



国防电子信息技术丛书

Electronic Warfare Target Location Methods
Second Edition

电子战目标定位方法 (第二版)

[美] Richard A. Poisel 著

王沙飞 田中成 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

电子战目标定位方法

(第二版)

Electronic Warfare Target Location Methods
Second Edition

[美] Richard A. Poisel 著

王沙飞 田中成 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书为电子战目标定位方法的权威著作。全书共7章。第1章介绍了目标定位问题和基本目标定位算法——梯度下降法。第2章讨论了基于三角定位法的位置估计算法。第3章和第4章讨论了测定一个或多个入射信号仰角的多种方法。第5章讨论二次定位方法,包括基于到达时间差(TDOA)、基于差分多普勒(DD)和基于距离差(RD)的定位方法,另外也讨论了噪声和误差方面的问题。第6章讨论了一些估计时间延迟的方法,包括经典的互相关法和广义相关法等。第7章讨论的单站无源定位技术是目前研究热点之一,详细介绍了对天波传播模式的高频信号进行单站定位的原理和方法,在此基础上介绍了基于 MUSIC 倒谱和基于射线追踪的单站定位算法。

本书可供各军兵种电子战、信息战部队指战员以及雷达工程、电子工程、系统工程、信号处理等相关专业的技术研究人员和工程管理人员使用,并可作为这些专业的研究生教材和参考书籍。

©2012 ARTECH HOUSE

685 Canton Street, Norwood, MA 02062.

本书中文翻译版专有版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2013-0764

图书在版编目(CIP)数据

电子战目标定位方法 / (美) 泊伊泽 (Poisel, R. A.) 著; 王沙飞, 田中成译. —2 版.

北京: 电子工业出版社, 2014. 6

(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Electronic Warfare Target Location Methods, Second Edition

ISBN 978-7-121-20069-4

I. ①电… II. ①泊… ②王… ③田… III. ①电子战—技术 IV. ①E919 ②TN97

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 063590 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚 特约编辑: 马爱文

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.5 字数: 397 千字

版 次: 2008 年 8 月第 1 版

2014 年 6 月第 2 版

印 次: 2014 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

译者序

电子目标定位是指通过测量辐射源的电磁波信号参数,来确定辐射源及其携载平台或目标的位置,这些电子目标包括导弹制导雷达、地面监视雷达、机载预警雷达、轰炸机/隐身飞机/直升机上的雷达、干扰机,以及通信电台等。对上述电子目标的准确定位技术是当前电子战领域的核心问题之一,在越来越强调隐蔽攻击的现代战争中,其地位和作用更是越来越重要。例如,在军事系统中,它有助于精确打击武器的使用,为最终摧毁对方提供有力的保障。在民用系统中,它也可以为目标提供可靠的服务,起到安全保障作用。而且,随着数字化接收机和现代信息处理技术的发展,对电子目标定位技术的研究和应用越来越广泛、越来越深入,新方法、新技术、新装备不断涌现,性能水平持续提高。

Richard A. Poisel 博士是一位资深的电子战专家,曾任美军研究、开发、工程指挥、情报与信息战实验室负责人,亚利桑那州 Fort Huachuca 陆军情报中心高级技术顾问,雷神公司导弹系统部资深工程师。本书是作者结合多年在雷达、通信电子战领域丰富的研究成果撰写而成的电子战技术专著。

《电子战目标定位方法(第二版)》在该书第一版基础上,针对电子目标定位领域的新理论和新方法,补充完善了方位测量、时延估计、超分辨参数估计等新内容,并针对一些具体应用问题进行了详细分析。全书共包含 7 章内容,第 1 章:辐射源定位技术简介,介绍了梯度下降算法;第 2 章:三角定位法,包括最小二乘距离误差定位算法、最小均方误差估计算法、最大似然估计三角测量算法,以及误差源分析等;第 3 章:测向技术,包括基于阵列信号处理的方位到达角估计算法、最小均方误差相位干涉算法、基于声表面波器件的相位差估计技术等;第 4 章:MUSIC,包括 MUSIC 算法模型介绍、信号数目估计方法、相位误差对算法性能影响的分析等;第 5 章:二次定位法,包括基于 TDOA 估计的定位技术、差分多普勒定位方法,以及距离差定位方法;第 6 章:时间延迟估计,包括基于广义相关的时延估计算法、基于互相关谱相位的时延估计算法、频率和相位误差在方向测量系统中的影响分析;第 7 章:单站定位技术,包括高频信号传播特性、基于倒谱计算的 TDOA 估计算法、基于 MUSIC 倒谱的单站定位算法、射线追踪、对电离层传播信号的单站定位和三角定位精度分析等。本书从基础数学公式开始,详细论述了各种电子目标定位方法的基本原理,还给出了大量的插图和详细的实例说明,具有很强的科研和工程应用参考价值。

本书由长期从事相关领域工作的王沙飞、田中成翻译,全书的翻译出版得到了房金虎、吕跃广等领导和同事们的大力支持和帮助,借此机会谨向他们表示诚挚的谢意。

电子战目标定位方法所涉及领域较广,因学识水平所限,虽经数遍认真校对,翻译中难免有理解与表述方面的偏差或错误,恳请读者给予批评指正!

