

· 光电工程系统技术 ·

机载光电探测航姿信息融合算法研究

王恒立, 朱 卓

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘 要:介绍了机载光电探测航姿信息融合的必要性,阐述了航姿信息融合算法的基本原理,具体描述了融合算法的实现过程,算法主体思路是通过 3 次坐标系的转换,将目标在传感器图像上的位置坐标变换到一个稳定的不受飞机姿态影响的基准坐标系里,并给出了坐标系变换的确切数学表达式.最后给出了一个采用该算法的系统的实际演示效果和详细数据,证明了算法的有效性.

关键词:光电探测;光电图像;航姿信息融合算法;基准坐标系

中图分类号: TP274⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)02-0022-05

Data Fusion Algorithm of Attitude Heading for Airborne Electro-Optic Detection

WANG Heng-li, ZHU Zhuo

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The importance of data fusion algorithm of attitude heading for Airborne Electro-Optic Detection is introduced. The basic principium of data fusion algorithm is illuminated, and the processing of the data fusion algorithm is described. According to this algorithm, reference frame should be mainly converted three times to change the target position coordinate on-image of the sensor into a fiducial reference frame being independent of the aircraft, an exact mathematical expression of reference frame conversion is given. Lastly, the practical demo and data of actual system implementing the data fusion algorithm are presented to validate the data fusion algorithm.

Key words: electric-optical detection; electric-optical image; attitude heading data fusion algorithm; fiducial reference frame

机载光电探测设备通常被固定安装于飞机表面,当飞机做平稳飞行时,光电探测设备的监视视场在短时间内变化不大,视场内远处目标的方位也只有微小的变化,体现在图像上只有微小的位移.但飞机并不总是平稳飞行,一旦飞机做偏转、俯仰和横滚等姿态动作,则光电探测设备的视场会立即发生变化,进而导致目标在一系列光电图像上的轨迹也很不稳定^[1].

为了消除飞机姿态变化对光电探测设备成像的

影响,就必须实时引入飞机姿态变化的信息(航姿信息)对设备所获得的光电图像进行实时修正,使设备获得的目标方位在时间上的相关性不受飞机姿态变化的影响^[2].

1 航姿信息融合算法的基本原理

目标在传感器图像上的位置表达为直角坐标方式,目标位置以图像像素的横纵坐标值来表示,飞机

收稿日期:2009-03-23

作者简介:王恒立(1976-),男,辽宁人,高级工程师,主要研究方向为光电工程与光电图像处理;朱卓(1978-),男,辽宁人,工程师,主要研究方向为光电工程与光电图像处理.

姿态变化导致传感器坐标系的变化进而使目标位置在图像上失真,所以如果使目标方位不受飞机姿态变化的影响,必须建立一个新的坐标系.在新的坐标系里,无论飞机做怎样的姿态变化,该坐标系都是稳定的,目标在该坐标系里的坐标值能真实地反映出目标的位置变化.由于得到的目标原始位置信息是基于传感器坐标系的,所以新坐标系必须能与传感器坐标系自由转换.

建立的新坐标系如图 1 所示,以飞机为原点, X 轴指向真北, Z 轴与地平面垂直, Y 轴垂直于平面 (X, Z) , 新建立的坐标系定义为基准坐标系,以 $O_g X_g Y_g Z_g$ 来表示.可以看出,在新坐标系里无论飞机做怎样的姿态变化,目标的坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 都是固定不变的.

