

基于侦察雷达的多测距实时数据融合方法研究

梁冠辉¹, 宫志华², 马德有²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 针对传统加权平均数据融合方法对测试设备测元齐备性要求高的局限性, 提出一种基于多测距融合的侦察雷达组网实时数据融合方法。在最小二乘准则下, 建立了侦察雷达组网融合模型, 并对模型求解涉及的待估参数初值选择、权系数矩阵确定和融合精度等问题进行深入研究。通过仿真实验分析, 有效验证了所提方法的实时性和精度。

关键词: 侦察雷达; 数据融合; 待估参数; 初值; 权系数矩阵

中图分类号: V271.4; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0041-05

Real-Time Data Fusion Based on Multiple Distance Measurements of Scout Radars

LIANG Guan-hui¹, GONG Zhi-hua², MA De-you²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming of the traditional weighted average data fusion method that it demands high integrality of measurement data to measurement equipment, we proposed a real-time data fusion method based on multiple distance measurements of networked scout radars. Under least squares rule, the networking fusion model of scout radars was established, and the initial value choice of the parameters to be estimated, determination of weight coefficient matrix, and fusion precision were studied for model solution. The real-time performance and precision of the proposed method were verified through simulation and analysis.

Key words: scout radar; data fusion; parameter to be estimated; initial value; weight coefficient matrix

0 引言

某侦察雷达主要用于执行地面、海面活动目标 and 低空飞行目标的侦察与火炮校射任务, 是各类武器系统实现精确打击的必要手段, 是发挥其作战效能的倍增器。然而, 单部侦察雷达的搜索精度较低、作用距离有限, 并且容易被敌电子干扰致盲, 克服该局限性的有效途径是进行多侦察雷达组网。侦察雷达组网系统可以通过利用信息的冗余性和互补性来克服单部侦察雷达的不足, 实现系统内的情报资源共享, 为指挥控制系统的决策提供依据^[1]。

多部侦察雷达组网后, 如何进行多冗余多测元数据综合处理以获得更可靠的实验结果一直是学术界的一个研究热点^[2]。传统的加权平均数据融合方法要求

每部侦察雷达的测元都是齐备的、可靠的, 然而, 测元齐备的条件常无法满足; 此外, 加权平均融合方法还需要进行误差传递及多次坐标转换, 计算量大、效率低。针对该局限, 同时考虑侦察雷达测距精度较高的特点, 本文提出一种基于多测距融合的侦察雷达组网实时数据融合方法, 该方法不要求侦察雷达的距离、方位角测元都是可靠的, 只要求距离测元可靠, 即可实现对多侦察雷达量测数据的融合。通过对融合算法中待估参数初值进行合理选取及测元权重进行恰当设置, 提高了算法的精度和实时性, 能满足侦察雷达组网时高精度实时数据融合的需求。

1 数据融合模型构建与求解

在雷达组网系统中普遍存在地球表面多站观测的空间对齐问题, 由于某侦察雷达的侦察对象主要是较小区域(50 km × 50 km)内的地面活动目标, 因此, 可以认为在该范围内的所有雷达站都位于同一理想平面。考虑雷达组网系统是一个综合的工程, 其中, 涉及的侦

察、指挥、火力、GPS定位等多个单元部门由于技术和标准继承的关系而拥有各自不同的坐标系标准,主要是以融合中心为原点的融合中心坐标系和以各雷达站为原点的雷达探测坐标系。

1.1 融合模型构建

设各雷达站在融合中心坐标系下的坐标真值为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$, n 为雷达站个数),某时刻目标在融合中心坐标系下的坐标真值为 (\hat{x}, \hat{y}) ,在各侦校雷达探测坐标系下的真实斜距离分别为 $\hat{\rho}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$),则根据空间几何关系可得

$$\begin{cases} \hat{\rho}_1 = \sqrt{(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2} \\ \hat{\rho}_2 = \sqrt{(\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2} \\ \vdots \\ \hat{\rho}_n = \sqrt{(\hat{x} - x_n)^2 + (\hat{y} - y_n)^2} \end{cases} \quad (1)$$