目 录

第 1 章 辐射源定位技术简介	1
1.1 简介	1
1.2 梯度下降法	2
1.3 结论	6
参考文献	7
第 2 章 三角定位法	9
2.1 简介	9
2.2 基本概念	9
2.3 最小二乘误差估计	13
2.4 总体最小二乘估计	16
2.5 最小二乘距离误差定位算法	17
2.6 最小均方误差估计	28
2.7 离散概率密度法	42
2.8 广义方位角法	45
2.9 最大似然定位算法	47
2.10 多重采样相关定位法	56
2.11 纯方位目标运动分析	58
2.12 三角定位中的误差来源	61
2.13 结论	70
附录 2A 最小二乘误差估计程序	72
附录 2B 广义方位角定位法程序	73
参考文献	76
第 3 章 测向技术	78
3.1 简介	78
3.2 波达方向阵列处理测量方法	79
3.3 其他到达角估计方法	87
3.4 最小均方误差相位干涉仪	89
3.5 巴特勒矩阵测向法	94
3.6 声表面波器件测量相位差法	101
3.7 结论	104
参考文献	105

第 4 章 MUSIC	107
4.1 简介	107
4.2 MUSIC 概述	107
4.3 MUSIC	108
4.4 建模误差下的 MUSIC 性能分析	109
4.5 波场数目估计	114
4.6 相位误差对 MUSIC 精度的影响	115
4.7 其他超分辨率算法	121
4.8 结论	126
参考文献	127
第 5 章 二次定位法	128
5.1 简介	128
5.2 到达时间差定位技术	129
5.3 差分多普勒定位	147
5.4 距离差方法	157
5.5 结论	168
参考文献	168
第 6 章 时间延迟估计	170
6.1 简介	170
6.2 系统概述	170
6.3 互相关	171
6.4 广义互相关	175
6.5 广义相关法估计时间延迟	177
6.6 利用互谱密度相位进行时间延迟估计	180
6.7 电子战到达时间差测向系统中的频率和相位误差的影响	185
6.8 结论	191
参考文献	191
第 7 章 单站定位技术	193
7.1 简介	193
7.2 高频信号传播特性	193
7.3 单站定位技术	196
7.4 无源单站定位技术	197
7.5 采用倒谱计算到达时间差	199
7.6 基于 MUSIC 倒谱的单站定位	200
7.7 地球曲率	202
7.8 天波测向误差	203
7.9 射线追踪	204

7.10 电离层传播信号中的单站定位技术与三角定位法的精确度比较	207
7.11 结论	213
参考文献	213
 附录 A Grassmann 代数学	 215
 附录 B 非线性规划算法	 228
 缩略语	 237

第 1 章 辐射源定位技术简介

1.1 简介

辐射源定位是电子战系统的一个基本功能。明确目标的具体位置具有以下几方面意义：首先，确定目标的位置有助于了解敌方的军事部署。第二，在精确定位目标之后，就可以使用带有全球定位系统的具有发射后不管(fire-and-forget)能力的武器来消灭目标。第三，同一区域中集中的不同类型辐射源的相关信息可用来分析该区域中敌方部队的类型。

本书介绍了几种现代定位技术(也包括了一些传统定位技术)。对**截获**(position fix, PF)信号进行测量时，测量结果中包含的信息往往是有差异的，这些定位技术就是基于对这些差异的分析来实现的。

辐射源的**到达角**(angle of arrival, AOA)，或者它的**方位线**(line of bearing, LOB)，是定位中经常使用的一个参数。假设在几乎同一时刻对同一目标进行测量，测得的两条或者更多条方位线如图 1.1 所示^[1~6]，这些方位线可能相交于一点。这种定位技术就是所谓的**三角定位法**(triangulation)。三角定位法将在第 2 章具体介绍，其中将会介绍几种不同的算法。

