

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.01.009

引用格式:陆安南,周琦,尤明懿.一种基于统计分析的解定位模糊方法[J].电讯技术,2016,56(1):50-53. [LU Annan,ZHOU Qi,YOU Mingyi. An ambiguity resolution method for emitter localization based on statistical analysis[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(1):50-53.]

一种基于统计分析的解定位模糊方法*

陆安南¹,周琦²,尤明懿^{**2}

(1. 通信信息控制和安全技术重点实验室,浙江 嘉兴 314033;2. 中国电子科技集团公司第三十六研究所,浙江 嘉兴 314033)

摘要:针对相位测量定位系统是否正确解辐射源位置模糊的判别问题,提出了基于相位差拟合误差均值与方差假设检验的统计判断方法,以逐步剔除错误解;对于剩余的正确辐射源位置估计,给出了提高定位精度的统计处理方法和辐射源位置估计的置信椭圆。仿真试验结果表明,提出的解模糊方法能有效降低将错误解判别为正确解的误判比例,定位结果的统计处理方法可以提升定位精度并缩小置信椭圆。所提方法对于促进相位干涉仪系统的实际应用具有积极意义。

关键词:卫星平台;辐射源定位;相位差;解模糊;统计分析法

中图分类号:TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)01-0050-04

An Ambiguity Resolution Method for Emitter Localization Based on Statistical Analysis

LU Annan¹,ZHOU Qi²,YOU Mingyi²

(1. Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaxing 314033, China;
2. No. 36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314033, China)

Abstract: A statistical analysis method of resolving ambiguity for emitter localization based on phase difference is put forward to eliminate false estimations step-by-step, using hypothesis testing of mean and variance of the fitting error of phase difference. Furthermore, for the residual correct estimation, a statistical method for localization accuracy improvement and the confidence ellipse are given. The results of the simulation experiment not only show that the proposed ambiguity resolution method can effectively reduce the probability of misjudging the false solution as the right solution but also verify that the statistical processing method can improve localization accuracy and reduce error ellipse. The proposed method can hopefully advance the practical application of phase interferometer systems.

Key words: satellite platform; emitter localization; phase difference; ambiguity resolution; statistical analysis method

1 引言

由于卫星平台限制和噪声影响,定位系统存在相位差模糊、测向模糊(多个方向无法唯一选择)和错误解模糊(错误选择了一个方向)问题^[1],基于这样的模糊或错误解模糊数据亦可能定位模糊(多个位置无法唯一选择)或错误解定位模糊(错误选择位置,一般远大于测量噪声引起的距离误差)。当前关于无源定位系统解定位模糊的研究集中于多站时差定位方法与各种单站定位方法^[2-3],研究的主

要内容可分为两类:一是如何消除由于定位方程多解性引起的模糊;二是如何消除由于重频信号时差配对模糊、相位差模糊等定位方程输入不确定引起的模糊。

某些情况下,采信错误解定位模糊的结果带来的损失远较放弃正确解定位模糊结果的损失大,但是关于判断解定位模糊是否正确方面的研究尚未见到。鉴于此,本文根据文献[2-3]所述的定位处理方法,研究其是否正确解定位模糊的判别问题,提出

* 收稿日期:2015-07-21;修回日期:2015-09-18 Received date:2015-07-21;Revised date:2015-09-18

** 通信作者:youmingyi@126.com Corresponding author:youmingyi@126.com

基于相位差拟合误差均值与方差假设检验的定位无模糊判断方法,该判断方法的显著性水平(对应于误判风险)可根据不同应用需求灵活优化。基于最小相位差单星无源定位方法的定位结果,在进一步给出在正确解定位模糊的前提下,应用 3σ 处理^[4]提高定位精度的方法和辐射源位置估计的置信椭圆。仿真试验验证了本文提出方法的有效性。

2 定位解模糊显著性判断

最小相位误差定位方法具有单基线定位和一定的解模糊能力,但是存在相位差测量误差和测向基线较长时,辐射源位置和虚假点的相位差拟合误差接近甚至大小颠倒,定位三维图可能有多个峰(均方根误差的倒数),如图 1 中有两个峰,直观上这两个峰高度差异较大,最高峰对应辐射源位置较可信,而图 2 中第二个峰高度接近,此时选择最高峰对应辐射源位置有可能出错,其中图 1 和图 2 中 Z 轴代表定位系统相位差测量误差均方根的倒数,其具体形式可参见文献[2]。

