



精度分析

雷 达 精 度 分 析

楼 宇 希 著

國 防 工 業 出 版 社

内 容 简 介

本书比较系统地叙述雷达精度分析的有关内容，包括对雷达误差的一般讨论，测角、测距和测速等各种误差的产生及其估算，雷达误差的综合方法，误差的测定和分离方法，设计时精度的分配和指标的计算，提高雷达精度的措施等。可供从事雷达研究、设计、生产、使用的工程技术人员、高等学校有关专业的教师和高年级学生参考。

雷达精度分析

楼宇希 著

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168¹/₃₂ 印张 11⁰/₁₆ 292 千字

1979年8月第一版 1979年8月第一次印刷 印数：0,001—6,500册

统一书号：15034·1831 定价：1.45元

序 言

雷达是测量目标坐标的设备，精度自然是重要的战术技术指标之一。因为雷达比一般简单的测量设备要复杂，分析雷达的测量精度也就更复杂一些。造成雷达测量误差的因素很多，如何正确设计方能多快好省地实现这一指标，对已有雷达的精度如何测定，测定时各种误差因素如何分离，以及如何估算各种因素所造成误差分量的大小，都是在实际工作中常遇到的。可是除了对雷达误差源的分析 and 有些误差源的估算方法能在一些参考资料中见到外，其它问题在资料中都很少讨论。因此，在一些同志的建议下整理了这本书。

本书的写法是以工程应用为主。为了能适合于较广泛的读者，在保持一定的系统性和逻辑性的前提下，尽量减少理论性的分析。本书要求读者具有必要的数学、无线电和雷达方面的专业知识。这些年来雷达技术日新月异，受到自己水平的限制和时间关系，书中未能把最新的科学技术成果和发展反映出来，其中有些部分仍沿用了早期的资料。不过本书的目的主要是介绍方法，即使是有些在技术上并不新颖的实例，却有代表性，仍不失其参考和借鉴的价值。

因为雷达精度分析所涉及的面很广，对我来说，要全面论述实在不能胜任。幸而在写作过程中受到许多同志的关心和帮助，各章节也分别得到许多从事这方面工作的同志审阅。这里难以一把他们的名字列出。可以说，本书的完成是集体的力量。虽然如此，书中的错误和不妥之处还必然不少，希望读者们提出批评指正。

本书脱稿时，全国人民瞩目的五届人大已经胜利闭幕，全国

科学大会正在召开。华主席在政府工作报告中提出的十年规划和二十三年设想，描绘出了实现四个现代化的宏伟蓝图，极大地鼓舞了全国人民的斗志。如果本书能为社会主义祖国的伟大建设起到一些作用，就是我最大的幸福。

——作者

目 录

绪言	1
第一章 对雷达误差的一般讨论	5
§ 1-1 根据误差产生的原因对误差分类	5
§ 1-2 各种误差的性质和特征	7
§ 1-3 误差的计算和表示法	11
§ 1-4 误差的频谱分析	15
第二章 测角误差源及其估算	20
§ 2-1 测角的体制和主要参数	20
§ 2-2 目标误差	25
1. 振幅起伏	25
2. 目标闪烁	31
3. 极化误差	32
4. 动态滞后	33
5. 动态滞后变化	34
§ 2-3 雷达跟踪误差	34
1. 电轴漂移和零点漂移	34
2. 热噪声	38
3. 伺服噪声和不灵敏区	39
4. 机械噪声和回差	41
5. 天线结构误差	43
6. 风负载	45
§ 2-4 转换误差	51
1. 标定	51
2. 轴系误差	51
3. 数据传感器系统的精度	54
4. 测读和量化误差	56
§ 2-5 传播误差	57
1. 对流层折射	57
2. 电离层折射	59
3. 乱波	59
4. 多路传播	62