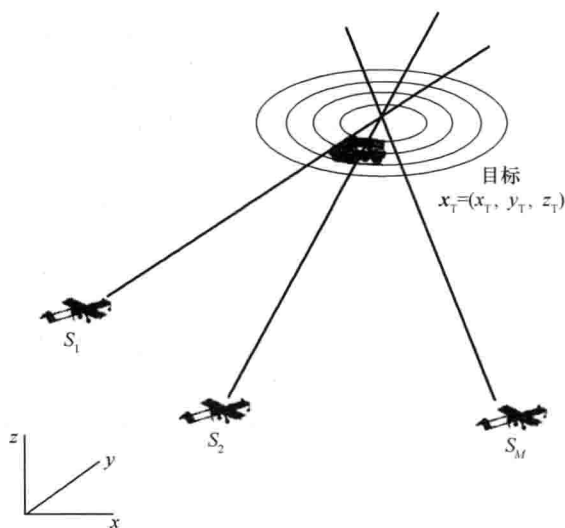


图 1.1 测量方位线的交点

目前已有几种估计入射到天线阵列上信号到达角的方法，它们均基于测量信号到达间距小于半个波长的两个天线(天线组中至少要有两个天线能够满足该要求，否则会出现模糊)的时间差或相位差^[7]。第 3 章给出了一些更通用的方法，其中最重要且应用广泛的是**多重信号分类法**(multiple signal classification, MUSIC)^[8]，该方法将在第 4 章中进行详细介绍。

另一种方法是测量信号到达几个间距远大于一个波长的传感器的时间，即**到达时间**(time of arrival, TOA)。到达时间本身可用于计算定位坐标，采用该方法得到的等值线是圆形的。但是更典型的用法是将各传感器测得的到达时间传给一个中心站，由该中心站计算各到达时

间之间的时间差,即**到达时间差**(time differences of arrival, TDOA)。与到达时间差类似的一种方法是计算不同传感器与目标之间的**距离差**(range difference, RD),它等于信号在传播媒质中的传播速度与到达时间差的乘积。一般认为空气中电波的传播速度为光速。如果信号是音频信号,则其在空气中的传播速度为声音在空气中的传播速度,该速度可能受到空气的湿度及其他参数的影响,在水中传播的速度为声音在水中的传播速度。

另一种形式的二次方法是测量**多普勒差**(differential Doppler, DD),又称为频率差,这些测量给出目标估计值位于其上的目标定位等时线。该方法最大的问题是目标不能运动,否则在测量多普勒差的时候会出现很大的误差。

基于到达时间、到达时间差、距离差或频率差的定位技术,求得的目标的可能位置曲线都是二次曲线,称为**定位线**(line of position, LOP),以多条定位线的交点作为目标位置的估计。这些定位方法的精度都会受到测量误差和噪声的影响。这些二次定位技术将在第5章讨论。第5章中还将讨论目标运动对定位的影响问题。目标的运动会增大定位误差,而如果能够检测到目标的运动,就能够消除这类误差。在第6章中给出了这方面的一些方法。

利用地球电离层的反射作用,高频信号可以传播到相当远的地方,这种信号的反射传播现象的实质是由于电离层电子和离子密度的变化而引起的信号折射。

采用第2章给出的到达角估计方法可估计这些目标的位置。如果已知信号到达方位角和俯仰角及电离层的高度,就可以使用单个传感器来估计目标方位,这种技术称为**单站定位**(single-site location, SSL)技术,将在第7章中进行讨论。第7章还给出了到达角估计方法与单站定位技术之间的优势比较。

在**机载自卫设备**(aircraft survivability equipment, ASE),特别是在**雷达告警接收机**(radar warning receiver, RWR)中广泛应用的比幅方法,可能是应用最广的到达角估计方法,空军和海军的作战飞机上均安装了该类设备。该方法的问题是其准确度较差,本书也讨论了其如何应用。

1.2 梯度下降法

Foy提出了一种基于简单的泰勒级数展开法(又称为高斯或高斯-牛顿插值法)的定位算法^[9],算法中对求解定位坐标的数学方法进行了全面的介绍,其中包含了许多解决定位估计问题的典型方法,因此以下将对该算法加以介绍。这种算法也是目前运用最普遍,计算最准确的一种方法。当然还有一些其他类型的下降算法可供使用^[6]。附录B给出了关于下降算法的更多深入探讨的内容。

方程中用于描述几何关系的表达式通常都是非线性的。如果将这些非线性表达式展开为泰勒级数,并保留其中的线性部分,就可以使用Newton-Raphson梯度下降法来迭代求解。首先假设一个初始解,然后进行迭代估计,直至求得一个估计解。在每次迭代计算中,根据局部线性最小平方和误差加入一个修正因子。

