

子午卫星多普勒定位

(加) D.E韦尔斯著



子午卫星多普勒定位

〔加〕 D·E·韦尔斯著
测绘科学研究所 译

测 绘 出 版 社

1 9 7 9 . 北 京

本书从电磁计量的基本原理导出了导航型和大地型接收机的观测多普勒数学模型，分析了数学模型中的假设，并就对流层折射改正所能得到的效能作了分析。应用希尔伯特空间最佳化的基本原理导出最小二乘最佳算法，对工作星历的精度和形式作了系统研究，并将吉尔理论应用于大地定位问题，且以一组实例作了全面分析。

本书供具有一定理论水平的大地测量工作者、远洋航运导航人员、海洋石油勘探及有关从事卫星科研工作者参考，也可供有关专业院校师生参考。

D.E.Wells

Doppler Satellite Control

University of New Brunswick, Fredericton N.B. Canada.

Technical Report No. 29, 1974.

子午卫星多普勒定位

〔加〕D·E·韦尔斯著

测绘科学研究所 译

（只限国内发行）

测绘出版社出版

山西新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本787×1092 1/32 印张8 1/4 插页1 字数192千字

1979年11月第一版 1979年11月第一次印刷

印数1—2,800册 定价1.30元

统一书号：15039 新118

HK 47/10
前言

多普勒原理应用于卫星定位，使导航定位技术跨入了一个新阶段。由于这一原理在大地测量中的应用，使大地测量技术迅速地发生了新的变革。目前世界上很多国家正在广泛采用多普勒卫星定位这一新技术作为测图的基础控制，或者用来重新进行椭球定位以及加强天文大地网。这一新技术从诞生到现在还不到十年的时间，已显示了极其旺盛的生命力，并且正不断地向前发展。

为了赶超世界先进水平，在本世纪内使我国实现社会主义的四个现代化的宏伟目标，对多普勒卫星定位技术应当予以足够的重视，以加速测绘技术的现代化。我国有关部门已引进或正在引进这一新技术。为了使广大测绘工作者熟悉和掌握这一新技术，现将 D.E. 韦尔斯著《子午卫星多普勒定位》一书予以翻译、出版，以供参考。

本书由我所黄启祥同志翻译，胡明城同志校订，刘乃苓同志协助了部分图件工作，由于译者水平有限，谬误之处在所难免，尚希读者批评指正。

测绘科学研究所

1978年11月

目 录

前 言

第一章 前 言..... (1)

§ 1.1 问题的陈述..... (1)

§ 1.2 本文论述概要..... (2)

§ 1.3 各章的内容提要..... (3)

第二章 电磁计量..... (5)

§ 2.1 电磁测量 (5)

§ 2.1.1 基本定义..... (5)

§ 2.1.2 弥 散..... (9)

§ 2.1.3 非均匀性..... (11)

§ 2.1.4 相位差测量..... (13)

§ 2.1.5 多普勒效应..... (18)

§ 2.2 子午卫星多普勒定位..... (20)

§ 2.2.1 子午卫星播送的数据..... (21)

§ 2.2.2 子午卫星多普勒的观测方程..... (22)

§ 2.2.3 导航观测方程的参数..... (34)

§ 2.3 对流层折射改正..... (44)

§ 2.3.1 霍普菲尔德模型..... (48)

§ 2.3.2 霍普菲尔德模型的约尼略
斯 算法..... (51)

§ 2.3.3 简化模型..... (53)

§ 2.4 电离层折射改正..... (55)

§ 2.4.1 两频率的模型..... (56)

第三章 希耳伯特空间最佳化	(58)
§ 3.1 基本 概 念.....	(59)
§ 3.1.1 数学客体和数学 关系	(60)
§ 3.1.2 映射 理 论.....	(65)
§ 3.1.3 希耳伯特空间最佳化 问 题.....	(67)
§ 3.1.4 纯量积的约定 条 件.....	(70)
§ 3.1.5 最小二乘 逼 近.....	(72)
§ 3.1.6 非线性最佳化 问 题.....	(73)
§ 3.1.7 最小二乘频谱 分 析.....	(74)
§ 3.1.8 矩阵表 示 法.....	(75)
§ 3.2 最小二乘 估 计.....	(76)
§ 3.2.1 期 望 值.....	(76)
§ 3.2.2 协方差和权 矩 阵.....	(77)
§ 3.2.3 显数学 模 型.....	(80)
§ 3.2.4 隐数学 模 型.....	(82)
§ 3.3 逐 步 估 计.....	(84)
§ 3.3.1 法方程 求 和.....	(85)
§ 3.3.2 两个矩阵恒 等 式.....	(88)
§ 3.3.3 分阶段平差和顺序平差的表 示 式...	(88)
§ 3.3.4 分开 Y 矢 量.....	(90)
§ 3.3.5 避免矩阵 M 的显 求 逆.....	(90)
第四章 卫星的判别, 工作星历的形式和精度	(92)
§ 4.1 工 作 星 历.....	(92)
§ 4.1.1 地固坐标系中的卫星 坐 标.....	(97)
§ 4.2 吉 尔 定 理.....	(101)
§ 4.2.1 吉尔平面 坐 标.....	(104)
§ 4.2.2 吉尔平面 导 航.....	(106)
§ 4.3 工 作 星 历 的 判 别.....	(109)

