

## 基于旋转干涉仪模糊相位差的多假设 NLS 定位算法

李 腾\* 郭福成 姜文利

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要:** 针对传统长基线干涉仪(LBI)定位系统通常需要多个接收通道的缺点, 该文提出了一种基于旋转 LBI 模糊相位差的定位新体制, 最少只需两个接收通道即可实现快速、高精度、无模糊定位。针对相位差模糊导致的强非线性问题, 提出了一种多假设非线性最小二乘定位算法, 给出了算法的实现流程, 从理论上分析了子区域宽度的选择依据。该算法计算量小、解定位模糊的能力强, 定位精度能够达到克拉美罗下限(CRLB)。计算机仿真实验验证了该文定位体制的可行性以及算法性能的优越性。

**关键词:** 无源定位; 干涉仪; 相位差; 模糊

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0956-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00699

## Multiple Hypothesis NLS Location Algorithm Based on Ambiguous Phase Difference Measured by a Rotating Interferometer

Li Teng Guo Fu-cheng Jiang Wen-li

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** To cope with the disadvantage that many receiving channels will be needed in traditional Long Baseline Interferometer (LBI) localization system, a novel emitter localization method using ambiguous phase difference measurements by a rotating LBI is proposed. High localization precision can be achieved in a short observing period with no localization ambiguity, and the amount of receiving channels can be reduced to two. To cope with the strong nonlinear problem caused by the phase difference ambiguity, a multiple hypothesis nonlinear least square localization algorithm is proposed. Flow of the algorithm is presented. The algorithm has some advantages, such as small computation burden and strong ability on resolving localization ambiguity. Moreover, localization precision of the algorithm can approach Cramer-Rao lower bound. Feasibility of the localization method and performance of the localization algorithm are validated through computer simulations.

**Key words:** Emitter localization; Interferometer; Phase difference; Ambiguity

### 1 引言

对非合作辐射源的无源定位技术在电子侦察、预警探测等领域具有重要应用价值, 受到广泛关注和研究<sup>[1-14]</sup>。利用长基线相位干涉仪可以得到高精度的角度信息, 且干涉仪测角对信号形式的适应能力较强, 因此基于干涉仪的单站无源定位技术越来越引起人们的重视<sup>[4-14]</sup>。传统的干涉仪测角定位方法通常需要多基线解模糊<sup>[15]</sup>, 因此系统复杂、设备量大且成本高昂。近年来, 基于短基线测角结合长基线测相位差变化率的定位方法得到深入研究<sup>[7-9]</sup>, 该方法在利用长基线性能增益的同时可以减少硬件设备量, 但是对信号的连续性以及观测平台姿态的控制和测量都有较高要求, 即要保证能够获得高精度的相位差变化率和姿态变化率信息。

从信息利用的角度看, 通过相位差估计相位差

变化率再进行定位并不会增加新的信息, 反而会因为估计模型的失真而引入误差, 而直接利用原始的相位差信息应该能够得到更好的定位性能。事实上, 文献[10-13]的研究成果已经表明了直接利用长基线干涉仪(LBI)模糊相位差定位的可行性, 其基本思想是利用观测平台与目标之间的相对运动消除定位模糊, 但是通常需要较长的时间才能实现无模糊定位。

本文针对高空或天基观测平台对地面辐射源定位问题, 提出了基于旋转 LBI 模糊相位差的定位体制, 最少只需两个接收通道即可实现快速无模糊定位。首先建立了干涉仪模糊相位差的数学模型, 分析了利用干涉仪旋转解定位模糊的基本原理, 然后针对相位差周期模糊带来的强非线性问题, 提出了一种多假设非线性最小二乘(Multiple Hypothesis Nonlinear Least Square, MH-NLS)定位算法, 从理论上分析了子区域宽度的选择依据, 最后在卫星应用场景下通过多个计算机仿真实验对本文提出的定位体制和算法进行了检验。

## 2 旋转干涉仪模糊相位差定位方法

### 2.1 数学模型

如图 1 所示, 在直角坐标系  $o-xyz$  中,  $T$  为位置固定的目标辐射源,  $S_1$  和  $S_2$  为安装在观测器上的两个接收天线, 构成 1 维 LBI (干涉仪长度远大于目标信号波长), 且在一个平面内以角速度  $\omega$  绕干涉仪中心点  $S$  转动, 利用干涉仪测量得到的相位差对观测平台下方的目标辐射源定位。干涉仪长度为  $d$ , 目标信号波长为  $\lambda$ ,  $\eta = d/\lambda$  表示基线波长比。

