

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0016 - 04

数字化宽带测向系统中的概率解模糊算法^{*}

姜勤波¹, 廖平², 王国华¹

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 第二炮兵驻成都地区军事代表室, 成都 610036)

摘要: 为了进一步提高干涉仪的测向精度, 增强对宽带信号的适应能力和扩展系统的工作频率范围, 以实现数字化宽带测向系统, 提出了概率解模糊模型和基于最大后验概率的快速算法。仿真结果表明, 该算法解模糊速度快, 解模糊能力强, 误解模糊概率低, 可广泛运用于干涉仪等需要解相位差模糊的领域。

关键词: 宽带测向系统; 相位差测量; 解模糊; 最大后验概率算法

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.004

An Algorithm for Solving the Phase Difference Ambiguity in Digital Wideband Direction - finding System

JIANG Qin - bo¹, LIAO Ping², WANG Guo - hua¹

(1. The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China;

2. The Second Artillery Military Representative Office for Chengdu Region, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to improve the direction - finding (DF) precision of interferometer, enhance the ability of measuring the wideband signal and expand the working frequency range, and realize a digital wideband DF system, this paper proposes the probability phase difference ambiguity resolution model and fast algorithm based on MAP (Maximum a Posteriori). The simulation result shows the proposed algorithm is featured by fast resolution speed, strong resolution capability and low error resolution probability. It can find wide application in the field where phase difference ambiguity resolution is required.

Key words: direction - finding; phase difference measuring; phase difference ambiguity resolution; MAP algorithm

1 引言

在电子对抗领域中, 辐射源测向是一个基本问题。而干涉仪测向系统是目前精度相对较高的一种测向体制, 因而被广泛使用。干涉仪测向体制的主要优点是精度高和工作频率范围宽, 但目前使用的干涉仪系统还存在不足, 主要包括: 在被动制导等领域中测向精度仍然不够; 对现代雷达使用的宽带脉压信号适应能力有限; 有待进一步提高系统的工作频率范围。

针对上述问题, 本文重点讨论数字化宽带测向

系统中的一个关键技术, 即解相位差模糊技术。为了满足测向精度和宽工作频率范围的要求, 在电子侦察领域使用的都是多基线干涉仪。在多基线干涉仪中, 传统的基线设计^[1]都是保证最短基线满足相位差不模糊, 即保证最短基线小于半波长。这样通过用短基线干涉仪解长基线干涉仪的相位模糊, 从而最终达到解最长基线干涉仪的模糊相位。然而在电子侦察的高频段 (10 ~ 20 GHz), 要实现最短基线不模糊也变得很难实现。所以本文要解决的是在所有基线都有模糊的情况下的解模糊问题。有学者提出了用中国余数定理在噪扰条件下的解模糊算

^{*} 收稿日期: 2011 - 05 - 10; 修回日期: 2011 - 07 - 27

法^[2],但其要求干涉仪基线必须两两互素。也有学者提出了利用非平行基线解模糊算法^[3],但其计算量大,综合性能有限。本文提出的算法是基于后验概率最大化的概率解模糊算法,其特点是解模糊速度快,解模糊能力强,误解模糊概率低。

2 概率解模糊模型

数字化宽带测向系统模型如下:

$$b_i + 2n_i = a_i x + e_i, i = 1, 2, \cdots, M - 1 \tag{1}$$

式中, $x = \sin\theta$, θ 为信号入射方向, b_i 是有模糊的相位差, n_i 是模糊整数, a_i 为相对基线长度, e_i 为相位差误差。式(1)中每一个方程都称为一个基线方程。定义模糊区间和模糊区间长度:

$$\text{ceil}(\frac{-a_i - b_i}{2}) \leq n_i \leq \text{floor}(\frac{a_i - b_i}{2})$$
$$N_i = \text{floor}(\frac{a_i - b_i}{2}) - \text{ceil}(\frac{-a_i - b_i}{2}) + 1 \tag{2}$$

n_i 的取值范围称为模糊区间, N_i 称为模糊区间长度。当 $N_i > 1$, 说明存在模糊; N_i 越大, 说明模糊度越大。作如下基本假设:

