

短基线干涉体制雷达天线站址坐标定位方法研究

张 峰 杨于杰

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要 研究了对短基线干涉体制雷达系统测角精度具有重要影响的天线站址定位问题。分析其成因和对测量结果的影响, 并给出了用 Newton - Raphson 方法形成的解决方案。仿真结果表明: 本方案迭代次数少, 能够得到精确的站址坐标。该方案快速、简便、适用于双、多基地干涉体制的雷达系统。

关键词 * 短基线干涉体制雷达 * 站址定位 * Newton - Raphson 方法

Research of the Site Location of the Antennas in Short Baseline Interferometer

ZHANG Feng YANG Yu - jie

(Beijing Institute of Radio Metrology & Measurements, Beijing 100039)

Abstract Research the site location of the antennas, one of the most important factors, in short baseline radar interferometer, and analyze from what it results and the effects coming with it. An iterative way, the Newton - Raphson method adjusted, is proposed to solve the problem. The simulation results show that this iterative way can approach a much accurate site location with fewer iteration steps.

Key words * Short baseline radar interferometer * Site location * Newton - Raphson method

1 引言

干涉体制作为一种精确测向的方法, 在军事、科研领域得到广泛的应用。而短基线干涉体制雷达(以下简称干涉仪), 因其布站方便、计算方法简单, 也越来越受到重视。但是短基线干涉仪由于基线较短, 其对测向结果的影响就变得很大; 同时

在与目标其他信息结合进行目标定位时, 天线站址坐标的准确程度对定位精度有较大影响, 其误差是各站址误差代数和的 3~4 倍。实际应用中, 存在几个问题, 使得确定天线站址坐标变得很困难。第一, 现有的定点定位方法精度有限, 不能满足高精度测向的需求; 第二, 天线馈源的相位中心与天线的几何中心不可能完全重合, 这样测量天

收稿日期: 2006-02-26

作者简介: 张峰(1978-), 男, 主要研究领域: 高精度测向技术、雷达信号处理。

线的几何中心得到干涉仪基线长度就和实际的由相位中心确定的基线长度存在差异。首先简单讨论了站址误差对测向和目标定位的影响,然后提出了一种利用全局收敛 Newton-Raphson 迭代算法的天线站址定位方法。同时对应应用 Newton-Raphson 迭代算法,提出几点意见。

2 干涉仪的测向原理

单基线干涉仪的测向原理如图 1 所示,设两天线的间距为 d ,以天线连线方向为方位基准。当被测目标远离测角系统时(R_0 远大于 d),两个测角天线接收的目标回波路径差 ΔR 与方向角 θ 、基线长度 d 的关系为

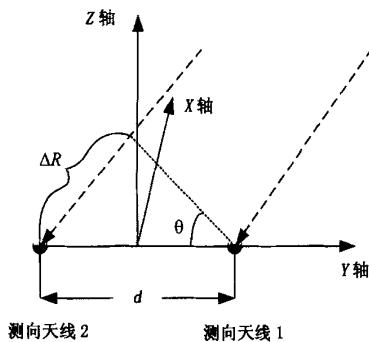


图 1 单基线干涉仪的测向原理图

$$\Delta R = R_2 - R_1 = d \cdot \sin\theta \quad (1)$$

式中: ΔR ——目标回波分别到达两天线的距离差;
 R_2 ——目标到测角天线 2 的距离; R_1 ——目标到测角天线 1 的距离。

干涉仪的实质就是依靠测量目标到两测角天线的路径差 ΔR ,达到测量目标方向角的目的。

3 干涉仪基线长度及站址误差对测向的影响

无论是对天线定位不准,还是天线的相位中心与几何中心不重合,都会导致基线长度 d 不准确,从而在推算目标方向角的时候引起误差。对公式 1 两边同时取微分,经整理就可以得到

$$\delta_\theta = \tan(\theta) \cdot \frac{\delta_d}{d} \quad (2)$$

假设基线真实长度为 60 m、目标方向角为 25° ,对基线长度的测量精度达到 ± 0.2 m,那么由此引起的目标方向角计算误差就达到了 0.0016 弧度(即 $5.34'$),对于高精度的定位系统,这样的方向角误差是不能接受的。如果目标到干涉仪的距离达到 300 km,那么此时由测向误差引起的目标横向定位误差将近 500 m。