用  $\mathbf{x}_T$  表示目标位置矢量。在  $m$  时刻, 观测器位置矢量为  $\mathbf{x}_{O,m}$ , 干涉仪基线单位矢量为  $\mathbf{b}_m$ , 则可以得到  $m$  时刻干涉仪的相位差为

$$\phi_m = g_m(\mathbf{x}_T) + \varepsilon_m \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_m$  为相位差测量误差,

$$g_m(\mathbf{x}) = 2\pi\eta[\mathbf{u}_m(\mathbf{x})]^T \mathbf{b}_m \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_m(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_{O,m}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{O,m}\|} \quad (3)$$

其中  $\|\bullet\|$  表示取矢量的长度。

由于没有解模糊的中间基线, 所以实际只能测量得到处于主值区间  $(-\pi, \pi)$  内的相位差  $\phi_m^a$ , 可表示为

$$\phi_m^a = \text{mod}_{2\pi}(\phi_m) \quad (4)$$

其中, 右上标  $(\bullet)^a$  表示“模糊”,  $\text{mod}_{2\pi}(\bullet)$  表示取  $2\pi$  的模。

由于  $d \gg \lambda$ ,  $\phi_m^a$  相对于  $\phi_m$  存在未知的整周期模糊, 因此称式(4)为模糊相位差观测方程。旋转 LBI 模糊相位差定位, 即通过 LBI 旋转过程中多次测量的模糊相位差结合观测器位置、姿态等信息, 实现对目标位置的估计。

### 2.2 利用 LBI 旋转解定位模糊的原理

LBI 测量得到的模糊相位差对应多个可能的无模糊相位差, 而每个无模糊相位差对应一个以干涉仪基线为轴, 以该相位差对应的信号入射角为半顶角的圆锥面, 如图 2 所示, 但是只有一个为目标所

在的圆锥面, 在图 2 中用实线表示。根据模糊周期数的不同可能有多个圆锥面, 图中画出 3 个只是一个示意。在实际中, 目标的位置通常满足一定的约束条件, 例如对地面目标定位时目标位置满足地球表面约束方程, 在本文的分析中假设目标位于  $xoy$  平面上。单次观测得到的多个圆锥面与  $xoy$  平面上的观测区域相交将得到多条定位线, 如图 3 所示, 其中只有一条为真实定位线, 其他为模糊定位线。

在干涉仪转动过程中经过 3 次或 3 次以上观测时, 每次观测对应的真实定位线总是相交于目标位置处, 而模糊定位线无法形成稳定的交点, 因此利用多次观测的模糊相位差可以实现无模糊定位。相对于文献[10-13]中利用观测器与目标之间的相对运动解定位模糊的方法, 干涉仪的转动可以使得各次观测的定位线之间在短时间内产生较大差异, 从而可以加速定位解模糊的过程, 这就是采用旋转干涉仪进行定位的重要原因。

由于最少只需要两个接收通道, 所以相对于传统的 LBI 定位体制, 该体制能够大大减少侦察系统的硬件设备量和复杂度, 降低对观测平台相关支撑条件的要求, 并且仍然能够利用长基线带来的性能

