

中国科学院测量与地球物理研究所编辑

测量与地球物理集刊

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA

10

科学出版社

本刊专职编辑 张 牙

测量与地球物理集刊

第 10 号

中国科学院测量与地球物理研究所 编辑

*

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1990 年 3 月第一次印刷 印张:9 1/2

印数:001—500

字数:209 000

ISBN 7-03-001569-X/P·298

定 价: 9.70 元

科技新书目: 212-095

测量与地球物理集刊 第 10 号

(1990 年)

目 录

GPS 精密测地系统总体方案	王广运 陈增强 陈 武 许国昌 (1)
GPS 载波及副载波信号恢复技术	陈增强 王广运 陈 武 许国昌 (11)
GPS 卫星信号分离与相位测量	陈 武 王广运 陈增强 许国昌 (19)
海洋地球物理勘探各种手段梗概	宋文尧 (25)
MERIT 期间 LAGEOS 激光测距资料分析	夏炯煜 (31)
全球大气角动量和日长的短周期变化	朱耀仲 (43)
大气角动量函数的计算及中国大陆地区风的贡献	孙永庠 (47)
编制等高星表的一种新方法	鲁礼志 (57)
长露光照相天顶筒的仪器误差分析	李劲峰 (69)
大地天文学的回顾与展望	韩天芑 (75)
消除海上重力勘探中的测线系统误差	张善言 宗 杰 (79)
再论海上重力勘探中的测线系统误差	张善言 (89)
物理大地测量学中的归算问题	李 斐 (95)
武昌倾斜潮汐观测初步分析	樊尚臻 吕纯操 (103)
大气温差测定仪及其在光电中星仪上的试验结果	谢亮云 张 柯 (109)
伪随机码测距	徐治洋 林丙华 (117)
激光卫星测距系统中的电子技术	王广运 陶国祥 (127)
中日海洋重力仪重力比对测量	濑川爾朗 藤本博已 小泉金一郎 梁哲寿 (日方) 梁础坚 潘显章 张贤林 (中方) (139)

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA, NO. 10

(1990)

CONTENTS

Basic Scheme of GPS Precise Surveying Earth System	
..... Wang Guangyun Chen Zengqiang Chen Wu Xu Guochang (10)	
GPS Carrier and Subcarrier Phase Reconstruction Technique	
..... Chen Zengqiang Wang Guangyun Chen Wu Xu Guochang (17)	
Signal Separation and Phase Measurement of GPS Satellite	
..... Chen Wu Wang Guangyun Chen Zengqiang Xu Guochang (23)	
A Brief Account About Various Means for Geophysical Prospecting in the Sea	Song Wenyao (29)
The LAGEOS Data Analysis During MERIT Main Campaign	
..... Xia Jiongyu (41)	
The Global Short-Period Variations in Atmospheric Angular Momentum and the Length of Day	Zhu Yaozhong (46)
The Calculation of the Atmospheric Angular Momentum Functions and the Contribution of the Wind in the Area of the Mainland of China	Sun Yongxiang (56)
A New Method for Compiling the Preliminary Catalogue of the Astrolabe	Lu Lizhi (67)
Analysis of the Instrument Error of Long Exposure PZT	Li Jingfeng (73)
Retrospect and Prospect for Geodetic Astronomy	Han Tianqi (75)
The Elimination of Systematic Error of Measuring Line in Gravity Prospe- cting at Sea	Zhang Shanyan Zong Jie (88)
To Expound Again About the Systematic Error of Measuring Line in Gra- vity Prospecting at Sea	Zhang Shanyan (94)
The Reductions in Physical Geodesy	Li Fei (101)
Elementary Analysis of Tilt Tide Observation in Wuchang	
..... Fan Shangzhen Lu Chuncao (108)	
Atmospheric Differential Thermometer and the Experiment Results on the Transit Instrument of Wto	Xie Liangyun Zhang Ke (116)
Pseudo Random Code Distance Measuring System	
..... Xu Zhiyang Lin Binghua (125)	
The Electrical Technique in SLR System...Wang Guangyun Tao Guoxiang (138)	
A Comparison of Gravity Measurement at Sea Between China and Japan Jiro Segawa Fujimoto Hiromi Koijumi Kin-ichiro Liang Zhe- shou (Japan) Liang Chu Jian Pan Xianzhang Zhang Xianlin (China) (149)	

GPS 精密测地系统总体方案*

王广运 陈增强 陈武 许国昌

摘 要

本文研究提出了一种 GPS 精密测地系统的总体方案。该系统采用了有码和无码两种技术相结合的技术,即采用 C/A 码和无码技术实现双频载波相位观测,能同时观测六颗 GPS 卫星的两个波段 L_1 和 L_2 ,以消除电离层的影响提高测量精度。利用 C/A 码,获得有关的星历和钟参数。卫星钟和测站钟可校正到好于 10 纳秒的时间精度。本系统用于精密大地测量,地壳形变监测, GPS 精密轨道测定以及地球动力学研究。

一、引 言

本项目是由中国科学院自然科学基金资助的项目(1985—1986年)。它的目的在于研究一种技术方案,充分利用 GPS 卫星信号资源,实现精密定位,为精密大地测量 GPS 精密定轨和地球动力学提供新的观测手段,亦为开展 GPS 精密测地系统的设计和试制提供理论依据。