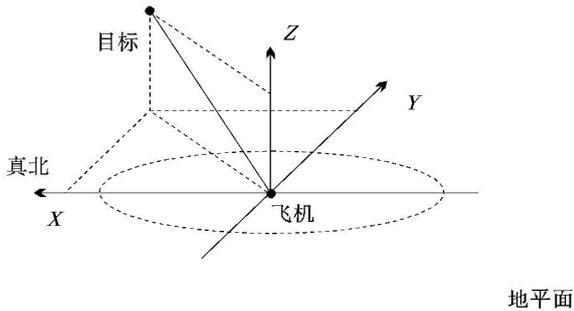


图 1 基准坐标系示意图

目标在基准坐标系里的位置方程可表达如下

$$(X_g, Y_g, Z_g) = F(\Psi, \theta, \varphi, \omega_1, \omega_2, \alpha, \beta) \quad (1)$$

式(1)中, Ψ 为飞机偏航角; θ 为飞机俯仰角; φ 为飞机滚转角; ω_1 和 ω_2 表示传感器与飞机的安装角度(偏转和俯仰); α 为目标在传感器坐标系上的方位角(此值由传感器的视场和目标的横纵像素坐标值得出); β 为目标在传感器坐标系上的俯仰角(此值由传感器的视场和目标的横纵像素坐标值得出).这 7 个参数都可以直接或间接地获得,只要求得函数 F 的确切表达式就可以得到目标在基准坐标系里的位置坐标.

2 航姿信息融合算法的推导与实现

2.1 坐标系定义

为求得式(1)的确切表达式,还需要另外定义 3

个坐标系

(1) 机体坐标系: $O_r X_r Y_r Z_r$

定义机体坐标系,它以指向机头方向的机身轴线为 X 轴, Z 轴与机身平面垂直, Y 轴垂直于平面 (X, Z) , 机体坐标系以 $O_r X_r Y_r Z_r$ 来表示.

(2) 传感器坐标系: $O_c X_c Y_c Z_c$

定义传感器坐标系,它以指向传感器镜头方向的传感器轴线为 X 轴, Z 轴与传感器水平面垂直, Y 轴垂直于平面 (X, Z) , 传感器坐标系以 $O_c X_c Y_c Z_c$ 来表示.

(3) 目标坐标系: $O_t X_t Y_t Z_t$

建立目标坐标系主要是为了计算的快速和便捷.目标坐标系可以这样定义:原点与传感器坐标系重合,目标在目标坐标系中的三维坐标固定为 $(X_t, 0, 0)$.它的物理意义为传感器坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 先沿 Z_c 轴转动 α 角到达 $O_e X_e Y_e Z_e$ 位置,再沿 Y_e 轴转动 β 角到达坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$.

目标将首先从目标坐标系转换到传感器坐标系,再从传感器坐标系转换到机体坐标系,最后从机体坐标系转换到基准坐标系.鉴于机体坐标系与基准坐标系之间的转换涉及到了 3 个坐标轴的转动,因此具有最完整的数学表达形式,而另外 2 次坐标系的转换与它类似,只是简化了一些,因此首先从机体坐标系与基准坐标系之间的转换开始.目标在 4 个坐标系的三维直角坐标均使用方向余弦描述,即方向向量的值为 1.

2.2 机体坐标系与基准坐标系的转换^[3]

由获得的航姿信息可知偏航角为 Ψ 、俯仰角为 θ 、滚转角为 φ ,由机体坐标系 $O_r X_r Y_r Z_r$ 和基准坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 的定义,可以做到让基准坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 通过 3 次独立转动使之处于 $O_r X_r Y_r Z_r$ 位置.第 1 次转动是绕 Z_g 轴的转动 Ψ 角到达 $O_a X_a Y_a Z_a$ 位置;第 2 次转动是绕 Y_a 轴转动 θ 角到达 $O_b X_b Y_b Z_b$ 位置;第 3 次转动是绕 X_b 轴转动 φ 角到达 $O_r X_r Y_r Z_r$ 位置.3 次转动的数学表达如下

(1) 绕 Z_g 轴转动角度 Ψ (偏航角)

$$O_g X_g Y_g Z_g \rightarrow O_a X_a Y_a Z_a$$

$$\text{变换矩阵: } \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = C_g^a \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_g^a = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 绕 Y_a 轴转动角度 θ (俯仰角)

$O_a X_a Y_a Z_a \rightarrow O_b X_b Y_b Z_b$

$$\text{变换矩阵: } \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \mathbf{C}_a^b \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_a^b = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

