



无线电测向与定位 理论及方法

王鼎 吴瑛 张莉 杨宾 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无线电测向与定位理论及方法

王鼎 吴瑛 张莉 杨宾 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

无线电测向与目标定位是无线电监测的重要内容,是对无线电信号进行分选和识别的重要依据。本书系统地介绍了无线电测向定位中的相关理论与方法,分为基础篇、测向方法篇、定位方法篇3大部分,共计9章。内容主要包括:绪论,数学预备知识,测向天线阵列信号模型及其基本特性简介,传统无线电测向理论与方法,超分辨率测向理论与方法,基于测向信息的静止目标定位理论与方法,基于测向信息的运动目标跟踪理论与方法,基于阵列信号数据域的目标位置直接估计理论与方法。

从本书的使用范畴来看,本书既可以作为高等院校通信与电子工程、信号与信息处理、控制科学与工程等专业的高年级本科生或研究生教材,也可以作为从事通信、雷达、电子、航空航天等领域的科学工作者和工程技术人员自学或研究的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

无线电测向与定位理论及方法/王鼎等编著. —北京:国防工业出版社, 2016.6

ISBN 978-7-118-10747-0

I. ①无… II. ①王… III. ①无线电技术—测向 ②无线电定位 IV. ①TN965 ②TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 134741 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20³/₄ 字数 496 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

众所周知,无线电测向与目标定位是无线电监测的重要内容,是对无线电信号进行分选和识别的重要依据。无线电测向定位与雷达定位有着本质区别,雷达定位属于有源定位体制,它通过自身发射的电磁波信号来确定目标的位置坐标;而无线电测向定位则属于无源定位体制,它是利用目标发射的电磁波信号来确定目标的位置坐标。由于无线电测向具有作用距离远、定位精度高、隐蔽性能强、受气候条件限制小等优点,因此被广泛应用于通信侦察、电子对抗、航天航空、射电天文、地震勘探等多个工程应用领域。

本书旨在系统地介绍无线电测向定位中的相关理论与方法,全书共分为基础篇、测向方法篇、定位方法篇3大部分,共计9章。内容主要包括:绪论,数学预备知识,测向天线阵列信号模型及其基本特性简介,传统无线电测向理论与方法,超分辨率测向理论与方法,基于测向信息的静止目标定位理论与方法,基于测向信息的运动目标跟踪理论与方法,基于阵列信号数据域的目标位置直接估计理论与方法。

第1部分为基础篇,该部分由第1~3章组成。第1章是绪论,内容包括无线电测向定位基本原理简介、无线电测向定位方法简介、无线电测向系统的基本组成及其技术指标。第2章是数学预备知识,内容包括矩阵理论中的若干预备知识、多维函数分析和优化理论中的若干预备知识、统计信号处理中的若干预备知识、线性离散和连续时间系统中的若干预备知识。第3章是测向天线阵列信号模型及其基本特性简介,内容包括测向天线阵列及其接收信号的相关假设、测向天线阵列接收信号模型、几种特殊阵型的阵列流形响应、阵列方向图、阵列波束宽度和角度分辨力。

第2部分为测向方法篇,该部分由第4~6章组成。第4章是传统无线电测向理论与方法,内容包括基于艾德考克天线阵的测向方法、基于乌兰韦伯尔天线阵的测向方法、基于数字波束形成的测向方法、相位干涉仪测向方法、相关干涉仪测向方法。第5章是超分辨率测向理论与方法I——基础篇,内容包括阵列信号模型与方位估计方差的克拉美罗界、多重信号分类算法的基本原理及其理论性能分析、最大似然估计算法的基本原理及其理论性能分析、子空间拟合估计算法的基本原理及其理论性能分析、基于旋转不变技术的测向算法的基本原理及其理论性能分析。第6章是超分辨率测向理论与方法II——推广篇,内容包括相干信号方位估计方法、信号二维到达角度估计方法、乘性阵列误差存在条件下的信号方位估计方法、联合信号复包络先验信息的方位估计方法。

第3部分为定位方法篇,该部分由第7~9章组成。第7章是基于测向信息的静止目标定位理论与方法,内容包括基于电离层反射的单站定位理论与方法、双站二维交汇定位理论与方法、多站(多于两站)交汇定位理论与方法。第8章是基于测向信息的运动目标跟踪理论与方法,内容包括基于测向信息的运动目标可观测性分析、基于单站测向信息的运动目标跟踪方法、基于多站测向信息的渐近无偏跟踪方法。第9章是基于阵列信号数据域的目标位置直接估计理论与方法,内容包括基于单个可移动阵列的信号数据域目标位置直接估计方法、