§ 4.3.1	卫星到达近站点的时刻和 斜率的观测值·····	(111)
§ 4.3.2	卫星到达近站点的时刻和 斜率的预期值·····	(112)
§ 4.4	工作星历的精度·····	(120)
§ 4.4.1	工作星历与精密星历的比较·····	(121)
§ 4.4.2	新、旧工作星历的比较·····	(126)
§ 4.4.3	吉尔平面导航结果·····	(128)
§ 4.5	工作星历的形式·····	(128)
§ 4.5.1	非摄动的和线性摄动的 开普勒轨道参数·····	(129)
§ 4.5.2	开普勒参数和工作星历参数 之间的比较·····	(132)
§ 4.5.3	精密星历可变轨道参数的 时序分析·····	(133)
§ 4.5.4	精密星历和工作星历可变轨道 参数的最小二乘逼近·····	(139)
§ 4.6	工作星历的协方差矩阵·····	(152)
第五章	实验数据的分析结果·····	(154)
§ 5.1	假设和判定的摘要·····	(154)
§ 5.1.1	多普勒测量结果和改正·····	(154)
§ 5.1.2	卫星的星历·····	(155)
§ 5.1.3	数据过滤·····	(156)
§ 5.1.4	坐标计算·····	(157)
§ 5.2	数据处理概要·····	(158)
§ 5.2.1	输入数据·····	(158)
§ 5.2.2	处理程序·····	(161)
§ 5.2.3	数据取舍·····	(164)

§ 5.3 吉尔平面导航结果	(169)
§ 5.3.1 多普勒残差	(170)
§ 5.3.2 吉尔平面坐标	(176)
§ 5.3.3 接收机的频率偏移	(181)
§ 5.3.4 估计的方差因子	(185)
§ 5.4 坐标计算结果	(187)
§ 5.4.1 1973年结果	(187)
§ 5.4.2 1973年与1972年结果比较	(211)
§ 5.4.3 1972年和1973年多普勒结果与 大地网的比较	(212)
第六章 讨论和结论	(219)
§ 6.1 假设和决定的重新研究	(219)
§ 6.1.1 多普勒测量结果和改正	(219)
§ 6.1.2 卫星的星历	(224)
§ 6.1.3 数据过滤	(226)
§ 6.1.4 坐标计算	(231)
§ 6.2 结论	(236)
§ 6.2.1 观测精度	(237)
§ 6.2.2 跟踪站坐标的符合程度	(238)
§ 6.2.3 作业方面的考虑	(239)
§ 6.3 对将来工作的建议	(240)
附录A 统计检验	(242)
参考资料	(248)

第一章 前 言

§ 1.1 问题的陈述

这份研究报告的目的,是研究子午多普勒系统(也叫做导航卫星系统)应用于大地定位,这个定位采用工作星历表(由子午卫星播送的卫星轨道的预报参数)和 $AN/SRN-9$ 型(导航)接收设备。

应用美国海军武器实验所(以下简称 NWL)的精密星历表(由计算站把全球跟踪网所得到的多普勒观测结果与48小时卫星轨道相拟合而计算的卫星坐标)和 $AN/PRR-14$ 型(大地接收机)接收设备,曾经证明:由子午卫星观测能够以大约一米的精度确定控制点的坐标 (DOD , 1972; Hadgigeorge, 1972; Anderle, 1974)。

虽然 NWL 精密星历表比工作星历表更接近于卫星的实际位置,但应用精密星历表要延误时间,或许还要增加费用。现在有若干种专用大地接收机可供应用,由它所测得的结果比导航接收机所测得的测量结果要好。然而,当把本报告所分析的数据集中起来时,唯一应用的大地接收机是 Geociever 这一种,它比导航接收机要昂贵,并且只是在连接计算机时,才提供工作星历表。