同时,用干涉仪的测向信息和其他目标信息,如目标距离、俯仰角等信息联合进行目标精确定位时,定位精度和各天线的站址误差关系非常密切。飞行目标位置矢量定位精度是地面各站址坐标误差的代数和,且各站址误差反映在飞行目标位置坐标上便有 3~4 倍的放大。

在实际工程工作中,现有的天线定位手段以 GPS 为主。而 GPS 所能达到的精度,静态定点定位,经差分方法解算可以达到 0.2 m。从分析可以看出,这样的定位精度是不能满足应用需求的。我们需要另外的方法对天线站址定位。

4 解决方案

GPS 定位精度不高,而干涉仪对目标到两个测向天线的路径差 ΔR 的测量可以达到毫米量级,精度较高。利用天线站址坐标和 ΔR 的关系建立方程组,从而求出天线站址坐标。方案如下:

设两天线由 GPS 确定的初始坐标分别为:测向天线 1 坐标 $A(x_1, y_1, z_1)$ 、测向天线 2 坐标 $B(x_2, y_2, z_2)$ 。假设在探测范围内的任意一点 $C_m(x_{tm}, y_{tm}, z_{tm})$ 放置一个馈源,经干涉仪测量后得到这一点相对于两个测向天线的路径差 ΔR_{tm} 。

同时,经由测角天线站址坐标和馈源点坐标,同样能得到馈源点到两个测角天线的路径差 $\Delta R'_{tm}$

$$\begin{aligned} \Delta R'_{tm} &= \sqrt{(x_{tm} - x_2)^2 + (y_{tm} - y_2)^2 + (z_{tm} - z_2)^2} \\ &= \sqrt{(x_{tm} - x_1)^2 + (y_{tm} - y_1)^2 + (z_{tm} - z_1)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

这个 $\Delta R'_{tm}$ 是 ΔR_{tm} 的一个估计值。我们的目的是得到两天线的站址坐标,有六个变量(记为向量 X)=

$(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2))$, 所以需要另外五个方程。那么在测量范围内再取相异的五个点, 得到另外五个方程, 组成非线性方程组。求解非线性方程组较好的方法就是 Newton - Raphson 方法。这种算法的思想就是: 改变量的值, 使得估计值 $\Delta R'_{tm}$ 与真值 ΔR_{tm} 之差的平方和最小。

令

$$\begin{aligned} f_m(X) &= \Delta R'_{tm} - \Delta R_{tm} \\ &= \sqrt{(x_{tm} - x_2)^2 + (y_{tm} - y_2)^2 + (z_{tm} - z_2)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_{tm} - x_1)^2 + (y_{tm} - y_1)^2 + (z_{tm} - z_1)^2} \\ &\quad - \Delta R_{tm} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。记向量函数

$$f(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_6(X))^T \quad (5)$$

则有

$$F(X) = f(X)^T f(X) \quad (6)$$

为极小化 $F(X)$, 计算 $F(X)$ 的梯度

$$\nabla F(X) = \left[\frac{\partial F}{\partial x_1} \quad \frac{\partial F}{\partial y_1} \quad \frac{\partial F}{\partial z_1} \quad \frac{\partial F}{\partial x_2} \quad \frac{\partial F}{\partial y_2} \quad \frac{\partial F}{\partial z_2} \right]^T \quad (7)$$

则问题转化为估计 $X = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$, 使得 $\nabla F(X) = 0$ 。

