

面向 DOA 测量的多目标位置信息场定位法

马贤同^{1,2} 罗景青² 张 奎²

(1. 电子信息控制重点实验室, 合肥 230037; 2. 电子工程学院, 合肥 230037)

摘 要: 现有无源有源测向定位理论均是针对单目标定位, 无法对不可区分的多个同类辐射源定位, 且传统的测向定位法存在虚假定位的缺点。针对以上问题, 提出了一种基于 DOA 测量的多目标位置信息场定位法。该方法可以解决现有单目标定位无法解决的多目标定位问题, 能够同时确定目标数目和多目标位置。仿真实验用三个观测站分别对两个和三个同类辐射源进行无源测向定位, 结果说明该方法具有同时确定目标数目和多目标位置的优势, 且能有效地解决传统测向定位法中存在虚假定位的问题。

关键词: 位置信息场; DOA; 多目标; 虚假定位

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)01-0121-06

A Location Method for Multi-target by Position Information Field Based on DOA

MA Xian-tong^{1,2} LUO Jing-qing² ZHANG Kui²

(1. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Hefei, 230037, China

2. Electronic Engineering Institute, Hefei, 230037, China)

Abstract: The existing passive or active location theory are all proposed for single objective orientation, which are unable to locate more than one undistinguished similar radiation sources, and the traditional bearing orientation method has false location faults. According to the problems, a novel location method for multi-target by position information field based on direction of arrival (DOA) measurement information is presented in this paper. This location method can solve the problem of multi-target location which current single target location method unable to solve, and it can get target number and multi-target position at the same time. Computer experiments used three observation stations to locate two and three similar radiation sources, respectively, based on passive bearing orientation method, simulation results show that this method has the advantage of getting target number and multi-objective position at the same time, and it also can solve the problem of false location effectively in the traditional bearing orientation method.

Key words: position information field; direction of arrival; multi-target; false location

1 引言

无源定位属于被动定位, 系统具有很好的隐蔽性, 不易受到干扰和攻击, 是目前定位研究的主要方向。目前主要的无源定位技术中应用得最广泛的是: 测向交叉定位法^[1]和时差定位法^[2-3]。很多学者对复合定位法进行了研究, 主要包括联合利用方位角与时间差信息的 DT 法^[4], 联合利用方位角与多普勒 (Doppler) 信息的 DF 法^[5]以及基于时间差和多普勒信息的时频

差定位法^[6]等。

测向交叉定位法具有全方位、快速、探测距离远、抗干扰能力强的特点。在实战中, 侦察系统往往在同一时间面对的是空间多个辐射源的复杂电磁环境, 有时需要对多个同类辐射源同时进行定位, 这时传统的测向交叉定位法势必会产生大量的虚假定位。现有的诸多定位方法都是针对单目标定位的, 它们在进行定位计算之前, 都要知道测量参数是关于某个确定目标的。文献[7]是典型的通过数据关

联的方法来判断测量数据是否属于某个确定目标。如果对测得的一组辐射源方位数据,这些方位数据与辐射源目标的其他参数相关后,没有办法分辨这些方位数据是来源于一个辐射源或两个辐射源或更多辐射源,因此不能确定信号源的数目,现有的方法也就无法获得辐射源目标的位置信息。本文将位置信息场定位法应用于测向定位系统中,对不可区分的多个同类辐射源定位,同时确定目标数目和目标的位置,且能够有效地解决虚假定位问题,具有一定的实际应用价值。

2 目标位置信息场定位法原理

定义在指定区域内关于感兴趣目标或目标群位置分布的函数为目标位置信息场函数,简称目标位置信息场或位置信息场。目标位置信息场是一个标量场,是关于目标或目标群位置分布特征的一个描述。在二维平面或三维空间甚至更高维空间中,关于目标和目标群的本体位置特征可用一个精确位置概率分布密度来表达:

$$p_X^{(0)}(\mathbf{X}) = K_X \sum_{i=1}^{N_T} \alpha_i \cdot \delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_i) \quad (1)$$