基于多个静止阵列的信号数据域目标位置直接估计方法。

本书由解放军信息工程大学信息工程学院王鼎、吴瑛、张莉、杨宾共同执笔完成，并最终由王鼎对全书进行统一校对和修正，写作历经2年多时间，在编著过程中参阅了大量著作和论文，在此向这些材料的原著作者表示诚挚的谢意。

本书得到了国家自然科学基金—青年科学基金（项目编号：61201381）和解放军信息工程大学“2110工程”（项目编号102063和102106）的资助。此外，本书的出版还得到了学院各级领导和国防工业出版社的支持，在此一并感谢。

由于无线电测向定位处于快速发展之中，新理论和新方法不断涌现，因此本书仅做抛砖引玉之用。限于作者水平，书中也难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正，以便于今后纠正。

作 者

2016年5月于解放军信息工程大学信息工程学院

符号表

A^T	矩阵 A 的转置
A^*	矩阵 A 的共轭
A^H	矩阵 A 的共轭转置
A^{-1}	矩阵 A 的逆
$A^\dagger$	矩阵 A 的 Moore-Penrose 逆
$A^{1/2}$	矩阵 A 的平方根
$\text{rank}[A]$	矩阵 A 的秩
$\det[A]$	矩阵 A 的行列式
$\text{null}\{A\}$	矩阵 A 的零空间
$\text{range}\{A\}$	矩阵 A 的列空间
$\text{range}^\perp\{A\}$	矩阵 A 的列补空间
$\text{tr}(A)$	矩阵 A 的迹
$\Pi[A]$	矩阵 A 列空间的正交投影矩阵
$\Pi^\perp[A]$	矩阵 A 列补空间的正交投影矩阵
$\text{vec}(A)$	矩阵 A 按字典顺序排列形成的列向量
$\text{Re}\{A\}$	矩阵 A 中元素实部构成的矩阵
$\text{Im}\{A\}$	矩阵 A 中元素虚部构成的矩阵
$A \otimes B$	矩阵 A 和 B 的 Kronecker 积
$a \otimes b$	向量 a 和 b 的 Kronecker 积
$A \bullet B$	矩阵 A 和 B 的 Hadamard 积 (即对应元素相乘)
$A \circ B$	矩阵的 Column-wise Kronecker 积 (即相对应的列向量进行 Kronecker 乘积)
$\text{diag}[\cdot]$	由向量元素构成的对角矩阵
$\text{blkdiag}[\cdot]$	由矩阵或向量作为对角元素构成的块状对角矩阵
$\text{vecd}[\cdot]$	由矩阵对角元素构成的列向量
$O_{n \times m}$	$n \times m$ 阶全零矩阵
$I_{n \times m}$	$n \times m$ 阶全 1 矩阵
I_n	$n \times n$ 阶单位矩阵

$\langle a \rangle_n$

向量 a 中的第 n 个元素

$\langle A \rangle_{nm}$

矩阵 A 中的第 n 行、第 m 列元素

$o(x)$

满足 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{o(x)}{x} = 0$

$O(x)$

满足 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{O(x)}{x} = \text{常数}$

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线电测向定位基本原理简介	1
1.2 无线电测向定位方法简介	3
1.2.1 无线电测向方法简介	3
1.2.2 基于测向信息的目标定位方法简介	4
1.2.3 基于信号数据域的目标位置直接估计方法简介	5
1.3 无线电测向系统的基本组成及其技术指标	5
1.3.1 无线电测向系统的基本组成	6
1.3.2 无线电测向系统的技术指标	7
1.4 全书结构和内容安排	8
参考文献	10
第 2 章 数学预备知识	13
2.1 矩阵理论中的若干预备知识	13
2.1.1 矩阵求逆计算公式	13
2.1.2 半正定矩阵和正定矩阵的若干性质	15
2.1.3 三种矩阵分解	16
2.1.4 Moore-Penrose 广义逆矩阵和正交投影矩阵	20
2.1.5 矩阵 Hadamard 积和 Kronecker 积	24
2.2 多维函数分析和优化理论中的若干预备知识	27
2.2.1 多维(标量)函数的梯度向量和 Hessian 矩阵	27
2.2.2 无约束优化问题的最优性条件及其数值优化算法	28
2.2.3 多维(向量)函数的 Jacobi 矩阵和 Taylor 级数展开	31
2.3 统计信号处理中的若干预备知识	32
2.3.1 未知参量估计方差的克拉美罗界	33
2.3.2 最大似然估计及其渐近统计最优性分析	39
2.3.3 加权最小二乘估计及其与最大似然估计的等价性	41
2.4 线性离散和连续时间系统中的若干预备知识	42
2.4.1 线性离散时间随机系统的卡尔曼滤波算法	42
2.4.2 线性连续时间系统的可观测性分析	45
参考文献	46
附录 A 第 2 章所涉及的复杂数学推导	47
附录 A1 证明式(2.154)	47