Foy指出了梯度下降法的主要优缺点,如表1.1所示。

表 1.1 梯度下降法用于目标定位的优点和缺点^[9]

优点	缺点
来自单站的多个独立测量数据可以直接取平均	需要迭代且初始值是假设的
采用合适的几何因子,不仅可以方便地实现单模式下多次测量数据的融合,还可以方便地实现不同模式下测量数据的融合,并且根据它们的先验精度信息还能对不同来源的数据进行加权	相对于描绘方位线的简单方法来说,其计算复杂度较高
很容易确定解的统计特性	因为采用的是局部纠正的方法,所以算法不能保证收敛
经验表明,即使初始的方位假设偏差很大,仍能良好收敛	
很容易检测出结果是否收敛	
容易进行仿真,所以容易检验其收敛性	
计算复杂度比 Kalman-Bucy 滤波器小	

令 $\mathbf{x}_T = (x_T, y_T)$ 代表目标辐射源位置的真值, $\mathbf{x}_k = (x_k, y_k)$, $k=1, 2, \dots, N$ 表示 N 个定位传感器位置的真值^{①②}。 n_{ki} 表示第 k 个传感器的第 i 次测量,这里的测量值并不局限于方位线、距离或其他某一种参数,而可以是任何可用于定位的测量数据。因此

$$f_i(x_T, y_T, x_k, y_k) = u_i = n_{ki} + \epsilon_i, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (1.1)$$

其中, n_{ki} 表示被测参数的真值, ϵ_i 表示测量误差。

例如,如果测量的是从定位传感器到辐射源的方位线,那么

$$f_i(x_T, y_T, x_k, y_k) = \arctan\left(\frac{y_T - y_k}{x_T - x_k}\right) + \epsilon_i \quad (1.2)$$

两个随机向量 $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{C(y)}]$ 和 $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{C(z)}]$ 的协方差矩阵,其在 i, j 位置的元素是随机向量第 i 个和第 j 个元素的协方差。其中 $C(\cdot)$ 代表变量的基数。该矩阵如下式所示:

$$\mathbf{C}_{yz} = \text{Cov}\{\mathbf{y}, \mathbf{z}\} = \mathcal{E}\{[\mathbf{y} - \mathcal{E}\{\mathbf{y}\}][\mathbf{z} - \mathcal{E}\{\mathbf{z}\}]^H\} \quad (1.3)$$

其中, H 代表厄米特(Hermit)算子,即共轭转置, $\mathcal{E}\{\cdot\}$ 代表统计期望。如果两个向量是零均值的,则有

$$\mathbf{C}_{yz} = \mathcal{E}\{\mathbf{y}\mathbf{z}^H\} \quad (1.4)$$

如果两个向量为同一个,则有

$$\mathbf{C}_{yy} = \text{Var}\{\mathbf{y}\} \quad (1.5)$$

协方差矩阵是两个组成向量之间相关性的量化测度。

算法的目标是在给定测量值和传感器的方位的条件下确定目标方位 (x_T, y_T) 。假定各测量值中的测量误差 ϵ_i 互相独立同分布(independent and identically distributed, i. i. d), 它们的均值为零, 即 $\mathcal{E}\{\epsilon_i\} = 0$, 在这里 $\mathcal{E}\{\cdot\}$ 表示统计期望^③。误差协方差矩阵(error covariance matrix)用下式表示:

$$\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon} = [c_{ij}] \quad (1.6)$$

并且

$$C_{ij} = \mathcal{E}\{\epsilon_i \epsilon_j\} \quad (1.7)$$

① 本书中用黑斜体字母表示矩阵和向量。

② 这里的分析只限于二维空间,可以直接推广到多维空间的情况。

③ 严格来说,定义期望的时候需要指定相应的域,但如果该域很明显,就不需要明确指出。

用 $(\hat{x}_T, \hat{y}_T)$ 作为真实位置 (x_T, y_T) 的估计,则有

$$x_T = \hat{x}_T + \delta_x \quad (1.8)$$

$$y_T = \hat{y}_T + \delta_y \quad (1.9)$$

泰勒级数(通常)是非线性函数的一种展开方式。其目的是通过只保留函数的线性项(第一项),或者到二次项,以简化分析。当只保留线性项时,这种处理使原本难以处理的非线性函数线性化。该处理结果为原函数的线性近似,在给定点的邻近区域能够相当准确地近似原函数。

$f_i()$ 在点 a 的泰勒级数展开式为^[10]

$$\begin{aligned} f(x) = & f(a) + (x-a)f'(a) \\ & + \frac{(x-a)^2}{2!}f''(a) + \dots + \frac{(x-a)^n}{n!}f^n(a) + \dots \end{aligned} \quad (1.10)$$