二、问题的提出

全球定位系统(GPS)是美国国防部制定的一项庞大的空间计划。计划在天空布设 18 颗卫星,组成 GPS 全球定位网,对全球海、陆、空实现精密定位和导航。根据计划,卫星上配有 C/A 码(精码,定位精度为百米级)和 P 码(精码,定位精度为十几米级)。C/A 码可开放供各国使用。P 码保密,仅供军方或少数特许部门使用。这就提出了一个问题,如何充分利用 GPS 信息,又不涉及 P 码保密问题来进行精密定位。同时,我们也注意到,在大地测量和地球动力学研究中,定位精度要求达到厘米级或更高些。这就是说,即使采用 P 码,定位精度也是不够的。因此美国学者 Counselman 教授和 MacDoran 提出了 GPS 精密干涉测地系统的概念。首先提出了射电干涉法的定位原理,继而发展为相位干涉法定位技术,也称之为相位差定位技术,成功地完成了 GPS 精密测地系统的试验,开创了这一崭新的领域。

到目前为止,我国对这一技术的研究尚属空白。国外样机属选进技术禁运之列。为此开展这一课题的研究具有重大的科学意义和经济价值。它不仅能给大地测量,地壳运动以及其他地球参数的动态测量提供先进观测手段,使地学研究工作跨入世界先进行列,

* 1987 年 5 月收稿。中国科学院自然科学基金资助项目。

而且可以提供精密定轨的手段,促进空间技术的发展。

三、GPS 信号结构与功率

GPS 是由 18 颗卫星组成,均匀分布在 6 个轨道平面上。轨道倾角约 55° ,呈圆形。卫星高度约为 2 万公里,运行周期为 12 小时。卫星发射两个 L 波段的频率。 L_1 为 1575.42 兆赫, L_2 为 1227.6 兆赫,其信号结构为

$$S_{L_1}(t) = A_p P(t) D(t) \cos(\omega_{L_1} t + \phi_{L_{10}}) + A_c C/A(t) D(t) \sin(\omega_{L_1} t + \phi_{L_{10}}) \quad (1)$$

$$S_{L_2}(t) = A_p P(t) D(t) \cos(\omega_{L_2} t + \phi_{L_{20}}) \quad (2)$$

式中, $P(t)$ 为精码,码率为 10.23 兆比特/秒, $C/A(t)$ 为粗码,码率为 1.023 兆比特/秒, $D(t)$ 为数据流,码率为 50 比特/秒。

L_1 波段信号是由 C/A 码 $\oplus D(t)$ 和 $P(t) \oplus D(t)$ 正交双相数字相位调制形成的。 L_2 波段信号只是由 P 码 $\oplus D(t)$ 二相数字相位调制的。C/A 码的信号带宽为 2.046 兆赫, P 码的信号带宽为 20.46 兆赫。

表 1 GPS 卫星信号功率

波 段	功 率	
	P 码(分贝瓦)	C/A 码(分贝瓦)
L_1	-158	-155
L_2	-158	

表 1 给出了 GPS 卫星信号功率。它是在卫星仰角大于等于 5° 时,用右旋圆极化的零分贝各向同性天线输出端收到的卫星信号功率电平以分贝瓦为单位。 L_2 中心载波为 1227.60 兆赫; L_1 中心载波为 1575.42 兆赫。

四、系统的设计目的和技术指标

1. 系统的设计目的

就本系统的设计目的,开展如下的工作。

(1) 精密大地测量。建立 GPS 卫星一等大地网,对现有的大地网进行改造,加密,要求精度为 1×10^{-6} 。

(2) GPS 精密轨道测定。利用本系统,分辨率达毫米级,用双频校正电离层延迟影响,加上大气水汽测定改正措施,同时对 6 颗 GPS 卫星定轨,能够达到 3 米以内,有可能达到 0.5 米的精度。

(3) 作为地球自转,极移研究的新手段。当定轨精度达到 0.5 米时,本系统可监测研究地球自转,极移运动。

(4) 水库库区地壳形变监测,在库区周围组网,监测蓄水前后的地壳形变,分析水库

蓄水诱发地震。

(5) 在地震活动地区,地壳运动比较活跃,建立区域范围的监测网,研究地壳运动的规律,网可以由几十公里到几百公里,用以研究地震形成、发生的机制。

(6) 用来监测断层的错位、升降和水平运动。

(7) 用以监测研究青藏高原的隆起。

(8) 研究测定电离层的变化。

(9) 精密时间同步。

(10) 研究地球形状。

2. 系统特点

本系统设计有如下几个特点。

(1) 载波相位是本系统的精密观测量。

(2) 采用 C/A 码和无码恢复载波相位相结合的技术。

(3) 同时观测 6 颗卫星的双频。

(4) 可用 C/A 码伪距测量进行单点定位。

(5) 提供广播星历和钟参数。

(6) 测站系统钟同步于 GPS 卫星时,无需另外的辅助时间同步装置。

(7) 双频载波相位观测可校正电离层延迟影响。

(8) L_1 和 L_2 载波相位差可减少无模糊度解的时间。

3. 基本技术指标

根据应用目的的要求本系统技术指标如下。

(1) 仪器精度为 5 毫米,在几十米到 1 公里的基线上测定基线长度的精度(内符合)为 5 毫米。

(2) 在大范围的测量精度,当采用广播星历,卫星位置误差 ≤ 20 米时,精度为 5(毫米) + 1×10^{-6} 。当采用精密星历和精密大气改正参数模型,卫星位置精度为 2.5 米时,精度为 5(毫米) + 2×10^{-7} 。