第三章 测距和测速误差源及其估算	66
§ 3-1 测距、测速的体制和主要参数	66
§ 3-2 目标误差	71
1. 振幅起伏	71
2. 目标闪烁	72
3. 动态滞后	72
4. 应答机延迟	73
§ 3-3 雷达跟踪误差	73
1. 零点漂移	73
2. 接收机延迟变化	73
3. 热噪声	74
4. 伺服噪声	75
§ 3-4 转换误差	75
1. 标定	75
2. 光速和频率不准	76
3. 调制脉冲前沿抖动	77
4. 脉冲压缩误差	77
5. 测距元件精度	77
6. 数据传递系统精度和测读、量化误差	77
§ 3-5 传播误差	78
1. 对流层折射	78
2. 电离层折射	80
3. 多路传播	81
4. 乱波	83
第四章 误差的综合方法	84
§ 4-1 综合的要求	84
§ 4-2 误差的分布律和数字特征	85
§ 4-3 误差合成的一般方法	91
§ 4-4 误差合成方法的应用实例	95
1. 跟踪系统增益变化引起的误差	95
2. 接收系统相移误差	97
3. 数据传递系统误差	100
4. 延迟线插值器误差	103
5. 阵风误差	105
§ 4-5 雷达误差估算的特点和总误差的定义	112
§ 4-6 雷达总误差的估算步骤	117
§ 4-7 雷达总误差估算举例	120
1. 圆锥扫描雷达	120

2. 测高雷达	130
第五章 误差的测定和分离	135
§ 5-1 对各种误差特征和分类的进一步讨论	135
§ 5-2 误差分离的方法	138
1. 直接与比较标准相比较	139
2. 随机误差的分离——平滑和最小二乘方法	139
3. 随机误差的分离——变量差分法	144
4. 根据误差的特征分离系统误差	151
5. 孤立误差源	153
6. 间接测量	154
§ 5-3 误差测定和分离方法举例	154
1. 雷达随机误差计算	154
2. 雷达机械轴误差的测定和分离	158
3. 同步机系统的误差测定和分离	161
4. 伺服不灵敏区和动态滞后误差的测定	166
5. 精密跟踪雷达主要随机误差的分离	167
§ 5-4 过失误差的检查和排除	168
1. 过失误差的类型	170
2. 过失误差的判断	172
3. 过失误差的消除和数据的纠正	183
§ 5-5 过失误差处理举例	185
1. 差分法	185
2. 巴德勒法	189
3. 方差分析和 t 检验法	190
4. 观察法和找出产生过失误差的原因	191
§ 5-6 对测定和分离方法的几点补充	195
1. 对测定和分离精度的考虑	195
2. 抽样数、抽样率和处理区间	196
3. 不等权数据的处理	198
4. 误差的传播	199
5. 测量结果的检查	201
§ 5-7 雷达误差的测定和分离	203
§ 5-8 雷达误差的计算和精度的评定	209
§ 5-9 太阳跟踪	217
§ 5-10 测速误差的测定	218
§ 5-11 目标模拟器	222
第六章 精度的设计	226
§ 6-1 设计时误差计算的特点	226

§ 6-2	使用角度的有关考虑	227
§ 6-3	精度设计的几项指导性原则	230
1.	控制大误差	231
2.	控制主要环节的带宽	232
3.	根据灵敏度来要求各环节或元件的精度和稳定性	234
4.	按加权后等精度原则分配误差	235
5.	留有适当的余量	237
§ 6-4	一般设计过程	237
§ 6-5	设计精度分配举例	239
§ 6-6	精度指标换算成为设计技术要求	247
1.	极化误差	248
2.	频率变化和调谐不一致引起的误差	251
3.	自动增益控制	255
4.	零点漂移和不灵敏区	258
5.	数据传递系统误差	260
6.	测距机电路误差	262
7.	轴系误差	262
§ 6-7	保精度工作区域	266
第七章	提高精度的措施	269
§ 7-1	设计	269
§ 7-2	复合控制和自适应控制的应用	276
1.	信号复现系统	276
2.	计算机控制	282
3.	带宽控制	284
4.	模型控制系统	285
5.	零灵敏度系统	287
6.	实时监测	289
§ 7-3	装配、调整及使用	290
§ 7-4	系统误差修正	291
§ 7-5	数据处理	301
1.	系统误差的修正	302
2.	随机误差的扼制	302
3.	利用多卜勒频率修正距离数据	306
4.	速度数据的获得	307
§ 7-6	精度的限制和今后的展望	310
附 录	有关数学基础	314
§ 1	随机变量及其数字特征	314

