

# GPS多路径效应影响 与结构振动的小波滤波筛分研究

黄 发<sup>1</sup>, 晓利<sup>2</sup>, 陈永奇<sup>2</sup>, 龚 涛<sup>1</sup>, 熊永良<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 香港理工大学, 香港九龙)

## Wavelet Filters Based Separation of GPS Multi-path Effects and Engineering Structure Vibrations

HUANG Ding-fa<sup>1</sup>, DING Xiao-li<sup>2</sup>, CHEN Yong-qi<sup>2</sup>, GONG Tao<sup>1</sup>, XIONG Yong-liang<sup>1</sup>  
(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract** The recent advances in GPS technology recording at 20 samples per second allows reliable monitoring of engineering structure, such as suspension or cable-stayed bridges and tall buildings. But the coordinates conducted from GPS trajectory estimator (i. e. epoch by epoch) usually are affected by many factors, e. g. multi-path and temperature as major. To assess stress and drift conditions of engineering structure one have to separate structure vibrations from other biases. The Wavelet analysis technique has been successfully used for this purpose, and the analysis results from practical data are presented.

**Key words** GPS; vibration monitoring of engineering structure; multi-path; wavelet analysis

**摘 要:** 当应用 GPS 技术进行大型工程结构监测时, 由于其测定的是监测点的绝对位移, 且受到诸多因素的影响, 其中多路径效应和温度变化是主要影响源, 要想正确分析结构的动力特性, 首先必须有效地分离结构振动与各类影响项。本文采用小波分析法, 对坐标序列进行多尺度分解, 有效地筛分出结构微小振动和各类影响项。通过实际测试数据分析, 取得了极其满意的效果。

**关键词:** GPS; 结构振动测试; 多路径效应; 小波分析

### 1 引 言

GPS 技术应用于大型工程结构 (如: 大桥, 高塔, 高层建筑等) 动态特性研究是近年来 GPS 应用研究的又一重要内容。由于高达 20 Hz 采样率的 GPS 接收机的出现, 使得它可以在这个研究领

域大显身手。采用加速度计用于测定大风和地震时结构的动力特性, 但要获得位移值则需要进行两重积分处理, 并在大多数情况下不能实现实时或准实时处理。通常而言, 用 GPS 进行大型工程结构的动态监测, 其结果包括两个方面: 其一, 振动, 其振动频率由结构体本身的固有频率决定

收稿日期: 2000-04-10; 修回日期: 2000-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49771062)

作者简介: 黄丁发 (1963-), 男, 湖北阳新人, 西南交通大学教授, 博士, 主要从事 GPS 理论与应用以及 3S 系统集成研究。

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

(如:高层建筑的基本振动周期通常在  $[0.05 \sim 0.1]N$  间变化,取决于建筑物结构的柔性,这里  $N$  为建筑物的层数,振动周期的单位为秒)。当有外力作用时,振幅增大,而振动频率稍为减小;其二,长周期不规则运动,主要由温度等其他长期项所引起的绝对位移变化。

结构工程师们往往对振动感兴趣,通常的测试方法也是通过加速度计测量而来。研究内容包括振动频率是多少,振幅是多大,以及振型与扭转,及其与风力和风速的关系等。实际上绝对位移是无法获得的。由于当前这些大型结构体的柔性结构设计,它们的动态特性实际上受诸多方面的影响,而且颇为复杂。所以,要想扩展或深入研究这类大型结构体的动态特性,寻求加速度计之外的测试方法是必需的。GPS就是这样的一种方法。但必须注意GPS测试结果与加速度计结果的区别,以及如何理解GPS的测试结果等方面的问题。由于GPS用于这类监测,通常情况下基线布设不会太长(如数公里以内),因此大气、卫星和接收机相关的误差均可认为在构成差分消除。但GPS信号多路径效应影响不能通过差分法削弱,从而成为应用的主要误差影响源,此外还有温度变化以及残余误差的影响等。要有效测定结构体的微小振动,必须正确地将它从这些影响源中分离出来。

本文将侧重探讨使用小波变换,通过多尺度分解算法来筛分出不同的成分,有效地分离各类影响项(主要是多路径影响)和结构振动,使结构体微小的振动均可清晰的显现出来。由于多路径效应是主要影响源,故本文主要研究多路径,振动和噪声的分离问题,是小波变换应用于GPS数据分析的又一新尝试。

