

连续波雷达 数据处理

贾兴泉 主编

Continuous-Wave Radar Data Processing

国防工业出版社

National Defence Industry Press <http://www.ndip.cn>

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助

连续波雷达数据处理

贾兴泉 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

连续波雷达数据处理/贾兴泉主编.—北京:国防工业出版社, 2005.7

ISBN 7-118-03415-0

I. 连... II. 贾... III. 连续波雷达—雷达信号—数据处理 IV. TN958.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 010768 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10¹/₈ 263 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

主 编 贾兴泉

副 主 编 王国平 邵长林

编写人员 王志丹 侯金保 叶正茂

辛虎兵 李文德

前 言

连续波雷达是我国航天测控领域的主干设备，在飞行器试验的外弹道测量中有着重要的地位和不可替代的作用。其测量数据事后处理结果可以提供给飞行器研制部门作为型号试验的精度分析、定型和性能改进的依据。因此，型号研制部门、测控总体、设备使用单位都非常重视连续波雷达的数据处理工作。

提高弹道跟踪数据的精度通常有两种办法：一是从设备上想办法，包括使用更高精度的设备、利用新技术改造现有设备等；二是从数据处理方法上想办法，包括建立准确的设备误差模型、随机误差模型、环境误差模型，建立精确的、少参数的、匹配关联的弹道参数模型等。在此基础上研究有效的弹道跟踪数据校准方法，修正系统误差，分析随机误差的统计特性，进一步提高弹道跟踪数据的精度。

全书共分9章，第1章干涉仪总体知识，介绍数据处理人员必备的设备知识；第2章干涉仪的测量原理，介绍连续波干涉仪定位、测速的数学原理；第3章雷达数据处理相关知识，简要介绍与雷达测量数据处理密切相关的数学知识；第4章地面直角坐标系的建立与转换，重点介绍与雷达测量数据处理有关的大地测量知识和各种直角坐标系的建立与转换；第5章测量数据预处理与误差修正，介绍测量数据的各种误差修正方法；第6章弹道的参数表示，主要介绍轨道的节省参数表示方法和弹道特征点与特征阶的提取；第7章系统误差诊断与估计，介绍系统误差的建模、诊断与估计；第8章弹道求解方法，重

点介绍连续波单站定轨的非线性回归分析方法和多站连续波跟踪雷达的测速定轨方法；第9章数据处理结果的评价，主要介绍如何从定性、定量原理，定位、测速机理，主观、客观分析等方面评价弹道跟踪数据的精度。

本书引用了许多论著的结果，在此向作者表示衷心的感谢；翁杰、王正明和刘利生专家对本书进行了仔细审阅，并提出了宝贵意见，在此表示感谢。

由于我们的水平有限，书中不妥之处，恳请专家、同行提出宝贵意见。

内 容 简 介

本书共 9 章，主要介绍了干涉仪设备的组成及各部分的主要功能，干涉仪测速、定位的数学原理，地面直角坐标系的建立与转换，测量数据的预处理与误差修正方法，弹道跟踪数据校准与评估的理论、模型、方法 and 应用。

本书集理论与实践于一体，内容丰富、实用性强，除系统地论述了连续波雷达数据处理的理论、方法、技术外，还编有大量的图、表和实例，以帮助读者理解所学内容。

本书可供从事应用数学、航天航空和有关工程领域的人员参考，是雷达数据处理人员、设备管理人员的自学用书和工具书，也可供从事雷达专业的硬件人员参考。

目 录

第1章 干涉仪总体知识	1
1.1 设备组成及各部分的主要功能	2
1.2 干涉仪测速分系统	3
1.2.1 多普勒频率的提取	4
1.2.2 多普勒频率的测量	5
1.2.3 测速系统信息流程	7
1.3 干涉仪测距分系统	8
1.3.1 解模糊	8
1.3.2 匹配	9
1.3.3 侧音频率的选取	10
1.3.4 距离的测量	13
1.4 系统精度分配	17
1.5 测距校零	20
第2章 干涉仪的测量原理	22
2.1 干涉仪测速的数学原理	22
2.1.1 利用多普勒效应求速	22
2.1.2 直接求速	28
2.1.3 多普勒频率与相位积累量的关系	32
2.1.4 3种求速法	34
2.2 干涉仪定位的数学原理	35
2.2.1 采样测距	35
2.2.2 伪随机码	36
2.2.3 伪随机码测距	39