附录 A2 证明式 (2.158)	48
附录 A3 证明式 (2.161)	48
附录 A4 证明式 (2.167)	50
第 3 章 测向天线阵列信号模型及其基本特性简介	51
3.1 测向天线阵列及其接收信号的相关假设	51
3.2 测向天线阵列接收信号模型	52
3.3 几种特殊阵型的阵列流形响应	53
3.3.1 均匀线阵	53
3.3.2 均匀圆阵	54
3.3.3 均匀 L 阵	54
3.3.4 均匀矩形阵	55
3.4 阵列方向图	55
3.4.1 均匀线阵方向图及其基本特性	56
3.4.2 均匀圆阵方向图及其基本特性	59
3.4.3 均匀矩形阵方向图及其基本特性	64
3.5 阵列波束宽度和角度分辨率	70
3.5.1 阵列波束宽度	70
3.5.2 角度分辨率	71
参考文献	72
第 4 章 传统无线电测向理论与方法	73
4.1 基于艾德考克天线阵的测向方法	73
4.1.1 基于艾德考克天线阵的模拟测向原理	73
4.1.2 瓦特森—瓦特测向法的数字实现原理	78
4.2 基于乌兰韦伯尔天线阵的测向方法	85
4.2.1 均匀线阵和/差方向图的特性	86
4.2.2 基于乌兰韦伯尔天线阵的测向原理	88
4.2.3 数值实验	90
4.3 基于数字波束形成的测向方法	93
4.3.1 延时—相加法	93
4.3.2 Capon 最小方差法	94
4.3.3 数值实验	96
4.4 相位干涉仪测向方法	100
4.4.1 一维相位干涉仪测向原理	100
4.4.2 二维相位干涉仪测向原理	101
4.4.3 相位干涉仪的模糊解分析	106
4.4.4 相位干涉仪的解模糊方法	108
4.5 相关干涉仪测向方法	114
4.5.1 相关干涉仪测向的基本原理	115
4.5.2 相关干涉仪测向方法中的插值运算	115

4.5.3 数值实验	116
参考文献	118
第 5 章 超分辨率测向理论与方法 I ——基础篇	119
5.1 阵列信号模型与方位估计方差的克拉美罗界	119
5.1.1 阵列信号模型	119
5.1.2 方位估计方差的克拉美罗界	120
5.2 多重信号分类算法的基本原理及其理论性能分析	128
5.2.1 多重信号分类算法的基本原理	128
5.2.2 多重信号分类算法的若干推广形式	130
5.2.3 多重信号分类算法的理论性能分析	131
5.2.4 数值实验	137
5.3 最大似然估计算法的基本原理及其理论性能分析	144
5.3.1 未知确定型信号模型下的最大似然估计算法及其理论性能分析	145
5.3.2 复高斯随机型信号模型下的最大似然估计算法及其理论性能分析	150
5.4 子空间拟合估计算法的基本原理及其理论性能分析	152
5.4.1 信号子空间拟合估计准则和算法	153
5.4.2 噪声子空间拟合的优化准则和算法	154
5.4.3 子空间拟合估计算法的理论性能分析	155
5.4.4 数值实验	158
5.5 基于旋转不变技术的测向算法的基本原理及其理论性能分析	159
5.5.1 基于旋转不变技术的测向算法的基本原理	159
5.5.2 LS-ESPRIT 算法	161
5.5.3 TLS-ESPRIT 算法	161
5.5.4 基于旋转不变技术的测向算法的理论性能分析	162
5.5.5 数值实验	166
参考文献	169
附录 B 第 5 章所涉及的复杂数学推导	170
附录 B1 证明式 (5.50) 中的两个等式成立	170
附录 B2 证明式 (5.53)	172
附录 B3 证明式 (5.114)	172
附录 B4 证明式 (5.152) 和式 (5.154)	173
附录 B5 证明式 (5.158)	174
附录 B6 证明式 (5.171)	175
附录 B7 证明式 (5.206)	175
附录 B8 证明式 (5.208)	177
第 6 章 超分辨率测向理论与方法 II ——推广篇	178
6.1 相干信号方位估计方法	179
6.1.1 相干信号的基本概念及其对超分辨率测向算法的影响	179
6.1.2 空间平滑预处理技术	180