取目标位置在融合中心坐标系下的最或然值为 (\tilde{x}, \tilde{y}) ,将式(1)中各方程在 (\tilde{x}, \tilde{y}) 处进行一阶 Taylor 展开可得

$$\begin{cases} \hat{\rho}_1 = \rho_{01} + \frac{(\tilde{x} - x_1)}{\rho_{01}}(x - \tilde{x}) + \frac{(\tilde{y} - y_1)}{\rho_{01}}(y - \tilde{y}) \\ \hat{\rho}_2 = \rho_{02} + \frac{(\tilde{x} - x_2)}{\rho_{02}}(x - \tilde{x}) + \frac{(\tilde{y} - y_2)}{\rho_{02}}(y - \tilde{y}) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_n = \rho_{0n} + \frac{(\tilde{x} - x_n)}{\rho_{0n}}(x - \tilde{x}) + \frac{(\tilde{y} - y_n)}{\rho_{0n}}(y - \tilde{y}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\rho_{0i} = \sqrt{(\tilde{x} - x_i)^2 + (\tilde{y} - y_i)^2}$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

整理式(2)可得

$$\begin{cases} \hat{\rho}_1 = a_{01} + a_{11}x + a_{12}y \\ \hat{\rho}_2 = a_{02} + a_{21}x + a_{22}y \\ \vdots \\ \hat{\rho}_n = a_{0n} + a_{n1}x + a_{n2}y \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_{11} = (\tilde{x} - x_1)/\rho_{01}$; $a_{12} = (\tilde{y} - y_1)/\rho_{01}$; $a_{0i} = \rho_{0i} - a_{i1}\tilde{x} - a_{i2}\tilde{y}$ 。结合各雷达站提供的目标位置量测值 ρ_i ($i=1, 2, \dots, n$),可以得到量测数据误差方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_{r1} = \rho_1 - \hat{\rho}_1 = \rho_1 - a_{01} - a_{11}x - a_{12}y \\ \varepsilon_{r2} = \rho_2 - \hat{\rho}_2 = \rho_2 - a_{02} - a_{21}x - a_{22}y \\ \vdots \\ \varepsilon_{rn} = \rho_n - \hat{\rho}_n = \rho_n - a_{0n} - a_{n1}x - a_{n2}y \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)写成矩阵形式,即雷达组网融合模型

$$\mathbf{\Delta} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{L} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{\Delta} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{r1} \\ \varepsilon_{r2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{rn} \end{bmatrix}$, 为测量误差向量; $\mathbf{A} = - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \end{bmatrix}$, 为

联合误差方程待估参数估计矩阵; $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$, 为待估参

数向量; $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \rho_1 - a_{01} \\ \rho_2 - a_{02} \\ \vdots \\ \rho_n - a_{0n} \end{bmatrix}$, 为常数项向量。

1.2 融合模型求解

在式(5)所示的雷达组网融合模型矩阵方程中,需求解2个参数 (x, y) 和 n 个改正量 $(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rn})$,即总的未知数有 $n+2$ 个,但只有 n 个方程,所以式(5)为不定方程组,其解是无穷的。为保证其解的唯一性,加入 $\Delta^T \mathbf{P} \mathbf{\Delta} = \min$ 这个限制条件,其中, \mathbf{P} 为权系数矩阵。因为 $\Delta^T \mathbf{P} \mathbf{\Delta} = \min$,所以 $\frac{d(\Delta^T \mathbf{P} \mathbf{\Delta})}{d\mathbf{X}} = 0$,求解该方程即可得到 \mathbf{X} 的解^[3]为

$$\mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (6)$$

在实际求解时,由于待估参数初值的合理性近似及非线性函数级数展开带来的截断误差,需要进行多次迭代计算。

由式(6)可知,欲求解目标位置参数,需要知道联合误差方程待估参数设计矩阵 \mathbf{A} 、权系数矩阵 \mathbf{P} 和常数项向量 \mathbf{L} 。欲计算 \mathbf{A} 和 \mathbf{L} ,由式(3)~式(5)可知,必须先确定待估参数初值。此外,欲求解目标位置参数 \mathbf{X} ,还需要确定权系数矩阵 \mathbf{P} 。