其中,符号 $f^n(a)$ 是指 $f(x)$ 在 a 点的 n 阶导数。在二维空间中,该式变为

$$\begin{aligned} f(a+h, b+k) = & f(a, b) + \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right) f(x, y) \Big|_{\substack{x=a \\ y=b}} + \dots \\ & + \frac{1}{n!} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right)^n f(x, y) \Big|_{\substack{x=a \\ y=b}} + \dots \end{aligned} \quad (1.11)$$

其中,竖线及后面的下标表示在微分后 x 用 a 来代替, y 用 b 来代替,且

$$\begin{aligned} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right) f(x, y) &= \left(h \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + k \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right) \\ \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right)^2 f(x, y) &= h^2 \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + 2hk \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x \partial y} + k^2 \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \\ &\dots \end{aligned}$$

对于当前的问题来说,经二维泰勒展开并去掉所有非线性分量后得,

$$\hat{f}_i + \frac{\partial f_i(\cdot)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} \delta_x + \frac{\partial f_i(\cdot)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} \delta_y \approx m_{ki} + \epsilon_i \quad (1.12)$$

其中,

$$\hat{f}_i = f_i(\hat{x}_T, \hat{y}_T, x_k, y_k) \quad (1.13)$$

为了便于处理,将上述运算写成矩阵的形式,为此首先做定义如下:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ \vdots & \vdots \\ h_{Ns1} & h_{Ns2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} & \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} \\ \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} & \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{Ns}(\cdot)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} & \frac{\partial f_{Ns}(\cdot)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=\hat{x}_T \\ y=\hat{y}_T}} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} m_{k1} - \hat{f}_1 \\ m_{k2} - \hat{f}_2 \\ \vdots \\ m_{kNs} - \hat{f}_{Ns} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_{N_s} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

于是式(1.12)可写为

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\delta} \approx \mathbf{z} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (1.18)$$

根据协方差矩阵进行加权处理,使平方和误差最小的 $\boldsymbol{\delta}$ 为^[11]

$$\boldsymbol{\delta} = [\mathbf{H}^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{z} \quad (1.19)$$

其中, $\mathbf{Y}$ 是一个考虑了一个或几个参数影响的加权矩阵。 $\mathbf{Y}$ 是任意选取的,但必须是正定满秩的,以确保 $\mathbf{Y}^{-1}$ 存在。这样,在一次迭代中, $\boldsymbol{\delta}$ 可根据式(1.19)进行计算,通过

$$\begin{aligned} \hat{x}_{\text{new}} &\leftarrow \hat{x}_{\text{old}} + \delta_x \\ \hat{y}_{\text{new}} &\leftarrow \hat{y}_{\text{old}} + \delta_y \end{aligned} \quad (1.20)$$

得到新的估计值。重复迭代直至相邻两次迭代中 (x_g, y_g) 的变化达到充分小($\boldsymbol{\delta} \approx \mathbf{0}$)为止。

定位估计的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_0 = [\mathbf{H}^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy} \\ \rho_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

如果误差服从正态分布,那么误差区域是一个椭圆,称为**概率误差椭圆**(elliptical error probable, EEP),椭圆的半长轴 a 和半短轴 b 分别可由下式确定^[12]:

$$a^2 = 2 \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 - \rho_{xy}^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - [\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + 4\rho_{xy}^2]^{1/2}} c_e^2 \quad (1.22)$$

$$b^2 = 2 \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 - \rho_{xy}^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + [\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + 4\rho_{xy}^2]^{1/2}} c_e^2 \quad (1.23)$$

其中, $c_e = -2\ln(1 - P_e)$, P_e 表示目标位于该误差椭圆中的置信度(例如,0.5表示50%,0.9表示90%,等等)。半长轴相对于 x 轴的倾角 θ 由下式给出:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\rho_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2} \quad (1.24)$$

概率误差圆(circular error probable, CEP)在概念上与 EEP 相似。它是一个以求得的目标坐标为中心的圆形区域,目标以指定的概率落在该圆内。文献[7,13]指出

$$\text{CEP} \approx 0.75 \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1.25)$$