其中, \mathbf{X} 表示所关心的可能存在目标的位置, N_T 为目标个数, α_i 为在位置 \mathbf{X}_i 存在目标的相对可靠性因子, K_X 为归一化系数,而 $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。

式(1)一般很难得到,而可以得到的只是式(1)的一个估计。当获得了一批观测(信号测量数据或测量参数集) \mathbf{Z} 后,由于观测的有限时域特性和有限频域特性,我们得到的结果是式(1)与一些函数的卷积:

$$f_X(\mathbf{X}/\mathbf{Z}) = K_X \sum_{i=1}^{N_T} \alpha_i \cdot g_{X/Z}(\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}_i^{(s)}) \quad (2)$$

式中, $f_X(\mathbf{X}/\mathbf{Z})$ 就是基于观测 \mathbf{Z} 的关于目标的位置信息场函数, $\hat{\mathbf{X}}_i^{(s)} = \hat{\mathbf{X}}_i^{(s)}(\mathbf{Z})$, $i = 1, \dots, N_T$ 为当目标为单目标时 X_i 的估计结果,是 \mathbf{Z} 的函数。 $g_{X/Z}(\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}_i^{(s)})$ 是某个在 $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}}_i^{(s)}$ 处取极大值且只有一个极值的实函数。 \mathbf{Z} 实际上是一观测空间,它可以是任何与目标位置有关的观测值的集合,可以是多个观测矢量的组合。之所以给出单目标时的估计结果,是因为在多目标情况下,由于各目标后验概率密度函数的互相影响,其估计结果可能不再具有与式(1)相对应的形式。

需要指出的是,式(1)中的 \mathbf{Z} 可以是多个方位、方位和距离、功率或衰减因子及相关参数,也可以是到达时间、到达时间差、频差、相位差、相位差变化率、方位变化率等等,当然还可以是直接时域采样数据^[8]、直接频域采样数据^[9],甚至可以是位置取样值本身。

根据 \mathbf{Z} , 求得 $f_X(\mathbf{X}/\mathbf{Z})$, 并从中分析出目标的个数、目标的位置的方法,称之为目标位置信息场定位分析法,简称位置信息场定位法^[10]。

分析易知,当只有一个信号时,若假定各观测误差矢量均是零均值的正态分布的随机变量,选择代价函数为平方代价函数时,这种位置信息场定位法变为最大后验概率(MAP)估计法。

当信号个数只有一个,而且没有目标位置的先验信息时,这种位置信息场定位法变为最大似然概率(ML)估计法。

A. Amar 等人在 IEEE T-SP 2008(11) 上发表的论文^[8], 以及 A. J. Weiss 在 IEEE T-SP 2011(6) 上发表的论文^[9](被称之为“直接定位法”或“一步定位法”), 可以分别看成是位置信息场定位法在只有一个目标信号源, 信号源分别是窄带直接时域采样和宽带直接频域采样情形的特例。

3 基于 DOA 测量的多目标位置信息场定位法

3.1 观测模型

一般地,无论是无源定位,还是有源定位,总是靠多次测量与目标位置有关的参数或信号后,对目标位置进行确定(估计)的。对只测向定位而言(下面以方位角为例进行说明), P 个观测站所得到的观测值 \mathbf{Z} 可描述成多个独立测量的方位角矢量的组合:

$$\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_M]^T \quad (3)$$

其中 $M \geq 1$, 表示独立观测的次数。而相应于 z_m 的目标“响应”函数 $h_m(\mathbf{X}_E)$ 为:

$$h_m(\mathbf{X}_E) = \begin{cases} \text{Arctg} \left(\frac{y_{pm} - y_E}{x_{pm} - x_E} \right), & x_{pm} \neq x_E \\ \pi/2, & x_{pm} = x_E \end{cases} \quad (4)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, M$, $\mathbf{X}_E = (x_E, y_E)$ 为随机参量,表示目标位置坐标。对于多目标的情况,它可以是任意一个目标的位置坐标。以两个目标(用 1 和 2 表示)为例, (x_E, y_E) 可能是目标 1 的坐标,也可能是目标 2 的坐