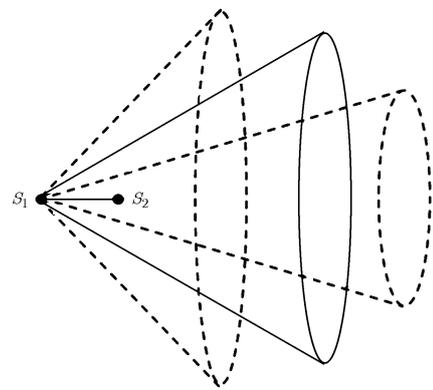


图 2 模糊相位差对应的圆锥面示意图

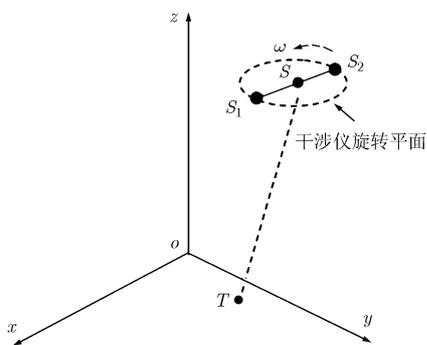


图 1 旋转 LBI 定位示意图

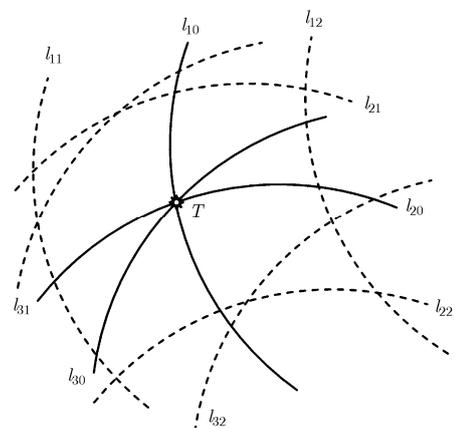


图 3 3 次观测的定位线相交情况示意图

增益, 适合应用在空中侦察平台或卫星平台上对地面或低空目标定位。

### 2.3 相关函数特性

假设共有  $M$  次相位差观测, 各次观测误差为零均值的独立同分布高斯白噪声。令  $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_M]^T$ ,  $\phi^a = [\phi_1^a, \dots, \phi_M^a]^T$ 。对于观测区域内的任意一点  $\mathbf{x}$ , 可建立其关于  $\phi$  的相关函数(负代价函数)

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M C_m(\mathbf{x}) = -\sum_{m=1}^M [\phi_m - g_m(\mathbf{x})]^2 \quad (5)$$

在实际中只能测量得到  $\phi^a$ , 考虑到相位差的周期模糊效应, 可建立  $\mathbf{x}$  关于  $\phi^a$  的相关函数

$$C^a(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M C_m^a(\mathbf{x}) = -\sum_{m=1}^M [\text{mod}_{2\pi}(\phi_m^a - g_m(\mathbf{x}))]^2 \quad (6)$$

由于

$$\text{mod}_{2\pi}(\phi_m^a - g_m(\mathbf{x})) = \text{mod}_{2\pi}(\phi_m - g_m(\mathbf{x})) \quad (7)$$

所以虽然  $C_m(\mathbf{x})$  的分布具有“单脊”特性, 如图 4 所示, 但是相位差周期模糊效应引起的  $\text{mod}_{2\pi}(\cdot)$  运算将使得  $C_m^a(\mathbf{x})$  的分布呈现出“多脊”特性, 如图 5 所示, 相应地,  $C(\mathbf{x})$  和  $C^a(\mathbf{x})$  的分布分别呈现出较明显的单峰和多峰特性, 如图 6 和图 7 所示。

图 4-图 7 给出的是干涉仪以 1 转/s 的速度转动时, 单次和 5 次观测(观测间隔 0.2 s)的无模糊相位差和模糊相位差的归一化相关函数分布。其中的数据在卫星平台应用背景下生成, 卫星轨道高度 600 km, 目标的经度、纬度均为  $0^\circ$ , 且位于初始时刻星下点。干涉仪基线长 0.5 m, 目标信号频率 3 GHz。

