

GPS 卫星定位软件研究*

黄 丁 发

摘 要

本文探讨了GPS卫星定位软件的设计问题。系统地分析了TIDPS**软件的功能和处理方法,并采用本软件对一条实测长基线进行了处理,证明本软件具有良好的性能和可靠性。

【关键词】 整周跳变; 周数模糊量; 二阶差分; 结构化分析; 数据流图

1 引 言

导航卫星全球定位系统作为一种最新式的卫星无线电导航系统,它的迅速发展引起了世界各国的广泛关注。鉴于它在精度和速度方面的巨大潜力,必将促使涉及定位的各类技术发生根本性变革。可以预计未来的GPS用户将非常广泛,而且为最初的设计者所料不及。它已在民用上广开市场,在诸如大地定位、海上导航、空中导航、板块监测等方面都具有极美好的应用前景。

美国以其巨大的人力和物力投资,走在GPS研究的最前列。我国也正在积极引进国外先进技术资料,开展这方面的研究,并取得了一定的成果。这种研究一般包括硬件和软件两个方面。本文将系统地论述处理软件TIDPS的研究与开发。

2 软件设计

一般来说,象GPS后处理软件TIDPS这样一个比较大的软件,其设计必须从整体的结构化设计着手。因此,可以把这个处理软件系统想象为一个有输入和输出的“黑箱”。输入当然是由接收机采集的原始数据,而输出就是一份有关天线相位中心在地固地心坐标系中的坐标和精度的报表。图1是它的软件模型,意味着数据通过软件流动时,被一系列变换所修改。

收稿日期:1988-09-16

*本文为硕士论文的一部分,指导教师为施品浩副教授。

**TIDPS是作者在加拿大新布伦斯瑞克大学测量工程系研制的软件包DIPOP1.0版及施品浩1986年9月修订版基础上进一步开发的软件。

其功能是：摘取原始磁带记录数据、数据转换过程、产生输出报表。

如果将软件模型作进一步细化。野外采集的数据一般以透明二进制补码的数据流形式记录于磁带上，首先必须解决的是数据的解码、分流和格式的标准化。至此，原始数据的粗加工才算完成。取得了有关卫星星历和观测值等的文件。

经粗加工后，数据只是在形式上作了变换，仍然包含有许多野外干扰信息，必须作更进一步的变换，即数据的预处理，预处理变换包括原始数据的检验，处理模型的选择和整周跳变的探测与恢复等。最后的输出是一个“净化”过的数据文件，将这个文件进一步作主处理变换最终输出一份成果。图 2 就是它的数据流图。

