的初始位置到各传感器的水平距离约为 200km, 传感器的测量精度为  $\sigma_r = 50\text{m}$ ,  $\sigma_\beta = 1^\circ$ ,  $\sigma_\theta = 1^\circ$ , 采样周期为  $T = 1\text{s}$ 。

图 1 示出了当地面上两传感器和目标所成方向夹角  $\theta_{12}$  变化时, 理论上对目标跟踪的位置误差的变化。图 1 中横坐标为  $\theta_{12}$  的值, 纵坐标为  $\sqrt{p11 + p22 + p33} / \sqrt{p011 + p022 + p033}$  的值, 其中  $\sqrt{p11 + p22 + p33}$  为用两传感器对目标进行融合跟踪时, 经过 50s 所得的理论位置误差,  $\sqrt{p011 + p022 + p033}$  是在坐标原点的单传感器对目标进行跟踪时, 经 50s 所得理论位置误差。从图 1 可看出当地面上传感器到目标的水平距离不变时, 两传感器在同一位置 ( $\theta_{12} = 0^\circ$ ) 时, 对目标的跟踪精度最差, 其位置误差是单传感器跟踪所得位置误差的 70% 左右; 当  $\theta_{12} = 90^\circ$  时对目标的跟踪精度最高, 几乎是单传感器跟踪位置误差的 50% 左右; 当  $\theta_{12} \in [0^\circ, 90^\circ]$  时, 随着  $\theta_{12}$  的增大对目标的跟踪精度越来越高, 但当  $\theta_{12} > 10^\circ$  时再增大方向夹角, 对目标的跟踪精度提高不大。

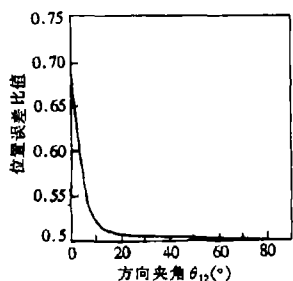


图 1 两传感器在地面上方向夹角  $\theta_{12}$  对跟踪位置误差的影响

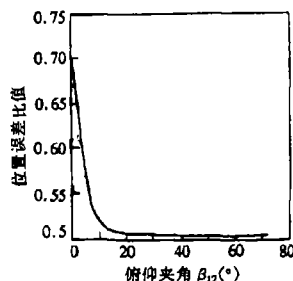


图 2 一传感器在地面上,  $\theta_{12} = 0^\circ$  俯仰夹角对跟踪位置误差的影响

### 3.2 俯仰角对目标跟踪精度的影响

图 2 示出了当目标到传感器的水平距离一定且两传感器与目标的方向夹角  $\theta_{12} = 0^\circ$  (此时两传感器只能通过改变其自身的高度来改变其与目标的相对位置) 时, 两传感器与目标所成的俯仰夹角  $\beta_{12}$  的变化对目标跟踪精度的影响。图 2 中横坐标表示俯仰夹角  $\beta_{12}$ , 纵坐标与图 1 中的纵坐标意义相同。由图 2 可见, 当传感器到目标的水平距离一定, 且  $\theta = 0^\circ$  时, 增大两传感器与目标的俯仰夹角  $\beta_{12}$  可提高对目标的跟踪精度, 但当  $\beta_{12} > 10^\circ$ , 再增大时, 对目标的跟踪精度提高不大。

当目标到传感器的水平距离一定时, 对目标的跟踪位置误差随  $\theta_{12}$  和  $\beta_{12}$  的变化曲线示于图 3。图 3 中  $x$  坐标表示方向夹角  $\theta_{12}$  的大小,  $y$  坐标为俯仰夹角  $\beta_{12}$  的大小,  $z$  坐标为两传感器对目标的跟踪理论位置误差与单传感器的跟踪理论位置误差的比值 (与图 1 中纵坐标的意义相同)。

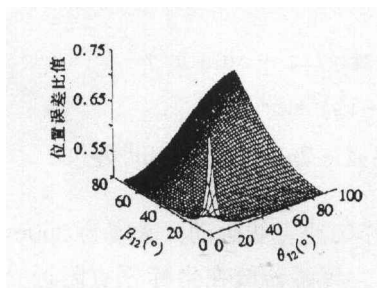


图 3 方向夹角及俯仰夹角对跟踪位置误差的影响

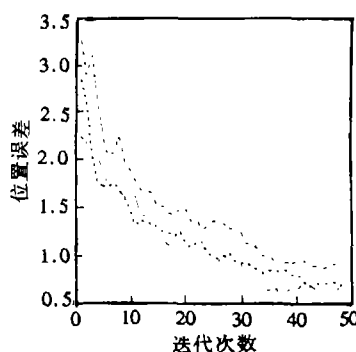


图 4 两雷达在地面上增大  $\theta_{12}$  对跟踪位置误差的影响 (点划线为  $\theta_{12} = 0^\circ$ , 虚线为  $\theta_{12} = 10^\circ$ , 实线为  $\theta_{12} = 20^\circ$ )