第3章 雷达数据处理相关知识	40
3.1 待估函数的参数表示	40
3.1.1 均匀逼近和平方逼近	40
3.1.2 多项式表示待估参数	41
3.1.3 样条函数表示待估函数	48
3.1.4 B样条函数	51
3.2 回归分析方法	54
3.2.1 问题的提出	54
3.2.2 线性回归分析方法	56
3.2.3 回归分析模型的优化	60
3.2.4 待估参数的选择	63
3.2.5 线性回归模型的有偏估计	63
3.2.6 非线性回归分析方法	67
3.3 非平稳时间序列的频域分离	71
3.3.1 频率的定义	71
3.3.2 频域分离技术	74
3.3.3 离散时间三频带信号分离的样条函数方法	81
3.3.4 随机误差分离的高精度方法	91
3.3.5 联合模型随机误差的协方差矩阵	109
第4章 地面直角坐标系的建立与转换	115
4.1 大地测量基础知识	115
4.1.1 地球的形状与地球椭球	115
4.1.2 地心大地坐标系与地心直角坐标系	117
4.1.3 天文坐标	118
4.1.4 天文坐标与大地坐标的关系	119
4.1.5 大地方位角等概念	121
4.1.6 地极移动和起始天文子午线	124
4.1.7 地心坐标系与参心坐标系	125
4.1.8 我国当前采用的主要坐标系	126
4.2 直角坐标系的平移与旋转	127

4.3 直角坐标系的建立	130
4.4 直角坐标系之间的转换	131
4.4.1 地心坐标与大地坐标之间的关系	131
4.4.2 地心坐标系与发射坐标系之间的转换	132
4.4.3 地心坐标系与法线测量坐标系之间的转换	135
4.4.4 法线测量坐标系与垂线测量坐标系之间的 转换	136
第5章 测量数据预处理与误差修正	139
5.1 预处理	139
5.1.1 定位数据的复原	139
5.1.2 测速数据的复原	141
5.1.3 野值的识别与处理	142
5.1.4 随机误差的统计与分析	143
5.1.5 测量数据的平滑与微分	144
5.2 时间误差修正	150
5.2.1 测量值不反映目标采样时刻状态的时间 误差修正	151
5.2.2 两套干涉仪伪码不同步时间误差修正	154
5.3 电波折射修正	156
5.3.1 折射指数的计算	158
5.3.2 大气球面分层假设下的折射修正	160
5.3.3 三维大气折射修正	174
5.4 跟踪部位修正	181
5.4.1 弹体坐标系与发射坐标系的转换关系	183
5.4.2 弹上任意点在发射坐标系中的位置和速度	186
5.4.3 测量值的修正	188
第6章 弹道的参数表示	189
6.1 弹道的多项式表示	189
6.2 弹道的样条描述	190
6.3 弹道特征点与特征阶的提取	192

6.3.1 弹道特征点的提取方法	194
6.3.2 弹道的特征阶	197
6.4 弹道最优节点的样条函数表示	198
6.4.1 等距节点与最优节点逼近效果比较	198
6.4.2 弹道最优节点的样条表示	202
第7章 系统误差诊断与估计	204
7.1 单测元诊断	205
7.2 匹配测元诊断	207
7.2.1 匹配样条拟合诊断	207
7.2.2 测速数据积分诊断	207
7.3 测元组合的系统误差诊断方法	212
7.3.1 测量数据的误差模型	212
7.3.2 常值、时间、慢漂误差的联合模型诊断与估计	213
7.3.3 测元系统误差的诊断	223
7.4 干涉仪常值系统误差的估计方法	239
7.4.1 EMBET 方法	239
7.4.2 非线性模型方法	241
7.4.3 EMBET 方法与非线性模型方法的比较	245
7.5 模型误差与估计效率	246
7.5.1 模型误差	246
7.5.2 模型误差与弹道联解精度	247
7.5.3 弹道估计效率与模型误差处理原则	252
7.5.4 色噪声与参数估计精度	255
7.5.5 多测元联合模型的权值估计	260
7.6 光雷联合估计干涉仪常值误差	265
7.6.1 光测常值误差对弹道精度的影响	266
7.6.2 光雷联用与自校准	269
第8章 弹道求解方法	273
8.1 干涉仪单站定轨的数学方法	273
8.1.1 测量数据的数学模型	273