- (1)模糊整数 n_i 在模糊区间内等概率分布;
- (2)相位差误差 $e_i (i = 1, 2, \cdots, M - 1)$ 是独立同分布的随机变量, 不妨假设其分布密度函数为 $f_e(x)$, 且为关于 0 对称。

下面求解 x 的分布密度函数。 n_i 服从均匀分布, 其分布密度函数为

$$f_n(x) = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \delta(x - n_{ij}) \tag{3}$$

式中, n_{ij} 为模糊数 n_i 的第 j 个可能取值。变量 $\frac{2n_i}{a_i}$ 和 $\frac{e_i}{a_i}$ 的分布密度函数分别为

$$f_n(x) = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \delta(\frac{a_i x}{2} - n_{ij}) = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \delta(x - \frac{2n_{ij}}{a_i})$$
$$g(x) = a f_e(a_i x) \tag{4}$$

变量 $\frac{2n_i}{a_i} - \frac{e_i}{a_i}$ 的分布密度函数为

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_n(u) g(x - u) du = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a_i \pi}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \delta(u - \frac{2n_{ij}}{a_i}) f_e(a_i \pi(x - u)) du = \frac{a_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} f_e(a_i(x - \frac{2n_{ij}}{a_i})) \tag{5}$$

则变量 $x = \frac{b_i}{a_i} + \frac{2n_i}{a_i} - \frac{e_i}{a_i}$ 的分布密度函数为

$$f_i(x) = f(x - \frac{b_i}{a_i}) = \frac{a_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} f_e(a_i(x - \frac{b_i}{a_i} - \frac{2n_{ij}}{a_i})) = \frac{a_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} f_e(a_i x - b_i - 2n_{ij}) \tag{6}$$

概率解模糊的思想是极大似然估计, 即把每一个基线方程都看成对 x 的一次独立估计, 则可计算 x 的似然函数, 最后取似然函数的最大值对应的 x^* 作为对 x 的估计。

$$L(x) = \prod_{i=1}^{M-1} f_i(x) = \prod_{i=1}^{M-1} \frac{a_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} f_e(a_i x - b_i - 2n_{ij})$$
$$x^* = \arg \max L(x)$$
$$\theta = \arcsin(x^*) \tag{7}$$

3 概率解模糊的快速算法

在实际应用中上述概率解模糊模型存在如下两个问题: 相位差 $f_e(x)$ 的影响因素多, 在实际应用中无法得到的; 式(7)所示的似然函数没有解析的解。所以为了求得似然函数的最大值, 必然要进行最大值搜索, 这样计算量非常大。为了解决概率解模糊模型在实际应用中的问题, 专门提出了概率解模糊的快速算法。

- (1)根据系统性能、信号类型与信噪比, 在给定置信度的情况下, 确定相位测量误差的置信区间 $[-E, +E]$ 。

- (2)求得每个基线方程的模糊数 n_i 的模糊区间。

$$\text{ceil}(\frac{-a_i - b_i}{2}) \leq n_i \leq \text{floor}(\frac{a_i - b_i}{2}) \tag{8}$$

$$n_{i1} = \text{ceil}(\frac{-a_i - b_i}{2}), n_{iN_i} = \text{floor}(\frac{a_i - b_i}{2})$$

式中, $\{n_{i1}, n_{i2}, \cdots, n_{ij}, \cdots, n_{iN_i}\}$ 为模糊域, n_{ij} 为递增连续整数。

- (3)初始化参数 $T_1 = \{n_{11}, n_{11}, \cdots, n_{1N_1}\}, t_{1k} \in T_1, k = 1, 2, \cdots, \text{length}(T_1)$ 。

