

基于概率密度函数的辐射源定位点融合算法

张奎, 罗景青, 刘伟
(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 针对空中观测平台对地面辐射源目标定位得到多个定位点的问题,提出了基于概率密度函数的定位点融合算法。在分析最大似然估计法的基础上,提出了概率密度函数求和法和修正最大似然估计法两种融合算法,通过概率密度函数相加求和与数据窗口选择,实现对辐射源多次定位点的融合,提高了定位精度。算法解决了个别定位点误差过大以及多个辐射源同时存在且其定位点不可区分时的融合问题。仿真实验结果表明,该方法可以有效融合多辐射源定位点,提高定位的精度,并且概率密度函数求和法融合性能更为稳健。

关键词: 无源定位; 目标定位; 概率密度函数; 修正最大似然估计; 融合

中图分类号: V271.4; TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0040-05

A Location Point Fusion Method Based on Probability Density Function

ZHANG Kui, LUO Jing-qing, LIU Wei
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: To deal with the multiple location points' fusion problem of aerial observation platform to the emitter on the ground, a fusion method based on probability density function is proposed. After the analysis to the maximum likelihood (ML) estimation method, two fusion methods, the sum method of the probability density function (S-PDF) and the modified ML (M-ML) method, are proposed. Location points are fused through the sum of each point's probability density function and the choice of data window to improve the location precision, and the fusion problem in the case of wild observation points and multiple emitters was solved. Simulation results verify that the algorithm can effectively fuse multiple location points to improve the locating precision, and the performance of S-PDF method is more robust than the M-ML method.

Key words: passive locating; target locating; probability density function; modified ML method; fusion

0 引言

无源定位由于其具有隐蔽性高、作用距离远、抗干扰能力强等优势,在现代战争中具有重要的军事意义^[1]。空间侦察平台对地面辐射源进行无源定位的方法之一是单点定位法^[2-4],即在空间某个位置对辐射源的方位角和俯仰角进行测量,而后通过测向定位线与地面的交点即时计算出辐射源目标的位置。这种定位技术可在瞬间完成,对于雷达目标而言,称之为单脉冲定位。不过,由于信道噪声等因素的影响,对目标角度的测量是有偏差的,因而定位结果也会有误差^[5-7]。当

对目标多次测量定位时,一般各次测量的定位结果并不重合,通过将多次单点定位的结果进行融合处理可以得到比单次定位结果更高的定位精度^[8-9]。通常,对多次单点定位结果的融合处理采用统计平均的方法。

若观测点中存在定位误差极大的点,或者存在多个辐射源目标,并且在测量时并不能准确地将多个辐射源目标的定位点进行区分,此时,基于单目标的统计平均处理方法误差可能会很大,甚至得到错误的结果。针对这一问题,本文提出了基于概率密度函数的辐射源定位点融合算法,对多个位置定位点不需要知道哪些定位点误差大,也不需要判断定位点中可能的辐射源数目,通过网格搜索,完成对多个位置定位点的融合,提高定位的精度,同时得到辐射源的数目。

1 单目标概率密度函数融合算法

假定地面上有一个辐射源目标,空中观测平台采用

收稿日期:2013-10-24 修回日期:2013-11-13

基金项目:国家自然科学基金(61171170)

作者简介:张奎(1986—),男,河南项城人,博士生,研究方向为无源定位。

测向的方法对地面上的辐射源目标进行定位,得到 N 个定位点,即对辐射源真实位置进行了 N 次观测,第 i 次的观测坐标设为 $\mathbf{X}_i = [x_i \ y_i]^T, i=1,2,\dots,N$ 。假定辐射源的真实位置为 $\mathbf{X}_0 = [x_0 \ y_0]^T$,第 i 个定位点的测量误差为 $\mathbf{e}_i = [e_{x_i} \ e_{y_i}]^T$,则辐射源位置的观测模型可表示为

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_0 + \mathbf{e}_i, \quad i=1,2,\dots,N. \quad (1)$$