采用这种方法求得的圆半径误差在10%以内。

例 1.1

本例来自文献[9],很好地说明了梯度下降法在综合应用不同种类的测量数据方面的能力。考虑图1.2所示的两个传感器,它们分别位于 $(-20, 20)$ 和 $(8, 12)$ 处。得到3种不同的测量数据:传感器 S_1 测得的方位线的方位角为 -38° ,其标准差 $\sigma_\phi = 3^\circ = 0.0524$ 弧度; S_1 与目标之间的距离 $r_1 = 32$ 单位,其标准差 $\sigma_r = 2$ 单位;两个传感器之间的距离差为 $r_1 - r_2 = \Delta r_{12} = 16$ 单位,其标准差 $\sigma_{\Delta r} = 1$ 单位。方位角可表示为

$$\phi_1 = \arcsin \left[\frac{y_1 - y_k}{\sqrt{(x_1 - x_k)^2 + (y_1 - y_k)^2}} \right]$$

该式的一阶展开为

$$\left[\frac{y_1 - y_k}{r_1^2} \right] \delta_x - \left[\frac{x_1 - x_k}{r_1^2} \right] \delta_y \approx \phi_1 - \arctan\left(\frac{y_1 - y_k}{x_1 - x_k}\right) - \epsilon_{\theta_1}$$

必须对此结果进行加权处理,方法是将其乘以当前估计坐标与传感器 S_1 之间的距离,即

$$\left[\frac{y_1 - y_k}{r_1} \right] \delta_x - \left[\frac{x_1 - x_k}{r_1} \right] \delta_y \approx r_1 \left[\phi_1 - \arctan\left(\frac{y_1 - y_k}{x_1 - x_k}\right) - \epsilon_{\phi_1} \right]$$

该式可用于求 a_{11} , a_{12} 和 z_1 。

传感器 S_1 到当前估计坐标之间的距离的真值表达式为

$$r_1 = \sqrt{(x_k - x_1)^2 + (y_k - y_1)^2} \quad (1.26)$$

一阶泰勒级数展开式为

$$\frac{x_k - x_1}{r_{k1}} \delta_x + \frac{y_k - y_1}{r_{k1}} \delta_y \approx r_{\text{measured}} - r_{k1} - \epsilon_{r_1}$$

距离差的一阶泰勒级数展开式为

$$\left[\frac{x_k - x_1}{r_{k1}} - \frac{x_k - x_2}{r_{k2}} \right] \delta_x + \left[\frac{y_k - y_1}{r_{k1}} - \frac{y_k - y_2}{r_{k2}} \right] \delta_y \approx \Delta r_{12} - (r_{k1} - r_{k2}) - \epsilon_{\Delta r_{12}}$$

当测量误差相互独立时,测量误差的协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon} = \begin{bmatrix} \sigma_\phi^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta r}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.0524)^2 r_{1k}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

运算从初始点 $x_0=22, y_0=4$ 开始,如图 1.2 所示。由式(1.19)可得 $\delta_x=-23.5, \delta_y=-24.4$ 。将这些值代入式(1.20)可得 $x_1=-1.5, y_1=-20.4$ 。继续运算,迭代 3 次后最终的结果如图 1.2 所示,为 $x_3=2, y_3=-5.1$,随后有 $\delta_x=0.05, \delta_y=-0.05$,运算结束。在这一点上,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.752 & 0.659 \\ 0.659 & -0.752 \\ 0.990 & 0.192 \end{bmatrix}$$

并且

$$\mathbf{C}_0 = [\mathbf{H}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.899 & -0.640 \\ -0.640 & 3.578 \end{bmatrix}$$

根据式(1.22)到式(1.24),得出概率误差椭圆的参数为

$$a = 1.929 \text{ 单位}$$

$$b = 0.868 \text{ 单位}$$

$$\theta = 102.76^\circ$$

于是

$$\text{CEP} = 1.587 \text{ 单位}$$

图 1.2 中给出了概率误差椭圆。

在这个例子中,三次迭代就收敛了,考虑到测量方差,结果所得概率误差椭圆是合理的。

1.3 结论

目前有许多目标定位技术,本书中仅选取了其中的一部分,并不打算泛泛而谈。GPS 的出现激起了人们对不同定位技术的兴趣,并开展了大量的研究工作(尽管应用到 GPS 的技术