- (4)计算如下连通函数:

$$L_i(t_{ik}, n_{i+1,j}) = \left| \frac{b_i - 2t_{ik}}{a_i} - \frac{b_{i+1} - 2n_{i+1,j}}{a_{i+1}} \right| - \frac{E}{\pi \sqrt{\frac{1}{a_i^2} + \frac{1}{a_{i+1}^2}}} \tag{9}$$

$$T_{i+1} = (n_{i+1,j} | L(t_{ik}, n_{i+1,j}) < 0, \forall t_{ik} \in T_i, j = 1, 2, \dots, N_{i+1})$$

其中连通函数 $L_i(t_{ik}, n_{i+1,j})$ 是度量第 i 行第 k 个模糊整数和第 $i+1$ 行第 j 个模糊整数匹配程度的函数。如果该值小于零,说明这两个模糊整数是可能的求解值,并标记这两个模糊整数连通。

(5)重复步骤 4,计算所有 $M-2$ 个连通函数,得到每一行的连通模糊整数,标记连通关系。

(6)根据所有连通函数取出每一行的连通模糊整数,并根据标记的连通关系确定所有可能模糊向量组。

取连通模糊整数和确定可能模糊向量组的具体过程举下例说明。设有 3 个模糊方程,模糊整数分别为

$$n_1 \in \{-1, 0, 1\}$$

$$n_2 \in \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$$

$$n_3 \in \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

两个连通函数的值用图 1 表示, $L(t_{ik}, n_{i+1,j}) < 0$ 用 1 表示,反之用 0 表示。

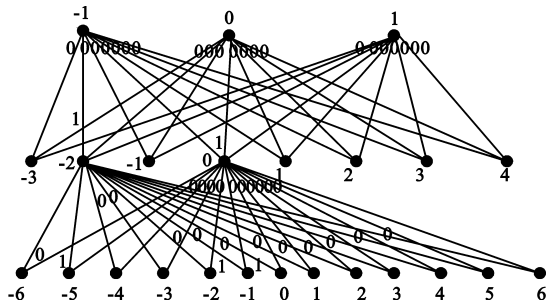


图 1 连通图
Fig.1 Connected graph

根据连通图可知, $T_1 = [-1, 0, 1], T_2 = [-2, 0]$,并可获得所有可能的模糊向量组:

$$N = [n_1, n_2, n_3] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \\ -5 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

如果相位误差置信区间和系统天线阵列设置合理,则模糊向量组只有唯一解。然而在现实系统中,一般设置相位误差置信区间偏大以保证能够检测到正确的模糊向量组,但这样做的直接后果可能会产生虚假的模糊向量组。

下面求解最大概率模糊向量。记

$$m = [b_1 - e_1, b_2 - e_2, \dots, b_{m-1} - e_{m-1}]^T$$
$$a = [a_1, a_2, \dots, a_{m-1}]^T$$

式(1)可写成:

$$m + 2n_j = ax_j \tag{10}$$

式中, n_j 为第 j 个可能模糊向量组,则可求得 x_j 的最小二乘(LS)解 x_j^* :

$$x_j^* = a^+ (m + 2n_j)$$

式中, $a^+ = (a^T a)^{-1} a^T$ 。

$$J(x_j^*) = \|m + 2n_j - ax_j^*\|_2^2 = e^T e = \sum_{i=1}^{M-1} e_i^2 = (m + 2n_j)^T (I - aa^+) (m + 2n_j) \tag{11}$$

$$P(x_j^*) = \frac{\frac{1}{J(x_j^*)}}{\sum \frac{1}{J(x_j^*)}} \tag{12}$$

选取最大的 $P(x_j^*)$,其对应的 n_j 为最大后验概率模糊向量组。

4 仿真实例

天线间距 $(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5) = (0.150, 0.157, 0.179, 0.191, 1.350)$ m,相位测量误差的标准差为 10° ,工作频段为 $1 \sim 20$ GHz,视场角为 120° 。用概率解模糊的快速算法进行解模糊,结果如图 2 所示。