(3) 绕 X_b 轴转动角度 φ (滚转角)

$O_b X_b Y_b Z_b \rightarrow O_r X_r Y_r Z_r$

$$\text{变换矩阵: } \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^r \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_b^r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

根据以上3步, 推出 $O_g X_g Y_g Z_g \rightarrow O_r X_r Y_r Z_r$ 的坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^r \mathbf{C}_a^b \mathbf{C}_g^a \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \mathbf{C}_g^r \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix}$$

根据 \mathbf{C}_g^a , \mathbf{C}_a^b , \mathbf{C}_b^r 的特殊形式, 由矩阵原理有

$$(\mathbf{C}_g^a)^T = (\mathbf{C}_g^a)^{-1} \rightarrow (\mathbf{C}_g^a)^T \mathbf{C}_g^a = \mathbf{I}$$

$$(\mathbf{C}_a^b)^T = (\mathbf{C}_a^b)^{-1} \rightarrow (\mathbf{C}_a^b)^T \mathbf{C}_a^b = \mathbf{I}$$

$$(\mathbf{C}_b^r)^T = (\mathbf{C}_b^r)^{-1} \rightarrow (\mathbf{C}_b^r)^T \mathbf{C}_b^r = \mathbf{I}$$

反推得到 $O_r X_r Y_r Z_r \rightarrow O_g X_g Y_g Z_g$ 的坐标转换关

系

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_g^a)^{-1} (\mathbf{C}_a^b)^{-1} (\mathbf{C}_b^r)^{-1} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} =$$

$$(\mathbf{C}_g^a)^T (\mathbf{C}_a^b)^T (\mathbf{C}_b^r)^T \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^g \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此实现机体坐标系与基准坐标系间的相互转换.

2.3 传感器坐标系与机体坐标系的转换

传感器与机体的安装角度是2个已知的量, 即方位角为 ω_1 , 俯仰角 ω_2 . 那么机体坐标系到传感器

坐标系的转换同样可以让机体坐标系 $O_r X_r Y_r Z_r$ 通过2次独立转动使之处于 $O_c X_c Y_c Z_c$ 位置. 第1次转动是绕 Z_r 轴转动 ω_1 角到达 $O_d X_d Y_d Z_d$ 位置; 第2次转动是绕 Y_d 轴转动 ω_2 角到达 $O_c X_c Y_c Z_c$ 位置.

(1) 绕 Z_r 轴转动角度 ω_1 (安装方位角)

$O_r X_r Y_r Z_r \rightarrow O_d X_d Y_d Z_d$

$$\text{变换矩阵: } \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^d \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_r^d = \begin{bmatrix} \cos \omega_1 & \sin \omega_1 & 0 \\ -\sin \omega_1 & \cos \omega_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 绕 Y_d 轴转动角度 ω_2 (安装俯仰角)

$O_d X_d Y_d Z_d \rightarrow O_c X_c Y_c Z_c$

$$\text{变换矩阵: } \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_d^c \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_d^c = \begin{bmatrix} \cos \omega_2 & 0 & -\sin \omega_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_2 & 0 & \cos \omega_2 \end{bmatrix}$$

根据以上2步转换, 推出 $O_r X_r Y_r Z_r \rightarrow O_c X_c Y_c Z_c$ 的坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_d^c \mathbf{C}_r^d \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^c \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}$$

与2.2节的运算相同, 可以得到 $O_c X_c Y_c Z_c \rightarrow O_r X_r Y_r Z_r$ 的坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_r^d)^{-1} (\mathbf{C}_d^c)^{-1} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_r^d)^T (\mathbf{C}_d^c)^T$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^c \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.4 目标坐标系与传感器坐标系的转换

传感器坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 先沿 Z_c 轴转动 α 角到达 $O_e X_e Y_e Z_e$ 位置, 再沿 Y_e 轴转动 β 角到达目标坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$. 目标在目标坐标系中的三维坐标固定为 $(1, 0, 0)$.