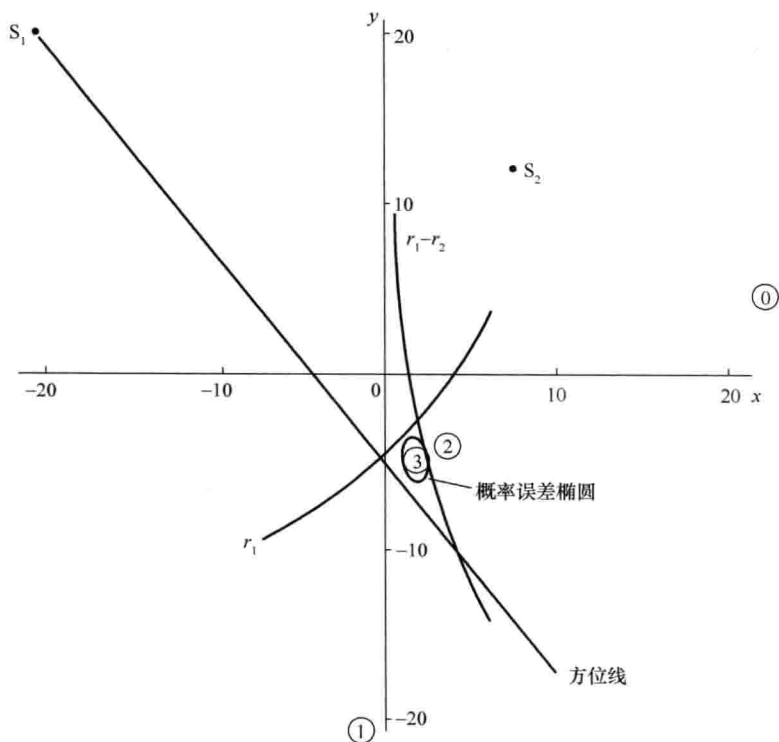


图 1.2 混合观测的几何模型

都是基于时间差的)。美国联邦通信委员会(FCC)正在制订一个规则,其目的是实现美国国内所有拨打 911 的电话都能被定位,这同样极大地推动了定位方法的研究。

希望读者能够对相关问题的建立一些基本概念,并掌握一些估计辐射源方位的方法。

参考文献

- [1] Jenkins, H. H., *Small-Aperture Radio Direction-Finding*, Norwood, MA: Artech House, 1991.
- [2] Poisel, R. A., *Introduction to Communication Electronic Warfare Systems*, Norwood, MA: Artech House, 2002, Chapters 11 and 12.
- [3] Neri, F., *Introduction to Electronic Defense Systems*, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 2001.
- [4] Van Trees, H. L., *Optimum Array Processing, Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, New York: Wiley, 2002.
- [5] Cadzow, J. A., "Methods of Direction-of-Arrival," *Proceedings IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing*, May 9-10, 1991.
- [6] Cadzow, J. A., "Signal Processing via Least Squares Error Modeling," *IEEE ASSP Magazine*, October 1990, pp. 12-31.
- [7] Rusu, P., "A TOA-FOA Approach to Find the Position and Velocity of RF Emitters," Applied Research Laboratories, University of Texas at Austin.
- [8] Schmidt, R. O., "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, No. 3, March 1986, pp. 276-280.
- [9] Foy, W. H., "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-12, No. 2, March 1976, pp. 187-193.

-
- [10] Abramowitz, M. ,and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, New York: Dover, 1972, p. 880.
 - [11] Whalen, A. D. , *Detection of Signals in Noise*, New York: Academic Press, 1971, pp. 374- 376.
 - [12] Poisel, R. A. , *Introduction to Communication Electronic Warfare Systems*, Norwood, MA: Artech House, 2002, pp. 384-388.
 - [13] Torrieri, D. J. , “Statistical Theory of Passive Location Systems,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-20, No. 2, March 1984, pp. 183-198.

第2章 三角定位法

2.1 简介

三角定位法是一种目标定位方法。在已知传感器的位置及两条甚至多条方位线的交点时,可以采用三角定位法确定目标的最大可能方位,得到目标位置的估计。三角定位法在目标定位中广泛应用,有多种测量信号到达方位角的技术。噪声、测量误差和多径反射是影响测量精度的常见因素。

三角定位法最早有据可查的研究工作是由 Stansfield^[1]开展的。Stansfield 算法是一种最大似然估计(maximum likelihood estimation, MLE)法。本章将对该方法进行研究。

三角定位法能够应用于各种各样的定位平台,包括飞机、轮船和地面车辆等。如果以信号相位为参数来计算方位线,则应用三角定位法定位时需要使用天线阵,且天线阵的基线长度应小于半波长,以避免测量中的相位模糊问题。除相位参数之外,还有一些其他参数也可用于到达角的测量(例如相对振幅),但是大多数方法都需要使用天线阵。