6.2	信号二维到达角度估计方法	185
6.2.1	基于多重信号分类算法的二维到达角度估计方法	185
6.2.2	基于 ESPRIT 算法的二维到达角度估计方法	189
6.3	乘性阵列误差存在条件下的信号方位估计方法	202
6.3.1	乘性阵列误差存在条件下的阵列信号模型	203
6.3.2	乘性阵列误差参数和信号方位联合估计方差的克拉美罗界	203
6.3.3	乘性阵列误差参数和信号方位联合估计方法	204
6.3.4	数值实验	206
6.4	联合信号复包络先验信息的方位估计方法	208
6.4.1	信号复包络已知条件下的方位估计方法	209
6.4.2	利用信号复包络恒模信息的方位估计方法	214
	参考文献	220
	附录 C 第 6 章所涉及的复杂数学推导	221
	附录 C1 证明式 (6.122) 中的两个等式	221
	附录 C2 证明式 (6.130) 和式 (6.131)	223
	附录 C3 证明式 (6.162) 至式 (6.164)	225
	附录 C4 证明式 (6.188) 至式 (6.190)	227
第 7 章	基于测向信息的静止目标定位理论与方法	229
7.1	基于电离层反射的单站定位理论与方法	229
7.1.1	不考虑地球曲率影响的近距离单站定位	229
7.1.2	考虑地球曲率影响的远距离单站定位	231
7.1.3	单站定位中的误差分析	232
7.2	双站二维交汇定位理论与方法	233
7.2.1	双站二维交汇定位基本原理	233
7.2.2	定位误差分析	234
7.2.3	数值实验	236
7.3	多站 (多于两站) 交汇定位理论与方法	238
7.3.1	定位观测模型和目标位置估计方差的克拉美罗界	238
7.3.2	定位误差椭圆概率, 误差椭圆面积与误差概率圆环	241
7.3.3	三种目标位置解算方法及其理论性能分析	247
7.3.4	数值实验	254
	参考文献	256
	附录 D 第 7 章所涉及的数学推导	256
	附录 D1 证明式 (7.56)	256
	附录 D2 矩阵 $A_n(\mathbf{r})$, $\dot{B}_{n1}(\mathbf{r})$, $\dot{B}_{n2}(\mathbf{r})$ 的表达式	257
第 8 章	基于测向信息的运动目标跟踪理论与方法	259
8.1	基于测向信息的运动目标可观测性分析	259
8.1.1	静止单站对匀速直线运动目标的可观测性分析	259
8.1.2	匀速直线运动单站对匀速直线运动目标的可观测性分析	261

8.1.3	匀加速直线运动单站对匀速直线运动目标的可观测性分析	263
8.1.4	静止多站对匀速直线运动目标的可观测性分析	267
8.2	基于单站测向信息的运动目标跟踪方法	269
8.2.1	目标运动模型和观测模型	269
8.2.2	目标运动状态向量估计的克拉美罗界	270
8.2.3	扩展卡尔曼滤波算法和伪线性卡尔曼滤波算法	271
8.2.4	无迹卡尔曼滤波算法	275
8.3	基于多站测向信息的渐近无偏跟踪方法	278
8.3.1	目标运动模型和观测模型	278
8.3.2	参数估计方差的克拉美罗界	279
8.3.3	渐近无偏跟踪方法	280
8.3.4	序贯渐近无偏跟踪方法	285
	参考文献	288
	附录 E 第 8 章所涉及的复杂数学推导	289
	附录 E1 证明式 (8.6)	289
	附录 E2 证明式 (8.10)	290
	附录 E3 证明式 (8.23)	290
	附录 E4 证明式 (8.59)	291
	附录 E5 证明式 (8.62)	292
	附录 E6	292
	附录 E7	294
第 9 章	基于阵列信号数据域的目标位置直接估计理论与方法	296
9.1	基于单个可移动阵列的信号数据域目标位置直接估计方法	296
9.1.1	阵列信号模型	297
9.1.2	目标位置估计方差的克拉美罗界	298
9.1.3	两种目标位置直接估计算法	301
9.1.4	数值实验	304
9.2	基于多个静止阵列的信号数据域目标位置直接估计方法	306
9.2.1	阵列信号模型	307
9.2.2	目标位置估计方差的克拉美罗界	308
9.2.3	两种目标位置直接估计算法	312
9.2.4	数值实验	314
	参考文献	318