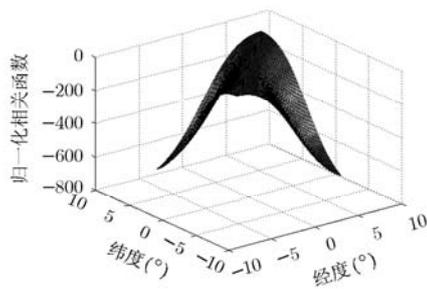


图 4 无模糊相位差单次观测的归一化相关函数分布

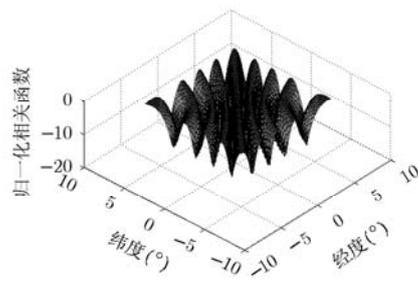


图 5 模糊相位差单次观测的归一化相关函数分布

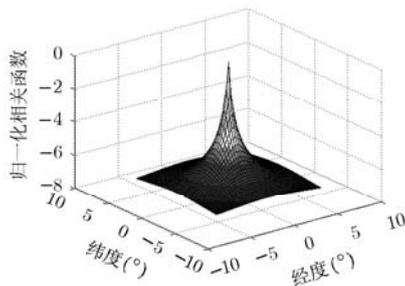


图 6 无模糊相位差多次观测的归一化相关函数分布

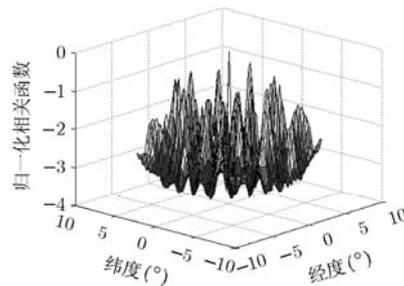


图 7 模糊相位差多次观测的归一化相关函数分布

从图 7 可以看出, 模糊相位差多次观测的相关函数存在大量的局部极值, 因此对于非线性最小二乘(NLS)、扩展卡尔曼滤波(EKF)等常用算法, 当初值选取不当时很容易收敛到局部极值上, 从而得不到全局最优解, 导致定位模糊, EKF 存在潜在的滤波发散问题, 因此其对于初值的要求比基于批处理的非线性最小二乘算法更高; 基于网络的准最大似然方法(网格法)<sup>[16,17]</sup>虽然具有多峰情况下的全局寻优能力, 但是往往需要将网格划分得足够小才能得到较好的结果, 这样需要消耗大量的计算和存储资源; 近年来, 基于粒子群优化(PSO)<sup>[18-20]</sup>的群智能算法在非线形估计领域获得了广泛应用, PSO 方法具有一定的全局寻优能力, 但是由于是基于随机搜索策略, 所以其全局寻优能力并不是十分可靠, 特别是当目标函数存在大量局部极值时, 其难以搜索到全局最优。

### 3 多假设非线性最小二乘(MH-NLS)定位算法

根据上文分析, 在目标所在的区域内, 多次观测的模糊相位差的相关函数分布通常具有多个峰值, 主峰对应目标位置解。若采用 NLS 算法直接进行目标位置估计, 当初始点不在主峰附近时, 很容易收敛到局部极值, 导致定位模糊, 而在没有其他辅助测量的情况下通常无法获得足够准确的目标位置先验信息。MH-NLS 算法的基本思想是, 在目标区域内选择多个初始点, 起始多个 NLS 估计器同时

进行定位解算，只要有一个初始点落在相关函数的  
主峰内，其对应的估计器将迭代收敛到全局最优，  
那么具有最大相关函数值的估计器的输出结果即为  
定位结果。

### 3.1 算法步骤

#### 步骤 1 定位初始化

将观测区域均匀划分为  $N$  个子区域，对于第  
 $n(n = 1, \dots, N)$  个子区域，取其中心点  $\hat{\mathbf{x}}_{1,n}$  作为第  $n$   
个 NLS 估计器的初始值；设置迭代终止条件  $\xi$  以及  
最大迭代步数  $K$ 。

#### 步骤 2 对每个初始点分别进行 NLS 迭代计算

第  $n$  个估计器的迭代过程如下：

(1) 令  $k = 1$ ；

(2) 将  $C^a(\hat{\mathbf{x}}_{k,n})$  在  $\hat{\mathbf{x}}_{k,n}$  处 Taylor 展开并保留一阶  
近似项，按照线性最小二乘估计可得

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1,n} = \hat{\mathbf{x}}_{k,n} + (\mathbf{A}_{k,n}^T \mathbf{A}_{k,n})^{-1} \mathbf{A}_{k,n}^T \mathbf{v}_{k,n} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{v}_{k,n} = \text{mod}_{2\pi}(\boldsymbol{\phi}^a - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_{k,n})) \quad (9)$$

$$\mathbf{g}(\cdot) = [g_1(\cdot), \dots, g_M(\cdot)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_{k,n} = \frac{\partial \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_{k,n})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k,n}} \quad (11)$$