## 2 GPS码和相位观测值的多路径效应

GPS接收机所接收的信号有两类,即直接到达和间接到达(通过其他物体折射)的信号,这些信号被接收机接收后产生干涉,从而影响码和相位的量测,导致GPS定位精度降低。反射可大致分为远距反射和近距反射,前者多路径效应表现为高频成分,后者多路径效应表现为低频成分。高频成分可由特殊的相关技术处理,如窄相关技术<sup>[1]</sup>,MEDLL<sup>[2]</sup>等,而近距反射的低频成分是多路径效应的关键。

因多路径效应影响,接收机接收的信号是直

达信号与多个折射信号的合成信号,可表示为

$$s(t) = c(t)D(t)A\sum_{i=0}^n T_i \cos(k_0 t + h_i) \quad (1)$$

其中, $c(t)$ 是伪随机码(C/A码或P码); $D(t)$ 是导航电文; $k_0$ 是卫星信号角频; $h_i$ 是第*i*个信号的相位; $T_i$ 为信号折射系数(对直达信号 $T_0=1$ )。

伪距的多路径效应影响可分3种情况:①大面积的散射,如信号通过金属环境,可至伪距误差10 m;②近距离规则物体的反射,可至2~6 m;③水面反射引起的低频影响,伪距误差量级可达10 m。当然本文关心的是相位的多路径效应影响,为讨论方便起见,设只有一个反射信号,即取*i*=0和1,且不失一般性,设 $h_0=0$ ,码和导航电文不计,此时

$$s(t) = AT_1 \cos(k_0 t + h) + A \cos(k_0 t) \quad (2)$$

可知相位的多路径效应为

$$\Delta h = \arctan\left(\frac{T_1 \sin h}{1 - T_1 \cos h}\right) \Leftrightarrow \tan \Delta h = \tan \frac{h}{2} \quad (3)$$

所以, $h \rightarrow \pi$ ;  $\Delta h \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 可以引起四分之一周,约5 cm影响。

下面再来看一看多路径效应的影响周期,如图1所示,在进行结构监测时,GPS天线采用强制对中安装,多路径信号来自侧面上方。

可知:相位漂移为

$$\Delta h = \frac{1}{\lambda} \Delta S = \frac{D}{\sin \theta} (1 - \cos \theta)$$

$$f_M = \left. \frac{d(\Delta h)}{dt} \right|_{\frac{d\theta}{dt} = 0.07 \text{ rad/s}, \theta = 45^\circ} = 0.52 \times 10^{-3} D$$

可见,当 $D=30$  m时,多路径效应的典型周期为64 s。它相对于结构的主振动频率而言,表现为长期影响项。

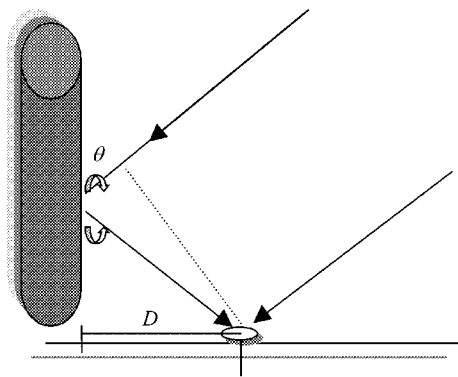


图 1 GPS多路径示意图

Fig. 1 Multipath effects of GPS signal

### 3 小波滤波与信号的多尺度分解

函数  $f(t)$  的小波变换为

$$w_f(a, b) = \langle f, \tilde{\psi}_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \tilde{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

其中,  $a, b$  分别为伸缩和平移参数 在实际应用中,小波和小波变换按  $a = 2^j; b = k2^j$  进行离散化,所以它们的 Fourier 变换满足如下关系

$$\tilde{w}_j f(k) = \tilde{f}(k) \tilde{\psi}(2^j k)$$

这实际上就是二进小波,由于它是允许小波,  $\tilde{\psi}(0) = 0$ ,且具有紧支集或衰减奇快,所以说其本质上就是一个带通滤波器 假定  $\tilde{\psi}$  是对称窗函数,在正频半相空间的中心为  $k_0$ ,半径为  $\Delta \tilde{\psi}$ ,则  $\tilde{\psi}_{2^j, k}$

的中心和半径分别为  $\frac{k_0}{2^j}, \frac{\Delta \tilde{\psi}}{2^j}$ ,其频率窗为:  $(\frac{k_0}{2^j} - \frac{\Delta \tilde{\psi}}{2^j}, \frac{k_0}{2^j} + \frac{\Delta \tilde{\psi}}{2^j})$