(3) 具有双频载波相位观测,实现电离层时延效应的校正。

(4) 能同时接收倾角 $\geq 15^\circ$ 以上的 6 颗卫星的双频信号。

(5) 提供 C/A 码的伪距观测和 GPS 卫星定时。

(6) 提供广播星历。

(7) 便于流动测量。

五、定位原理

GPS 精密测地系统采用了有码技术 C/A 码重建 L_1 波段信号载波相位,以及采用无码技术恢复 L_2 波段信号载波相位。这是一种有码和无码技术相结合的系统,兼有二者之优点。载波相位是精密大地测量的基本观测量。在观测载波相位的同时可进行 C/A

伪距测量, 给出卫星星历参数、大气层和电离层改正参数, 实现测站钟和 GPS 卫星时的同步。可用的观测量列于表 2。

表 2 大地测量可用观测量

观测量	波段	频率(兆赫)	码	码率 (兆比特/秒)	波长(厘米)	周期(毫秒)
载波相位	L_1	1575.42			19.05	
载波相位	L_2	1227.60			24.45	
载波差相位	L_1-L_2	695.64			43.65	
伪距	L_1		C/A	1.023	293.1	1

GPS 精密测地系统具有 6 个并列的 C/A 码发生器通道。同时接收 6 颗不同的 GPS 卫星信号, 完成测点相对于 6 颗卫星位置的伪距测量。同时重建了 6 颗卫星信号中 L_1 波段的载波相位。同时系统中有 6 个并列的无码载波恢复通道, 同时恢复 6 颗卫星信号中 L_2 波段的载波相位。这样我们就得到了大地测量有用的观测量。

C/A 码伪距测量是通过测量 GPS 卫星上的伪随机码与测点接收机码发生器同一伪随机码之间的时延来获得的。在测量时, 接收机码发生器的码跟踪环接收到相应卫星信号的码, 信号数据流给出了发射初始时刻, 我们就可以测量出码由卫星传播到测点的时延。由于存在着卫星钟与测点接收机钟之间的钟差以及传播路径介质的各种延迟效应, 实际测量的是从测点到卫星 i 之间的伪距 ρ_p^i 。

$$\begin{aligned}
 \rho_p^i &= R_p^i + C(\Delta t_{PR} - \Delta t_{ST}^i) \\
 &= R_p^i + C[(t_{PR} + \Delta t_{PR}) - (t_{SV}^i + \Delta t_{SV}^i)] + C\tau_{AP} \\
 &= R_p^i + C(T_{PR} - T_{ST}^i) + C\tau_{AP}
 \end{aligned} \quad (3)$$

卫星 i 位置可由发播的轨道参数通过计算获得。令卫星 i 在地心坐标系中的位置为 $X_{cs}^i, Y_{cs}^i, Z_{cs}^i$ 。则测点在该坐标系中的位置为 X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp} 。

测得的伪距 ρ_p^i 可表示为

$$\begin{aligned}
 \rho_p^i &= [(X_{cs}^i - X_{cp})^2 + (Y_{cs}^i - Y_{cp})^2 \\
 &\quad + (Z_{cs}^i - Z_{cp})^2]^{1/2} + C\tau_{PA}^i + C(\Delta t_{PR} - \Delta t_{SV}^i)
 \end{aligned} \quad (4)$$

由于我们可同时观测 6 颗卫星, 就可以根据各卫星的轨道参数, 分别求出各卫星在地心坐标系中的瞬时位置。于是建立四个最优化观测方程联立求解参数 X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp} 和 Δt_{PR} 。通常利用测点位置的概略值 $X'_{cp}, Y'_{cp}, Z'_{cp}$, 接收机钟标称的概略值 $\Delta t'_{PR}$ 作为初值, 采用反复迭代和最小二乘法求解测点位置和钟差值。

$$\begin{aligned}
 X_{cp} &= X'_{cp} + \Delta X_{cp} \\
 Y_{cp} &= Y'_{cp} + \Delta Y_{cp} \\
 Z_{cp} &= Z'_{cp} + \Delta Z_{cp} \\
 \Delta t_{PR} &= \Delta t'_{PR} + \delta t_{PR}
 \end{aligned} \quad (5)$$

GPS 精密测地系统进行相对位置精密测量是通过二点接收机恢复的载波相位之差, 或相位干涉来实现的。本系统用有码技术 C/A 码和无码技术同时恢复 6 颗卫星信号的 L_1 和 L_2 各 6 个载波相位, 同时得到 6 颗卫星的双波段信号的原始观测量。

在某一时刻 t_{TP}^i , 卫星 i 发射的载波相位为 $\phi_s^i(t_{TP}^i)$, 在 t_{RP}^i 时刻测点 P 的接收机接收的信号载波相位为 $\phi(t_{RP}^i)$, 则

$$\phi_P^i(t_{RP}^i) = \phi_s^i(t_{TP}^i) + \phi_s^i(t_{TP}^i, t_{RP}^i) \quad (6)$$

考虑到下列事实:

- (1) 电波传播路径相移包括两部分, 小数相位周期和整数相位周期。
- (2) 信号通过接收机的各种单元以及本振信号均产生相移。
- (3) 信号通过对流层和电离层会引起时延。
- (4) 其他如相对论效应、地球自转不均匀、以及地球潮汐引起的时延。
- (5) GPS 卫星钟和本地钟的钟差及其变化。

我们可以得到在 i 历元由单站 P 接收机观测 i 卫星的载波相位观测量为:

$$\begin{aligned} O_\phi(P, i, t) = & \phi_s^i(t_{TP}^i) + f_s \{ \delta C_P(t^i) + \rho_P^i(t^i) / C \\ & + \rho_P^i(t^i) \delta C_P(t^i) / C \} + f_s [\tau_a^i(t^i) \\ & + \tau_1(t^i) + \tau_R^i(t^i) + \tau_m^i(t^i) \\ & + \tau_e(t^i)] + N(P, i, 1) - \phi_{RO}(t^i) \\ & - f_{RO} \delta C(t^i) + \phi_{RP}(t^i) \end{aligned} \quad (7)$$