标。式(4)中 $(x_{pm}, y_{pm}), p=1, 2, \dots, P$ 为在获得第 m 组测量值时观测站 p 所对应的位置。

每个独立的观测量一般均是受测量噪声污染后的与目标位置有关的函数:

$$z_m = \mathbf{h}_m(\mathbf{X}_E) + \mathbf{v}_m \quad (5)$$

其中, $\mathbf{h}_m(\mathbf{X}_E)$ 为目标对应于测量 z_m 无噪时的“响应”, 其形式由式(4)确定, 而 \mathbf{v}_m 是观测量 z_m 的测量误差, 假定测量噪声是零均值的, 其协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_m = E\{\mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H\} \quad (6)$$

设 \mathbf{X}_E 的先验概率密度为 $p_0(\mathbf{X})$, 则可定义目标位置信息场为:

$$f_X(\mathbf{X}/\mathbf{Z}) = \ln p_0(\mathbf{X}) - \sum_{m=1}^M C[d(z_m, \mathbf{h}_m(\mathbf{X}))] \quad (7)$$

其中, $C[\cdot]$ 为一代价函数, 而

$$d(z_m, \mathbf{h}_m(\mathbf{X})) = \left\{ [z_m - \mathbf{h}_m(\mathbf{X})]^H \mathbf{R}_m^{-1} [z_m - \mathbf{h}_m(\mathbf{X})] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

是观测矢量 z_m 与场内点 \mathbf{X} 处目标响应 $\mathbf{h}_m(\mathbf{X})$ 的标称化距离(欧氏距离)。

3.2 代价函数的选取及虚假定位的消除

对一个可能存在目标的感兴趣区域, 就某一观测站而言, 区域内的每一点都可以得到相对于该观测站的一个方位角, 整个区域内相对于该观测站的方位角组成一个集合, 用 \mathbf{B} 表示。对于观测站测得的每一个方位角 z 而言, $z \in \mathbf{B}$, \mathbf{B} 中的一些方位角是与 z 离得比较“近”的, 一些则离得比较“远”。在对目标进行定位的过程中, 就需要对 \mathbf{B} 中的方位角进行处理, 使得与 z 离得比较“近”的方位角信息对定位结果的“贡献”大, 使与 z 离得比较“远”的方位角信息对定位结果的“贡献”小。

设方位角测量误差的均值为零, 标准差为 σ_θ 。对某一观测站得到的每一个方位角 z , 式(8)可以写为:

$$d(z, \mathbf{h}(\mathbf{X})) = |(z - \mathbf{h}(\mathbf{X})) / \sigma_\theta| \quad (9)$$

其中 $|\cdot|$ 表示取绝对值, 且

$$h(\mathbf{X}) = \begin{cases} \text{Arctg}\left(\frac{y_p - y}{x_p - x}\right), & x_p \neq x \\ \pi/2, & x_p = x \end{cases}$$

$h(\mathbf{X})$ 表示区域 \mathbf{X} 内任意一点 (x, y) 对应于观测站 (x_p, y_p) 的方位角。则代价函数可以定义如下:

$$C[d] = \begin{cases} d^2/2, & d < \gamma \\ \gamma^2/2, & d \geq \gamma \end{cases} \quad (10)$$

其中, γ 为一门限。

在多站测向定位系统中, 当存在多个辐射源目标时, 会存在大量的虚假定位。如果不对它们进行处理就无法得到目标的坐标。由于式(10)代价函数的选取, 在一定程度上突出了有价值信息 $(|z - \mathbf{h}(\mathbf{X})| < \gamma \sigma_\theta)$ 对定位结果的“贡献”, 对不可靠的或者价值小的信息的“贡献”进行了弱化, 能有效地解决传统测向定位法中存在虚假定位的问题。为了进一步说明这一点, 假设测量误差服从正态分布, 则 γ 宜取3, 根据正态分布的特性, 能够较好地提取有用信息, 后面的仿真实验也验证了这一点。

3.3 处理流程

运用位置信息场定位法对不可区分的多个同类辐射源目标进行定位的基本处理流程可以总结如下:

①获得 M 次测量的方位角数据 $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_M]^T$;