设  $k_0 = 3\Delta \tilde{\psi}$ ,则频带为  $(2^{-j-1}\Delta \tilde{\psi}, 2^{-j+2}\Delta \tilde{\psi})$ ,这种选取可以覆盖整个正半频率轴,且不相交 即

$$(0, \infty) = \bigcup_{j \in \mathbb{Z}} (2^{-j-1}\Delta \tilde{\psi}, 2^{-j+2}\Delta \tilde{\psi})$$

当  $j$  从 1 向正无穷大取整数时,频带向低频方向移动,得到无数个带通滤波器作用于信号,总体相当于一个低通滤波器的效果

对于离散的采样序列,使用不同截止频率的滤波器在不同尺度上分析信号,离散小波变换(DWT)以不同尺度将信号序列分解为近似信号和细节成分<sup>[3]</sup>.若以采样频率  $2K$  采得信号序列,其包含的频域为  $[0, K]$ ,DWT 使用两组函数(尺度函数和小波函数),分别对应低通和高通滤波器,其冲击响应计为  $g[n]$  和  $h[n]$ ,对信号进行滤波即为求卷积

$$y_{high}[n] = f[n] \times h[n] = \sum_k f[k] h[n-k]$$

$$y_{low}[n] = f[n] \times g[n] = \sum_k f[k] g[n-k] \quad (5)$$

低通滤波去掉信号  $[K/2, K]$  的高频率成分,此时信号最高频率为  $K/2$ ,然后做二次减半抽样(调整尺度),再进行低通和高通滤波,表示为

$$y_{high}[n] = \sum_k f[k] h[2n-k]$$

$$y_{low}[n] = \sum_k f[k] g[2n-k] \quad (6)$$

可见该过程使时间分辨率依次减半,频率分辨率倍增,信号被分解的频带组合为

$$Y(K/2^{j+1}, K/2^j) \quad (j = 0, \dots, m)$$

### 4 实测数据分析

#### 4.1 数据采集与多路径效应

数据采集选在一主体结构高 309.95 m,桅杆顶高 383.95 m,地面以上 69 层,加上机电层共 81 层的钢筋混凝土结构的高层建筑物, GPS 监测点设在大厦楼顶天台的混凝土墩上,采用强制对中安置.参考站设在距离大厦约 1 km 处,同样采用强制对中安置.就观测条件而言,主体结构天台上由于有两个圆筒结构,对观测天空有一定遮蔽及产生多路径效应影响,如图 1,  $D = 26.35$  m,多路径影响典型周期为 72.8 s,相对于结构振动周期  $T = [0.05N \sim 0.1N]$  ( $N = 81$ ) 的 4~8 s 表现为长期项

GPS 数据处理采用动态轨迹估计法,逐历元解出监测点的动态轨迹,在坐标域分析结构振动和各项误差影响项.由于参考站与监测点的距离不过一公里,所以认为在构成双差时,有关对流层和电离层的影响以及与卫星和接收机有关的误差均已消除.对监测点坐标的影响主要源于多路径效应,卫星可视性条件(GDOP, PDOP),温度变化以及风荷载.

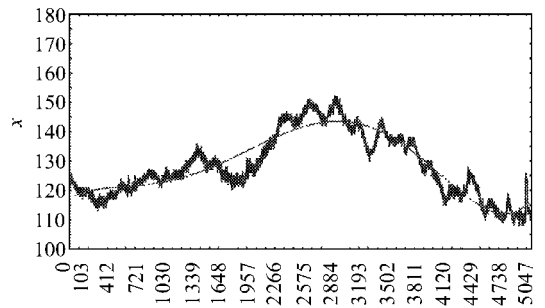


图 2 东西向坐标时程(第一天)

Fig. 2 Coordinates sequence(East, the first day)

本次测试采用加拿大 NOVATEL 公司生产的 OUTRIDER DL RT2 双频 GPS 接收机,数据采样率为 4 Hz.共对大厦进行了持续两天的观测,获得了大量数据.对于一特定地带,多路径效应影响与卫星的轨道运行周期相关,由于 GPS 卫星的运行周期约为 11 小时 58 分,所以相邻两天中,同一卫星在第二天的出现会提早约 4 分钟.图 2 至图 5 是相邻两天卫星处于相同高度和方位时段内的大厦动态时程曲线.比较两天的结果发现

它们之间存在极大的相关性,而且在时间上刚好有 4 分钟的提前。这进一步说明了多路径效应存在的客观性,而且可清楚地发现多路径影响的量级达数厘米,结构振动被完全淹没。