定义 $f(X)$ 对 $(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ 的 Jacobin 矩阵为

$$J(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_3}{\partial y_1} & \frac{\partial f_4}{\partial y_1} & \frac{\partial f_5}{\partial y_1} & \frac{\partial f_6}{\partial y_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_1} & \frac{\partial f_2}{\partial z_1} & \frac{\partial f_3}{\partial z_1} & \frac{\partial f_4}{\partial z_1} & \frac{\partial f_5}{\partial z_1} & \frac{\partial f_6}{\partial z_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} & \frac{\partial f_3}{\partial y_2} & \frac{\partial f_4}{\partial y_2} & \frac{\partial f_5}{\partial y_2} & \frac{\partial f_6}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_2} & \frac{\partial f_2}{\partial z_2} & \frac{\partial f_3}{\partial z_2} & \frac{\partial f_4}{\partial z_2} & \frac{\partial f_5}{\partial z_2} & \frac{\partial f_6}{\partial z_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

在 X 的领域内, 函数 F 可以用泰勒级数展开为

$$F(X + \delta_X) = F(X) + J(X) \cdot \delta_X + O(\delta_X^2) \quad (9)$$

应得到 $-F(X) = J(X) \cdot \delta_X$

忽略 δ_X^2 项及其更高项, 并置 $F(X + \delta_X) = 0$, 可以得到一个关于修正项 δ_X 的线性方程组, 即

$$F(X) \cdot \Delta_X = -F(X) \quad (10)$$

其中 δ_X 可使每个函数 $f_m(X)$ 同时接近于零。

解由公式(10)确定的方程组, 得到新的向量

$$X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + b\delta_X \quad (11)$$

这一过程不断迭代直到收敛为止, δ_X 为 Newton 步长, b 为步长调整因子以使迭代过程全局收敛, 步长调整策略见文献^[4]。

5 计算机模拟验证结果

本节在不同的观测噪声的条件下对短基线干涉仪基线定位问题进行实例仿真, 对所得结果进行分析比较。

5.1 仿真计算

用三维直角坐标表示测向天线站址坐标和馈源点坐标。仿真条件为: 测向天线 1 A(30.8, 29.9, 1.6)m; 测向天线 2 B(30.5, -30.1, 1.8)m; 基线长度 60.003 7 m; 馈源坐标: $C_1(10 000, 35 000, 6 418.4)$, $C_2(90 000, 15 000, 24 448)$, $C_3(80 000, -20 000, 17 528)$, $C_4(80 000, -45 000, 19 510)$, $C_5(50 000, 15 000, 4 567)$, $C_6(150 000, -50 000, 13 833)$ 。用迭代出的测向天线站址坐标, 计算出馈源点的方向角 θ' 与馈源点的方向角, 真值 θ 的差的 2-范数, 来评价迭代结果(小于 $0.05'$, 即小于 $0.000 83^\circ$, 认为迭代结果有效)。

5.1.1 无观测噪声

设容差限为 $1e-20$, 当 $F(X)$ 的值控制在容差限内, 表示一次迭代满足了精度。此时, 即使初始测角天线坐标偏离真值很大, 迭代结果都能收敛到准确值。运行程序十次, 图 2 给出了迭代收敛曲线, 从图中可以看出这种方法收敛速度很快, 平均迭代次数 6.55 次。这时收敛概率 100%, 迭代结果有效概率能到。

5.1.2 低观测噪声

观测精度较高时, 设干涉仪测量值 ΔR 的测量方差 $\delta_{\Delta R_{tm}} = 0.000 1$ m, 馈源点坐标定位方差 0.02 m, 容差限 $1e-18$ 。运行程序 100 次, 图 3 给出了迭代收敛曲线, 从图中可以看出这种方法收敛速度还是很快的。