假定 e_{x_i} 均服从均值为 0、方差为 σ_x^2 的高斯分布, e_{y_i} 均服从均值为 0、方差为 σ_y^2 的高斯分布,且 e_{x_i} 与 e_{y_i} 不相关,则辐射源位置观测 \mathbf{X}_i 的概率密度函数为

$$f(\mathbf{X}_i) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(x_i-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y_i-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right\}. \quad (2)$$

假定各次位置观测点之间是独立的,则 $\mathbf{X}_i (i=1,2,\dots,N)$ 的联合概率密度函数为

$$g_1(\mathbf{X}_0) = f(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N) = f(\mathbf{X}_1)f(\mathbf{X}_2)\dots f(\mathbf{X}_N) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\right)^N \exp\left\{-\sum_{i=1}^N \left[\frac{(x_i-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y_i-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (3)$$

令

$$u = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(x_i-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y_i-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (4)$$

则对 \mathbf{X}_0 的最大似然估计是使 $f(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N)$ 取得最大值的值,即是使 u 取最小值的值,用 u 对 \mathbf{X}_0 求偏导,

并令 $\frac{\partial u}{\partial \mathbf{X}_0} = 0$, 可以求得

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ \hat{y}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \end{cases}. \quad (5)$$

式(5)就是对辐射源位置的最大似然估计,即在辐射源位置没有先验信息的情况下,对多次位置观测点的统计平均处理方法。

实际上,当位置观测点中含有较大误差的定位点或错误的定位点时,采用式(5)对各位置观测点进行融合平均处理之后,定位的误差会较大。为此,本文采用各位置观测点的概率密度函数求和的方法,各位置观测点概率密度函数求和后的函数为

$$g_2(\mathbf{X}_0) = \sum_{i=1}^N f(\mathbf{X}_i) \quad (6)$$

使 $g_2(\mathbf{X}_0)$ 取得最大值的 \mathbf{X}_0 , 即是对辐射源的位置估计。

式(6)两边同时对 \mathbf{X}_0 求偏导,令 $\frac{\partial g_2}{\partial \mathbf{X}_0} = 0$, 可以得到

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N f(\mathbf{X}_i)(x_i - x_0) = 0 \\ \sum_{i=1}^N f(\mathbf{X}_i)(y_i - y_0) = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

对式(7)进行求解可以得到

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = \sum_{i=1}^N a_i x_i / \sum_{i=1}^N a_i \\ \hat{y}_0 = \sum_{i=1}^N a_i y_i / \sum_{i=1}^N a_i \end{cases} \quad (8)$$

式中, $a_i = f(\mathbf{X}_i)$ 。

由高斯分布概率密度函数的性质可以知道:当辐射源的位置观测点 \mathbf{X}_i 离真实辐射源位置 \mathbf{X}_0 较近时,式(2)中的 $f(\mathbf{X}_i)$ 会取一个较大的概率密度值 a_i ; 而当 \mathbf{X}_i 离真实辐射源位置 \mathbf{X}_0 较远时, $f(\mathbf{X}_i)$ 的取值则会较小。这样就可以突出真实的位置观测点,从而弱化误差较大的观测点对位置估计的贡献。因此,分析式(8)可以看出,通过概率密度函数求和对辐射源位置进行估计,就是用观测点的概率密度函数取值对辐射源位置观测点进行加权求和。

由于式(8)中 a_i 是与 \mathbf{X}_0 相关的参数,因此,对式(8)的求解采用网格搜索的方法。

对于单目标概率密度函数融合算法,最大似然估计(ML)法需要假定目标数目的先验信息为单个,但实际处理中会遇到多个位置观测点非单目标的情况,因此,有必要对 ML 法进行修正。

2 多目标概率密度函数融合算法

当观测区域内含有多个目标时,由于 ML 法是基于单个目标假设的,因此,得到的融合定位结果会是错误的。为此,需要对单目标最大似然估计融合算法进行改进,以适用于目标数目先验信息未知的辐射源位置观测点融合问题。