更新该估计器的相关函数值

$$\text{Cost}(n) = -\mathbf{v}_{k,n}^T \mathbf{v}_{k,n} \quad (12)$$

(3) 如果  $\|\hat{\mathbf{x}}_{k+1,n} - \hat{\mathbf{x}}_{k,n}\| < \xi$  或  $k = K$ ，该估计器  
的迭代过程结束并记录其输出  $\hat{\mathbf{x}}(n) = \hat{\mathbf{x}}_{k,n}$ ；否则，  
 $k = k + 1$ ，转(2)。

#### 步骤 3 输出定位结果

(1) 查找相关函数值最大的估计器

$$n_1 : \text{Cost}(n_1) = \max_{N \geq n \geq 1} \text{Cost}(n) \quad (13)$$

(2) 最终定位结果

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{NLS}} = \hat{\mathbf{x}}(n_1) \quad (14)$$

### 3.2 子区域的划分

从 3.1 节中的算法流程可以看出，如果子区域  
的划分过于密集，则估计器个数很多，计算量将很  
大；如果子区域的划分过于稀疏，则可能没有初始  
点位于相关函数的主峰内，从而可能导致没有一个  
估计器收敛到全局最优，因此子区域的划分应该在  
保证至少有一个初始点位于主峰内的前提下，尽量  
稀疏以减小计算量。

对于任意一次观测，过干涉仪基线与目标视线  
的平面与  $xoy$  平面相交可得到一条直线，该次观  
测的相关函数沿着该直线变化最快，不妨称之为梯  
度线。梯度线与真实定位线相交于目标位置处，与  
各条模糊定位线也都存在一个交点，如图 8 所示， $T$

为目标位置， $T_1$  和  $T_2$  分别为梯度线与真实定位线  
两侧最近的两条模糊定位线的交点。该次观测的  
相关函数在梯度线上的变化规律可用图 9 所示的  
曲线来描述，相关函数分别在  $T, T_1$  和  $T_2$  达到  
最大值，而在  $T$  和  $T_1$  以及  $T$  和  $T_2$  之间分别  
存在一个最小值点  $B_1$  和  $B_2$ 。

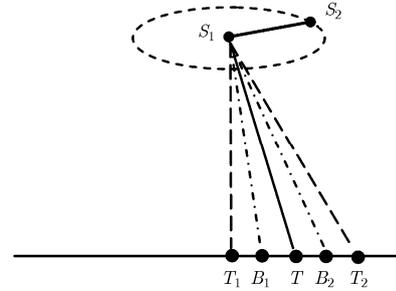


图 8 梯度线与定位线相交示意图

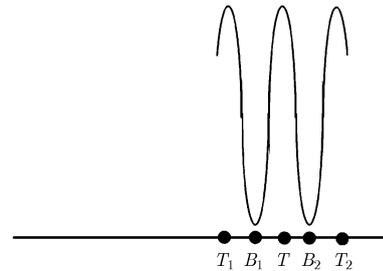


图 9 梯度线上的单次观测相关函数示意图

假设干涉仪基线方向  $\overline{S_1 S_2}$  与目标视线方向  $\overline{S_1 T}$   
之间的夹角为  $\theta$ ， $\overline{S_1 T}$  与  $\overline{S_1 B_1}$  的夹角以及  $\overline{S_1 T}$  与  
 $\overline{S_1 B_2}$  的夹角分别为  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$ ，则根据模糊相位差  
方程的特性可得

$$2\pi\eta \cos(\theta + \Delta\theta_1) = 2\pi\eta \cos\theta - \pi \quad (15)$$

$$2\pi\eta \cos(\theta - \Delta\theta_2) = 2\pi\eta \cos\theta + \pi \quad (16)$$

将式(15)和式(16)分别在  $\theta$  处 Taylor 展开，保留一  
阶近似项可得

$$\Delta\theta_1 \approx \Delta\theta_2 \approx 1/(2\eta \sin\theta) \quad (17)$$

则圆弧  $TB_1$  和  $TB_2$  的长度  $|TB_1|$  和  $|TB_2|$  为

$$|TB_1| \approx |TB_2| \approx |S_1 T| / (2\eta \sin\theta) \quad (18)$$

其中  $|\cdot|$  表示线段的长度。假设观测器此时高度为  $h$ ，  
则当目标位于观测器正下方时， $|S_1 T|$  达到最小值  $h$ ，  
 $\sin\theta$  达到最大值 1，因此式(18)达到最小，即

$$|TB_1|_{\min} \approx |TB_2|_{\min} \approx h / (2\eta) = R_{\min} \quad (19)$$