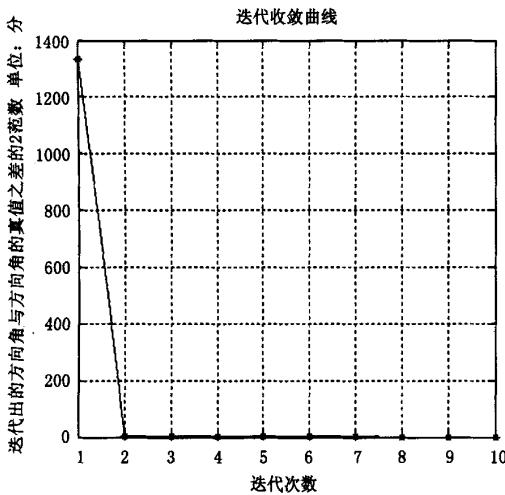


图 2 无观测噪声时仿真 10 次曲线图

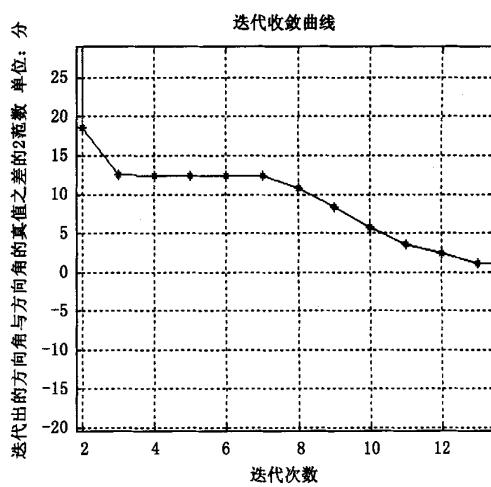


图 4 中观测噪声时仿真 100 次曲线图

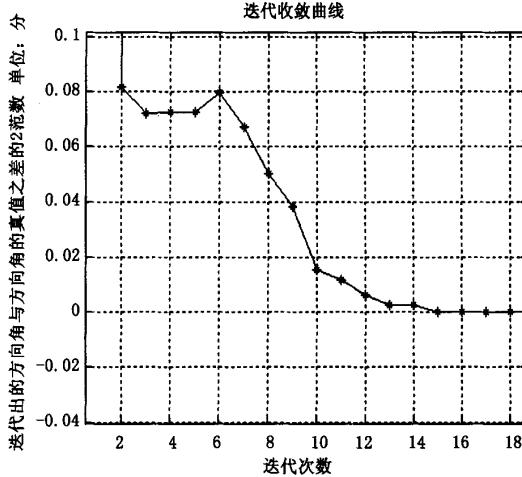


图 3 低观测噪声时仿真 100 次曲线图

这时平均迭代次数达到了 8.16 次,与无观测噪声时相比增大次数不大,收敛概率,迭代结果有效概率能到以上。由以上两种情况可以看出,算法的收敛数度很快,而且对观测噪声不敏感。

5.1.3 中观测噪声

观测精度较高时,设干涉仪测量值 ΔR_{lm} 的测量方差 $\delta_{\Delta R_{lm}} = 0.0008 \text{ m}$,馈源点坐标定位方差 0.10 m,容差限 $1e - 18$ 。运行程序 100 次,图 4 给出了迭代收敛曲线。

这时平均迭代次数 8.65 次,收敛概率,迭代结果有效概率能到左右。由以上三种情况可以看出,算

法的收敛数度依然很快,而且对观测噪声不敏感,但迭代结果的有效性对观测噪声的依赖性很强。

5.1.4 高观测噪声

观测精度较高时,设干涉仪测量值 ΔR_{lm} 的测量方差 $\delta_{\Delta R_{lm}} = 0.005 \text{ m}$,馈源点坐标定位方差 0.50 m,容差限 $1e - 18$ 。运行程序 500 次,图 5 给出了迭代收敛曲线。这时平均迭代次数 9.49 次,收敛概率,迭代结果有效概率只有。