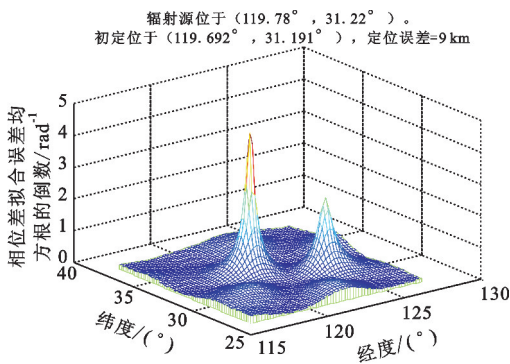


图 1 两峰高度差异较大

Fig. 1 The case of big difference between the optimal solution and the suboptimal solution

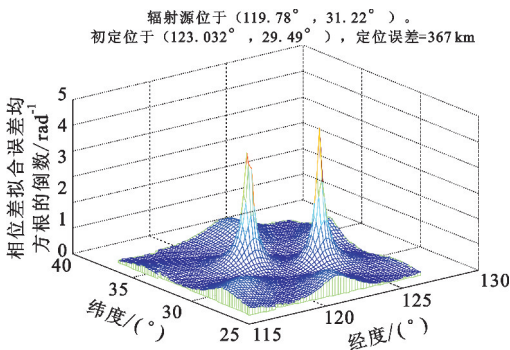


图 2 两峰高度差异接近

Fig. 2 The case of small difference between the optimal solution and the suboptimal solution

考虑到相位差的拟合误差呈独立同分布 $N(0, \sigma^2)$, σ 未知,因此可用以下方法逐步剔除假峰:

- (1)在给定的显著性水平下,用 t 检验法^[5]对各个峰逐一进行相位差的拟合误差的均值是否为零的检验,剔除均值不为零的峰;
- (2)在给定的显著性水平下,用 F 检验法^[5]对相位差的拟合误差的方差是否相等检验,剔除所有与最高峰方差不相等的峰。

通过以上处理后,若仅留下一个峰,则该峰对应真实辐射源位置,否则存在该显著性水平下无法分辨的定位模糊,则此次定位结果不可采信或需引入额外信息消除模糊。

设定位系统对位于 $\boldsymbol{\eta} = (\lambda, \phi)$ 的辐射源进行了 N 次测量,每次测量 L 条基线的相位差,其中 $\boldsymbol{\eta}$ 为辐射源位置矢量, λ, ϕ 分别为辐射源位置的经、纬度。用最小相位误差定位算法初步确定 M 个峰及对应的位置是 $\boldsymbol{\eta}_m = (\lambda_m, \phi_m)$, $m = 1, 2, \dots, M$ 。关于 $\boldsymbol{\eta}_m$ 的相位差的拟合误差 $\xi_{i,1}, \xi_{i,2}, \dots, \xi_{i,L}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 的均值 $\bar{\xi}_m = \frac{1}{NL} \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \xi_{i,l}$ 、方差 $S_m^2 = \frac{1}{NL} \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L (\xi_{i,l} - \bar{\xi}_m)^2$ 和均方根 $\sigma_m = \sqrt{S_m^2 + \bar{\xi}_m^2}$ ($\boldsymbol{\eta}_m$ 的峰值为 $1/\sigma_m$),下面给出具体算法:

- (1)计算 $t_{(NL-1)} = \frac{\bar{\xi}_m}{\frac{S_m}{\sqrt{NL-1}}}$,取显著性水平 α ,查自由度为 $NL-1$ 的 t 分布双侧临界值 t_α ,当 $|t_{(NL-1)}| > t_\alpha$ 时,剔除 $\boldsymbol{\eta}_m, m = 1, 2, \dots, M$;
- (2)再次按峰高度降序排列 $\boldsymbol{\eta}_m$,计算 $F_{(NL-1, NL-1)} = \frac{S_m^2}{S_1^2}$,取显著性水平 α ,查第一自由度和第二自由度均为 $NL-1$ 的 F 分布临界值 $F(\alpha)$,当 $F_{(NL-1, NL-1)} > F(\alpha)$ 时,剔除 $\boldsymbol{\eta}_m$ 。