很显然, (7) 式建立了卫星轨道参数和地面测点之间的联系。由于卫星钟和地面测点接收机的本地钟都是以 UTC 时间为标准的, 所以当卫星轨道参数已知时, 就可以估算出任何时刻卫星在空间轨道上的位置, 并作为已知参数, 然后通过相位观测量计算出测点位置。反之, 如果当地面位置已知时, 通过相位观测量可求解卫星在观测时刻瞬间空间位置, 从而给出卫星的轨道参数。卫星信号瞬时载波相位观测量可以单独使用。当卫星轨道参数已知时, 可用于单点定位, 其测量精度达到米级。在许多精密大地测量中, 以及在地球动力学研究中, 不宜单独使用卫星信号瞬时载波相位观测量, 而是把许多单测点同时观测记录的瞬时载波相位观测量成对组合, 进行相位干涉测量 (也称为载波相位一次差分观测量, 简称为单差观测量)。同时也可组合成二次差观测量和三次差观测量。用最小二乘法平差和多值性函数法可解算出基线长度和相对位置坐标参数。

六、总体结构

本系统可同时接收 6 颗星的 L_1 和 L_2 波段的信号。 L_1 波段用 C/A 码技术, 有 6 个并行的通道。包括 6 个并行的 C/A 码发生器, 6 个并行的 C/A 码跟踪环, 6 个并行的 L_1 载波跟踪环。 L_2 波段用无码技术, 包括 6 个并行的载波恢复环。系统还包括有定时同步单元, 数据格式单元存储单元记录系统 (参见图 1)。

本系统天线采用小型全向天线。天线接收的信号经过一个功率合成器, 送到一个前端滤波器, 经预选滤波后送到限幅器, 限幅的卫星信号送到一个增益为 25 分贝的低噪声前端放大器。

低噪声前端放大器输出经电缆线送到二个低噪声射频放大器。一个为 L_1 射频放大器, 另一个为 L_2 射频放大器, 增益都为 25 分贝。二射频放大器输出分别送到两个低噪声混频器, 与 L_1 本振和 L_2 本振混频产生两路中频, 即 L_1 中频和 L_2 中频。二中频信号分

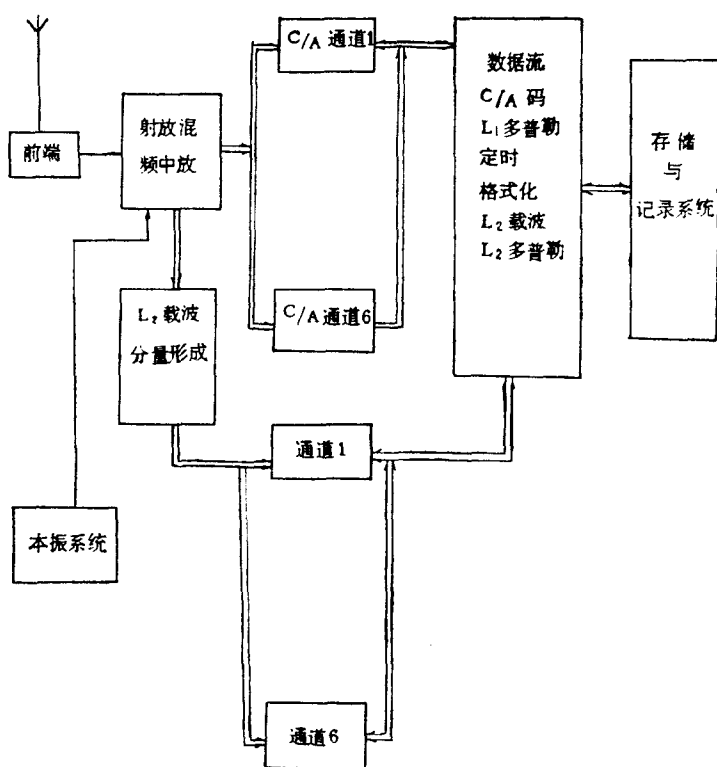


图1 总体方块图

别经过带通滤波器,然后再经过各自通道的放大器,再分别送到第二混频器,与第二本振混频产生第二中频,第二混频后的二波段信号再经过带通滤波器和放大器。图2示出了射频放大器和混频、中放的原理方块图。

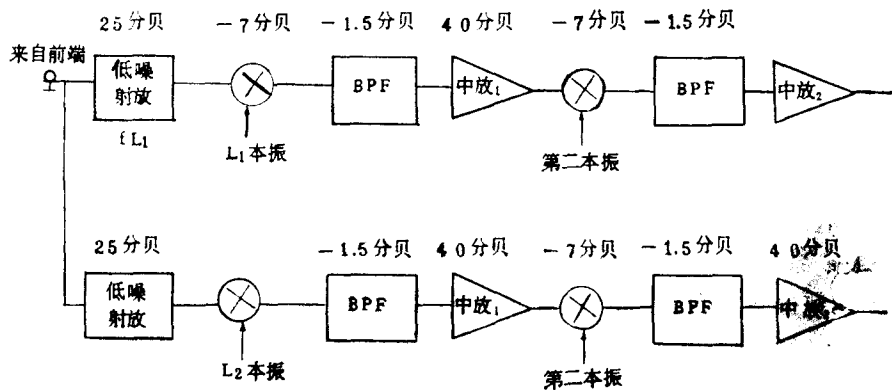


图2 射放、混频中放原理方块图

L_1 通道第二中放的输出经过一个功率分配器分别送到6个并行的C/A码解扩通道。6个C/A解扩通道具有完全相同的电路形式,只是C/A码发生器产生的C/A码系列分别对应于6颗星上的C/A码产生的C/A码系列。C/A码解扩后的信号分别送到相