根据上面的分析可以得出，对于观测区域中的  
一点  $A$ ，若与目标  $T$  的距离小于  $R_{\min}$ ，则其处于各  
个单次观测的相关函数的主峰内，从而必然处于  $M$   
次观测的相关函数  $C^a(\mathbf{x})$  的主峰内。

在没有先验信息的情况下,通常将观测区域均匀划分为多个方形子区域,并取各个子区域的中心点为各个估计器的初始值。一种极端的情况可以用图10来描述,图中圆形区域的圆心为目标位置,半径为 $R_{\min}$ ,那么该区域处于 $C^a(\mathbf{x})$ 的主峰内,当方形子区域的宽度为 $\sqrt{2}R_{\min}$ 时,只有在图示的极端情况下, $T$ 附近的4个子区域的中心 $C_1 \sim C_4$ 刚好都落在圆形区域的边缘上,否则至少有一个子区域的中心落在圆形区域内。

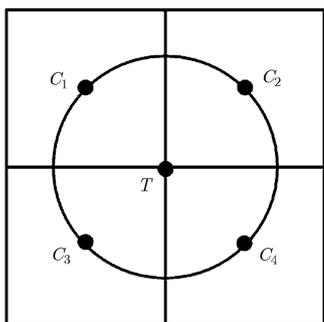


图10 子区域划分时一种极端情况示意图

因此,为了保证对观测区域内任何位置的目标至少有一个估计器的初始值落在 $C^a(\mathbf{x})$ 的主峰内,子区域的宽度 $W$ 应该满足

$$W \leq W_{\min} = h / (\sqrt{2}\eta) \quad (20)$$

$W_{\min}$ 反比于基线波长比 $\eta$ ,正比于观测器高度 $h$ ,因此,基线波长比越大或观测器高度越低,子区域的宽度就必须越小,即子区域的划分就必须越密集,反之子区域的划分就可以越稀疏。

需要说明的是,对地面目标定位时,观测区域实际上是曲面而不是平面,各个子区域也是近似方形的小曲面,因此上面的分析结果会产生细微的偏差,但是该偏差对于选择合适的宽度以进行子区域划分而言通常是可以忽略的。

#### 4 仿真实验

本节通过卫星平台应用背景下的计算机仿真实验对本文提出的定位方法的可行性、定位算法的性能以及相关分析结果进行检验。在仿真中认为目标位于地球面。

仿真场景:卫星沿赤道圆轨道运行,轨道高度600 km,目标信号频率3 GHz,干涉仪基线长度1 m、旋转速度1转/s,总的观测时间1 s,相位差观测数据率20 Hz。在本节的所有仿真中蒙特卡罗次数均为100次。

利用该仿真场景中的参数,根据式(20)可得 $W_{\min} = 42.4$  km。

#### 4.1 算法定位精度仿真

对于模糊相位差定位而言,如果能够消除定位模糊,则其定位的理论精度应该与利用无模糊相位差的理论定位精度相同。设置目标经度、纬度分别偏离初始时刻星下点 $2.2^\circ, 3.5^\circ$ ,相位差测量误差为零均值高斯白噪声。在不同的测量误差情况下,将本文算法的定位误差与无模糊相位差定位误差的克拉美罗下限(CRLB)进行比较,得到的结果如图11所示,图中横坐标为相位差测量误差的均方根,本文算法的定位误差取各次仿真定位误差的均方根。仿真中子区域宽度取 $W = W_{\min}$ ,CRLB的推导略。

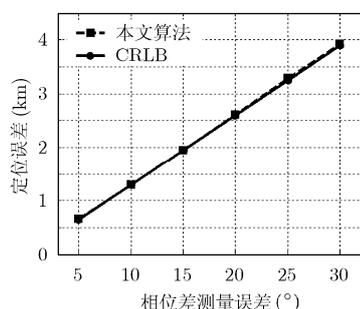


图11 不同误差情况下的定位精度

从图11可以看出,在不同的测量误差情况下,本文算法的定位精度都十分接近相应的无模糊相位差定位误差的CRLB,说明本文算法能够达到接近最优的定位精度,同时也证实了利用旋转干涉仪模糊相位差可以实现快速高精度的无模糊定位。