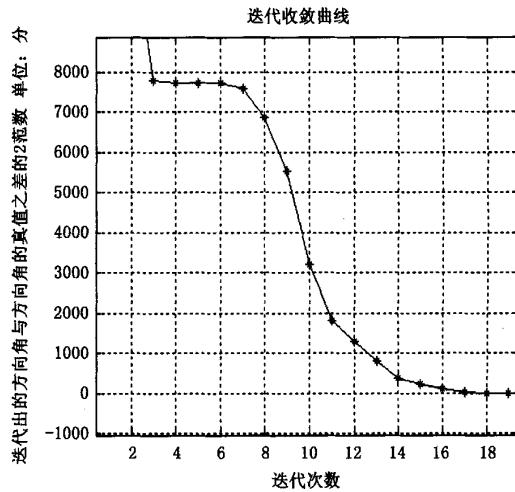


图 5 高观测噪声时仿真 500 次曲线图

5.2 仿真结果分析

从以上给出的仿真结果可以看出,这种干涉仪天线校准方案有较快的收敛速度、较好的收敛效果

和较高的精度。仿真中发现,在大噪声时,所收敛到的值与真值之差的 2 – 范数仍较大。对于这种情况的解释为,需要最小化公式(6),式中 $f(X)$ 带入的是带噪声的观测量,由于观测信息不多,因此最小化公式(6)所得的结果不可避免地受噪声影响。

同时,上面的解决方法有一个前提,干涉仪的测量值 ΔR_{lm} 尽可能的准确,否则迭代出的结果会收敛到错误的解上。对于这个问题,只能想办法尽可能的提高干涉仪的测量值 ΔR_{lm} 的测量精度。

6 结束语

干涉仪的基线定位问题一直是干涉仪使用中的难点,测向天线相位中心的不确定性和基线长度不准,限制了干涉仪本身测向的精度,以及与其它目标

信息联合进行目标定位的准确程度。提出的干涉仪天线站址坐标定位方案,快速、简便,适用于双、多基地干涉体制的雷达系统。

参考文献

- [1] 余学峰.多基雷达定位中站址误差影响分析[J].兵工学报.2002, Vol 23 No.2.
- [2] 丁丽娟.数值计算方法[M].北京理工大学出版社,1997.
- [3] 张志涌等.精通 MATLAB 5.3 版[M].北京航空航天大学出版社,2000.8.
- [4] William H. Press 等,傅祖芸等译.C 数值算法[M].第二版.电子工业出版社,2004.1.290 ~ 298.
- [5] 胡来招.无源定位[M].国防工业出版社,2004.1.89 ~ 92.

中国宇航学会计量与测试专业委员会 2006 年工作会在成都召开

2006 年 5 月 26 日中国宇航学会计量与测试专业委员会 2006 年工作会在成都市召开。来自全国各地的计测专委会的委员、代表 20 余人出席了大会。

工作会由学会主任委员航天科工集团二院二〇三所所长王伟主持并致开幕词。首先与会代表听取了委员杨春涛做的题为“内强素质、外树形象,推进学会发展”的工作报告。报告充分肯定了在过去的一年中,计量与测试专业委员会在中国宇航学会的领导下,在各团体会员单位及几个外国公司驻京办的大力支持和帮助下,在新一届领导、委员和会员的积极参与和配合下所做的对学会组织进行改革、组织大型学术交流会、广泛宣传期刊等大量富有成效的工作。由执行秘书韩丹宣读了 2005 年宇航学会下发的若干重要文件。随后与会委员和代表就一年来学会工作的有关问题以及今后学会工作如何开展、如何使学会焕发更强大的生命力等议题进行了热烈的讨论和交流,与会代表畅所欲言,在专委会组织结构、人员构成调整;促进组织小型专题研讨会;大型学术交流会组织形式多样化;期刊与学会工作相互促进等方面都提出了具有建设性的意见及建议。

代表们一致认为虽然会议时间很短,但会议结果富有成效。工作会结束时主任委员王伟对各位委员对专委会工作的大力支持表示衷心的感谢,希望在新的一年里中国宇航学会计量与测试专业委员会能够加强学会自身建设,抓住机遇、大胆创新,以新的面貌、新的姿态,去开创专委会工作的新局面。

中国宇航学会计量与测试专业委员会

秘书 韩丹

二〇〇六年六月二日

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>