(1) 绕 Z_c 轴转动角度 α (目标在传感器坐标系里的方位角)

$O_c X_c Y_c Z_c \rightarrow O_e X_e Y_e Z_e$

变换矩阵:
$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \mathbf{C}_c^e \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_c^e = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 绕 Y_e 轴转动角度 β (目标在传感器坐标系里的俯仰角)

$O_e X_e Y_e Z_e \rightarrow O_t X_t Y_t Z_t$

变换矩阵:
$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{C}_e^t \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_e^t = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

根据以上 2 步转换, 推出 $O_c X_c Y_c Z_c \rightarrow O_t X_t Y_t Z_t$ 的坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{C}_c^e \mathbf{C}_e^t \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_c^t \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}$$

与 2.3 节的运算相同, 可以得到 $O_t X_t Y_t Z_t \rightarrow O_c X_c Y_c Z_c$ 的坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_c^e)^{-1} (\mathbf{C}_e^t)^{-1} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_c^e)^T (\mathbf{C}_e^t)^T \cdot$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_t^c \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.5 坐标转换后的最终表达式

由式(1)~式(3)最终得到

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^g \mathbf{C}_c^r \mathbf{C}_t^c \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{C}_t^g \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{C}_t^g \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{C}_t^g = \mathbf{C}_r^g \mathbf{C}_c^r \mathbf{C}_t^c = (\mathbf{C}_g^a)^T (\mathbf{C}_a^b)^T (\mathbf{C}_b^r)^T (\mathbf{C}_r^d)^T \cdot (\mathbf{C}_d^c)^T (\mathbf{C}_c^e)^T (\mathbf{C}_e^t)^T$. 显然式(4)中不再含有未知变量, 结果可以求得.

将最终得到三维直角坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 仍以方位角和俯仰角的方式来表达. 这 2 个角度是不随飞机姿态变化而变化的^[4].

目标方位角: $\alpha_g = \tan^{-1}(y_g/x_g)$

目标俯仰角: $\beta_g = \sin^{-1}(z_g)$

3 航姿信息融合算法的效果验证

为验证算法的有效性, 现用一套三维航姿模拟系统进行测试, 将光电探测设备按一定角度安装在一飞机模型上, 再将飞机模型固定在 3 维转台上, 通过控制转台可以使飞机模型同时发生俯仰、横滚和偏航 3 个姿态, 飞机模型上安装有高精度的姿态参考系统可以实时给出飞机模型的三维姿态变化信息.