第1章 绪 论

无线电测向与目标定位是无线电监测的重要内容，是对无线电信号进行分选和识别的重要依据。无线电测向定位与雷达定位有着本质区别，雷达定位属于有源定位体制，它通过自身发射的电磁波信号来确定目标的位置坐标；而无线电测向定位则属于无源定位体制，它是利用目标发射的电磁波信号来确定目标的位置坐标。由于无线电测向具有作用距离远、定位精度高、隐蔽性能强、受气候条件限制小等优点，因此被广泛应用于通信侦察、电子对抗、航天航空、射电天文、地震勘探等多个工程应用领域。

本章将对无线电测向定位基本原理、无线电测向定位方法以及无线电测向系统的基本组成及其技术指标进行简要讨论，并介绍全书结构和内容安排。

1.1 无线电测向定位基本原理简介

无线电测向是指利用无线电测向系统确定辐射源信号来波方向（或称到达方向）的过程，这一过程通常也被称为波达方向（DOA, Direction of Arrival）估计^[1-3]。当考虑二维空间时，测向系统仅需要测量信号方位即可，当考虑三维空间时，测向系统就需要同时测量信号方位角和仰角。在测向过程中，人们习惯将通过测向站地球子午线指北的方向（即正北方向）作为参考方向，而目标方位则是指参考方向旋转到辐射源信号入射方向的夹角，在实际工程应用中将这一测向结果称为示向度。图 1.1 给出了示向度示意图，图中测向站 A 点的地球子午线指北的方向 AN 作为参考方向，然后作出从 A 点到 B 点的连线 AB，于是 $\angle NAB$ 就是指测向站 A 测得目标辐射源 B 的示向度。

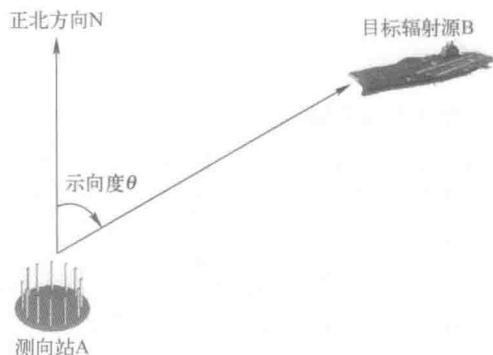


图 1.1 示向度示意图

测向站给出测向结果的最终目的是要确定目标的位置坐标（即目标定位），但仅仅只靠一个测向站给出的单次测向结果是无法实现目标定位的，还需要更多信息^[1-3]。为了能够获得目标的位置坐标，最直接的方法是利用多个不同测向站给出的角度定位线进行交汇定位。图 1.2 是双站交汇定位原理示意图，由于图中考虑的是二维定位场景，因此通过求解两条角度定位线的交点坐标即可获得目标的位置信息。然而，当测向站个数大于两个时，由于测向误差的因素，不同的定位线往往无法相交于同一点（图 1.3），此时就需要根据测向误差的统计特性设计合理的优化准则，并通过优化算法求解在统计意义上较优的定位结果。