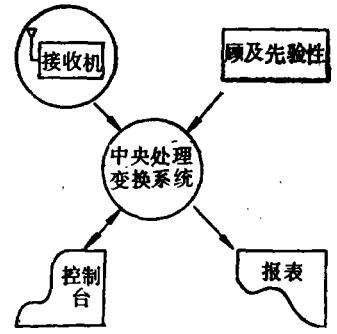


图 1

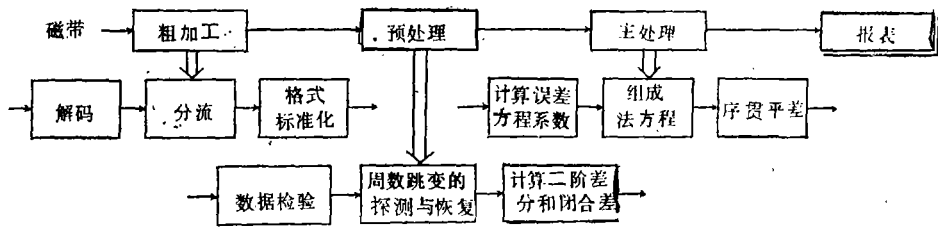


图 2

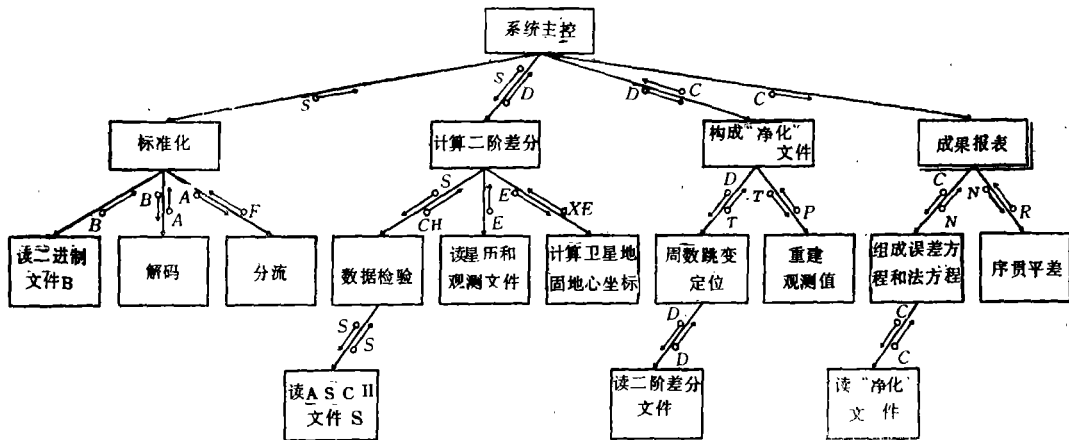


图 3

一个软件的可执行部分是由有限个元素组成的，元素就是通常所说的模块。而结构则表现了软件内部各模块之间的组成关系（见图 3）。

系统总控首先获得控制，然后顺着结构将控制转给读磁带模块读取二进制文件（B-文件）。经解码、分流、标准化转为 ASC II 码文件，称为 S 文件，再将控制转给计算机模块，建立数据文件，接着主控又调用读模块读取 S 文件，顺结构分别进行观测的检验、计算卫星坐标和闭合差，组成二阶差分最后得到一个 D- 文件而返回主控。主控又将控制转给读模块读

取 D-文件, 分别进行整周跳变的控制与恢复, 并建立一个“净化”的数据文件 C-文件, 然后返回主控模块。再进一步把控制交给下一读模块读取 C-文件, 组成法方程并解算。然后输出结果文件报表, 最后控制交还操作系统, 操作结束。

3 软件功能与处理模型

TIDPS 软件的功能可以分成五个功能模块来描述。在一定的软硬件环境支持下 (见本文 4), 按一定的结构关系装配, 便得到一个可执行的部件。

TIDPS 的功能包括: (a) GPS 野外数据的传输; (b) 原始磁带二进制信息流的解码和分流; (c) 数据的预处理 (包括观测值的检验、卫星位置计算、差分观测值的组成、整周跳变的探测与修复以及观测值的压缩等); (d) 计算基线向量及冗余参数 (如: 时钟参数、相位模糊量、大气延迟参数等)。现分述如下:

DTRAN 模块: 它包括两个程序即 MCS-87 和 TLI/BAS。这实际上是一对计算机通讯程序, 它们分别运行于 IBM PC 和 DPS-85 微机上。其功能是采用 DPS-85 机读取野外采集的 GPS 磁带数据, 并实现到 IBM PC 机上的数据传输, 以 ASC II 码存贮于磁盘上。

DECOD 模块: 由于 GPS 野外采集的数据均以透明二进制数据流形式存贮, 因此, 必须实现磁带记录信息的解码和分流。DECOD 就是将这种二进制数据流按数据的类型分别建立 ASC II 码文件的模块。

DFMAT 模块: 为了保证软件的通用性, 在预处理开始前, 设计了一个标准化文件。这也是为了顾及不同接收机采集的数据存在诸多差异这一事实, DFMAT 模块可以取得数据格式的标准化。

PPROC/RECYC 模块: 此模块的功能是实现 GPS 数据的预处理。读取观测值文件和星历文件对数据进行编辑, 计算卫星的位置、组成二阶差分。由于相位观测值存在整周跳变。因此, 在作定位计算前, 必须对它进行定位并实现观测值重建。故在 PPROC 之后, 又设计了 RECYC。最后输出一个“净化”的数据文件, 这就是主处理的输入。

MPROC 模块: 主处理的功能是读取“净化”文件, 按序贯平差法求取天线相位中心在地固地心坐标系中的位置。最后输出有关结果和精度的报表。

由于二阶差分较有效地削弱或消除了时钟误差、轨道误差以及大气折射的相关性等的影响。但又不象三阶差分那样大大地损耗了观测信息, 因此本软件采用这种模式进行处理。

3.1 关于观测方程

为讨论问题方便起见, 现对公式记符作一规定: 用上标表示卫星标识, 下标表示接收机标识。

接收机 A 产生的相位 (以弧度为单位)

$$\Phi_A(\tau_A) = \Phi_A(\tau_0) + 2\pi f_A(\tau_A - \tau_0). \quad (1)$$

而接收机接收到卫星 j 的信号相位

$$\Phi^j(\tau_A) = \Phi^j(\tau_0) + 2\pi f^j \left(\tau_A - \frac{R_A^j(\tau)}{C} - \tau_0 \right) - [\Phi^j(\text{iono}) + \Phi^j(\text{trop})].$$