②在区域 \mathbf{X} 内设置网格点 $\mathbf{X}_E(i), i=1, 2, \dots, I$, 其中 i 表示第 i 个网格点;

③根据代价函数计算 $f_X(\mathbf{X}_E(i)/\mathbf{Z}), i=1, 2, \dots, I$;

④通过比较搜索寻找使 $f_X(\mathbf{X}_E(i)/\mathbf{Z})$ 极大的 $i=i_0$, 令 $\hat{\mathbf{X}}_E = \mathbf{X}_E(i_0)$, 极大值的个数表示目标的个数, 极大值对应的位置即是目标的位置。

通过上述四个步骤可以实现对不可区分的多个同类辐射源目标数目和位置同时确定。

4 仿真实验

4.1 三站对两个目标测向定位

假设三个观测站的位置分别为 $(0, 0)$ km, $(50, 0)$ km 和 $(100, 0)$ km, 两个同类辐射源的位置分别为 $(40, 70)$ km 和 $(60, 70)$ km, 当不存在噪声时, 每个观测站可以得到关于目标的2个方位角信息, 共6个方位角信息, 对这6个方位角信息加上均值为零, 标准差 σ_θ 分别为1度和0.5度的高斯噪声。假设这些数据是不可区分的, 没有办法分辨这些方位角数据是来源于一个辐射源的或两个辐射源的或更多辐射源的。

得到的6条测向定位线如图1所示, 图1对应的位置信息场定位图如图2所示。通过图1可以看出定位线的交点有多个, 无法直接估计出目标的个数及位置, 这在 $\sigma_\theta=1$ 度时尤为明显。通过图2可以看出目标的个数为2, 当 $\sigma_\theta=1$ 度时, 估计的目标位置分别为 $(40, 70.25)$ km 和 $(59.5, 71.25)$ km; 当 $\sigma_\theta=0.5$ 度时, 估计的目标位置分别为 $(39.75, 71)$ km 和 $(59.5, 70.25)$ km。