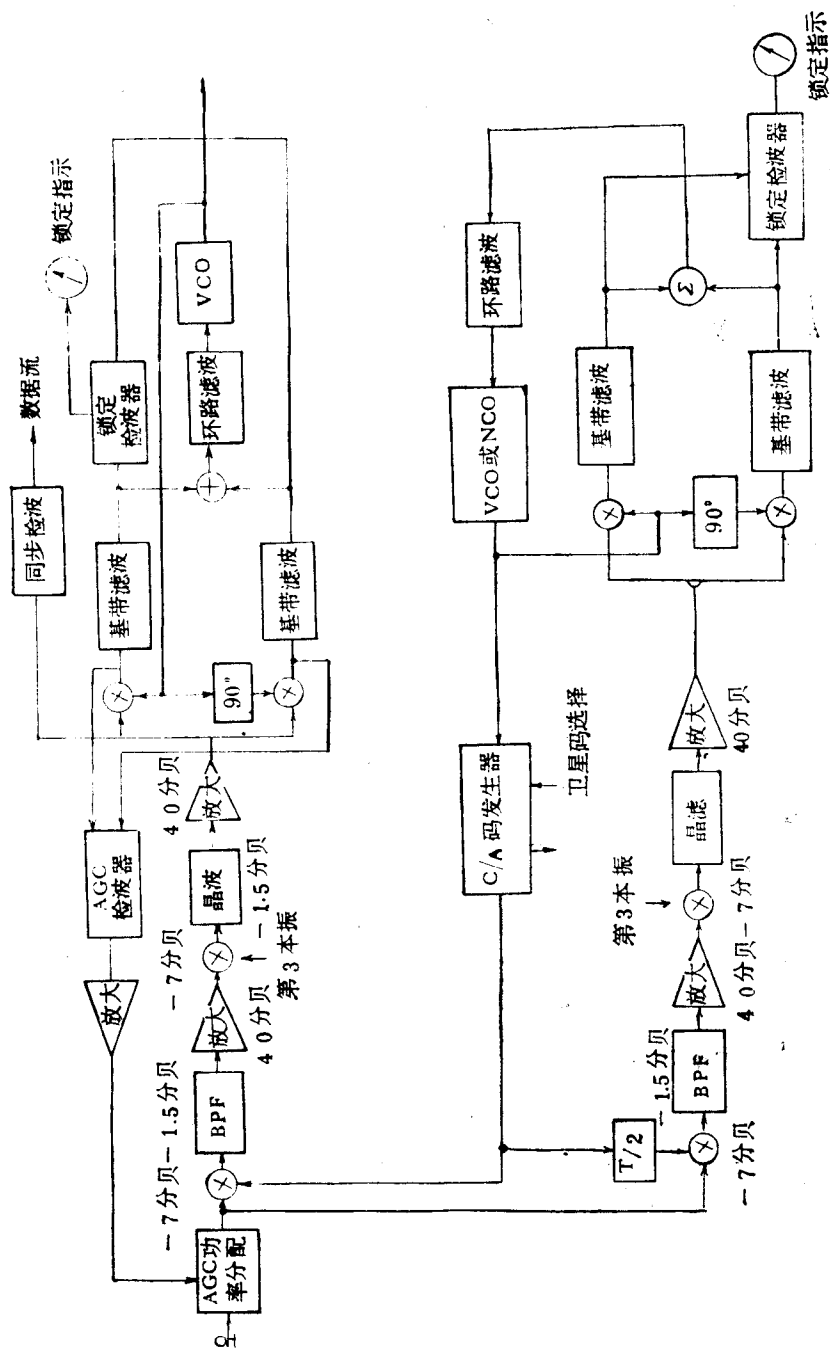


图 3 C/A 码解扩, 跟踪通道

应的载波相位恢复环 (Castas 环), 数据流检测, 以及码相位跟踪环。载波相位恢复环和码相位跟踪可采用模拟压控振荡环路, 也可采用数控振荡环路。图 3 示出了单通道的 C/A 码解扩, 跟踪的原理方块图。

来自 L_2 通道的第二中放的信号经过一个非线性的平方电路, 产生各卫星信号载波的 2 倍频分量。经过一个通带滤波器后, 送入一个放大器, 放大后, 再送入第三混频器。混频后经滤波, 放大后送到一个功率分配器, 分别送到 6 个通道的 L_2 载波恢复电路, 将 6 颗卫星的载波相位分离恢复出来 (如图 4 所示)。