其中 τ_A : 信号在接收机A被接收的时刻, f_A 、 f^j : 分别为接收机本振频率和卫星的发射频率, $R_A^j(\tau_A)$: 接收机时刻 τ_A 时, 卫星 j 到接收机 A 的距离, $\Phi^j(\text{iono})$ 、 $\Phi^j(\text{trop})$: 分别为大气电离层和对流层引起的延迟。

由 (1)、(2) 式可知: 相位拍差

$$\begin{aligned} \Phi_A^j &= \Phi_A(\tau_0) - \Phi^j(\tau_0) + 2\pi(f_A - f^j)(\tau_A - \tau_0) + \frac{2\pi f^j}{C} R_A^j(\tau_A) \\ &\quad + \Phi_A^j(\text{iono}) + \Phi_A^j(\text{trop}). \end{aligned} \quad (3)$$

顾及 $N = \frac{\Phi}{2\pi}$; 并令 $N_A^j(\tau_0) = N_A(\tau_0) - N^j(\tau_0)$, 所以

$$N_A^j = N_A^j(\tau_0) + (f_A - f^j)(\tau_A - \tau_0) + \frac{f^j}{C} R_A^j(\tau_A) + N_A^j(\text{iono}) + N_A^j(\text{trop}). \quad (4)$$

若在A、B两站分设接收机, 同步观测卫星 j 。并令接收机时钟与GPS时间系统(记为 t) 的同步差分别为 ε_A 、 ε_B 。即 $\tau_A = t + \varepsilon_A$, $\tau_B = t + \varepsilon_B$ 。由于 ε_A 、 ε_B 一般很少, 可由台劳公式展开 $R_A^j(\tau_A)$, $R_B^j(\tau_B)$ 故有:

$$\begin{aligned} N_A^j &= N_A^j(\tau_0) + (f_A - f^j)(t - \tau_0) + (f_A - f^j)\varepsilon_A + \frac{f^j}{C} [R_A^j(t) + \dot{R}_A^j(t)\varepsilon_A] \\ &\quad + N_A^j(\text{iono}) + N_A^j(\text{trop}). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} N_B^j &= N_B^j(\tau_0) + (f_B - f^j)(t - \tau_0) + (f_B - f^j)\varepsilon_B + \frac{f^j}{C} [R_B^j(t) + \dot{R}_B^j(t)\varepsilon_B] \\ &\quad + N_B^j(\text{iono}) + N_B^j(\text{trop}). \end{aligned} \quad (6)$$

构成一阶差分, 即作 (5) ~ (6)。并令: $N_{AB}^j = N_A^j - N_B^j$, 有

$$\begin{aligned} N_{AB}^j &= N_{AB}^j(\tau_0) + (f_A - f_B)(t - \tau_0) + (f_A - f^j)\varepsilon_A - (f_B - f^j)\varepsilon_B + \frac{f^j}{C} [R_A^j(t) \\ &\quad - R_B^j(t)] + \frac{f^j}{C} [\dot{R}_A^j(t)\varepsilon_A - \dot{R}_B^j(t)\varepsilon_B] + N_{AB}^j(\text{iono}) + N_{AB}^j(\text{trop}). \end{aligned} \quad (7)$$

若将 (7) 式更进一步在卫星 j , k 之间求差, 以构成两阶差分, 记为:

$$N_{AB}^{jk} = N_{AB}^j - N_{AB}^k.$$

同时令 $\varepsilon = \frac{1}{2}(\varepsilon_A + \varepsilon_B)$, $\delta = \varepsilon_A - \varepsilon_B$ 则:

$$\begin{aligned} N_{AB}^{jk} &= N_{AB}^{jk}(\tau_0) - (f^j - f^k)\delta + \frac{f^j}{C} [R_A^j(t) - R_B^j(t)] - \frac{f^k}{C} [R_A^k(t) - R_B^k(t)] \\ &\quad + N_{AB}^{jk}(\text{iono}) + N_{AB}^{jk}(\text{trop}) + \left\{ \frac{f^j}{C} [\dot{R}_A^j(t) - \dot{R}_B^j(t)] - \frac{f^k}{C} [\dot{R}_A^k(t) - \dot{R}_B^k(t)] \right\} \varepsilon \\ &\quad + \left\{ \frac{f^j}{2C} [\dot{R}_A^j(t) + \dot{R}_B^j(t)] - \frac{f^k}{2C} [\dot{R}_A^k(t) + \dot{R}_B^k(t)] \right\} \delta \end{aligned} \quad (8)$$