#### 4.2 子区域宽度的影响

为了检验3.2节中关于子区域宽度分析结论的正确性,设计4种不同的仿真情况,其中相位差测量误差都为均方根 $10^\circ$ 的零均值高斯白噪声。

情况1 目标位于初始时刻星下点,以 $W_{\min}$ 为子区域宽度,按照3.2节中的极端情况划分子区域。

情况2 目标位于初始时刻星下点,将子区域宽度减小为 $0.5W_{\min}$ (21.2 km)。

情况3 目标位于初始时刻星下点,子区域宽度扩大为 $1.2W_{\min}$ (51 km),子区域的划分使得没有一个起始点落在以目标为中心、以 $R_{\min}$ (30 km)为半径的区域内。

情况4 目标经度、纬度分别偏离初始时刻星下点 $2.2^\circ, 3.5^\circ$ ,子区域的划分与情况3相同。

从情况1的仿真结果可以看出,以 $W_{\min}$ 为宽度划分子区域,即使在最极端的情况下,也能实现完全无模糊定位;比较情况2与情况1的仿真结果可以看出,以小于 $W_{\min}$ 的宽度划分子区域并不能提高定位精度,反而会因为子区域个数增加而增加计算

量,事实上由 4.1 节中的仿真结果可知,以  $W_{\min}$  为宽度划分子区域通常都能得到十分接近 CRLB 的定位精度,所以再减小子区域宽度已无意义;以大于  $W_{\min}$  的宽度划分子区域存在着风险,因为对于某些目标,可能没有一个起始点落在相关函数的主峰内,情况 3 即属于这种情况,此时 100 次仿真中只有 8 次实现了无模糊定位,由于无模糊定位次数太少,得到的定位均方根误差不具有统计意义,因此表 1 中没有给出;情况 4 与情况 3 的子区域宽度相同,其之所以能够完全无模糊定位,是因为目标位置与情况 3 不同,此时恰好有一个起始点落在了相关函数的主峰内。

表 1 不同仿真情况的定位结果

仿真情况	无模糊定位次数	定位均方根误差(km)
情况 1	100	0.750
情况 2	100	0.758
情况 3	8	/
情况 4	100	1.301

从这个仿真实验可以得出结论,为了减小计算量并且保证对观测区域内任意位置的目标完全无模糊定位,子区域的宽度应该选择为  $W_{\min}$ 。

### 4.3 算法性能比较

本仿真将本文算法与网格法以及 PSO 方法的性能进行比较。目标经、纬度分别偏离初始时刻星下点  $2.2^\circ$ ,  $3.5^\circ$ , 相位差测量误差为均方根  $10^\circ$  的零均值高斯白噪声。

表 2 中的 3 种算法都是在 PC 机上用 MATLAB 编程实现,其中的仿真时间不具有绝对意义,与计算机的性能以及 MATLAB 软件的效率等因素有关,但是可以作为各个算法计算效率的一种比较手段。

在表 2 中,本文算法的子区域宽度选择为  $W_{\min}$ ,网格法的网格宽度为本文算法的  $1/4$ ,其定位结果为各个网格点的概率加权,可以看出,虽然网格宽度为  $W_{\min}/4$ ,但是网格法的定位精度依然很差,若要得到更高的精度,需要将网格宽度进一步缩小,这样无疑将需要消耗更大的计算量与存储量;PSO 方法采用文献[19]中的基于惯性权重的 PSO 方法,也称标准 PSO 方法,取粒子数 300 个,由于粒子数较多,算法计算量较大,但是尽管这样,依然不能实现完全无模糊定位,这是因为相关函数存在大量局部极值,PSO 方法难以进行可靠的全局寻优。PSO 方法的定位均方根误差是对 87 次无模糊定位结果进行统计得到的。

从本仿真可以看出,相对于网格法和 PSO 方

表 2 算法性能比较

算法	参量设置	无模糊定位次数	平均单次仿真时间 (s)	定位均方根误差 (km)
本文算法	子区域宽度 $W_{\min}$	100	0.67	1.301
网格法	网格宽度 $W_{\min}/4$	100	19.63	4.795
PSO 方法	粒子个数 300	87	15.15	1.871