8.1.2 定轨的数学方法	273
8.2 干涉仪定轨的非线性回归分析方法	275
8.2.1 数学模型的建立	275
8.2.2 算法及误差分析	276
8.3 多站连续波跟踪雷达的测速定轨	279
8.3.1 测速逐点定轨	280
8.3.2 测速样条函数定轨	282
第9章 数据处理结果的评价	289
9.1 雷达测量数据评定与分析	289
9.1.1 雷达测量数据随机误差评定与分析	289
9.1.2 系统误差的分析与评定	290
9.1.3 总误差的评定	292
9.2 数据处理结果评价	293
9.2.1 数据处理结果的定性评价	293
9.2.2 数据处理结果的自评价	294
9.2.3 数据处理结果的互评价	296
附录1 平稳时间序列的模型表示法	298
附录2 大地坐标与地心坐标之间的转换	300
附录3 符号说明	303
附录4 常用的概率分布	307
附录5 常用的矩阵公式	311

第 1 章 干涉仪总体知识

干涉仪是将不同测站测得的弹载应答机转发信号合并到一起进行相干处理的连续波雷达系统。决定目标飞行状态至少需要 3 个独立的定位元素和 3 个独立的测速元素。所以对一个全干涉仪来说,至少有 1 个主站和 2 个副站才能构成一个完整的测量体制。布站时要求主、副站通视,站间几何位置要有利于定轨精度。我国目前的干涉仪系统主要有 1 主 2 副 3 站制的 L 型布站和 1 主 3 副 4 站制的 Y 型布站。

干涉仪体制有跟踪距离远、测量精度高等优点,它是战略导弹、运载火箭飞行试验主动段外测的主要设备。干涉仪测量系统的工作方式有主动式和被动式两种。设干涉仪系统的信号发射天线 T 和主站接收天线 R 在发射坐标系下的站址分别为 (x_T, y_T, z_T) , (x_R, y_R, z_R) , 副站接收天线的站址为 (x_i, y_i, z_i) , $i = P, Q$ 。t 时刻目标 m 在发射坐标系下的位置为 $x(t), y(t), z(t)$, 速度为 $\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t)$, 则

$$R_j = \sqrt{(x(t) - x_j)^2 + (y(t) - y_j)^2 + (z(t) - z_j)^2}$$
$$\dot{R}_j = \frac{(x(t) - x_j)\dot{x}(t) + (y(t) - y_j)\dot{y}(t) + (z(t) - z_j)\dot{z}(t)}{R_j}$$

式中, $j = T, R, P, Q$; R_j , $\dot{R}_j$ 分别表示目标距测站的距离和距离变化率。

国内干涉仪系统主站的测量元素为距离和 ($S = R_T + R_R$) 与距离和变化率 ($\dot{S} = \dot{R}_T + \dot{R}_R$); 副站为距离差 ($Q = R_R - R_Q$, $P = R_R - R_P$) 与距离差变化率 ($\dot{P} = \dot{R}_R - \dot{R}_P$, $\dot{Q} = \dot{R}_R - \dot{R}_Q$)。

下面,以 3 站制体制为代表介绍数据处理必备知识。

1.1 设备组成及各部分的主要功能

1. 干涉仪的组成

干涉仪的组成如图 1.1.1 所示。

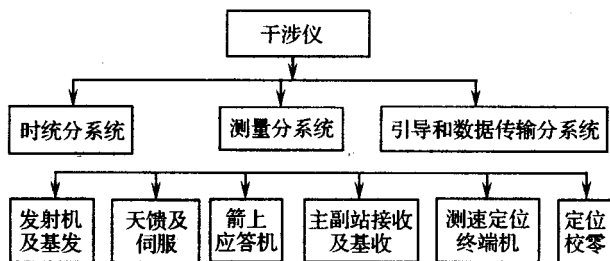


图 1.1.1 干涉仪组成框图

2. 干涉仪各部分的主要功能

干涉仪由 3 大部分组成：时统分系统、测量分系统、引导和数据传输分系统。各系统的主要功能如下。

(1) 时统分系统由铷原子频标、氢原子频标、锁相晶振、驱动放大器以及时间产生器组成。提供测量系统高纯度、高稳定度的频率标准(如 5MHz)及时间信号标准，提供由基准(如 5MHz)产生的一系列的采样信号。

(2) 引导和数据传输分系统由单脉冲引导雷达、实时引导计算机、调制解调器以及传输信道组成。它的功能是提供各种引导源信息和将测量数据送到安控中心计算机上。

(3) 测量分系统是干涉仪的主体。其功能是完成对目标的位置和速度的测量。主要由下列各部分组成。

① 发射机及基线发射机。发射机的功能主要有 3 条：一是产生射频频率(假定 3 根)；二是在二、三路射频上调制测距信号 X、Y 码；三是将 3 根射频信号进行电压放大及功率放大，通过发天线向应答机发出测量信号。