由图 3 可见当同时增大方向夹角和俯仰夹角时, 并不能提高对目标的跟踪精度, 反而使精度有所降低。

改变传感器的测量精度, 再仿真。通过大量的仿真发现: 当  $r_i^2 \gg \sigma_r^2 / \sigma_\theta^2$  且  $r_i^2 \gg \sigma_r^2 / \sigma_\beta^2$  ( $r_i$  表示目标到传感器  $i$  的距离) 时, 上面的结论成立。

所以在三维空间中对远距离空中目标跟踪, 当传感器的测量精度与目标到传感器的距离的关系为  $r_i^2 \gg \sigma_r^2 / \sigma_\theta^2$  且  $r_i^2 \gg \sigma_r^2 / \sigma_\beta^2$  ( $r_i$  表示目标到传感器  $i$  的距离) 时, 若传感器到目标的水平距离一定, 可通过调整地面上的两传感器与目标所成的方向夹角使对目标的跟踪精度达到最优。

## 4 仿真结果

在本节中用三坐标雷达对目标进行了跟踪, 设目标在高度为 10km 的平面上向原点方向作匀速直线运动, 初始位置为 [200km 0 10km], 速度为 300m/s, 在三个坐标方向上状态噪声相同为  $\sigma_q = 1\text{m/s}^2$ . 雷达到目标初始位置的水平距离大约为 200km, 雷达的测量精度为  $\sigma_r = 50\text{m}$ ,  $\sigma_\beta = 1^\circ$ ,  $\sigma_\theta = 1^\circ$ , 采样周期为  $T = 1\text{s}$ , 跟踪了 50s.

每部雷达用转换坐标卡尔曼滤波算法进行滤波, 形成当地状态估计, 然后送入融合中心, 用分布融合算法组合得到全局状态估计. 滤波初始状态用前两个采样点计算出来, 初始方差取为  $P_0 = \text{diag}(10)$ . 进行了 50 次 Monte Carlo 仿真实验, 目标的位置误差示于图 4- 图 6.

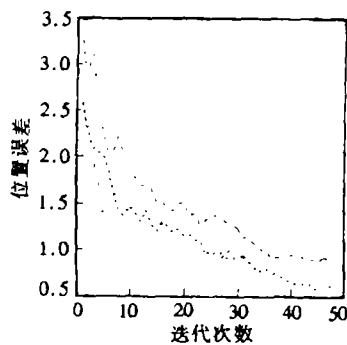


图 5 增大  $\beta_{12}$  对跟踪位置误差的影响.  
 $\theta_{12} = 0^\circ$  (点划线为  $\beta_{12} = 0^\circ$ , 虚线为  $\beta_{12} = 10^\circ$ , 实线为  $\beta_{12} = 20^\circ$ )

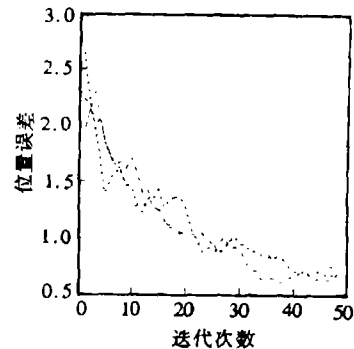


图 6 同时增大  $\theta_{12}$  和  $\beta_{12}$  对跟踪位置误差的影响  
实线为  $\theta_{12} = 20^\circ$ ,  $\beta_{12} = 20^\circ$ , 点划线为  $\theta_{12} = 20^\circ$ ,  $\beta_{12} = 0^\circ$ , 虚线为  $\theta_{12} = 0^\circ$ ,  $\beta_{12} = 20^\circ$

由图 4 可知, 当两传感器同在地面上时, 增大两传感器与目标的方向夹角  $\theta_{12}$  可提高对目标的跟踪精度, 但当  $\theta_{12} > 10^\circ$  时, 再增大, 对目标的跟踪精度影响不大. 由图 5 可知, 当两传感器与目标的方向夹角  $\theta_{12} = 0^\circ$  时, 增大两传感器与目标的俯仰夹角  $\beta_{12}$  可提高对目标的跟踪精度, 但当  $\beta_{12} > 10^\circ$ , 再增大, 对目标的跟踪精度影响不大. 从图 6 可知, 同时增大两传感器与目标的方向夹角和俯仰夹角, 不能提高目标的跟踪精度.