法,本文算法能够实现快速高精度且完全无模糊的定位。

## 5 总结

本文提出了一种利用旋转长基线干涉仪模糊相位差的定位体制,该体制最少只两个接收通道即可实现快速、高精度、无模糊定位。相位差周期模糊使得该定位问题的非线性很强,为了进行可靠的定位解算,提出了一种有效的多起始非线性最小二乘定位算法,从理论上分析得出了子区域宽度的选择依据。相对于网格法以及粒子群优化方法,本文算法计算量小、解定位模糊的能力强,并且定位精度能够达到克拉美罗下限,是解决该定位问题的一种优秀算法。

## 参考文献

- [1] Koch D B. Creating a software framework for simulating satellite geolocation[C]. IEEE SouthEast Conference, Nashville, Tennessee, USA, March 17-20, 2011: 180-184.
- [2] Hang Y, Jin K C, and Lei C. Study on location accuracy of Dual-Satellite Geolocation system[C]. IEEE 10th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, Oct. 24-28, 2010: 107-110.
- [3] 徐义, 郭福成, 冯道旺. 一种单星仅测 TOA 无源定位方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 502-508.  
Xu Yi, Guo Fu-cheng, and Feng Dao-wang. A new satellite passive localization method using TOA measurement only[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(2): 502-508.
- [4] 陆安南, 杨小牛. 单星测频测相位差无源定位[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 244-247.  
Lu An-nan and Yang Xiao-niu. Passive location from the combined set of frequency and phase difference measurements by single satellite[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(2): 244-247.
- [5] Groot J S, Dam F A M, and Theil A. Passive emitter location with Doppler frequency and interferometric measurements[C]. Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, Capri, Italy, Sept. 3-5, 2008: 1-6.

- [6] Levanon N. Interferometry against differential Doppler: performance comparison of two emitter location airborne systems[J]. *IEE Proceedings F Radar & Signal Processing*, 1989, 136(2): 70-74.
- [7] 王强. 基于干涉仪体制的运动单平台无源定位技术研究[D]. [博士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [8] 钟丹星. LBI体制运动单平台无源定位关键技术研究[D]. [博士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [9] 许耀伟. 一种快速高精度无源定位方法的研究[D]. [博士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 1998.
- [10] Carlsen E C, Kolanek J C, and Sharpin D L. Airborne very long baseline interferometry and geolocation[C]. Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, Massachusetts, USA, July 12-14, 2006: 334-338.
- [11] Struckman K. Correlation interferometer geolocation[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, New Mexico, USA, July 9-14, 2006: 1141-1144.
- [12] Rose C M. Method for single satellite geolocation of emitters using an ambiguous interferometry array[P]. United States of America, US 7436359B1, 2008.
- [13] Kolanek J and Carlsen E. Precision geolocation system and method using a long baseline interferometer antenna system[P]. United States of America, US 7286085 B2, 2007.
- [14] 李腾, 郭福成, 姜文利. 利用旋转多普勒的单站无源定位性能分析[J]. *宇航学报*, 2010, 31(10): 2388-2394.  
Li Teng, Guo Fu-cheng, and Jiang Wen-li. Performance analysis of passive localization utilizing rotational Doppler-based single observer[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(10): 2388-2394.
- [15] Jacobs E and Ralston E W. Ambiguity resolution in interferometry[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, 17(6): 766-780.
- [16] Laneuville D and Vignal H. Grid based target motion analysis[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, March 3-10, 2007: 1-7.
- [17] Elsaesser D. Sensor data fusion using a probability density grid[C]. 10th International Conference on Information Fusion, Quebec, Que, Canada, July 9-12, 2007: 1-8.
- [18] Ememipour J, Nejad M M S, Ebadzadeh M M, *et al.* Introduce a new inertia weight for particle swarm optimization[C]. ICCIT'09, Seoul, Korea, Nov. 24-26, 2009: 1650-1653.
- [19] Shi Y and Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C]. The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, Anchorage, AK, USA, May 4-9, 1998: 69-73.
- [20] Kennedy J and Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, Nov. 27-Dec. 1, 1995, Vol.4: 1942-1948.
- 李腾: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为无源探测与定位技术、综合电子战技术。
- 郭福成: 男, 1975年生, 副教授, 研究方向为无源探测与定位技术、综合电子战技术。
- 姜文利: 男, 1967年生, 教授, 研究方向为综合电子战技术、空间电子侦察技术。