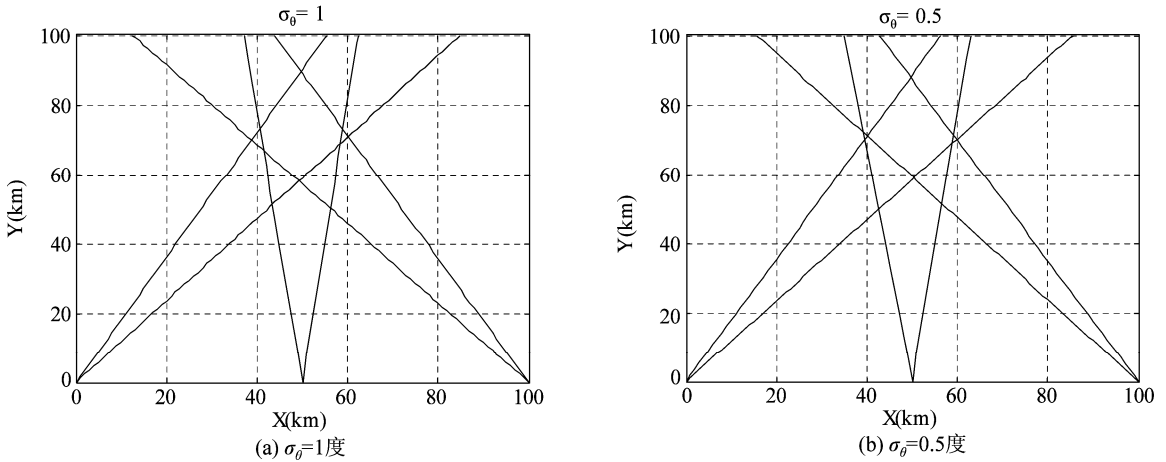


图1 三站两目标测向定位线

Fig. 1 the direction-finding positioning line of two goals with three stations

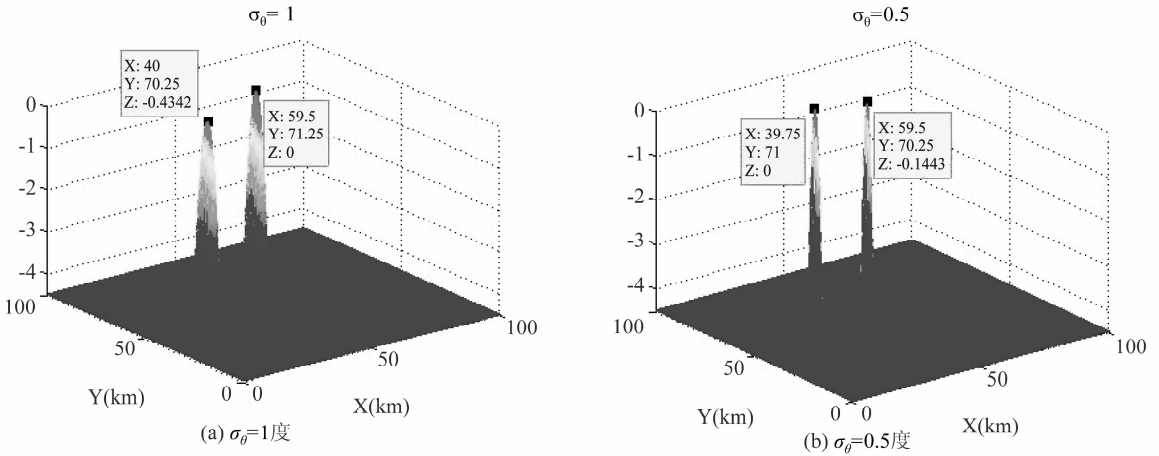


图2 图1 对应的位置信息场定位图

Fig. 2 the position information field location figure corresponding to figure 1

仿真条件不变, $N=1000$ 次独立重复实验得到的统计结果如表 1 所示。对某个目标而言, 表中均值为 N 次独立重复实验得到的该目标位置的估计值的平均值, 方差为:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(\hat{x}_{E,n} - x_E)^2 + (\hat{y}_{E,n} - y_E)^2] \quad (11)$$

其中, $(\hat{x}_{E,n}, \hat{y}_{E,n})$ 为第 n 次独立重复实验该目标的位置估计值, $n=1, 2, \dots, N$ 。

表1 三站对两个目标定位结果统计表

Tab. 1 positioning results tables of two targets with three stations

目标	目标 1		目标 2	
	$\sigma_\theta=1$ 度	$\sigma_\theta=0.5$ 度	$\sigma_\theta=1$ 度	$\sigma_\theta=0.5$ 度
均值(km)	(40.03, 69.92)	(39.94, 70.04)	(60.03, 69.95)	(60.02, 69.97)
方差(km ²)	4.05	0.97	4.47	1.10

4.2 三站对三个目标测向定位

三个观测站的位置同 4.1, 增加一个位于(85,55) km 处的同类辐射源, 当不存在噪声时, 每个观测站可以得到关于目标的 3 个方位角数据, 共 9 个方位角数据, 用这 9 个方位角信息加上均值为零, 标准差 σ_θ 分别为 1 度和 0.5 度的高斯噪声, 假设这些数据不可区分。

得到的 9 条测向定位线如图 3 所示, 图 3 的位置信息场定位效果图如图 4 所示。通过图 3 可以看出定位线的交点有很多个, 无法直接估计出目标的个数及位置, 这在 $\sigma_\theta=1$ 度时尤为明显。通过图 2 可以看出目标的个数为 3, 当 $\sigma_\theta=1$ 度时, 估计的目标位置分别为 (40.25, 72.75) km、(59.75, 73.25) km 和 (85.50, 56.00) km。当 $\sigma_\theta=0.5$ 度时, 估计的目标位置分别为 (39.75, 69.00) km、(59.75, 70.25) km 和 (85.50, 55.25) km。