在实际应用时, ε 、 δ 通常可采用二阶多项式来描述。

3.2 关于整周跳变

整周跳变定义为载波相位观测值的间断。信号被遮挡或接收机失锁时均会发生。接收机捕获信号到失锁后又重新捕获, 这个具体的时刻是无法知道的。但其相位观测值的小数部分始终保持正确, 而本来连续的整数部分则会产生一个跳变。

基于二阶差分的优越性, 本软件对周跳的探测是以二阶差分为基础的。实际上是对二阶差分观测值的异常进行定位, 即通过预报值与实测值的比较来完成。然后采用一高次多项式拟合来解算周跳的量值。

设在 t_i 处有跳变, 就可设一未知数 N_i ,

$$\Phi_i + N_i = \sum_{j=0}^{n_i} a_j t_i^j, \quad (i = 1, n_i)$$

其中: i 为无相对跳变的观测值群号, n_i 为 i 群中观测值个数, n_i 为多项式阶数, Φ_i 为双差观测值, N_i 为待定参数 ($N_0 = 0$)。

很显然, 第 i 组与第 j 组之间的跳变

$$\Delta N_{ij} = N_j - N_i.$$

3.3 关于大气传播延迟

在考虑大气的传播延迟时, 人们总是把它分为电离层的影响和对流层的影响两部分。一般在不太长的基线上电离层的传播延迟存在相关性, 通过差分GPS的办法可以削弱其影响, 因而可不必顾及。而对于长基线则又当别论。一般要使用双频校正。

$$\Delta\tau_1 = \frac{A}{f_1^2}, \quad \Delta\tau_2 = \frac{A}{f_2^2},$$

其中: $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 分别为电离层引起的信号延迟, f_1 、 f_2 为信号的频率, A 为常数。

$$\text{令 } \Delta\tau = \Delta\tau_2 - \Delta\tau_1 = \Delta\tau_1 \left[\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 - 1 \right],$$

所以 $\Delta\tau_1 = 1.5457\Delta\tau$ 。

本软件在对对流层影响进行估算时, 采用了施品浩老师在长期的多普勒数据处理中总结出来的一套模型, 即S模型。关于它的优点可参见 [1], 作者还采用著名的 Hopfield 模型进行了验算, 结果表明了S模型的可靠性。

4 软件的通用性与维护

任何一个软件系统, 都有其自己的支持环境, 没有它软件就不能运行。对于一个应用软件而言, 一般希望它所受的约束条件越少越好。TIDPS 的支持为:

(1) 硬件:

- 西门子7570 C处理器,
- 西门子单色显示器,

- 西门子115键键盘,
- 西门子台式打印机,
- 西门子硬磁盘存储器,
- 西门子PC-16* (与IBM PC兼容)。

(2) 软件:

TIDPS 的软件支持为在 BS 2000 操作系统支持下的 Fortran 77 语言。如图 4。

TIDPS 软件采用标准 Fortran 77 语言写成。尽管它是在西门子上完成调测试的,但在调试过程中充分地顾及了本软件最终要在 IBM PC 微机上实现这样一个目的。作者放弃了对西门子现成数字包的调用,而采用 Fortran 77 对所需数字包中的功能命令进行重写,结果与调用西门子数字包的结果完全一致。这样做的优点是使微机化的工作大大简便,只要对个别语句稍加修改即可。

目前市场上接收机产品名目繁多,本软件在设计时也作了适当的考虑。即采用一个 DFMAT 模块来实现不同输入的标准化,使软件不因输入的不同而无能为力。

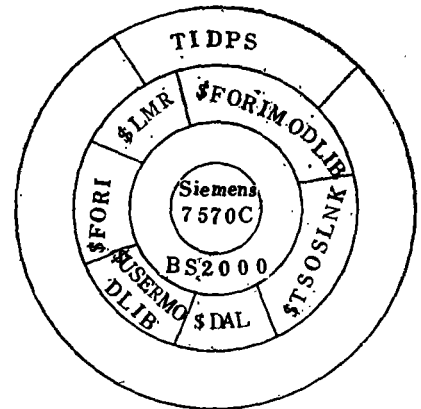


图 4

5 实测数据处理试验

为了证明本软件的可行性,本文采用实测数据进行了处理。在软件的调测试中采用了美国1985年春季会战中摘录的片断资料,这条边的弦长有480多公里,且拥有施品浩老师在加拿大的处理结果和VLBI的处理结果。因此,选用此边的结果来验证TIDPS软件比较可靠。从表1中可见它们的处理结果是符合得非常好的。