2 待估参数初值选取及权系数矩阵确定

由1节可知,式(5)为侦校雷达组网融合模型,而式(5)是由式(1)在待估参数最或然值处进行 Taylor 展开、误差求取等处理得到的,因此,待估参数初值选择得恰当与否,会对求解的精度产生直接的影响。

2.1 待估参数初值选取

对于某侦校雷达而言,其测量的目标坐标形式为二维,即待求解的目标参数只有2个。因此,本文利用多部侦校雷达中任意两部雷达(设雷达 i, j)的测距来确定目标待估参数的初值 $\tilde{\mathbf{X}} = [\tilde{x} \quad \tilde{y}]^T$,具体步骤如下所述。

1) 选择任意初值 $\mathbf{X}^{(0)} = [x^{(0)} \quad y^{(0)}]^T$ 作为 t_0 时刻待估参数的初值,需要注意该值不能是这两部雷达的位置坐标;同时,设定迭代阈值 ε 。

2) 构建方程组

$$\begin{cases} \rho_i = a_{0i} + a_{i1}x + a_{i2}y \\ \rho_j = a_{0j} + a_{j1}x + a_{j2}y \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ_i 和 ρ_j 分别为雷达 i, j 测得的目标距离值; $\rho_{0i} = [(x^{(0)} - x_i)^2 + (y^{(0)} - y_i)^2]^{1/2}$; $a_{i1} = \frac{x^{(0)} - x_i}{\rho_{0i}}$; $a_{i2} = \frac{y^{(0)} - y_i}{\rho_{0i}}$; $a_{0i} = \rho_{0i} - a_{i1}x^{(0)} - a_{i2}y^{(0)}$; $\rho_{0j} = [(x^{(0)} - x_j)^2 +$

$(y^{(0)} - y_j)^2]^{1/2}$; $a_{j1} = \frac{x^{(0)} - x_j}{\rho_{0j}}$; $a_{j2} = \frac{y^{(0)} - y_j}{\rho_{0j}}$; $a_{0j} = \rho_{0j} - a_{j1}x^{(0)} - a_{j2}y^{(0)}$ 。将式(7)整理成矩阵形式为

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}\mathbf{X}^{(1)} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \rho_i \\ \rho_j \end{bmatrix}$; $\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} a_{0i} \\ a_{0j} \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} \\ a_{j1} & a_{j2} \end{bmatrix}$; $\mathbf{X}^{(1)} = \begin{bmatrix} x^{(1)} \\ y^{(1)} \end{bmatrix}$ 。

3) 解式(8)的矩阵方程,得到 $\mathbf{X}^{(1)} = \mathbf{A}^{-1}[\mathbf{R} - \mathbf{A}_0]$ 。

4) 令 $\mathbf{X}^{(0)} = \mathbf{X}^{(1)}$, 转步骤2), 同理求解 $\mathbf{X}^{(2)}$ 。

5) 如果 $\|\mathbf{X}^{(2)} - \mathbf{X}^{(1)}\| - \|\mathbf{X}^{(1)} - \mathbf{X}^{(0)}\| \leq \varepsilon$, 则 $\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^{(2)}$; 否则令 $\mathbf{X}^{(0)} = \mathbf{X}^{(2)}$, 转步骤2)。

计算得到 t_0 时刻待估参数的初值后, 利用式(6)即可计算 t_0 时刻待估参数值。为了提高算法的实时性, 考虑在 Δt 时间内目标位置不会发生太大的改变, 直接利用 t_0 时刻待估参数值作为 t_1 时刻待估参数初值进行计算。同理, 将 t_i 时刻待估参数值作为 t_{i+1} 时刻待估参数初值。

2.2 权系数矩阵确定

权的分配对融合效果的影响十分明显: 分配合理, 融合效果好; 分配不合理, 对系统的融合精度和可靠性提高都不大。在多测距实时数据融合时, 由于多测距一般为不等精度的测量数据, 因此, 数据的加权对于数据处理结果的精度具有重要影响。

虽然通过多测距构成的融合模型是非线性的, 但本文通过在待估参数或然值处进行 Taylor 展开, 将非线性模型线性化, 线性化后的多测距融合模型即可利用测距精度来确定权系数矩阵^[4]。