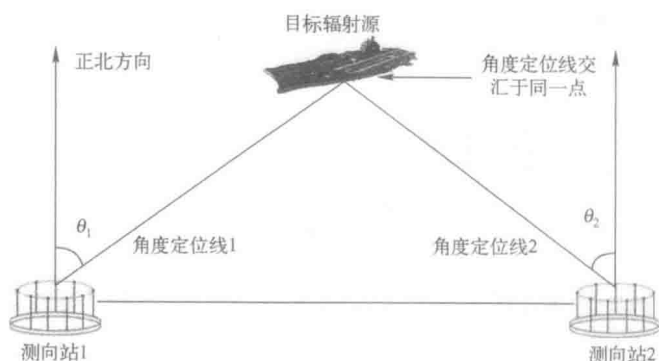


图 1.2 双站测向交汇定位示意图

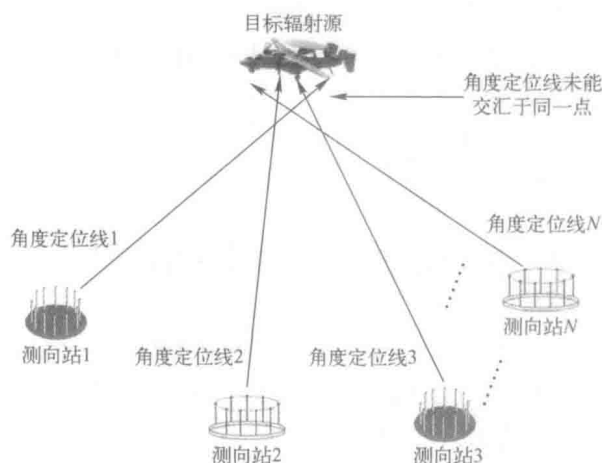


图 1.3 多站（多于两站）测向交汇定位示意图

除了多站测向交汇定位，单站测向定位也是一种常用的无线电定位体制。由于仅存在单个测向站（观测量受限），它通常要求测向站与目标之间处于（相对）运动状态，通过利用（单）测向站在不同时刻所获得的（序列）测向结果就可以实现对静止目标的定位或者是对运动目标的跟踪，图 1.4 给出了单个运动测向站对静止和运动目标的定位示意图。另一方面，实际工程应用中还存在一种专门针对天波超视距信号的测向定位体制，该类定位系统主要应用于短波频段（3~30MHz），能够利用单个测向站给出的单次二维测向结果（包括方位角和仰角）获得目标的位置坐标，但是它需要已知信号反射点的电离层高度参数，如图 1.5 所示。

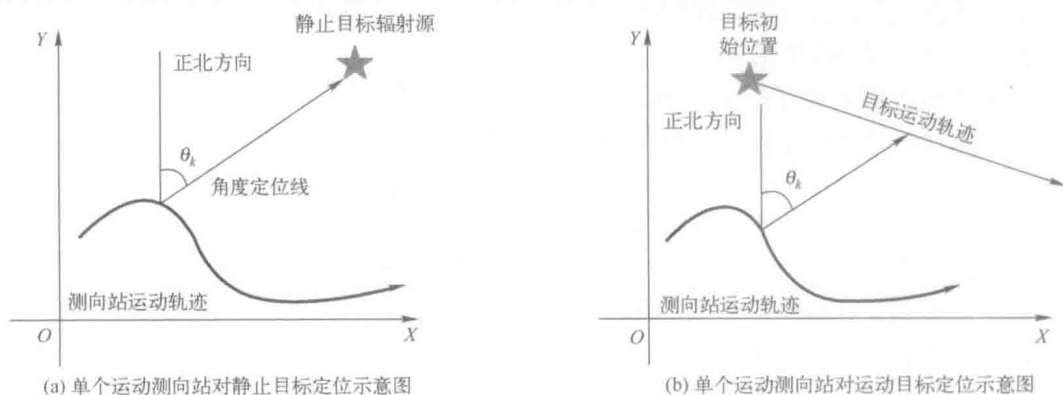


图 1.4 基于单个运动测向站的目标定位示意图

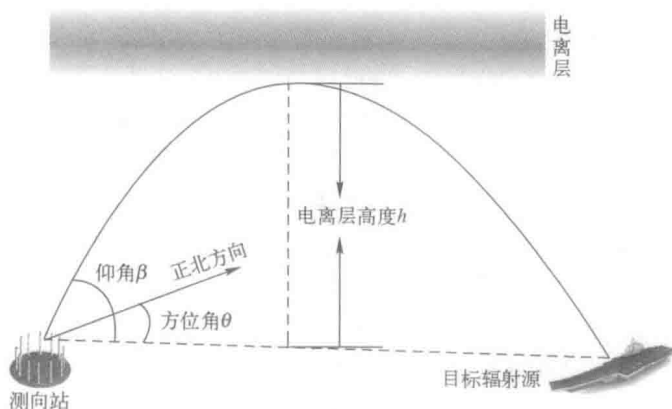


图 1.5 短波单站天波超视距定位示意图

无论上述哪种定位方式,采用无线电信号对目标进行测向定位的依据是无线电波具有以下传播特性:

- ① 无线电波在理想均匀媒质中按照直线(或者最短路径)传播。
- ② 无线电波经过电离层反射后,入射波与反射波在同一铅垂面内。
- ③ 无线电波在传播路径中,若遇到不连续媒质时会产生反射或绕射。
- ④ 在理想均匀媒质中,无线电波传播速度为恒定常数。

根据①和②两个特性可以测定无线电波的传播方向,从而确定目标相对于测向站的方向。根据①和④两个特性可以测定无线电波在目标与测向站之间的传播时间,从而确定目标与测向站之间的斜距。