应用工作星历表和导航接收机的初步结果($Krakiwsky$; Wells和Kirkham, 1972; $Krakiwsky$, Wells和Thomson, 1973)表明,子午系统测定的站间距离与地面大地测量的站间距离的符合程度平均约在2米以内。然而,这些结果是应用两分钟多普勒积分间隔,并且假设工作星历表完全代表实际

的卫星轨道而得到的。同时也采取了很多人工数据处理和检查,采用了简化的对流层折射改正,没有计入极移影响。

§ 1.2 本文论述概要

本书分为下述三个部分。第一部分是第二章,其中讨论采用导航子午接收机和大地子午接收机所进行的多普勒测量,并且使这些测量与大地测量中所作的电磁测量互相联系,使其脉络贯通。这一章是从电磁计量的基本原理开始的。

第二部分是第三章,其中讨论最小二乘的最佳化在本书中的三种应用(最小二乘趋近,最小二乘谱分析和最小二乘估计),从希尔伯特(Hilbert)空间最佳化的基本原理推出这三种应用的算法。

第三部分包括第四、五和第六章,其中讨论采用工作星历表和导航接收机的子午多普勒测量结果对于大地定位的应用。为了使工作星历表和导航接收机的缺陷所产生的影响减到最小,推断地作了四个判定:

(a) 应用容许的最短多普勒积分间隔(约4.6秒),从一次卫星通过获得最多的数据。这样,由工作星历表以两分钟间隔所提供的卫星位置就不够用,还要计算这些位置之间的卫星位置。这就是第四章中所要讨论的最小二乘趋近问题。

(b) 应用联测定位技术来消减星历表误差和未改正的折射误差的影响。所谓联测定位,就是计算同时跟踪的接收机之间的站间矢量,而不是每一接收机的位置矢量。

(c) 由工作星历表所定义的卫星轨道,允许采取一个新的位置,这一位置平行于由工作星历表根据适当的偏置参数及其方差所确定的轨道,这在第四章中进行研究。

(d) 实现了数据处理的自动化。对数据自动地进行对流层和电离层折射改正的算法在第二章中研究。自动地鉴别每次通过和改正极移的算法在第四章中研究。在所接收的通过之中,对噪声通过和有噪声的多普勒观测结果自动地进行过滤,其算法在第五章中研究。如第四章中所述,由跟踪站和某一次通过中在近站点上的卫星速度矢量所构成的平面是子午卫星测量“天然的”坐标系,我们决定应用这个坐标系对多普勒测量结果和通过进行过滤。

§ 1.3 各章的内容提要

作为读者的引导,本节阐述作者对于其余五章中每一章所要达到的目的,并且根据作者的意见列出了每章中所包含的独特内容。

第二章的目的,在于使导航的和大地的子午卫星数学模型与电磁计量的基本原理联系起来。子午卫星的相位测量与其他的电磁测量系统 (§ 2.1, § 2.2) 中所作的相位测量相同。对子午卫星数学模型中所包含的一些假设作了详细的分析 (§ 2.2.2, § 2.2.3)。也分析了用霍普菲尔德 (Hopfield) 对流层折射改正模型所能得到的计算效能 (§ 2.3.2)。其他的一些模型也比得上霍普菲尔德模型 (§ 2.3.3)。

第三章的目的,在于使希尔伯特空间最佳化的基本原理与本书所应用的最小二乘最佳算法发生联系。最小二乘估计是从函数解析原理 (§ 3.1, § 3.2) 发展起来的。分析了逐步最小二乘估算的分段算法和连续算法之间的差异 (§ 3.3.3)。

第四章是对工作星历表的精度和形式的系统研究。把吉尔 (Guier) 理论应用于大地定位的问题 (§ 4.2), 包括吉尔平面坐标算法的推导 (§ 4.2.1)。为了鉴别工作星历表,

提出了一种算法 (§ 4.3)。推导了一个简单而灵敏的算法 (§ 4.3.2)。

第五章的目的是论证应用工作星历表和导航接收机的子午大地定位的精度。为了便于完整地分析子午数据，提出了一套灵活的、自动的、高效率的程序 (§ 5.2)。关于应用这些程序中所涉及到的工作情况和费用*，提出了大量资料 (§ 5.2)。分析了某些通用的导航接收机的特性 (§ 5.3, § 5.4)。而且对一组实验子午卫星数据作了全面分析 (§ 5.3, § 5.4)。