相位干涉仪测向系统在实际应用中也会产生与最小相位误差定位法相似的问题,即存在测向模糊和错误测向模糊进而导致定位模糊或错误解定位模糊问题。常见的处理方法是使用第 i 次测向得到的所有可能的 k 个方向 $(\alpha_{i,k}, \beta_{i,k})$ 计算示向线与地面的交点 $\mathbf{x}_{i,k} = (\lambda_{i,k}, \phi_{i,k})$,其中 $\alpha_{i,k}, \beta_{i,k}$ 分别为第 i 次测向所得的辐射源方位、俯仰角。然后,用聚类方法选择某个点作为辐射源的位置。该方法也有错选的可能,避免的方法是选择 M 个点 $\boldsymbol{\eta}_m = (\lambda_m, \phi_m)$ 作为辐射源的可能位置,对 $\boldsymbol{\eta}_m$ 用相位差的拟合误差仿前述步骤进行解模糊正确性判断。

3 提高定位精度与定位误差估计

在确定 $\boldsymbol{\eta}_1$ 为辐射源位置的初始估计后,以 $\boldsymbol{\eta}_1$ 为中心,按 3σ 准则剔除 $N_1 = N$ 组相位差中与理论相

位差的差的绝对值大于 3σ 的异常值,为简便假设一组中有一个异常值则整组剔除,留下 N_2 组有效相位差,并用这 N_2 组值在 η_1 附近重新计算辐射源的位置,重复按 3σ 准则剔除异常数据和计算新位置,直到没有新的异常数据剔除为止。最终 N_0 组有效相位差估计的位置 η_0 为辐射源位置的优化估计。

为了便于给出定位置信区,计算辐射源位置的 N_0 次估计。对于测向定位,在一定的条件下可以证明 η 的各次估计 $\eta_i=(\lambda_i,\phi_i)$ 独立且服从高斯分布,其均值为 η_0 。对于最小相位误差定位算法,可以将 N_0 次定位看成以 η_0 为初始位置,用非线性相位差函数线性化后基于最小二乘法的位置估计,不难证明 η 的各次估计 η_i 独立且服从高斯分布。为简便计算,以下假定 N 次定位估计 η_i 独立同分布,均值为 η_0 。以 η_0 为中心,给定置信概率情况下定位误差椭圆计算步骤如下:

(1) 计算

$$S=\frac{1}{N_0-1}\sum_{i=1}^{N_0}(\eta_i-\bar{\eta})^T(\eta_i-\bar{\eta})\triangleq\begin{pmatrix}s_{11}&s_{12}\\s_{21}&s_{22}\end{pmatrix},$$

式中: s_{11} 、 s_{12} 、 s_{21} 、 s_{22} 代表 2×2 矩阵 S 的各个元素;

$$\bar{\eta}=\frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{N_0}\eta_i=(\bar{\lambda};\bar{\phi})=\eta_0;\bar{\lambda},\bar{\phi}\text{ 分别为辐射源位置的}$$

平均经、纬度;

(2) 计算耦合系数 $r=\frac{s_{12}}{\sqrt{s_{11}s_{22}}}$;

(3) 给定概率 P , 计算

$$c=\sqrt{\frac{N_0-1}{N_0}[(1-P)^{\frac{2}{2-N_0}}-1]};$$

(4) 生成置信椭圆

$$\frac{1}{1-r^2}\left[\frac{(\lambda-\bar{\lambda})^2}{s_{11}}-2r\frac{(\lambda-\bar{\lambda})(\phi-\bar{\phi})}{\sqrt{s_{11}s_{22}}}+\frac{(\phi-\bar{\phi})^2}{s_{22}}\right]=c^2;$$

(5) 计算

$$\mu_{1,2}=\sqrt{\frac{1}{2}\left[s_{11}+s_{22}\pm\sqrt{(s_{11}-s_{22})^2+4r^2s_{11}s_{22}}\right]}。$$