由概率统计理论^[10]可知,当辐射源位置观测误差服从高斯分布时,辐射源位置 x 轴向上的测量参数落在真值附近 $3\sigma_x$ 范围内的概率达到 99.74%, 辐射源位置 y 轴向上的测量参数落在真值附近 $3\sigma_y$ 范围内的概率达到 99.74%。为此,对于 ML 法,采用辐射源真实位置附近 3σ 范围内的位置观测点对辐射源进行位置估计从理论上讲是可行的,这就是修正最大似然估计(M-ML)算法。

考虑到落在辐射源位置附近 3σ 范围内的位置观测点数不同时,概率密度函数的系数 $\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}$ 相乘会影响最大值的判断,因此, M-ML 法仅取指数部分。令

$$k(\mathbf{X}_i) = \exp\left\{-\frac{(x_i-x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y_i-y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (9)$$

$$F[k(\mathbf{X}_i)] = \begin{cases} k(\mathbf{X}_i), & |x_i-x| < 3\sigma_x, |y_i-y| < 3\sigma_y \\ \exp\{-9\}, & \text{others} \end{cases} \quad (10)$$

则可以得到修正最大似然函数为

$$K(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^N F[k(\mathbf{X}_i)] \quad (11)$$

使得 $K(X)$ 出现极大峰值的位置 \hat{X} 即为对多目标辐射源的位置估计。

对于概率密度函数求和的方法,由于采用了概率密度函数加权的方法,对多目标位置观测定位点已经具有一定的区分功能,因此,可以直接用于对多目标辐射源位置定位点的融合。此时,概率密度求和函数变为

$$g_2(X) = \sum_{i=1}^N f(X_i) \quad (12)$$

使得 $g_2(X)$ 出现极大峰值的位置 \hat{X} 即为对多目标辐射源的位置估计。

3 算法处理流程

3.1 单目标融合算法处理流程

ML法可以通过式(5)直接计算得到辐射源位置更精确的估计。概率密度函数求和(S-PDF)法则需要对辐射源可能位置区域进行网格搜索,算法具体处理流程如下:

- 1) 获得 N 个辐射源的单次位置观测点 $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$;
- 2) 在可能的位置区域 D 内设置网格点 $X_E(i), i = 1, 2, \dots, I$, 其中, i 表示划分的网格点的序号;
- 3) 根据概率密度求和函数计算 $g_2(X_E(i)), i = 1, 2, \dots, I$;
- 4) 寻找使 $g_2(X_E(i))$ 取得极大值的 $i = i_0$, 令 $\hat{X} = X_E(i_0)$, 即为目标辐射源的位置估计。

通过上述4个步骤可以实现对单个目标辐射源位置观测点的融合,从而达到高定位的精度。

3.2 多目标融合算法处理流程

S-PDF法和M-ML法均需要对辐射源可能位置区域进行网格搜索,算法具体处理流程如下:

- 1) 获得 N 个辐射源的单次位置观测点 $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$;
- 2) 在可能的位置区域 D 内设置网格点 $X_E(i), i = 1, 2, \dots, I$, 其中, i 表示划分的网格点的序号;
- 3) 根据概率密度求和函数以及修正最大似然函数计算 $g_2(X_E(i))$ 以及 $K(X_E(i)), i = 1, 2, \dots, I$;
- 4) 寻找使 $g_2(X_E(i))$ 、 $K(X_E(i))$ 取得极大值的 $i = i_0$, 令 $\hat{X} = X_E(i_0)$, 极大值的个数为目标的个数,极大值对应的位置为目标辐射源的位置估计。