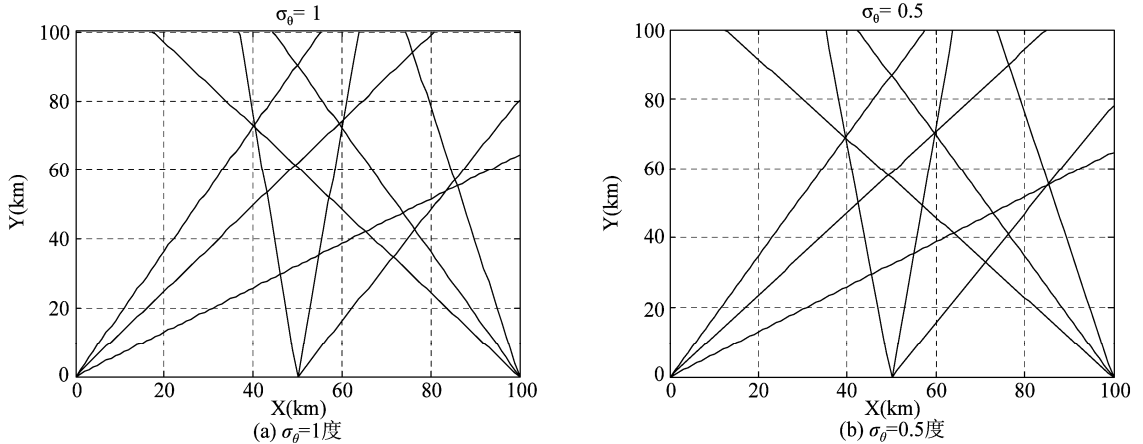


图 3 三站三目标测向定位线

Fig. 3 the direction-finding positioning line of three goals with three stations

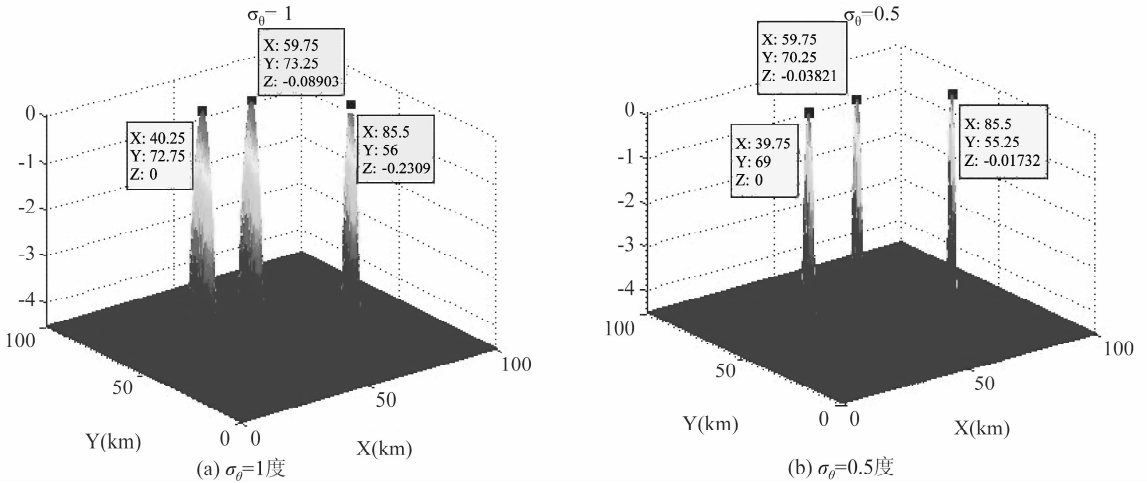


图 4 图 3 对应的位置信息场定位图

Fig. 4 the position information field location figure corresponding to figure 3

表 2 三站对三个目标定位结果统计表

Tab. 2 positioning results tables of three targets with three stations

目标 \ 统计量	目标 1		目标 2		目标 3	
	$\sigma_\theta = 1$ 度	$\sigma_\theta = 0.5$ 度	$\sigma_\theta = 1$ 度	$\sigma_\theta = 0.5$ 度	$\sigma_\theta = 1$ 度	$\sigma_\theta = 0.5$ 度
均值 (km)	(40.05, 69.93)	(40.03, 70.04)	(60.17, 69.82)	(60.02, 70.11)	(84.55, 54.50)	(84.89, 54.91)
方差 (km^2)	4.48	1.82	14.01	3.77	10.74	3.39