那么 $a=c\mu_1$ 和 $b=c\mu_2$ 分别为置信椭圆的长、短半轴,当 $a\approx b$ 时可用 $\sqrt{ab}$ 作为置信概率为 P 的圆概率误差,椭圆的倾角与其主值 $\theta_0=\frac{1}{2}\arctg\left(\frac{2r\sqrt{s_{11}s_{22}}}{s_{11}-s_{22}}\right)$ 和 r 、 $s_{11}-s_{22}$ 的符号有关,见表 1。

表 1 椭圆倾角与 θ_0 和 r 、 $s_{11}-s_{22}$ 的符号关系

Tab. 1 The relationship between obliquity of the confidence ellipse and θ_0 , r , $s_{11}-s_{22}$

r	θ_0		
	$s_{11}<s_{22}$	$s_{11}=s_{22}$	$s_{11}>s_{22}$
<0	$\theta_0-\pi/2$	$-\pi/4$	θ_0
$=0$	$\pi/2$	任意	0
>0	$\theta_0+\pi/2$	$\pi/4$	θ_0

4 仿真分析与验证

以下的仿真和计算中均假定卫星在典型的 500 km 高度的圆形轨道上飞行,地面辐射源的位置不失一般性选取为 $(\lambda_0,\phi_0)=(119.779\ 8^\circ,31.224\ 4^\circ)$;定位系统采用正交基线测量相位差,相位差测量均方根误差 $\sigma_\phi=10^\circ$,基线与波长比为 1.5;显著性水平 $\alpha=0.1$,置信概率 $P=0.9$ 。

对图 1 中的数据进行检验并计算置信椭圆,结果见表 2 和图 3,其中测量时间间隔 $\Delta T=7\text{ s}$,测量次数 $N=17$ 。表 2 中,主峰位置对应于正确的辐射源位置估计,零均值检验未能剔除副峰,但等方差检验剔除了副峰,正确解模糊,定位误差为 9 km。

表 2 定位解模糊显著性判断

Tab. 2 Significance test results for localization ambiguity resolution

检验方法	临界值	测量值	检验结果
零均值检验	1.693	-0.215 000(主峰)	相容
		-0.298 000(副峰)	
等方差检验	1.600	3.932 127	拒绝

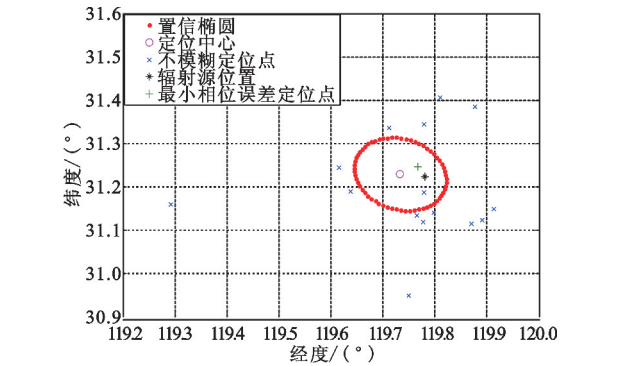


图 3 置信椭圆及定位点

Fig. 3 Confidence ellipse and localization points

对图 2 中的数据进行检验,结果见表 3,其中测量时间间隔 $\Delta T=5\text{ s}$,测量次数 $N=9$ 。表 3 中,主峰位置对应于错误的辐射源位置估计,零均值与等方差检验均未能剔除副峰,无法解模糊,因此正确地拒绝了将距离 367 km 的主峰位置作为辐射源位置估计。

表 3 定位解模糊显著性判断

Tab. 3 Significance test results for localization ambiguity resolution

检验方法	临界值	测量值	检验结果
零均值检验	1.740	0.080 000(主峰)	相容
		0.085 000(副峰)	
等方差检验	1.890	1.424 144	相容

从表 2 和表 3 看出 F 检验起了主要作用。图 3 中的置信椭圆包含了辐射源实际位置,但明显没有包含 50%的不模糊定位点,因此其显著小于传统的 50%误差椭圆。实际中,置信椭圆的缩小将提升后续行动的效率(如打击范围的缩小)。