1.2 无线电测向定位方法简介

下面将对无线电测向定位领域中已有的方法进行简要概述,其中包括无线电测向方法,基于测向信息的目标定位方法以及基于信号数据域的目标位置直接估计方法。

1.2.1 无线电测向方法简介

无线电测向技术的应用开始于第一次世界大战初期,在第二次世界大战之后日臻完善,发展至今已经形成了一套较为完备的理论体系,人们称其为无线电测向学。

从机理上分析,目标信号的来波方向信息不是寄载在天线接收信号的振幅上就是蕴含在其相位中,因此,现有的测向方法大体上可以分为:①基于幅度测量的测向法;②基于相位测量的测向法;③基于复向量测量的测向法。具体地说,第一种测向方法包括基于艾德考克(Adcock)天线阵的测向法^[4, 5](也称为瓦特森—瓦特测向法),基于乌兰韦伯尔天线阵的测向法^[6, 7]等;第二种测向方法包括相位干涉仪测向法^[8-11],多普勒测向法^[1, 2]等;第三种测向方法包括相关干涉仪测向法^[12-15],基于数字波束形成的测向法^[2]等。此外,若从模拟和数字的角度进行划分,现有的测向方法可以分为模拟测向法和数字测向法,不过很多模拟测向方法也可以通过数字化的方式加以实现。

对于任意一种测向方法,除了测向精度以外,角度分辨率也是衡量其性能优劣的一项重要指标。传统测向方法很多是无法分辨出多个信号的,即便能够分辨多个信号,其角度分辨

能力也会受到“瑞利限”的制约。为了突破瑞利限的限制, R.O.Schmidt 于 20 世纪 70 年代末提出了多重信号分类 (MUSIC, Multiple Signal Classification) 算法^[16, 17], 该算法的意义不仅仅在于提供了一种新型测向方法, 更为重要的是开辟了一类以线性子空间为基石的现代超分辨率测向理论, 其中首次建立了信号子空间和噪声子空间的概念。随后, R.Roy 等人又相继提出了基于旋转不变技术的信号参数估计 (ESPRIT, Estimation Signal Parameter via Rotational Invariance Technique) 算法^[18-20], M.Viberg 等人提出了基于子空间拟合 (SF, Subspace Fitting) 的信号参数估计算法^[21-23], 这些算法都可以统一到基于线性子空间的测向理论框架之下, 因此可统称为子空间类测向方法。另一方面, 最大似然估计 (MLE, Maximum Likelihood Estimation) 算法作为一类具有普适性的信号参数估计方法, 其在信号测向领域也发挥着重要作用^[24-27], 其参数估计方差通常可以渐近逼近相应的克拉美罗界 (CRB, Cramér-Rao Bound)。值得一提的是, 在一些条件下最大似然方位估计算法和子空间类测向算法具有相同的渐近估计方差, 甚至是渐近一致的。总体而言, 上述测向算法不仅在参数估计方差上可以渐近逼近其克拉美罗界, 角度分辨能力也都能够突破瑞利限, 因此又可统称为 (现代) 超分辨率测向方法。

1.2.2 基于测向信息的目标定位方法简介

基于测向信息的目标定位技术是无源定位领域中的一个重要研究方向, 也是最常见的定位手段之一。当目标与测向站位于同一平面时 (即考虑二维空间定位), 需要利用测向站获得的方位信息估计目标的二维位置坐标, 但是当目标与测向站不在同一平面时 (即考虑三维空间定位), 就需要同时利用测向站获得的方位角和仰角信息估计目标的三维位置坐标。

利用测向结果实现目标定位的方式有很多, 其中最为常见的是多站测向交汇定位, 它利用了不同测向站所获得的角度定位线进行交汇定位, 可以应用于包括短波 (3~30MHz) 和超短波 (30~300MHz) 在内的多种通信频段。在双站二维定位场景下, 直接解算出两条定位直线的交点即可确定目标的位置坐标, 但是在多站 (多于两站) 定位问题中, 则需要合理设计优化准则, 并进行优化计算以取得统计最优的定位精度。目前已有的目标位置解算方法种类繁多, 这里不再一一例举, 但值得一提的是, 这些方法大都可以归结为某种类型的最小二乘估计问题, 笔者曾在文献^[28]中总结了无源定位中的八大类最小二乘估计问题 (统称为广义最小二乘估计问题), 并针对每类最小二乘估计问题给出了相应的求解算法。