§ 2	正态分布和大数定律	318
§ 3	随机变量数字特征的运算	319
§ 4	统计量及其计算	325
§ 5	几种常用的其它分布	332
1.	χ 分布和 χ^2 分布	332
2.	t 分布	334
3.	F 分布	334
§ 6	假设检验	335
1.	t 检验法	336
2.	F 检验法	336
3.	方差分析	337
§ 7	随机过程	339
§ 8	抽样	341
§ 9	最小二乘方	345
§ 10	用变量差分法计算随机变量的统计方差	347
§ 11	高阶等差级数求和	350
§ 12	一个积分的计算	352
附表 1	正态分布表	353
附表 2	χ^2 分布表	354
附表 3	t 分布表	355
附表 4	F 分布表	356
参考资料	358

绪 言

精度是雷达的主要战术指标之一。特别是跟踪、引导等雷达，测定目标坐标的精度，在战术技术性能中居于首要地位。由于影响精度的因素很多，想使已有精密跟踪雷达的精度略为提高，都必须付出巨大的代价；而在雷达设计和制造中稍一不慎，就会使精度下降很多。而且一般雷达的目标都是活动的，不可能像对静止目标的测量那样，进行多次重复测量以减小测量数据的离散程度，从而对离散的要求就较高。因此对雷达精度的分析和如何提高雷达精度的研究，在雷达的设计和使用中就显得十分重要。研究和掌握误差产生的原因及其在各种条件下的变化规律，可以找出减小误差甚至消除某些误差的方法，进而获得保证雷达精度或进一步提高雷达精度的可能性。

在自然科学和工业的各部門，已经有很多人研究了精度和误差问题，总结出了很多有系统的规律^[1]。误差论已成为一门独立的理论。测量和计量技术所分析和讨论的基本问题很多能应用到雷达上来，雷达也可以作为一种测量设备来看，只不过比一般测量设备更为复杂而已。也正因为它更为复杂，单靠分析一般测量仪器的方法来分析雷达精度问题就嫌不够。对运动目标的连续测量误差是一种随机过程，因此讨论随机过程的基本理论和处理方法的资料^[2]，对分析和处理雷达误差有一定的参考价值。

许多讨论自动调节和随动系统的书籍都研究了当存在随机扰动情况下系统的精度和误差问题。但是在它们所讨论的问题中，多数假设是线性系统，各个环节都是理想的，从而分析有随机干扰输入或系统中某一环节产生随机扰动时对系统工作精度的影响，提出系统各种特性和质量指标的要求。有的虽然也分析了非

线性情况，但求解又过于复杂，难以实用。按线性系统提出的关于自动调节和随动系统的设计准则，可以说是原理性的。由此所给出的跟踪精度是潜在测量精度，是系统在理想情况下所能达到的极限精度。实际的机构总不像上面假设的那样理想，还有很多其它的误差，有的还在系统的闭环之外。例如某些元件的工作特性往往是非线性的，电气和机械结构也往往存在一些缺陷，某些部件的调整和装配也不能没有误差，环境条件和负载的变化也会引起系统工作性能的改变，等等。这些都引入额外的跟踪误差。在很多时候，这些原因所产生的误差甚至比外来随机干扰和线性系统本身的固有误差大许多。分析实际系统时必须考虑这些因素。虽然如此，雷达跟踪系统的精度分析仍必须应用自动调整的基本理论。特别是在自动调整原理的基础上发展起来的自适应控制系统的出现，使设备能在各种条件变化的情况下获得最佳的性能，是设计雷达时考虑提高精度的一个重要方向。

一些研究机械制造和加工工艺的著作⁽³⁾考虑了这些实际的误差，有比较系统的理论和方法。应用在雷达精度分析中也是合适的。

在雷达的精度和误差分析方面，著作也很多。但大部分都偏重于对各项误差源的分析 and 讨论。也有少数比较详细地分析了某些型号雷达或天线跟踪系统，对各部分误差作了估算和测试。我国最早的一份报告⁽⁴⁾发表在1962年，分析了圆锥扫描雷达的各种误差源。这里值得提出的是巴登(D. K. Barton)的两本著作^(5,6)，比较有系统地分析了跟踪雷达测角、测距和测速的几种主要误差源，成为设计和分析跟踪雷达的常用参考书。然而这两本书对精度测定、误差分离、精度设计、提高精度以及对雷达机械结构方面的误差，涉及很少。而这些正是实际工作中常遇到的。