取显著性水平 $\alpha=0.1$,置信概率 $P=0.9$,对 $\Delta T=5\text{ s}$ 、 $N=17$ 和 $\Delta T=8\text{ s}$ 、 $N=9$ 各进行 50 次蒙特卡罗实验,得到:

(1)正确判别解模糊比例,包括最高峰对应辐射源位置时剔除副峰(简记为真-真)和最高峰对应虚假位置(简记为假-假)时保留副峰两种情况;

(2)最高峰对应虚假位置时剔除副峰比例(简记为假-真);

(3)最高峰对应辐射源位置时保留副峰比例(简记为真-假);

(4)真-真时辐射源落入置信椭圆内的比例(简记为落入椭圆内比例),见表 4 和表 5。

表 4 判别比例与置信比例($\Delta T=5\text{ s}$ 、 $N=17$)

Tab. 4 Judgment ratio and confidence ratio($\Delta T=5\text{ s}$ 、 $N=17$)

情形	解模糊判别比例/%	落入椭圆内比例/%
假-假	无	91
假-真	无	91
真-真	94	91
真-假	6	91

表 5 判别比例与置信比例($\Delta T=8\text{ s}$ 、 $N=9$)

Tab. 5 Judgment ratio and confidence ratio($\Delta T=8\text{ s}$ 、 $N=9$)

情形	解模糊判别比例/%	落入椭圆内比例/%
假-假	100	81
假-真	0	81
真-真	36	81
真-假	64	81

本文所提方法的主要目的是在减小以假为真的判别概率下,提高以真为真的判别概率,表 4 和表 5 表明该方法达到了此目的。

5 结束语

定位系统相位模糊或错误解相位模糊将对正确定位辐射源位置造成影响,简单地采用相位差、角度差或距离差最小化不能保证正确定位,而判断是否正确解模糊的方法尚未见报道。本文提出通过多次测量采用统计方法给出定位结果无模糊的定量判据,可以有效避免错误定位,对定位结果的采信意义重大。给出的定位点邻域包含辐射源位置的概率和几何尺寸也有助于该定位结果的应用。本文的方法对于干

涉仪测向应用的适用性将是有价值的研究方向。

参考文献:

[1] 陆安南. 一种长基线组合二维角测向方法[J]. 数据采集与处理,2012,27(3):385-388.
LU Annan. Direction finding of 2D angle by combination of long baselines[J]. Journal of Data Acquisition & Processing,2012,27(3):385-388. (in Chinese)

[2] 陆安南,杨小牛. 最小相位误差单星无源定位法[J]. 上海航天,2007,34(3):6-9.
LU Annan, YANG Xiaoniu. Passive location with minimizing phase difference error by single satellite[J]. Aerospace Shanghai,2007,24(3):6-9. (in Chinese)

[3] 陆安南. 基于模糊测向结果的单星无源定位法[J]. 电子对抗,2002(3):6-11.
LU Annan. A passive location method using ambiguous direction finding results [J]. Electronic Warfare, 2002 (3):6-11. (in Chinese)

[4] LESLAW R P. Uncertainty ellipses and their application to interval estimation of emitter position[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics,1997,33(1):126-133.

[5] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability and statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



陆安南(1959—),男,江苏江都人,1989 年于华中理工大学获硕士学位,现为研究员,主要研究方向为无线电测向与定位;

LU Annan was born in Jiangdu, Jiangsu Province, in 1959. He received the M. S. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1989. He is now a senior engineer of professor. His research concerns radio direction finding and emitter localization.

周琦(1977—),男,四川眉山人,2000 年于电子科技大学获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为无线电测向与定位;

ZHOU Qi was born in Meishan, Sichuan Province, in 1977. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. He is now a senior engineer. His research concerns radio direction finding and emitter localization.

尤明懿(1984—),男,上海人,2012 年于上海交通大学获工学博士学位,主要研究方向为系统可靠性技术和定位跟踪技术。

YOU Mingyi was born in Shanghai, in 1984. He received the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2012. He is now a senior engineer. His research concerns system reliability, localization and tracking technology.

Email:yumingyi@126.com