## 5 结 论

本文通过理论分析和大量的仿真得出以下结论: 在三维空间中, 用多传感器对远距离空中目标跟踪, 当  $r_i^2 \gg \sigma_r^2/\sigma_\theta^2$  且  $r_i^2 \gg \sigma_r^2/\sigma_\beta^2$  ( $r_i$  表示目标到传感器  $i$  的距离) 时, 可通过合理放置多传感器来提高对目标的跟踪精度. (1) 目标到传感器的水平距离越近则对目标的跟踪精度就越高; (2) 当目标到传感器的水平距离不能再缩小时, 增大地面上两传感器的方向夹角  $\theta_{12}$  可提高对目标的跟踪精度; (3) 当目标到传感器的水平距离不能再缩小时,  $\theta_{12} = 0^\circ$ , 可通过增大两传感器与目标所成的俯仰夹角  $\beta_{12}$  提高对目标的跟踪精度.

通过大量的仿真还发现, 当同时增大两传感器和目标所成的方向夹角及俯仰夹角时, 并不能提高对目标的跟踪精度, 若增大太多时, 反而会使目标的跟踪精度降低.

从本文的结论可知, 在不增加传感器数量的情况下, 可通过合理调整多传感器的位置提高对目标的跟踪精度, 因此可节省传感器资源.

## 参 考 文 献

- [1] 宋小全. 多传感器数据融合的目标跟踪: [博士论文]. 长沙: 国防科技大学 1997, 5.
- [2] 桑伟森, 顾耀平编著. 综合电子战新技术新方法. 北京: 国防工业出版社, 1993, 10.
- [3] Hassan M F, Salut G, Singh M G, Titli A. A decentralized computational algorithm for the global Kalman filter. *IEEE Trans. on AC*, 1978, AC-23(4): 262-267.
- [4] Hashmipour H R, Roy S, Laub A. Decentralized structures for parallel Kalman filtering. *IEEE Trans. on AC*, 1988, AC-33(1): 88-94.
- [5] Liggins M E, Chee-Yee Chong, Kadar I, Alford M G. Distributed fusion architectures and algorithms for target tracking. *Proc. of the IEEE*, 1997, 85(1): 95-106.
- [6] Yaakov B S. A tutorial on multitarget-multisensor tracking and fusion. 1997 IEEE National Radar conference, Syracuse, NY: 15 May. 1997.
- [7] 杨春玲, 倪晋麟, 刘国岁. 转换坐标卡尔曼滤波器的雷达目标跟踪, *电子学报*, 1999, 27(3): 121-123.
- [8] Chunling Yang, Guosui Liu. Research on target tracking accuracy. 1998 International Symposium on Noise Reduction for Imaging and Communication Systems(ISNIC-98), Japan: 1998,

RESEARCH ON LONG RANGE AEROPLANE TRACKING  
ACCURACY WITH MULTI-SENSORS

Yang Chunling Liu Guosui Ni Jinlin\* Zheng Quanzhan Gu Hong Su Weimin

(*Electro-Photo Institute, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*)

\*(*Nanjing Research Institute of Electronics and Technology, Nanjing 210013*)

**Abstract** This paper mainly studies the influence of multi-sensors' positions on a long range aeroplane tracking accuracy. From theory and simulations, It is obtained that the rational positions of multi-sensors can improve the target tracking accuracy in nonlinear systems.

**Key words** Multisensor, Target tracking, Data fusion

杨春玲: 女, 1970年生, 从事多传感器多目标跟踪、神经网络等方面的研究. 现在华南理工大学电子与通信工程系做博士后.

刘国岁: 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, 从事噪声雷达理论与应用、随机信号理论与应用、近代信号处理等方面的研究.

倪晋麟: 男, 1961年生, 研究员, 从事雷达系统和信号处理、相控阵天线、自适应阵列处理方面的研究.

郑全战: 男, 1968年生, 讲师, 主要从事信号处理方面的研究.