通过上述4个步骤可以对实现多个目标辐射源位置观测点的融合,并同时确定辐射源目标数目。

4 仿真分析

实验1 单目标时,ML法和S-PDF法性能比较。假定辐射源的真实位置坐标为(1000 m, 2000 m), 空中

观测平台对其进行定位, x 轴向的定位均方根误差为 $\sigma_x = 20$ m, y 轴向的定位均方根误差为 $\sigma_y = 20$ m, 若假定空中观测平台对辐射源目标的位置观测点数为100个, 网格搜索范围: x 轴向为[990 m 1100 m], y 轴向为[1900 m 2100 m], 网格搜索大小为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 则各位置观测点及真实辐射源位置如图1所示, 采用ML法和S-PDF法融合处理之后的定位结果如图2所示。

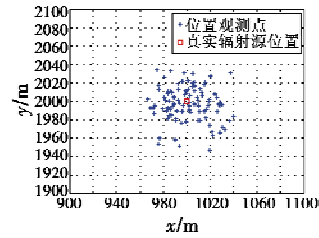


图1 单目标位置观测点及真实位置分布

Fig. 1 Distribution of location points and true positions in single emitter case

由图1可以看出, 各次位置观测点的误差大小不等, 在辐射源位置先验信息未知的情况下, 仅通过单次观测点得到的辐射源位置, 误差可能会很大, 因此, 必须对各次位置观测点进行融合处理。

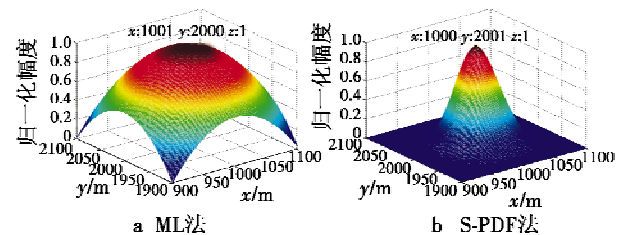


图2 单目标ML法和S-PDF法融合定位结果

Fig. 2 Fusion results of ML method and S-PDF method in single emitter case

由图2可以看出, ML法和S-PDF法均可实现对单目标多个位置观测定位点的融合, 且融合之后的定位结果更接近真实的辐射源位置。

实验2 单目标时, ML法和S-PDF法融合定位均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)随位置观测点个数的变化曲线。

假定空中观测平台对地面辐射源的定位点个数以20为单位由20步进到200, 其他条件同实验1。做200次蒙特卡罗实验, 可以得到采用ML法和S-PDF法定位的均方根误差随位置观测点个数的变化曲线, 见图3。

定位均方根误差的算式为

$$R = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [(\hat{x}_{E,m} - x_E)^2 + (\hat{y}_{E,m} - y_E)^2]} \quad (13)$$

式中: $(\hat{x}_{E,m}, \hat{y}_{E,m})$ 为第 m 次实验对辐射源的位置估计, $m = 1, 2, \dots, M$, M 为蒙特卡罗实验次数; (x_E, y_E) 为真实的目标辐射源位置。

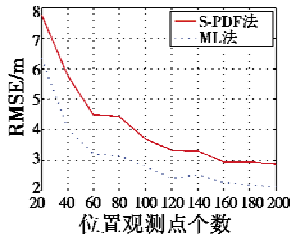


图3 ML法和S-PDF法定位均方根误差随位置观测点个数的变化曲线

Fig. 3 Location RMSE of ML and S-PDF method for different number of location points

由图3可以看出,ML法和S-PDF法定位的均方根误差均随位置观测点个数的增多而减小,且在观测点不存在过大定位误差的条件下,ML法的定位精度优于S-PDF法。

实验3 单目标存在定位误差较大的定位点时,ML法和S-PDF法性能比较。

假定位置观测点中有两个定位点误差较大,分别为(1100 m,2100 m)和(1070 m,2080 m),其他条件同实验1,则采用ML法和S-PDF法定位均方根误差随位置观测点个数的变化曲线如图4所示。

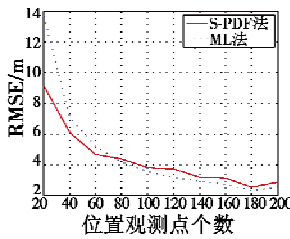


图4 存在较大误差定位点时ML法和S-PDF法定位均方根误差随位置观测点个数的变化曲线

Fig. 4 Location RMSE of ML and S-PDF method in case existing points with large error