② 基线传输设备。它的功能是为副站提供基准信号和将副

站接收信息传到主站。

③ 天馈及伺服分机。它由抛物面天线、馈源及伺服机构等组成。天线及馈源的功能是发射和收集微波信号。伺服的功能是放大、校正自跟踪接收机来的误差信号 ΔA 和 ΔE ，通过减速齿轮带动天线对准目标。

④ 箭上应答机。它由收发天线、接收转发等几部分组成。它的功能是移频、放大、转发。

⑤ 主、副站接收机。主站接收机由高频头、自跟踪接收机、大环、基线接收机大环以及主、副通道的 5MHz 环、80MHz 环所组成。副站接收机包括接收、转发及标收 3 大部分。接收部分由高频头、自跟踪接收机、大环组成。主、副站接收机的主要功能：一是提供主、副站伺服的方位、俯仰误差信号；二是滤除噪声、复制主、副站接收的多普勒频率 f_{dr} 、 f_{dp} ，并完成相关做差得到主、副站多普勒频率差 f_{drp} ；三是提供定位主、副通道的精侧音的 80MHz 及其匹配音 5MHz；四是对定位 X、Y 码实施解调；五是副站接收锁在基发信号上的基准信号为副站提供基准；六是副站转发为了实现发收隔离起到移频 110MHz 及放大作用。

⑥ 终端机。由定位终端机和测速终端机组成。测速终端机分锁相倍频器(也称锁倍器)和测频两部分；定位终端机由 5MHz 粗测、5MHz 精测及 80MHz 精测以及记录测速定位数据的事后记录磁带机组成。测速终端机的功能有：一是对多普勒频率实施锁相倍频，进一步滤除噪声，提高分辨率；二是对多普勒实施测量。定位终端机的伪码环起到产生复制发码状态的作用，5MHz 粗测、5MHz 精测、80MHz 精测实施对收发信号的相位差进行测量。

⑦ 定位校零。它的功能是测量地面设备和应答机的延时。

1.2 干涉仪测速分系统

雷达测速的基础是多普勒效应。相对于地面发射源运动的测量设备测到的频率并不等于发射源的频率，这种现象被称为多普

变换, 然后再送给终端机。频率变换器如图 1.2.2 所示。

其信息流程是:

主站接收机来的 $88\text{MHz} + f_{\text{dR}} / 60$ 与频率综合器提供的 80MHz 信号进行混频, 再倍乘 4, 得到 $32\text{MHz} + f_{\text{dR}} / 15$, 频率综合器提供的 31.875MHz 与 $32\text{MHz} + f_{\text{dR}} / 15$ 混频得到 $\dot{S}$ 测速频率经变换器输出: $0.125\text{MHz} + f_{\text{dR}} / 15$ 。

对于 $\dot{r}$ (代表 $\dot{P}$ 和 $\dot{Q}$), 多普勒频率的提取同主站的 f_{dR} 。信息流程是: 主基收来的 $\times\times 70\text{MHz} + f_{\text{dP}}$ 与主接收来的 $\times\times 80\text{MHz} + f_{\text{dR}}$ 混频, 得到 $110\text{MHz} + f_{\text{dRP}}$ (注意 $f_{\text{dRP}} = f_{\text{dR}} - f_{\text{dP}}$ 即主、副站多普勒频率差), 然后与频率综合器提供的 109.91MHz 混频得到 $\dot{r}$ 测速频率变换器的输出: $0.09\text{MHz} + f_{\text{dRP}}$ 。

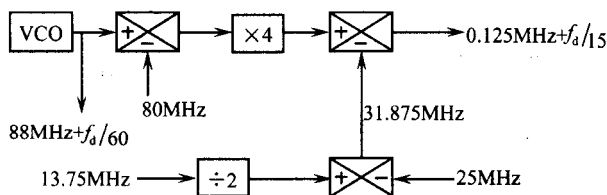


图 1.2.2 $\dot{S}$ 频率变换器方框图

1.2.2 多普勒频率的测量

上面我们讲了多普勒频率的提取问题, 终端要将多普勒频率测量出来, 还涉及测量方案的选择、 f_{d} 正负问题、分辨率及测量方法等。

在我国连续波雷达中, 一般采用如下 3 种测量方法: 第 1 种是固定时间测整周的锁倍器法, 第 2 种是固定时间测整周的分周扩展测时法, 又称模拟内插时间测量法, 也称精密测时法, 第 3 种是基本固定时间测整周。

锁倍器法和分周扩展测时法都是为了提高分辨率, 降低量化误差。