### 4.2 多尺度分解与特定成分提取

为了获得结构振动,必须将振动与其他影响项分离,即分离结构振动,多路径效应,温度变化影响以及噪声。相对于结构振动而言,多路径效应和温度变化影响表现为长期变化,现采用小波滤波和多尺度分解来提取不同的信号成分,依第 3 节所述,设计小波滤波器及多尺度分解过程如图 6。假定采样率为  $f_s$ ,可知信号序列包含的最高频率成分为  $f_s/2$ 。所以,实测坐标序列的 8 个尺度的分解细节和近似信号为

- (1 Hz, 2 Hz], (0.5 Hz, 1 Hz], (0.25 Hz, 0.5 Hz], (0.125 Hz, 0.25 Hz], (0.0625 Hz, 0.125 Hz],
- (0.03125 Hz, 0.0625 Hz], (0.015625 Hz, 0.03125 Hz], (0.0078125 Hz, 0.015625 Hz], (0 Hz, 0.0078125 Hz)

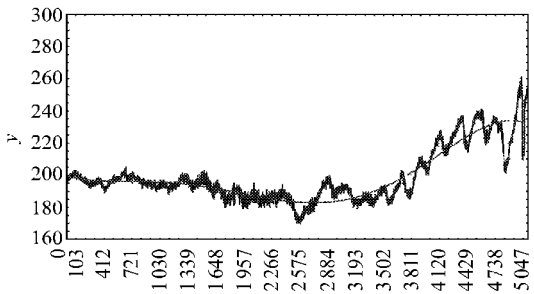


图 3 南北向坐标时程(第一天)

Fig. 3 Coordinates sequence(North, the first day)

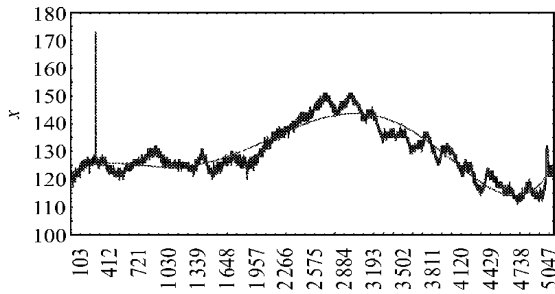


图 4 东西向坐标时程(第二天)

Fig. 4 Coordinates sequence(East, the second day)

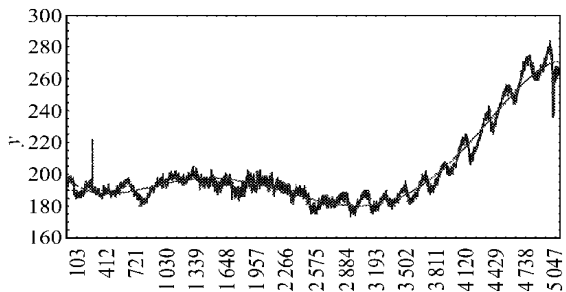


图 5 南北向坐标时程(第二天)

Fig. 5 Coordinates sequence(North, the second day)

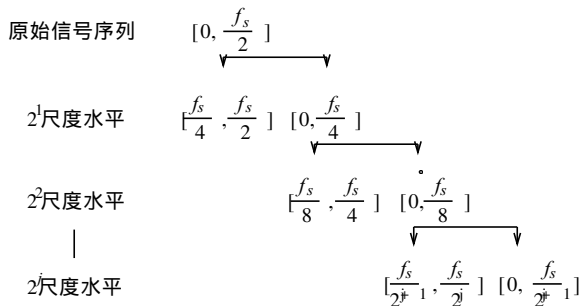


图 6 坐标序列的多尺度分解

Fig. 6 Multi resolution decomposition of coordinates sequenes

### 4.3 结果分析

由以上分解知道:第一尺度水平上的细节信号主要是噪声(图 7),第四尺度水平上为结构振动结果,其小波系数如图 8,第五至第八尺度水平上,主要是多路径效应和温度变化影响的长期项。首先进行信噪分离,提取得噪声基本上在 2 mm,少量(个别)到达 4 mm。图 9和图 10分别为东西和南北方向上的结构振动,可见常态下该结构的振动幅值只有几毫米,且东西向较南北向振动剧烈,这与结构体的构造是一致的。通过频谱分析,可获得振动在东西和南北向上的振动频率分别为:0.1748 Hz和 0.1998 Hz,如图 11和图 12。图 13至图 16为不同的多路径效应影响,且图 15和图 16中还包括了温度变化的长期影响项。