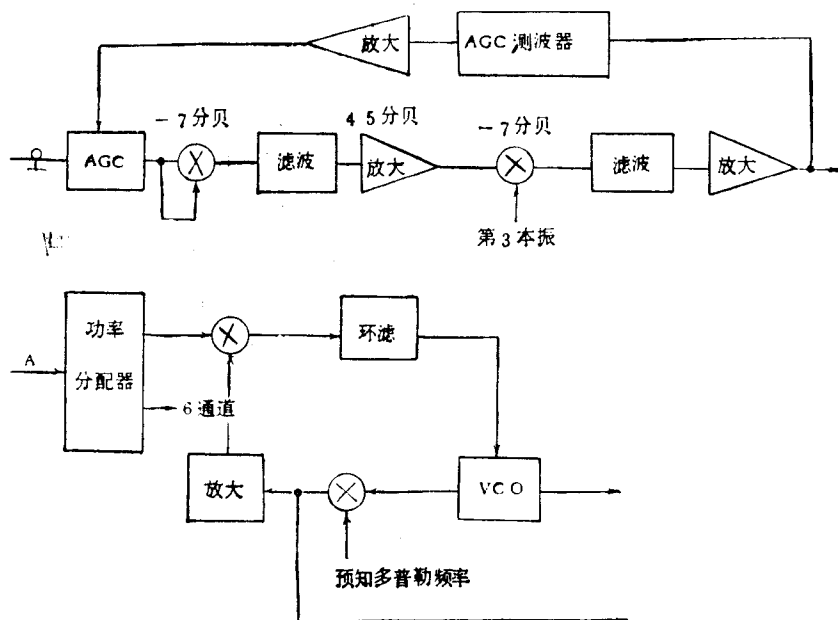


图 4 L_2 通道和一路载波相位恢复原理方块图

七、几个部件说明

1. 本振系统和频率方案

由于本振相位与载波相位观测量密切相关, 所以本振系统的相位稳定度必须足够高。本系统中的本振系统采用内装的高稳定度的石英晶体振荡器。在固定站应用时可以采用外接的具有高稳定度性的铷钟或铯钟。

本振系统的各种频率均由高稳定度的石英晶体为基准经频率综合而成。晶体振荡器输出的频率为 5.11 兆赫。经过 2 倍频电路产生 $F_0 = 10.23$ 兆赫。 F_0 经频率综合形成本振系统的各种频率。由本振频率就确定了各级中放的中心频率。第一本振频率为 $136 F_0$, 提供给二波段信号通道的第一混频器。则 L_1 波段的第一中放中心频率为 $18 F_0$, L_2 波段的第一中放的中心频率为 $16 F_0$, L_1 通道的第二本振为 F_0 , 第二中放为 $17 F_0$, 第三本振为 $16 F_0$, 第三中放为 F_0 。 L_2 通道第二本振为 F_0 , 第二中频为 $15 F_0$, 第三本振为 $32 F_0$,

第三中频为 $2F_0$ 。

产生第一本振频率也可采用锁相方式。图 5 为锁相环产生 $136F_0$ 的原理。 $136F_0$ 的射频振荡器经 4 分频为 $34F_0$, $34F_0$ 与 $18F_0$ 混频产生 $16F_0$, 与 $16F_0$ 鉴相控制射频振荡器的频率相位稳定。

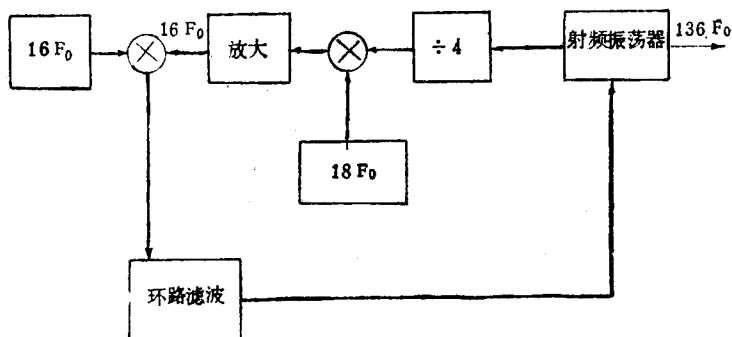


图 5 $136F_0$ 锁相环原理图

2. 定时单元

本系统采用 GPS 时的定时。由卫星得到 UTC/ T_{GPS} 修正。通过估算 GPS 卫星时 T_{GPS} 与本地钟 T_{UP} 的时间偏差, $CP(u)$, 来调整本地时间系列使之与 UTC 相关。定时精度可达微秒的量级。见图 6。

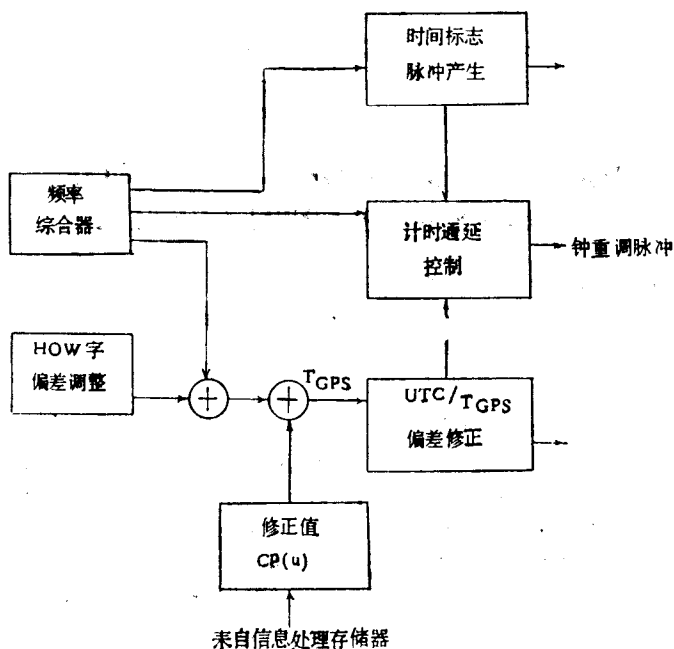


图 6 定时单元原理图

八、几个特殊问题

GPS 精密测地系统与一般导航接收机不同点在于以下几个问题:

(1) 载波与副载波相位恢复技术。因为测量精度要求高,必须应用载波相位观测量,因此要对 L_1 (BPSK) 和 L_2 (QPSK) 的载波相位恢复出来加以利用。