随着我国社会主义革命和建设的突飞猛进，科学技术的高速发展，雷达的设计越来越多，应用越来越广。因而很需要有雷达精度分析方面的书籍供设计、使用者参考之用。为了总结自己的

经验，同时吸取外国对我们有用的东西，为我国的社会主义建设服务。本书试图对雷达精度分析的各个方面作一略为系统的介绍。

“精度分析”一词已成为常用的术语，但它并没有一个确凿的定义，所包含的内容也还没有公认的范围。本书根据常遇到的问题分为误差源及其估算、误差的综合方法、误差的测定和分离、精度的设计以及提高精度的措施等部分。除了第一章对雷达误差及其分析作一般性的介绍外，误差源及其估算分别按测角和测距、测速编为第二、第三两章，简要地介绍各误差源产生误差的原因和估算方法，有些难以用公式计算的提供了一部分经验数据。本书不准备以这一部分为重点，介绍是简略的，估算公式也是近似的。前三章的叙述作为以后各章讨论的基础。第四章以概率法为基础介绍了各类误差的合成原则和计算方法。用概率法综合误差是资料上常见的，但本书还根据误差的各种特征提出了合成时的不同计算方法，适用于雷达误差源的各种复杂情况。并试图作出规定雷达精度的统一标准。第五章介绍了误差测定和分离的常用方法，特别是比较详细地分析了对一般读者较为生疏的变量差分法。过失误差是误差测定时常遇到的，如果不能正确排除往往影响测定结果的精度。本书根据经验，分析和提出了一些对过失误差的判断和处理方法。在这一章还介绍了几种测定和计算雷达整机精度的方法。第六章叙述了设计时精度分配和技术要求确定的一些原则和方法。原则和方法的叙述不宜过于繁琐，无法包括实际遇到的千变万化的问题。如果要解决实际问题，不但需要掌握原则和一般性的方法，还牵涉到许多应用的技巧。为此，以上三章都举了若干有代表性的实例，以进一步说明这些原则和方法的应用。虽然是实例，目的只是为了把方法具体化，由于各种用途的雷达设计、参数都差别很大，它们的实际数据不一定有通用性。第七章讨论了提高精度的各方面措施。

雷达精度分析的理论基础是概率论和数理统计，信息论和控制论的有些概念也很有用。雷达本身又是多种技术专业(无线电、

电气、机械、结构等等)的综合,精度分析也必然牵涉到这些方面。本书在附录中简要汇集了有关数学的基础知识,其它不准备更多地叙述,需要时读者可自行参阅有关书籍。

雷达的类型很多,精度是跟踪雷达的重要指标。其它雷达的测量精度虽然一般说大都比跟踪雷达低,但有一些雷达(如三坐标雷达和测高雷达)的测量精度也是重要的。本书的讨论以跟踪雷达为主,也适当地涉及了其它雷达。各种类型雷达的精度不同,工作体制也有差别,分析的方法却是相同的。因此本书介绍的许多方法有通用性。

第一章 对雷达误差的一般讨论

§ 1-1 根据误差产生的原因对误差分类

雷达测量目标位置通常用方位、仰角、斜距三个量或方位、斜距两个量（也有少数雷达采用其它坐标系，但总包括角度和斜距两种量）。如果需要它们的速度量，常用对它们微分的方法得到，后来随着脉冲多卜勒体制的发展，也有少数雷达利用测量多卜勒频率来得到目标的径向速度。

从雷达测量目标坐标的方式看，可以把雷达分为两类。一类是自动跟踪雷达，它对运动目标进行自动跟踪，可以给出连续的目标坐标测量值。另一类是非跟踪雷达，它所给出的测量值是离散的。一般地说，后一类雷达的测量精度较低。不管那一类雷达，按它们的工作过程看，目标、电磁波传播的空间、雷达天线和馈线、接收机、伺服系统（包括测角、测距或测速）、天线转动设备、数据传递、显示以及记录等附属设备都是雷达测量系统的组成部分。如果跟踪或测量由人工进行操作，则人工操作和测读也属于测量系统的一部分。这些部分工作的准确性和灵活性，都影响测量的精度。所以在分析测量误差时，必须对这些部分可能引入的误差都一一加以考虑。