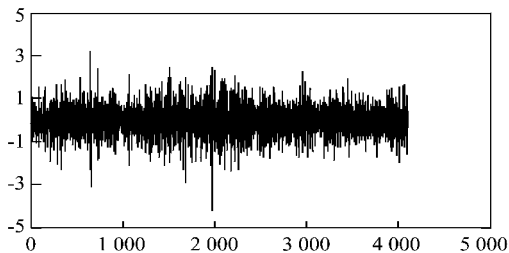


图 7 提取的 GPS坐标测量噪声

Fig. 7 Filtered out noise

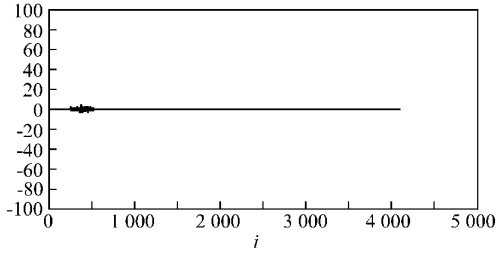


图 8 结构振动的小波系数

Fig. 8 Wavelet coefficients of structure vibrations

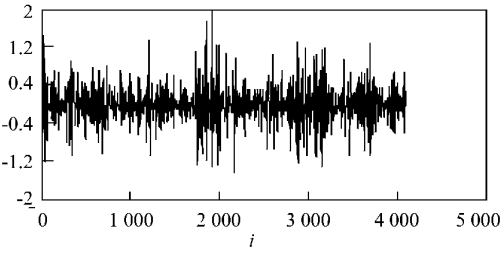


图 9 小波提取得结构振动 (东西向)

Fig. 9 Structure vibration from wavelet decomposition (East)

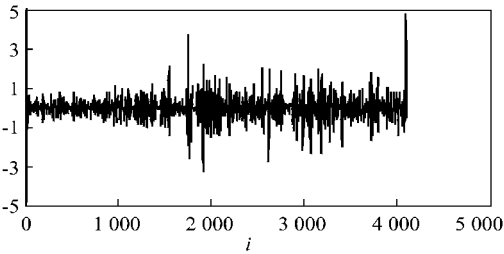


图 10 小波提取得结构振动 (南北向)

Fig. 10 Structure vibration from wavelet decomposition (North)

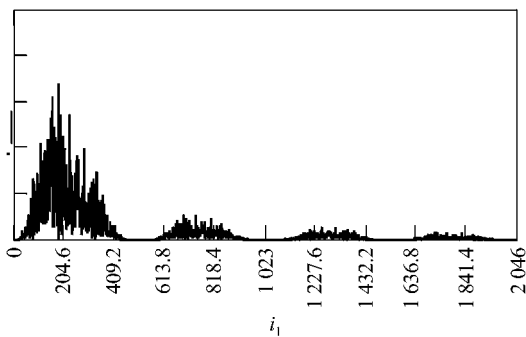


图 11 结构振动的频谱 (东西向,  $f = 0.1748$  Hz)  
Fig. 11 Spectrum of structure vibration (East,  $f = 0.1748$  Hz)

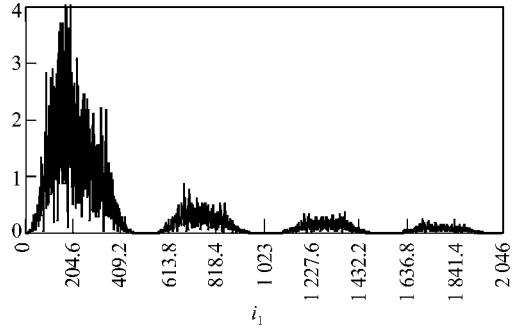


图 12 结构振动的频谱 (南北向,  $f = 0.1998$  Hz)  
Fig. 12 Spectrum of structure vibration (North,  $f = 0.1998$  Hz)

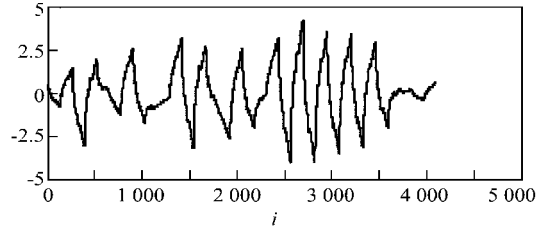


图 13 多路径效应 (东西向)