本章开始部分通过一些简单的图例对三角定位法的基本概念进行了简要介绍。现有的很多最优位置估计算法都是基于最小二乘误差(least-square error, LSE)估计技术的。本章首先对 LSE 估计进行概括性的介绍。接下来介绍的总体最小二乘误差(total least-squared error, TLSE)估计技术是对最小二乘误差估计技术的扩展,它在某种程度上更具一般性。在此之后介绍基于最小二乘距离误差的位置估计算法,紧接着讨论基于最小均方误差方法的最优位置估计问题,介绍一种所谓的离散概率密度(discrete probability density, DPD)定位方法,该方法中将目标区域(area of interest, AOI)分割成离散区间进行考察。广义方位角的概念与一般方位角的概念有所不同,它采用三维坐标而不是笛卡儿坐标来描述方位线,这就产生了一种与众不同的位置估计算法,本章对这种算法进行介绍。利用统计学中最大似然估计的概念,也可以得出一些定位估计的算法,这里给出了其中的两种。首先讨论一种基于方位线扇面(fan)重叠区域的位置估计方法,这里方位线扇面指由方位线误差的正负最大值确定的扇形区域。接下来在理论上分析目标方位和速度的可观测性问题。本章最后讨论利用三角定位法进行位置估计过程中误差的来源,包括系统误差(偏差)和随机误差(噪声)两个方面。

2.2 基本概念

图 2.1 是三角定位法的几何描述,这里仅初步考虑二维的情况。图中有两个传感器节点和一个目标节点,两个传感器节点 S_1 和 S_2 之间的距离为 d 。当然,图 2.1 所示的两个传感器也可以表示运动了距离 d 的同一个传感器。这两个传感器相对于同一参考方向分别求得一个方位角。距离 r 可以根据简单的三角形法则算得,即根据

$$\sin \phi_1 = \frac{d_1}{d}$$

$$d_1 = d \sin \phi_1$$

和

$$\sin(\phi_2 - \phi_1) = \frac{d_1}{d_2}$$

$$d_2 = \frac{d_1}{\sin(\phi_2 - \phi_1)}$$

可得

$$d_2 = \frac{d \sin \phi_1}{\sin(\phi_2 - \phi_1)} \quad (2.1)$$

根据图中所示 d_2 、 ϕ_2 、 x 、 y 的关系,可得

$$\begin{aligned} x &= d_2 \cos \phi_2 \\ y &= d_2 \sin \phi_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

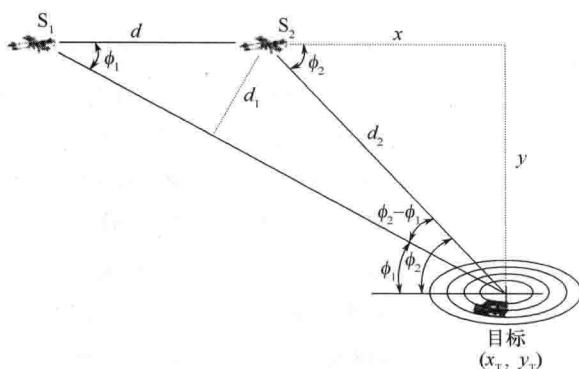


图 2.1 三角定位的几何示意图

很明显,这种方法可以推广到多个传感器及三维空间的情况,此时每次计算目标坐标时仅取其中的两个传感器,这样就可以求得多个目标坐标。可以将这些坐标的均值作为目标位置的估计,本章还将讨论其他使用两条以上的方位线进行目标定位的方法。

另一种应用三角定位法估计目标方位的方法是绘制测得的方位线,并观察它们在哪里相交,如图 2.2 所示。绘制过程可能隐含在数学计算中,也可能是实实在在画出来的。图 2.2 所示传感器可能代表一个运动的传感器,也可能代表三个固定的传感器,两种情况下的计算结果相同。如果测量过程中没有误差,那么这些方位线将相交于一点。然而一般来说,测得的方位线中总会伴有测量误差和噪声。这里通常将噪声假定为零均值加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)。这些测量误差和噪声对位置估计的影响体现在方位线不再交于一点。如图 2.3 所示,如果噪声是随机的,那么测得的方位角可能比实际方位角大,也可能比实际方位角小,从而形成一个误差椭圆。传感器中还可能存在测量偏差问题,很多参数估计器都有测量偏差。产生偏差的原因主要有两个,一个是定位算法内在的缺陷,另一个是参数测量设备中存在的系统误差。

如图 2.2 所示,如果只有三条方位线,那么如果它们没有像期望的一样交于一点,则它们会围绕目标的实际位置形成一个三角形。在已知三角形的位置时,有三种比较常用的非统计学方法可用于估计目标的方位,如图 2.4 所示^[2]。这三种方法都要估计三角形质心的位置。在图 2.4(a)所示的方法中,将三角形的每个顶点与其对边的中点相连,将交点作为目标方位。在图 2.4(b)所示的方法中,作三角形各角的平分线,将角平分线的交点作为目标方位。在