图 2 给出的 8 帧图像(256×256 像素)是光电

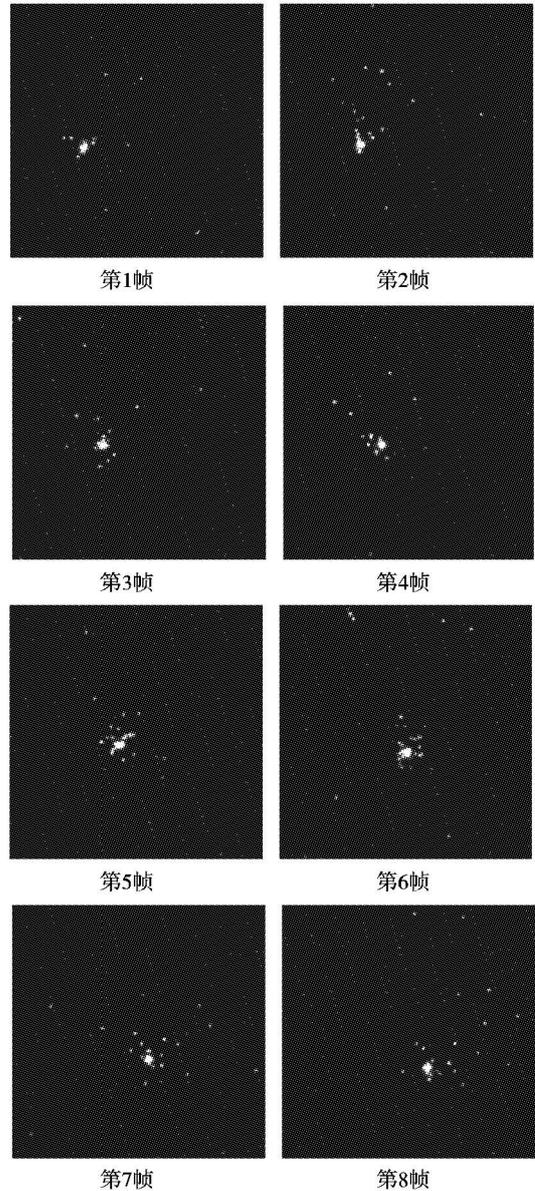


图 2 光电探测设备在 160 0 ms 内连续拍摄的图像

探测设备在 160 0 ms 内连续摄取的,在图像摄取期间,控制转台做三轴运动.由于平台的运动,目标在图像中的位置也发生了变化.

表 1 给出了应用航姿信息融合算法前后的结果数据.表 1 中的前 5 个参数前面已经提及,分别代表姿态参考系统给出的航姿数据和光电探测设备在飞机模型上的安装角度,参数 X 和 Y 表示图像上目标的纵横坐标值, α 和 β 则是未应用航姿信息融合算

法时所得到的目标方位角和目标俯仰角,可以看到 α 和 β 有很大的变化. α_g 和 β_g 是应用航姿信息融合算法后得到的目标方位角和目标俯仰角,从表 1 可以清楚看到 α_g 和 β_g 基本保持不变(误差在 2° 左右,主要是转台转动使光电探测设备在空间位置上有平移而产生的),这验证了航姿信息融合算法的有效性.

表 1 平台姿态信息与图像融合的结果数据

图像序号	ω_1	ω_2	Ψ	θ	φ	X	Y	α	β	α_g	β_g
1	45	0	0.7	0.1	0.2	75	145	-22	7	-22	7
2	45	0	5.3	-4.4	4.6	82	142	-25	6	-21	8
3	45	0	8.8	-7.9	8.1	93	141	-29	4	-21	8
4	45	0	12.5	-11.6	11.8	101	141	-33	4	-21	8
5	45	0	18.3	-17.3	17.4	111	142	-38	5	-20	9
6	45	0	23.3	-22.3	22.4	130	150	-44	9	-22	9
7	45	0	27.3	-26.4	26.4	138	157	-49	12	-22	9
8	45	0	30.6	-29.7	29.7	148	165	-52	15	-22	9

4 结 束 语

通过将航姿信息和光电图像实时进行数据融合,消除了飞机机动对光电探测的影响,获得了稳定的目标位置信息,从而为对目标作出更准确的判断与识别打下了良好的基础.

参考文献

[1] Moira Smith. Target Tracking for Missile Warning Ap-

plications[J]. SPIE, 2004, 5438: 282 - 293.

[2] Abraham Lesnik. Enhanced Target and Clutter Separation by Sensor and Data Fusion[P]. ADA392180, 1999.

[3] 张天光,王秀萍,王丽霞.捷联惯性导航技术[M].北京:国防工业出版社,2007.

[4] 贾成功,王锴,王志刚,等.光电传感器角度信息关联技术[J].光电技术应用,2003,18(4):28 - 30.

(上接第 21 页)

Process Noise on the Two-sensor Fusion-Track Covariance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(6):803 - 804.

[12] 徐毓,李锋.不同维状态的多传感器航迹融合[J].传感技术学报,2004(2):200 - 204.

[13] Chong C Y, Chang K C, Mori S. Distributed Tracking in Distributed Sensor Networks[C]//Proceedings of the

American Control Conference, Seattle, 1986.

[14] Roecker J A, Mc Gillem C D. Comparison of Two-Sensor Methods Based on statevector Fusion and Measurement Fusion[J]. IEEE Transon Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(2):447 - 448.

[15] Robert L, Mark K. Data Fusion of Decentralized Local Tracker Outputs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3):787 - 798.