表 1 单位: 米

	ΔX	ΔY	ΔZ	S
加拿大 (1)	-5.547	9.761	9.679	484 130.715 6
**武汉 (2)	-5.554	9.749	9.647	484 130.687 9
VLBI (3)				484 130.547
(1)-(3)				0.168
(2)-(3)				0.141

**为TIDPS软件的处理结果。

本文还采用 TIDPS 软件处理了另外一条实测边的数据。在实测中 TI-4100 配备有外接伽

*此项只在与微机通讯时才要求, TIDPS 在运行过程中不需要。

原子频标, 采用Gesar 1、2版软件作实时控制。

这次数据处理除了GPS数据的传播和转录工作是在DPS-85与IBM PC之间进行之外, 其余的工作均在西门子上实现。各种软件接口的产生和连接均由软件自动完成。

处理工作从原始的盒式记录磁带开始, 采用二阶差分模式, 其优点前已述及。并限定相位整周模糊量为整数, 时钟同步误差采用二次多项式模型来模拟。并利用 L_1 、 L_2 两个频率上的观测值来进行电离层散射补偿。在作对流层折射改正时, 采用的是S模型。

数据处理过程中, 坐标系统为WGS-84。数据通过检验后, 实际上只采用了612个观测值。最终处理结果表明: 其内符合精度相当令人满意。空间弦长的中误差为 $m_s = \pm 0.14$ 米, 所以 $m_s/S = 1/5\,000\,000$, 可见其边长相对中误差达0.2ppm。

从定位速度上看, GPS可以花费更少的时间取得比子午卫星系统更精确的结果。这点已从GPS的内符合精度中获得证实, 那么就外部符合而言, 也可以把GPS结果与多普勒结果作一比较。当然, 这不是说多普勒可以作为GPS的外部检核, 但有一点可以肯定, 全国多普勒网平差后, 其相对精度达1ppm是可信的。这却说明了GPS仅用1小时的观测资料就可达到或超过如此精度(见表2)。

表2 单位: 米

方 案	ΔX	ΔY	ΔZ	S
(1) GPS	6.551	9.305	-5.879	656 335.591 4
(2) Doppler	9.458	4.825	-2.576	656 335.543 0
(1)-(2)	-2.907	4.480	-3.303	0.048 4

本文还计算了卫星对的残余误差, 一般来说, 仍有某些系统性误差存在。但是其量值较小, 对定位结果几乎没有什么影响。一般认为是未模型化的大气残余和轨道误差以及残存的整周跳变等的影响。

6 结 束 语

本文对GPS卫星定位软件的设计与实现进行了研究, 并首次提交了一个可资实用的软件成果, 通过实测数据的处理证明: 软件具有良好的性能和可靠性。与DIPOP1.0相比其优势为: 软件接口自动产生并自动连接; 软件编码更加优化, 处理速度有大幅度提高; 更加完善了处理模型和处理方法; 实现了对原始磁带的处理功能; 采用交互式工作方式, 操作简单。它的诞生对GPS在很多领域的推广使用有着应用和参考价值。但是, TIDPS仍存在一定的不足, 需要在今后的维护中进一步完善。

参 考 文 献

- [1] Shipinhao. A Practical Formula for Calculating Saturated Vapour Pressure of Water. presented of UNSM, Australia: 1981.
- [2] P Vanicek et al. DIPOP-differential Positioning Program Package for the Global Positioning System (GPS) . Technical Report No. 115, UNB, 1985.
- [3] D Wells. Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, April, 1986.

On the Research of GPS Satellite Positioning

Software Package

Huang Dingfa

Abstract

This paper deeply discusses the design of GPS positioning software package. As an example, it also analyses the capability and processing method of software TIDPS.

To test the quality of this software, a baseline has been processed on Siemens 7570 C computer. The result shows this software has a good capability and reliability for the widely application of GPS in many aspects.

【Key words】 cycleslip, ambiguity, double difference, structure analyse, data stream diagram