由图4可以看出,两种算法的定位精度都随位置观测点个数的增多而提高,在位置观测点个数小于70时,采用S-PDF法的定位性能优于ML法,但在位置观测点个数大于70时,ML法的定位性能稍优于S-PDF法。这是因为S-PDF法对位置观测点进行了加权,当观测点误差较大时,该点的计算权重很小,加权后对定位结果的影响也较小,而ML法由于取了平均处理,因此其误差较大。随着观测点个数的增加,ML法受平均处理的影响减小,因此,其定位精度提高。

实验4 两个目标时,ML法、M-ML法和S-PDF法融合定位结果。

假定两个辐射源目标的真实位置坐标分别为(1000 m,2000 m)和(1060 m,2070 m),空中观测平台对两辐射源的观测点数相同,各观测100次,两者x轴和y轴的定位均方根误差为 $\sigma_x = \sigma_y = 10$ m,其他

条件同实验1,可以得到两目标位置观测点及真实位置如图5所示,ML法、M-ML法和S-PDF法对辐射源的定位结果如图6所示。

由图6可以看出,ML法不能适应两目标辐射源的情况,而M-ML法和S-PDF法则可以实现对两目标位置观测点的融合,从而提高定位的精度。

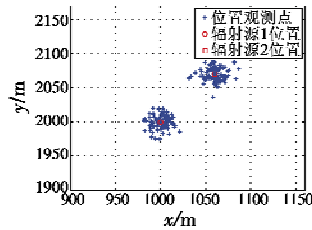


图5 两目标位置观测点及真实位置分布

Fig. 5 Distribution of location points and true positions in case of two emitters

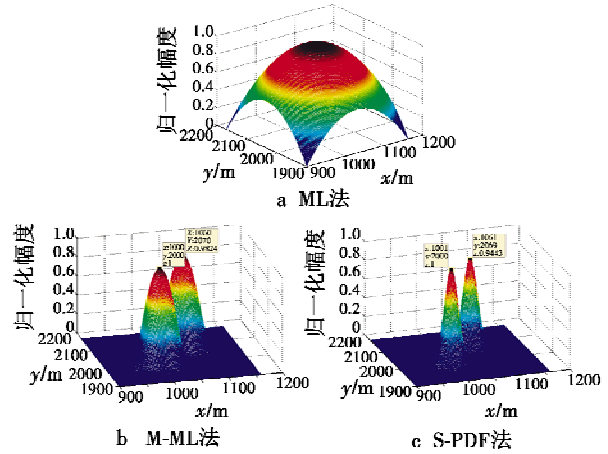


图6 两目标时3种方法的定位结果

Fig. 6 Fusion results of three methods in case of two emitters

实验5 M-ML法和S-PDF法性能比较。

假定x轴和y轴的定位均方根误差为 $\sigma_x = \sigma_y = 28$ m,其他条件同实验4,可以得到两目标位置观测点及真实位置如图7所示,M-ML法和S-PDF法对辐射源的定位结果如图8所示。

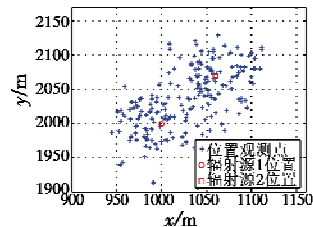


图7 两目标位置观测点及真实位置分布

Fig. 7 Distribution of location points and true positions in case of two emitters

对比图6和图8可以看出,当两辐射源的位置很近且辐射源的定位误差较大时,即两辐射源位置不可区分时,S-PDF法较M-ML法性能更优,更为稳健。

要成分,最终满足架构要求。

2) 用户需求的变化会带来作战环境以及系统功能的变化。

在系统产品的研制周期中,用户需求将会随时变化,这将带来作战环境及系统功能的变化。对于用户需求的变更,需要按照设计流程进行快速、高效的系统架构更改、验证,并最终确定正式的更新。