设有 n 个传感器对目标进行测量, 第 i 个传感器的量测模型为 $\tilde{Z}_i = Z_i + \Delta_i$, 量测值为 \tilde{Z}_i , 真值为 Z_i , 量测误差为 Δ_i , Δ_i 服从 $N(\mu_i, \sigma_i)$ 的正态分布。假设赋予第 i 个传感器的测量值 \tilde{Z}_i 的权值为 ω_i , 所有传感器最终的融合值为 $s = \omega\tilde{\mathbf{Z}}^T = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n][\tilde{Z}_1, \tilde{Z}_2, \dots, \tilde{Z}_n]^T$ 。

由文献[5]可知, 融合后所得值的数学期望为各个传感器数学期望的加权平均, 其均方差 σ_s 为 $\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \cdot \sigma_i^2\right)^{1/2}$ 。为了使融合后精度达到最高, 即 σ_s 最小, 构造函数

数 $F = \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \sigma_i^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^n \omega_i - 1\right)$ 。该函数取最小值的条件

为 $\partial F / \partial \omega_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n)$, 展开得

$$\begin{cases} \partial F / \partial \omega_1 = 2\omega_1 \sigma_1^2 + \lambda = 0 \\ \partial F / \partial \omega_2 = 2\omega_2 \sigma_2^2 + \lambda = 0 \\ \vdots \\ \partial F / \partial \omega_n = 2\omega_n \sigma_n^2 + \lambda = 0 \end{cases} \quad (9)$$

求解式(9), 并进行归一化处理得到

$$\omega_i = \frac{1}{\sigma_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (10)$$

式中, σ_i 为第 i 个距离测元的量测均方差。由于各个侦校雷达获得的距离测元之间互不相关, 结合式(10)即可确定权系数矩阵 \mathbf{P} 的表达式为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

3 仿真试验及分析

为验证本文提出的侦校雷达多测距融合模型的正确性和合理性, 以及待估参数初值选取方法及权系数矩阵确定方法能否有效提高融合精度和实时性, 特进行仿真实验验证分析。

3.1 仿真条件

假设利用5部侦校雷达组网对某地面目标进行观测, 目标运动轨迹如图1中实线所示。5部雷达在以融合中心为原点的坐标系中的位置坐标依次为(0 m, 200 m), (0 m, 1200 m), (1000 m, 1200 m), (1000 m, 200 m)和(-1000 m, 200 m), 斜距离测量的均方差分别为10 m, 12 m, 14 m, 16 m和20 m, 测距间隔为0.1 s。通过对5部侦校雷达测得的距离数据进行融合, 从而获得地面目标相对于融合中心的距离数据和方位角数据。目标运动轨迹、雷达站和融合中心相对位置关系如图1所示。

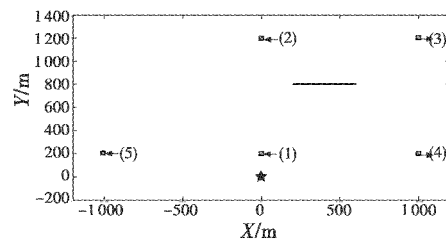


图1 雷达站和融合中心位置示意图

Fig. 1 Position of radar station and fusion center

3.2 仿真实验

3.2.1 待估参数初值不同时的融合效果对比

为验证待估参数初值选择是否确实影响融合精度和实时性, 特在两种方案下进行对比实验: 方案1, 由本文提出的方法来确定待估参数的初值; 方案2, 每个时刻都采用固定的待估参数初值。由5部侦校雷达对0~10 s内的同一地面活动目标以同频率进行测距, 并对测距结果进行融合。分别计算两种方案的融合结果参数, 计算结果如表1所示。

表1 不同待估参数初值下的融合结果参数

Table 1 Fusion result parameters with different initial values

方案	X方向		Y方向		距离		平均 迭代次数
	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	
方案1	7.48	1.11	7.36	-0.67	4.95	9.30	2.08
方案2	8.09	0.13	8.06	-1.77	5.37	10.19	4.00