第六章的目的是评价第四、第五章的结果所依赖的那些判定。研究了用来代替这些判定的其它可供选择的判定，得出了结论，并提出了建议。

• 工作费用的部分略去未译——译注。

第二章 电 磁 计 量

物理空间的计量特性，不论是在牛顿型的物理空间内或是在爱因斯坦型的物理空间内，都是基于电磁能在真空中的传播速度。

因此，物理空间的计量必然与涉及到的电磁传播的观测息息相关。电磁计量的主要困难，在于传播媒质不是真空，但又必须计及它的传播特性（折射特性），这是可以想像到的。

大地测量中，只有很少几种测量（主要是有关重力的大小、梯度和变化的测量）不涉及到电磁传播问题（折射问题）。大地测量中两种基本电磁测量技术是光学仪器对准方向（光学仪器对准地面目标和地面之外的目标进行水平角和垂直角观测，以及几何水准测量）和两个电磁信号之间的相位差测量（电磁波测距和无线电定位）。

本书所研究的是一种特殊的无线电定位系统，即子午多普勒卫星系统。在这一章，我们首先复习一下所有电磁测量的基本原理，以便正确地了解这个子午系统。然后叙述子午卫星观测，最后讨论如何克服折射对观测结果的影响。

§ 2.1 电 磁 测 量

§2.1.1 基 本 定 义

在这一节，我们将要定义电磁计量讨论中的一些术语。许多定义来源于美国电气与电子工程师协会（IEEE, 1972）。

在国际单位制（加拿大标准协会1973）中，根据各种自

然现象的采用值所定义的基本单位，是计量的基本单位。现今有七个：米，公斤，秒，安〔培〕，升，克分子，烛光。我们特别着重于米和秒，其定义为：

“米是长度，它等于一种射线在真空中的 $1\ 650\ 763.73$ 波长，这一射线相当于 Kr^{86} 原子在 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 级之间的跃迁”（1960年度量衡大会）。

“秒是一种射线的 $9\ 192\ 631\ 770$ 周期所持续的时间，这一射线相当于 Cs^{133} 原子两个超精细基态能级之间的跃迁”（1967年度量衡大会）。

设有一种扰动是时间或空间的函数或者是时间和空间两者的函数，这样的扰动叫做波。周期波是这样一种波，在该波中的一个固定点上，每经历一段时间（叫做周期 P ），扰动逐一地重复，或者在一个固定的时间每增加一段距离（叫做波长 λ ），扰动逐一地重复，或兼有这两者。周期是以 Cs^{133} 原子的采用值为基础来计量，即以秒为单位。波长以 Kr^{86} 原子的采用值为基础来计量，即以米为单位。

设有一周期为 P 的时间——周期波，该波上某一点在时间上相对于任一时间原点超前了 t ，则 t/P 这一分数叫做该点的相位。周期波的频率是其周期的倒数 $f = 1/P$ 。角频率是 $\omega = 2\pi f$ 。相位常数是 $k = 2\pi/\lambda$ 。

具有周期和波长的周期波，或者说在时间和空间上都成周期的波，如果这个波的空间周期性是在某一媒质中测量的，我们就说这个波在该媒质中传播。波长 λ 和周期 P 的比是传播速度：

$$v = \lambda/P = f\lambda = \omega/k.$$

设一周期波中的扰动被一空间或时间或两者的正弦函数充分地模型化，这个周期波就是正弦波。以周期 P 和波长 λ 传播的平面正弦波的例子是：

$$y = A \sin 2\pi(t/P + x/\lambda + \theta_0) \quad (2-1)$$

其中 y 是从某一时间原点起算的时间 t 以及从某一空间原点起算的距离 x 所相应的波的振幅； θ_0 是波在 $t = x = 0$ 时的初相； A 是波的最大振幅。 (t, x) 处的相位是

$$\theta = t/P + x/\lambda + \theta_0.$$

(t, x) 处的相角是 $2\pi\theta$ 。

一个波可以由两个或更多的分波组成，每个分波具有不同的频率。这些分波振幅的分布是波的频谱，它是频率的函数。一个波的频谱是由一段频率或者更多的连续频率段所组成，这个波谓之由频带组成的。每一带两端的频率值之差是带宽。如果一个带的带宽非常窄，以至可以由单一频率来模型化，那么这样的窄带谓之频谱线。频谱由单一谱线组成的波叫做单色波。