3) DoDAF 不同版本视点描述的转换。

DoDAF1. X 版的体系结构在一些情况下需要升级。DoDAF2. 0 版之前的体系结构和现在的版本相比,必须定义或解释与新版本体系结构在概念上的差异。

DoDAF2. 0 版在体系结构数据类型方面有了较大的变化,由先前版本体系结构的核心体系数据模型(CADM)演变为国防体系结构框架元模型 DM2 (DoDAF Meta_model), DM2 由概念数据模型(CDM)、逻辑数据模型(LDM)和物理交换规范(PES)组成,并使用国际国防企业规范(IDEAS)。在 DoDAF2. 0 的物理交换规范中,PES 被编成一套 XML 范式定义(XSD)文件,并为诸如 EA 数据库等数据交换提供了一个核心格式。DM2 数据组到 DoDAF 模型有相应的映射关系。

在大多数情况下,DoDAF2. 0 元模型(DM2)支持 DoDAF1. 5 版的数据概念,但有一个例外,节点(Node)是一个复杂的逻辑概念,将由更为具体的概念加以表述。通常将低版本 DoDAF1. X 的体系结构数据向 DoDAF2. 0 转换时,要先确定低版本体系结构的节点在高版本的概念,输出体系结构数据,然后采用 DoDAF PES 将低版本节点概念转换为相应的高版本概念,并输入高版本体系结构。反之,则需要将 PES 规范的数据格式转换为低版本的 CADM 数据格式。

4) DoDAF 体系结构与系统研制周期模型的结合。

DoDAF 体系结构规定了对作战环境及目标系统描述的方式,但和系统研制周期模型中的各个研制阶

段还要有机结合。例如,作战视图和系统视图的产品描述,穿插于整个需求分析及功能分析之中,这就需要制定详细的开发计划,将这些视图甚至是视图产品的部分内容,划分到各个阶段中去。

4 结束语

本文就 DoDAF 体系结构建模方法的特点、步骤进行了探讨,通过对典型的反潜飞机任务系统的作战视点、系统视点等主要视点的描述、可视化建模并进行了模型的验证。分析及设计结果表明:

1) 统一建模语言的可视化分析、设计方式便于在用户、设计人员和测试人员中间建立一致的理解;

2) 开放式体系结构便于系统自身扩展升级以及和其他系统进行交联;

3) 通过模型验证,使系统设计结果更可预见;

4) 基于 DoDAF2. 0 框架的作战体系建模能够更加全面地利用战场各种有利因素,使作战效能达到最优。

由此可见,DoDAF 建模方法适合武器系统的建模,能够使设计工作更加有序、规范地进行,并且大幅缩短产品的开发周期,提高市场竞争力。目前,欧美等国已经大规模采用该体系结构规范,在各种作战系统中广泛应用,并不断推进该体系结构规范向前发展。

参 考 文 献

- [1] 黄力,罗爱民,邱涤珊,等. C⁴ISR 系统结构框架研究进展[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(3):16-19.
HUANG L, LUO A M, QIU D S, et al. Research progress of C⁴ISR architecture framework[J]. Fire Control and Command Control, 2004, 29(3):16-19.
- [2] 吴娟,王明哲. DoDAF 产品集的 SySML 模型支持系统[J]. 兵工自动化, 2006, 25(2):13-17.
WU J, WANG M Z. The SySML model support system of DoDAF product[J]. Weapon Industry Automation, 2006, 25(2):13-17.
- [9] ELSAESSER D. Emitter geolocation using low-accuracy direction-finding sensors[C]//IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications, 2009:1-7.
- [10] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,1999.
SHENG Z, XIE S Q, PAN C Y. Probability & statistics [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1999.

(上接第 44 页)

of emitter position based on satellites direction-finding systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(12):2875-2878.