1000 次独立重复实验取平均得到的统计结果如表 2 所示。

通过 4.1 和 4.2 的仿真实验,说明运用位置信息场定位法可以实现对多个不可区分的同类辐射源目标数目和位置同时确定,能够有效地抑制虚假定位的现象,且测向精度越高,定位精度相对越高。

5 总结

针对不可区分的多个同类辐射源定位的问题,由

于很难分辨某个测量参数是关于某个确定目标的,不能确定辐射源的数目,现有的方法也就无法获得辐射源目标的位置信息。为了解决这一问题,本文将位置信息场定位法应用于测向定位系统中,通过代价函数的选取,解决了对不可区分的多个同类辐射源定位问题,能够同时确定辐射源目标的数目和位置。仿真实验用三个观测站分别对不可区分的两个和三个同类辐射源进行了定位,通过观察测向定位线会发现有很多交点,无法确定目标的数目和位置,但通过位置信息场

定位法能够同时确定目标数目和目标的位置,且能够解决虚假定位问题。本文所采用的目标位置的计算方法为网格搜索法,虽然算法简单且能得到较直观的图形效果,但计算量较大,且需要提供冗余的观测站等信息,实际应用中可以采用两步网格搜索法、拟合法等方法克服这一缺点,或者使用位置信息场定位法确定多个目标的初始位置,然后通过迭代法进一步求解其精确估计位置。

参考文献

- [1] Xiu J J, He Y, Wang G H, et al. Constellation of multi-sensors in bearing-only location system [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 215-218.
- [2] Chan Y T, Ho K C. Joint time-scale and TDOA estimation: analysis and fast approximation [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(8):2625-2630.
- [3] Huang Z, Jiang W, Zhou Y. Application of the multi-cycle estimator of Doppler and TDOA for passively locating targets exploiting non-co-operative transmitters [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(10):756-760.
- [4] Li Zong-hua, Feng Dao-wang, Sun Zhong-kang, et al. Passive location using time of arrival along with direction of arrival and its changing rate [C]. 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, Changsha, China, 2003, 261-265.
- [5] 贾兴江,周一宇,郭福成. 多运动站测角频差无源定位方法研究 [J]. 国防科技大学学报, 2011, 31(1): 76-80.
Jia X J, Zhou Y Y, Guo F C. Research on multiple moving observers passive localization with DOA and FDOA measurements [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 31(1):76-80. (in Chinese)
- [6] Huang Z, Jiang W, Zhou Y. Application of the multi-cycle estimator of doppler and TDOA for passively locating targets exploiting non-co-operative transmitters [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(10):756-760.
- [7] 冯富强,尹成友,陈鹏举. 一种消除虚假定位目标的方法 [J]. 现代雷达, 2002, 24(3):45-47.
Feng F Q, Yin C Y, Chen P J. A way of "ghost" location cancellation [J]. Modern Radar, 2002, 24(3):45-47. (in Chinese)
- [8] Amar A., Weiss A. J. Localization of narrowband radio emitters based on doppler frequency shifts [J]. IEEE Trans. Signal Process., Nov. 2008, 56(11):5500-5508.
- [9] Weiss A. J. Direct geolocation of wideband emitters based on delay and doppler [J]. IEEE Trans. Signal Process., Jun. 2011, 59(6):2513-2521.
- [10] 罗景青. 目标位置信息场分析定位法 [J]. 电子工程学院学报, 2012, 31(2):1-4.
Luo J Q. Targets localization by information field analysis [J]. Journal of Electronic Engineering Institute, 2012, 31(2):1-4. (in Chinese)

作者简介



马贤同(1987-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为空间信息处理理论与技术。

E-mail:mxtzhy@foxmail.com



罗景青(1957-),男,教授,博士生导师,研究方向为空间信息处理、阵列信号处理、电子对抗信息处理。

E-mail:luojingqing001@163.com



张奎(1986-),男,河南项城人,博士研究生,主要研究方向为无源定位技术。