Fig. 13 Multipath effects (East)

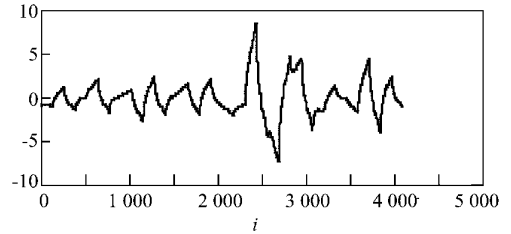


图 14 多路径效应 (南北向)

Fig. 14 Multipath effects (North)

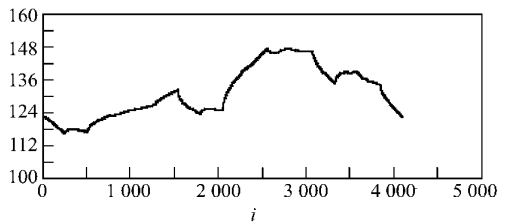


图 15 低频多路径与温度变化的综合影响 (东西向)

Fig. 15 Mixed impacts of temperature and low frequency components of multipath (East)

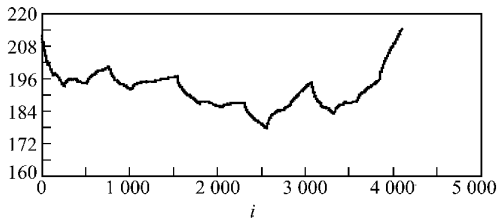


图 16 低频多路径与温度变化的综合影响  
(南北向)

Fig. 16 Mixed impacts of temperature and low frequency components of multipath (North)

## 5 结论与建议

通过以上分析,得出如下结论:

1. 应用 GPS 技术进行结构动力测试,在参考站与多路径监测点的距离不太长时,主要影响源为多路径效应,卫星可视性条件 (GDOP, PDOP),温度变化以及风荷载。

2. GPS 多路径效应,对于平面坐标的影响可达数厘米不等,且随卫星运行呈周期变化,远距离折射表现为高频成分;近距离折射表现为低频成分,其中低频部分是多路径效应影响关键所在。

3. 通常情况下,结构振动幅值(几毫米)远小于各类影响源的综合影响,即使在大风荷载下多路径效应影响亦可以掩盖结构振动。因为 GPS 结果含有丰富的各类影响源信息。

4. 采用小波滤波来分解,可以有效地将各类影响区分开来,甚至振幅只有 1~2 mm 的振动信号也可以提取出来,并且能很好地识别。

5. 经小波提取出的结构振动结果可以与加速度计结果相比较。

6. 多路径效应等各类影响项,均可分别提取,提取的结果可以用于该影响源的建模。

## 参考文献:

- [1] DIERENDONCK A J, FENTON P, FORD T. Theory and Performance of Narrow Correlator Technology in GPS Receiver [J]. Navigation, 1992, 39(3): 256-283.
- [2] NEE R D J V. Multipath and Multi-transmitter Interference in Spread-Spectrum Communication and Navigation Systems [M]. Delft: Delft University Press, 1995. 208.
- [3] TEOLIS A. Computational Signal Processing with Wavelets [M]. Boston: Birkhauser, 1998. 92.

# 中国测绘学会第七次全国 会员代表大会学术论文征文通知

中国测绘学会第七次全国会员代表大会将于 2001 年召开,为做好本次大会的学术交流活动,促进测绘高新技术的发展,展望 21 世纪测绘科技发展,面向西部大开发,发挥测绘的基础性、先行性的作用,中国测绘学会秘书处将组织出版学术论文集,征文主题和范围包括:大地测量、工程测量、摄影测量、遥感、地图学、地理信息系统、矿山测量、测绘仪器、测绘教育、地籍测绘、海洋测绘、信息传输与处理、地图印刷、有关科学管理等测绘及其相关相邻学科。应征论文内容必须紧扣本次征文范围,强调有针对性、创新性、前瞻性、实用性。论文内容可以公开发表,不涉及保密问题,责任自负,并请单位出证明盖章。

论文集不公开出版,凡入选的论文中国测绘学会将向有关公开刊物推荐发表,论文报送截止时间为 2001 年 3 月 31 日,论文要求有统一的格式,具体请与中国测绘学会秘书处联系:

地址:北京市复外三里河路 50 号测绘出版社内

邮编:100045 联系人:谭吉安

联系电话:010-68510527 传真:010-68514524

E-mail: csgpc@sina.com csgpc@sohu.com