(2) 信号分离相位测量技术。利用全方位天线接收,所有可见卫星信号会同时进入接收机,要进行信号分离工作,并对其相位进行测量。

(3) 数据处理和模糊度消除技术。在相位测量中,最主要的问题是存在模糊度。因此必须采取适当的处理方法,来消除模糊度,提高测量精度。

(4) 外界环境的影响和改正。因为利用这种仪器进行测量,内部精度是相当高的。外界环境,如对流层效应和电离层效应的影响却很大。所以说,在某种意义上讲,外界影响的改正起着决定作用。

参 考 文 献

- [1] Counselman, C. C. *et al.*, Miniature interferometric terminal earth surveying, *Bull. Geod.*, **53**(2), pp. 139—163, 1979.
- [2] MacDoran, P. F., Satellite emission interferometric earth surveying—SERIES/GPS, *Bull. Geod.*, **53**(2), pp. 117—138, 1979.
- [3] Spilker, J. J. Jr., GPS signal structure and performance characteristics, *Navigation*, **25**(2), pp. 121—146, 1978.
- [4] Remondi, B. W., Using the global positioning system (GPS) phase observable for relative Geodesy: Modeling, Processing and Results, *Ph. D. Dissertation*, Univ. of Texas, Austin, 1984.
- [5] Coad, C. C. *et al.*, Initial relative positioning results using the global positioning system, *Bull. Geod.*, **58**(2), pp. 193—210, 1984.
- [6] Counselman, C. C. *et al.*, Miniature interferometric terminals for earth surveying: ambiguity and multipath with global positioning system, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-19**(4), Oct. 1981.

BASIC SCHEME OF GPS PRECISE SURVEYING EARTH SYSTEM

Wang Guangyun Chen Zengqiang Chen Wu Xu Guochang

(*Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

In this paper a basic scheme of GPS Precise Surveying Earth System is proposed. By using combined technique the system can receive the C/A code to provide satellite ephemeris and clock parameters, recover the carrier phase on band L_1 by using correlation technique and reconstruct the carrier phase on band L_2 taking advantage of codeless technique. The system can obtain two observables on bands L_1 and L_2 to eliminate the ionospheric effects and can use carrier phase L_1 , L_2 , L_1-L_2 and C/A code pseudorange to resolve the ambiguity. The system can be widely applied in the fields of precise geodesy, crustal deformation monitor, GPS satellite orbit determination and geodynamics.

GPS 载波及副载波信号恢复技术*

陈增强 王广运 陈武 许国昌

摘 要

载波和副载波信号恢复技术是 GPS 精密测地系统中重要问题之一。本文论述了应用相关技术和无码技术恢复载波的问题,并给出了两种技术的差别和比较。文中还简要讨论了利用延迟相乘法恢复副载波的问题。

一、引 言

我们知道, GPS 卫星发射两个波段的信号,对 L_1 波段调制有 P 码, C/A 码和数据流 $D(t)$, 对 L_2 波段调制有 P 码和数据 $D(t)$ 。

$$S_{L_1} = A_P P_i(t) D(t) \cos(\omega_1 t + \varphi) + A_C C_i(t) D(t) \sin(\omega_1 t + \varphi) \quad (1)$$

$$S_{L_2} = A_P P_i(t) D(t) \cos(\omega_2 t + \varphi) \quad (2)$$

P 码、C/A 码均为伪随机码,且有

$$P_i(t) = X_{1i}(t) X_{2i}(t + n_i T) \quad (3)$$

式中 $0 \leq n_i \leq 36$, 共有 37 种延迟, $X_2(t)$ 的周期为 15345037 位。T 为码钟间隔, $X_1(t)$ 和 $X_2(t)$ 的速率均为 10.23 米, $X_1(t)$ 的周期为 1.5 秒, 因此总周期长为 15345037×1.5 , 近似为 266 天。实际上每颗卫星从中取出不重叠的一段, 周期为 7 天且起始时刻为星期日零点。

$$C_i(t) = G_1(t) G_2(t + n_i T) \quad (4)$$

式中 $0 \leq n_i \leq 1023$, T 为每位持续时间, G 的生成多项式为

$$G_1 = x^{10} + x^3 + 1$$

$$G_2 = x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$$

C/A 码的码长为 1023 位, 周期为 1 毫秒。

P 码和 C/A 码均为伪随机码, 具有良好的相关特性。

由于信号是采用 PSK 调制, 因此在接收信号中不包含载波和副载波钟频分量, 必须采用适当的非线性变换来分离这些频率分量。

由前面分析可知, 恢复载波或副载波信号主要存在两个问题: 1) 如何将各个卫星信号区分开来; 2) 采用什么非线性变换可以分离载波谱线。对于第一个问题, 有码接收机不存在什么问题, 接收机产生与某卫星相同的码, 与接收信号相关。因为不同卫星之间的

* 1987 年 5 月收稿。中国科学院自然科学基金资助项目。

码几乎不相关,从而可消除多路卫星信号的影响。但对于无码接收机要消除多路卫星信号的干扰则要困难得多。但幸运的是,由于每个卫星相对测站的位置不同,因此接收的信号频率由于多普勒频移不同而不同。对于载波频率,最大多普勒频差可达 7.5 千赫,每个卫星之间的多普勒频差一般大于几百赫。对于 P 码频率,最大多普勒频差为 53 赫,每个卫星之间的多普勒频差大于几赫。因此可以根据多普勒频移的不同对卫星进行区分。至于第二个问题,我们将在下面论述。