除了多站交汇定位, 利用单个测向站也可以对目标的位置参数进行估计, 但是一般要求目标与测向站之间处于相对运动状态, 并且需要利用测向站在不同时刻所获得的 (序列) 测向结果完成目标的定位或跟踪。这一过程既可以是对静止目标的位置估计, 也可以是对运动目标的航迹跟踪。一般而言, 单站测向定位问题通常可以归结为非线性状态滤波问题^[29, 30], 因此需要利用滤波型算法进行求解。众所周知, 卡尔曼滤波 (KF, Karlman Filter) 算法是求解状态滤波问题的最经典算法^[31, 32], 但它主要是针对线性问题所提出的, 对于非线性问题则需要对标准卡尔曼滤波算法进行修正, 其中最具代表性的非线性滤波算法包括扩展卡尔曼滤波 (EKF, Extended Karlman Filter) 算法^[33], 伪线性卡尔曼滤波 (PLKF, Pseudo Linear Karlman Filter) 算法^[34], 无迹卡尔曼滤波 (UKF, Unscented Karlman Filter) 算法^[35, 36]以及粒子滤波 (PF, Particle Filter) 算法^[37, 38]等。

在单站测向定位问题中, 还存在一类针对天波超视距信号的定位体制和方法^[39, 40], 其目标信号的通信频率主要集中在短波波段。该类方法虽然仅需要单次二维测向结果 (包括方位

角和仰角)即可估计目标的位置参数,但是其求解过程中需要已知信号的(电离层)反射点距离地球表面的高度,并且其定位数学模型中还对电离层反射点、目标位置以及测向站位置三者的几何关系做出一定约束限制,最后需要结合地球曲面方程方可解算出目标的经纬度。不难想象,这种定位体制主要是面向中远距离(通常距离测向站 500~1000km 以内)目标的,而且在定位模型中做了一些近似假设,所以很难要求其在实际工程应用中会具有很高的定位精度。一般而言,较高精度的短波单站测向定位系统的目标位置估计精度可达观测距离的 5% 左右,这意味着距离测向站 1000km 远的目标定位误差约为 50km。

1.2.3 基于信号数据域的目标位置直接估计方法简介

无论在无线电测向定位系统中采用何种测向算法和目标位置估计算法,其定位过程都可以归纳为两步估计方式,即每个测向站先独立地进行测向(第一步),然后再利用测向结果进行交汇定位(第二步)。从整个过程中不难发现,测向往往并不是最终目的,而仅仅给出了中间参数,目标位置估计才是最终所要的结果。因此,一种很自然的想法就是,能否避免测向这一环节,而直接从信号数据域中提取目标的位置参数,即单步估计(这里也称为直接估计)方式。基于这一理念,A.J.Weiss 等人针对现有的各种无线电信号定位体制,提出了相应的目标位置直接估计(PDE, Position Direct Estimation)方法,其中主要包括基于宽带信号时/频差信息的目标位置直接估计方法^[41]、基于窄带信号多普勒频偏的目标位置直接估计方法^[42]、基于信号方位和时差信息的目标位置直接估计方法^[43-47]等。此外,M.Oispuu 等人提出了基于单个运动阵列(即单个运动测向站)的目标位置直接估计方法^[48],张敏等人提出了基于单个运动长基线干涉仪的目标位置直接估计方法^[49,50]。

事实上,无论是两步先测向再定位方式还是单步直接定位方式都有其各自的优缺点。两步定位方式的优势主要体现在计算过程简单,对测向站之间的通信带宽和同步精度要求不高,便于工程实现,而其不足之处可以归纳为以下四点:首先,从信息论的角度来看,两步定位方式难以获得渐近最优的估计精度,这是因为从原始数据到最终估计结果之间每增加一步处理环节,就会损失一部分信息,从而影响最终的定位精度(在低信噪比和小样本数条件下该现象尤为明显);接着,两步定位方式存在门限效应,例如,当两个信号的方位间隔小于某个测向站的角度分辨门限时,该测向站会将其错判为单一信号,如果该测向站将这一错误信息传送到中心站时很可能导致中心站的误判;其次,两步定位方式中的第一步往往是各个测向站利用其采集到的信号数据独立地进行参数估计,这很容易损失各个测向站所采集数据之间的相关性,而丢失掉的信息在第二步定位环节中是无法得到弥补的;最后,当有多个目标同时存在时,两步定位方式存在“目标—量测”数据关联问题,即如何将信号测量参数和目标进行正确关联,从而完成后续的多目标定位。仔细研究不难发现,单步直接定位体制正好可以解决上述四点不足,但是这种定位方式需要各个测向站的信号采集数据全部集中到中心站统一进行处理,因此对于测向站的通信带宽和同步精度要求较高,其计算过程也较为复杂。然而,随着信息传输带宽和计算能力的提升,有理由相信单步定位方式将会在实际工程应用中发挥重要作用。

1.3 无线电测向系统的基本组成及其技术指标

本节将讨论无线电测向系统的基本组成及其技术指标,这里的技术指标主要是面向实际