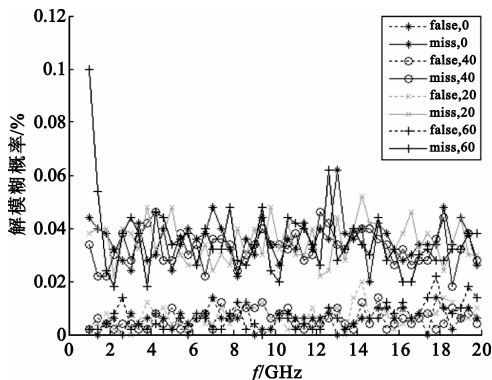


图 2 系统的漏检概率与错误解模糊概率
Fig.2 Miss probability and false resolution probability of system

图 2 中,“false, x ”表示在测向角度为 x 时的错误解模糊概率(即检出入射角是错误的概率);“miss, x ”表示在测向角为 x 时的漏检概率(即没有检出入射角度的概率)。从图 2 中可以看出,在 $1 \sim 20$ GHz 工作范围内系统错误解模糊概率约为 1%,漏检概率约为 4%。

5 结束语

本文在数字化宽带测向模型的基础上,提出了

概率解模糊模型和快速算法。通过仿真验证可知,概率解模糊算法解模糊能力极强,可广泛应用于干涉仪等需要解相位差模糊的领域,其应用前景广阔。关于基线设置的问题,将在后续论文中讨论。

参考文献:

[1] Zoltwski M D, Mathew s C P. Real - time frequency and 2 - D angle estimation with sub - Nyquist spatio - temporal sampling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42 (10): 2781 - 2794.

[2] 周亚强,陈翥,皇甫堪,等. 噪扰条件下多基线相位干涉仪解模糊算法[J]. 电子与信息学报,2005,27(2):259 - 261. ZHOU Ya - qiang, CHEN Zhu, HUANGFU Kan, et al. Algorithm of Solving Multi - baseline Interferometer Phase Difference Ambiguity in Noisy Circumstance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(2): 259 - 261. (in Chinese)

[3] 辛红,邓家骏,梁昌洪. 长基线测向模糊性消除[J]. 电波科学学报, 1999, 14(4): 416 - 421. XIN Hong, ZHENG Jia - jun, LIANG Chang - hong. Resolving the ambiguities in direction finding system with long base-

lines[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(4): 416 - 421. (in Chinese)

作者简介:

姜勤波(1976—), 男, 博士, 主要研究方向为信号处理、电子对抗;

JIANG Qin - bo was born in 1976. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research interests include signal processing and electronic countermeasure.

Email:jqinbo@163.com

廖平(1973—), 男, 四川成都人, 博士, 高级工程师, 主要从事电子对抗技术方面的研究;

LIAO Ping was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1973. He is now a senior engineer with the Ph. D. degree. His research concerns electronic countermeasure.

王国华(1961—), 男, 吉林长春人, 副教授、硕士生导师, 主要从事电子测量工作。

WANG Guo - hua was born in Changchun, Jilin Province, in 1961. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns electronic measurement.

《电讯技术》征稿的新要求

为了促进本刊的国际化进程,进一步扩大影响力,为广大科技人员搭建更高层次的学术研究和技术交流平台,现对来稿作如下几点新的要求:

- (1) 来稿中的图题、表题应给出对应的英文翻译;
- (2) 中文参考文献采用双语著录;
- (3) 属于基金项目的来稿应给出项目的英文翻译;
- (4) 提供作者简介的英文翻译,其中应包括作者的出生年、籍贯、何时获得已有学位、研究方向等内容,可参见 IEEE 系列刊物作者简介的翻译;
- (5) 欢迎作者将具有原创性的研究成果直接以全英文论文投稿,应注意语言流畅,专业术语准确,符合科技英语表达习惯,并附上中文标题、单位、摘要和关键词,以及中文作者简介;
- (6) 为了保证出版的及时性,作者不得在自校阶段对稿件作大幅修改,否则,将按新投稿件处理,编辑部保留追究由此造成的一切损失的权利。

更多信息请浏览本刊网站:www.teleonline.cn。

《电讯技术》编辑部