二、载波恢复技术

所谓载波恢复,关键要求分离载波谱线分量。对于信号 $S(t)_1 = AP(t) \sin [\omega_0 t + \theta]$, 其线性调制 $P(t)$ 的功率谱中无直流分量。因此在载频 ω_0 上没有剩余频谱分量,不能用一般锁相环来产生相干参考信号,而需要用非线性技术来产生载波分量。其中最常用的方法为平方技术。

设接收信号为

$$S(t) = 2P(t) \sin (\omega_0 t + \theta) + n(t) \quad (5)$$

式中 $n(t)$ 为限频白噪声。

$$n(t) = 2n_s \sin (\omega_0 t + \theta) + 2n_c \cos (\omega_0 t + \theta) \quad (6)$$

信号通过平方律电路后:

$$S^2(t) = P^2 + P^2 \cos 2(\omega_0 t + \theta) + V(t) \quad (7)$$

式中 $V(t)$ 为噪声项。

显然在 $S^2(t)$ 中存在着载波的二倍频分量,可由一锁相环产生载波信号。这种电路称为平方环(如图 1 所示)。

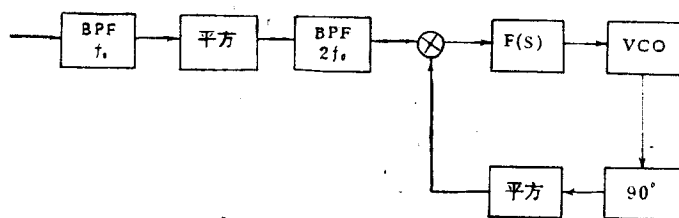


图 1 平方环电路

可以证明,平方环电路相位估值方差与载波——噪声比的关系为

$$\sigma_{\varphi}^2 = B_L \left[\frac{1}{\frac{S_c}{N}} + \frac{1}{\left(\frac{S_c}{N} \right)^2 T} \right] \quad (8)$$

式中 B_L 为环路带宽, S_c/N 为载波噪声比, T 为调制码的码宽。

对于 GPS 接收恢复载波方法可分为两类,一类是相关恢复技术,另一类为非相关恢复技术。

1. 相关恢复载波技术

在已知 GPS 信号调制编码的情况下,在接收机中装有相同结构的码发生器,实际卫星码与本地码相关后恢复载波。可利用平方环、Costas 环、逆调制环以及判决反馈环来恢复 BPSK 的载波(L_2 波段),可利用四次方环、斯里普凯尔环、和逆调制环来恢复 QPSK 的载波(L_1 波段)。因此,几乎所有的 GPS 接收机,如果有必要的话都可以从中提取载波,关于这一技术已有较多的论述,这里不做仔细分析。这里只就外来干扰信号,包括多路 GPS 信号的同频干扰,来分析对相关接收的影响。

卫星信号 $S_s(t)$ 和干扰信号 $S_i(t)$ 一同进入接收机。设两信号振幅相同、载频相同。此两信号经前放、混频、滤波、中放后,送入载波跟踪锁定环,实现相关接收。相关接收后的输出 $X(t)$ 包括有用分量和干扰分量两部分,即

$$X(t) = V_o(t)D_s(t) + n_i(t) \quad (9)$$

现数据流带宽为 $R_d = 5\delta$ 赫,干扰分量带宽 $R_c = 10.23$ 兆赫,低通滤波器带宽为 100 赫。经过滤波器后, $D_s(t)$ 的功率损失很小,仅减少 0.44 分贝,而多路干扰信号的功率减少了 $\frac{2R_d}{R_c}$ 倍。

$$\frac{S}{I} = \frac{P_D(h)}{\frac{P_n(I) \cdot 2R_d}{R_c}} = \frac{P_D(h)R_c}{2P_n(I)R_d} = \frac{1}{3} \times 10^5 \quad (10)$$

实际上,通常在空中至少有四至六颗 GPS 卫星同时可见,当接收所需的一颗卫星信号时,有三至五颗干扰卫星信号。按有五颗干扰卫星信号计算,信号与噪声比仍有 $1/(11 \times 10^3)$,可见干扰是极微小的。

由以上分析可见,利用相关技术恢复载频是十分可靠的。

2. 无码技术恢复载波

对于无码接收机则只能将接收信号直接输入平方电路,此时码速率为 10.23 比特/秒(对于 P 码),因

$$S^2(t) = P^2 + P^2 \cos 2(\omega_0 t + \theta) + V(t) \quad (11)$$

下面我们分析 $V(t)$, 首先假定只有一路信号。

$$V(t) = 2\sqrt{2}P \sin(\omega_0 t + \theta)n(t) + n^2(t) \quad (12)$$

当 $P(t)$, $\sin(\omega_0 t + \theta)$ 为平稳过程时, $V(t)$ 的自相关函数为

$$R_V(\tau) = E[2\sqrt{2}P(t) \sin(\omega_0 t + \theta)n(t) + n^2(t) \times \{2\sqrt{2}P(t+\tau) \sin[\omega_0(t+\tau) + \theta]n(t+\tau) + n^2(t+\tau)\}] \quad (13)$$

式中 $n(t)$ 为接收白噪声,单边带功率谱密度为 N_0 , $n(t)$ 的功率为 $P_n = N_0 B$, B 为中频带宽。

$$\text{因} \quad R_n(\tau) = E[n(t)n(t+\tau)] = 2R_n^2(\tau) + R_n^2(0) \approx \rho_n(\tau) \cos \omega_0 \tau \quad (14)$$

式中 $\rho_n(\tau) = E[N(t)N(t+\tau)]$, $n(t) = 2N(t) \sin \omega_0 t$

因此