根据误差产生的来源和性质，可以对测量误差进行分类。分类的方法很多。如果按照误差产生的部位来分，可分为：目标误差、雷达跟踪误差、转换误差、传播误差和测量误差等。目标误差是由目标的运动和反射情况的改变而产生的误差。雷达跟踪误差是指雷达跟踪的闭环系统各部分（例如角度闭环中的天馈线、接收机、伺服系统和天线转动系统）的性能不理想所产生的误差。

非自动跟踪的雷达没有跟踪闭环，但这些误差依然存在，只是因为缺少反馈作用，工作在开环状态，计算时有区别。也有的雷达是通过人工操作形成闭环，由于人工反馈的时间常数很大，已和系统开环工作差不多。转换误差是指基准线(或基准面)的标定精度、坐标轴装配的准确性、坐标转换和传递过程中所产生的误差。传播误差是电磁波传播过程所引入的误差。测量误差是指用其它观察仪器来测定雷达精度时，这些仪器本身或测量方法上所引入的误差。在测定雷达的精度时，测量误差必然存在，不过它不属于雷达本身的误差，本书不准备讨论。

以上所列的每一类误差中都包括若干不同的项目。下面列出了主要的项目。采用不同的工作体制和雷达不同的设计，误差项目是不同的。在有的雷达中，有的项目没有；而在另外的雷达中，也可能增加一些新的项目。至于这些项目的含义及内容，将在下面两章分别讨论。

(一) 目标误差：

- (1) 目标振幅起伏；
- (2) 目标闪烁(等效反射中心的偏移)；
- (3) 极化误差(只出现在角坐标)；
- (4) 动态滞后和动态滞后的变化(这项误差与伺服系统性能有关，也可归入雷达跟踪误差中)。

(二) 雷达跟踪误差：

- (1) 电轴漂移和零点漂移；
- (2) 热噪声误差；
- (3) 伺服系统的电噪声和不灵敏区；
- (4) 传动系统的机械噪声和回差(只出现在角坐标和机电式测距机的距离坐标)；
- (5) 结构误差(只出现在角坐标)；
- (6) 风负载(也只出现在角坐标)。

(三) 转换误差：

- (1) 标定;
- (2) 轴系误差(只出现在角坐标);
- (3) 光速和频率不准(只出现在距离和多卜勒频率);
- (4) 数据传递系统精度;
- (5) 显示器扫描线或刻度的非线性;
- (6) 量化或测读误差。

(四) 传播误差:

- (1) 大气折射误差(包括对流层和电离层);
- (2) 多路传播;
- (3) 传播中的干扰(乱波)。

这种分类方法是为了便于下面的叙述。根据不同的需要, 还有其它的分类方法, 将在后面逐步介绍。

§ 1-2 各种误差的性质和特征

在自然科学和工程上, 测量的对象是十分广泛的。但归纳起来可以分为两类: 一类是对静止量的测量; 另一类是对变动量的测量。对静止量测量时, 被测量的量是恒定值。而对变动量测量时, 被测量的量随时间变化。有的情况, 变动是按某种规律进行的; 也有的情况, 变动带有一定的随机性。雷达对目标坐标的测量属于后一类。

任何测量, 由于测量设备本身的不完善, 测量时必然会引入误差。要分析这些误差, 首先必须根据它们的来源, 弄清楚它们的性质和特征。根据所引入误差的性质和特征, 可以分为随机误差、系统误差和过失误差三类。

随机误差也常称为偶然误差, 是纯粹的随机量。它的出现是不规则的, 反复多次测量时, 它的大小和符号各不相同。产生随机误差的原因很多, 主要有以下几方面:

(1) 测量精度超过设备或仪器制造精度的极限, 这时设备或仪器本身所具有的测不准性质会产生误差。例如接收机的热噪