电磁波中的扰动，在性质上是电磁扰动。计量学上有用的电磁波是单色的正弦波或有少许频谱线的正弦波，电磁波的波长取决于传播波的媒质的特性，称为媒质的折射特性。因为波长取决于媒质的折射特性，所以速度也是如此。在真空中，速度是

$$c = \lambda_{\text{真空}}/P = f\lambda_{\text{真空}} = \omega/k_{\text{真空}}. \quad (2-2)$$

国际科学无线电协会于1957年第十二届大会通过下面的决议 (URSI, 1957)：

“鉴于第十一届大会以来，电磁波速度量测方面的进展，在无线电技术问题中，电磁波在真空中的速度推荐为 $299\,792\,500 \pm 400 \text{ m/s}$ ”。国际大地测量和地球物理联合会随后在1958年通过了相同的决议 (IUGG, 1958)。定义米、秒和真空中传播速度的三个采用值不是独立的。它们之间的矛盾最近已显示出来 (Evenson等人, 1972)，这种矛盾以速度单位表示是 44 m/s 。这就是说，当用 C 的采用值把电磁量

测的时间间隔换算为米的时候,结果将在世界范围内使距离相对于米的定义大约偏长 0.15×10^{-6} 。这一矛盾在重新定义米时终于会解决的,因为我们现在才知道把 Kr 作为米的标准是有缺点的,而在采用 Kr 作为长度标准的当时,还不知道这种缺点 (Rowleg 和 Hamon, 1963)。1973年6月,定义米的协议委员会(CCDM)推荐 c 的采用值为 $299\,792\,458\text{m/s} \pm 4 \times 10^{-9}$; 该委员会还建议: 在重新定义米之前,有必要做进一步的工作,即使根据 c 的采用值重新定义米,仍然要保持米做为国际单位制中的基本单位(如果物理上不是独立的,保持量纲的独立)。1973年10月度量衡大会通过了这些建议 (Terrien, 1974 a; 1974 b)。

对于非真空的传播媒质, 折射特性一般用折射率表示

$$n = c/v = \lambda_{\text{真空}}/\lambda = k/k_{\text{真空}} \quad (2-3)$$

或用折射本领表示

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (2-4)$$

如果在一种媒质中, 波长是频率的函数, 从而速度、折射率和折射本领也是频率的函数, 则该媒质叫做弥散媒质。弥散性将在 § 2.1.2 讨论。

如果在一种媒质中, 波长、速度、折射率和折射本领是位置 and 时间的函数, 则该媒质称为非均匀媒质。非均匀性在 § 2.1.3 中讨论。

我们所要研究的特定的电磁计量问题是不同电磁波之间的相位差(或与此相应的时间间隔)的量测, 以及应用传播速度作为换算因子, 把这种量测结果换算为米。相位量测在 § 2.1.4 中讨论。

我们所要研究的特定系统是子午多普勒卫星系统。在子午卫星和跟踪接收机之间传播的电磁波涉及到多普勒效应, 因为发射机和接收机之间是在相对地运动。多普勒效应

在 § 2.1.5 中讨论。子午卫星观测的相位量测在 § 2.2 中讨论。子午卫星观测的电磁波是在地球的电离层和对流层中传播的，这两层都是弥散的和非均匀的。对流层对子午卫星观测的影响在 § 2.3 中讨论。电离层影响在 § 2.4 中讨论。

§ 2.1.2 弥 散

任一非真空的传播媒质，不论是气体、液体、固体或等离子体，都含有带电体（电子和质子），这些带电体具有电场，它与任何外部施加的场相互作用。这些带电体是在运动中（电子自转和围绕着核的轨道运动），由此引起的磁矩与任何外部施加的磁场相互作用。这些相互作用的存在驱散外部场（减弱），为了改变带电体的位置或运动，就需要一定的相互作用时间，这个时间延迟着外部场通过媒质的传播。当外部场的能（频率）与原子相互作用的能（频率）正好成均势的时候，将发生例外情况，在这种情况下，就产生称为共振的现象。在频率接近这种共振的时候，外部场和带电粒子的相互作用将达到这样的程度，以致影响传播速度，从而使媒质呈现弥散。

从宏观的标准来看，一种媒质在阻止电场方面的动态是由叫做电容的参数来表征；在阻止磁场方面的动态是由导磁率来表征；在消弱电场方面的动态是由传导率来表征。通过媒质的传播速度，可用下式表示

$$v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}, \quad (2-5)$$

此处 ϵ 是电容率（以法拉/米表示）， μ 是导磁率（以亨利/米表示）。真空的电容率和导磁率分别是：

$$\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ 法拉/米,}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨利/米,}$$

因此，媒质的折射率的表达式是：