由表1可知,采用方案1确定待估参数初值时,其平均迭代次数明显小于方案2,也即方案1的实时性要明显优于方案2。同时也发现,采用方案1确定待估参数初值时,其融合误差均方差,无论是X方向、Y方向还是距离上都要明显优于方案2,但融合误差的均值和方案2相比时在不同方向上有大有小。为了进一步衡量两种方案的融合精度,特计算两种方案下的融合误差,如表2所示。

表2 不同待估参数初值下的融合结果误差

Table 2 Fusion result error with different initial values

方案	X方向	Y方向	距离
方案1	7.56	7.39	10.53
方案2	8.10	8.25	11.52

由表2可知,方案1的融合精度,无论是X方向、Y方向还是距离上都要优于方案2。这充分表明,本文提出的待估参数初值选择方法是一种有效的方法,在大幅提高实时性的同时也提高了精度,但精度提高不大。

3.2.2 权系数矩阵不同时的融合效果对比

为验证权系数矩阵选取对融合效果的影响,特进行如下两种方案的对比实验:方案1,由本文提出的方法来确定不同测距的权系数矩阵,即根据测距精度来计算权系数矩阵;方案2,根据雷达站和目标之间的距离来确定各个测距的权系数矩阵。分别计算两种方案的融合结果参数和融合误差,计算结果如表3和表4所示。

表3 不同权系数矩阵下的融合结果参数

Table 3 Fusion result parameters for different weight coefficient matrixes

方案	X方向		Y方向		距离		平均 迭代次数
	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	
方案1	7.48	1.12	7.36	-0.67	4.94	9.30	2.08
方案2	8.18	1.04	8.01	-1.56	5.42	10.20	2.11

表4 不同权系数矩阵下的融合结果误差特性

Table 4 Fusion result error for different weight coefficient matrixes

方案	X方向	Y方向	距离
方案1	7.56	7.39	10.53
方案2	8.23	8.16	11.55

由表3、表4可知,无论是X方向、Y方向还是距离,方案1的融合精度均优于方案2,并且实时性也略

有提高。

3.2.3 组网雷达数量不同时的融合效果对比

与单部侦察雷达相比,通过多部侦察雷达组网不仅可以扩大探测区域、增强探测信息可靠性及提高系统“四抗”能力,还能有效提高数据的准确性。为解答是否组网雷达的数量越多,融合精度越高的疑问,以3种方案为例来进行对比分析:方案1,由图1中雷达站3部侦察雷达进行组网;方案2,由图1中雷达站4部侦察雷达进行组网;方案3,由图1中雷达站5部侦察雷达进行组网。在3种方案下,每部侦察雷达均对0~10s内的同一地面活动目标以同频率进行测距,并对测距结果进行融合。

分别计算这3种方案下融合结果参数和融合误差,计算结果如表5和表6所示。

表5 组网雷达数量不同时的融合参数

Table 5 Fusion result parameters for different quantity of radar

方案	X方向		Y方向		距离	
	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值
方案1	10.68	1.48	9.84	-0.86	6.96	12.80
方案2	7.86	1.01	7.56	-0.72	5.24	9.59
方案3	7.48	1.12	7.36	-0.67	4.94	9.30

表6 组网雷达数量不同的融合结果误差特性

Table 6 Fusion result for different quantity of radar

方案	X方向	Y方向	距离
方案1	10.78	9.88	14.57
方案2	7.93	7.59	10.93
方案3	7.56	7.39	10.53

由表5、表6可知,方案2的融合精度要明显优于方案1,方案3的融合精度略优于方案2。即由3个站增加到4个站时,精度提高比较明显,但由4个站增加到5个站时,精度提高不大。同时,由式(5)、式(6)可知,随着雷达站数量的增加,矩阵 A, P, L 的维数都在增大,显然计算的时间会增加,换言之,实时性会变差。在综合考虑精度和实时性要求时,组网雷达的数量也要适中。

4 结论

基于以上分析,可以得到如下结论。

1) 当采用多测距融合确定目标位置时,待估参数初值的选择较为重要。初值选择得越接近真值,数据融合算法的实时性越好,同时精度也有所提高。因此,在确定初始时刻待估参数初值时,要尽可能准确,结合2.1节内容可知:如果选择测量精度最高的雷达测距数据来确定待估参数初值,显然此时确定的初值精度最高;在确定非初始时刻的待估参数初值时,则利用上一时刻的待估参数融合值。

2) 当采用多测距融合确定目标位置时,权系数矩阵的选择非常关键。在已知测量设备误差特性时,利用该特性来确定权系数矩阵可以获得较高的融合精度,并且算法实时性也略有提高。

3) 增加组网雷达的数量,无论新增雷达站测量精度是否比原有雷达站精度高,都可以有效提高融合后的精度。但在增加雷达数量的过程中,融合精度的提高并非线性的,即随着雷达站数量的增加,融合精度提高越来越慢,同时算法的实时性会有所下降。因此,在综合考虑精度和实时性要求时,组网雷达的数量并非越多越好,需要在精度和组网数量之间确定一个平衡。

利用本文提出的算法进行多侦察雷达组网数据融合时,由于只需要距离测元是可靠的,对方位角测元没有要求,因此,该算法在保证精度的同时有效降低了对组网设备的要求。该原理同样可以推广到利用光电经纬仪组网时的数据融合,由于光电经纬仪测元只有角度数据,因而无法采用传统加权平均的数据融合方法,而本文所提方法只需部分测元即可,因此,可有效解决光电经纬仪组网时的数据融合问题。如今,部分侦察雷达不仅测距精度非常高,测角的精度也比较高,还有部分侦察雷达在测距、测角之外同时测定目标运动的径向速度,那么,在融合过程中能否引入角度测元,甚至是速度测元呢?引入这些测元后,融合是否能够提高呢?提高的幅度有多大呢?对融合的实时性有没有影响呢?这些问题还有待进一步深入研究。

参考文献

- (上接第40页)
- tion algorithm for infrared image small target in background of sea and sky[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2003, 1:23-28.
- [4] VICTOR T T, PELI T, LEUNG M, et al. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [C]//Proceedings of SPIE, Signal and Data Processing of Small Targets, 1993:2-11.
- [5] 臧传吉,李桂祥,王宇翔. 基于形态学方法的红外小目标检测[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(2):94-97. (ZANG C J, LI G X, WANG Y X. Infrared dim target detection using morphology-based method[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(2):94-97.)
- [6] 彭嘉雄,周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12):47-51. (PENG J X, ZHOU W L. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12):47-51.)
- [7] 莫金花,郝润平,张艳宁,等. 全局-局部联合滤波的红外小目标背景抑制方法[J]. 中国电视学与图像分析, 2011, 16(3):223-231. (MO J H, XI R P, ZHANG Y N, et al. Global filter combined with local filter for infrared small target background suppression[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2011, 16(3):223-231.)
- [8] 陈炳文,王文伟,秦前清. aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10):1252-1260. (CHEN B W, WANG W W, QIN Q Q. Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(10):1252-1260.)
- [9] 吕雁,苏新主. 一种基于背景预测的红外杂波抑制新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8):1271-1274. (LÜ Y, SU X Z. Novel method for IR image clutter suppression based on background prediction[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(8):1271-1274.)
- [1] 孙鹏,唐宏. 电子战武器装备发展现状与展望[J]. 电讯技术, 2008, 48(3):7-11. (SUN P, TANG H. Development status and prospect of EW weapons[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(3):7-11.)
- [2] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜. 多源信息融合[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. (HAN C Z, ZHU H Y, DUAN Z S. Information fusion based on multisource[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2006.)
- [3] 秦源. 基于雷达和红外传感器的低空情报网中的信息融合[D]. 南京:南京理工大学, 2005. (QIN Y. Information fusion in low altitude information net based on radar and IR[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.)
- [4] 郭徽东,章新华. 用于多传感器最优融合的优化节点样条数据平滑方法[J]. 兵工学报, 2003, 24(3):385-388. (GUO H D, ZHANG X H. An optimal knots spline measurement smoothing method used in the optimal fusion of multi-sensor data [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3):385-388.)
- [5] 王炯琦,周海银,吴翊. 基于最优估计的数据融合理论[J]. 应用数学, 2007, 20(2):392-399. (WANG J Q, ZHOU H Y, WU Y. The theory of data fusion based on state optimal estimation[J]. Mathematica Applicata, 2007, 20(2):392-399.)