

基于自适应噪声抵消与小波滤波的 GPS 监测误差分析

伊廷华¹ 李宏男¹ 伊晓东¹ 王国新¹

(1 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 大连市凌工路 2 号, 116024)

摘要:对 GPS 载波相位测量误差进行了理论分析和试验研究。根据噪声特征以及它们对载波相位测量结果的影响, 提出了基于自适应噪声抵消与小波滤波相结合的 GPS 噪声抑制方法。对具有强相关特性的多路径误差采用自适应噪声抵消方法, 而对于不相关的高频噪声则通过合理选择小波分解层数对信号进行分解, 对作用阈值后的小波系数进行重构, 得到最后的变形信号。实测数据分析表明, 该方法能有效地削弱多路径效应及测量随机噪声, 较用单一方法对 GPS 数据进行消噪处理有较大的优越性。

关键词:全球定位系统; 自适应噪声抵消; 小波; 多路径效应

中图分类号: P228.41; P207

随着 GPS RTK 技术的逐步成熟, 具有高效、快速、全自动、全天候、高精度等优越性能的变形监测方法在特大型土木工程中开始应用^[1]。然而, 由于 GPS 卫星信号受到多种干扰误差的影响, 如星历误差、卫星钟差、电离层和对流层折射误差以及多路径效应等, 使得实测结果常常难以达到预估及规定的精度要求。在变形监测中, 基准站和流动站的距离较短, 其公共误差可通过双差消除。因此, 多路径误差已成为主要误差源。过静等^[2]建立了多路径方程, 并从理论和试验上分析了不同介质对 GPS 信号的影响。黄丁发等^[3]利用小波多分辨分析技术有效地从噪声中筛分出结构的微小振动。钟萍等^[4]提出了采用交叉验证法和 Vondrak 数字滤波器相结合的 CVVF 法对模拟数据和实测数据进行了分析, 效果较好。Comp 等^[5]通过分析信号的信噪比来识别和消除多路径效应。Ge 等^[6]提出了基于最小均方法的自适应滤波方法来消除多路径效应。

本文提出了基于自适应噪声抵消与小波滤波相结合的 GPS 噪声抑制方法。实测数据分析结果表明, 根据不同噪声特征选用不同的滤波方法较用单一的滤波方法更合理有效。

1 自适应噪声抵消与小波滤波方法

1.1 多路径效应

GPS 接收机所接收到的信号有直接到达和间接到达两类, 这些信号被接收机接收后产生干涉, 从而影响码和相位的测量, 导致 GPS 精度降低, 称为多路径效应^[7]。工程变形监测主要用到的是载波相位测量, 多路径信号主要由相位延迟引起, 忽略码和导航电文的影响, 则合成信号为:

$$S = S_d + S_i = \alpha A \sin(\omega t + \varphi_c) \quad (1)$$

其中,

$$\varphi_c = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \sin \varphi_i}{1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos \varphi_i} \right) \quad (2)$$

这里, S_d 为直接信号; S_i 为间接信号; A 为载波信号振幅; α 为反射系数 ($0 \leq \alpha \leq 1$); ω 为载波信号角频率; φ_i 为第 i 个信号的相位延迟; α 和 φ_c 分别为合成信号的反射系数和总的相对相位延迟。

可见, 载波相位多路径误差的大小取决于反射系数 α 和相位延迟 φ_i 。当 $\alpha = 1$ 和 $\varphi_i = \pi$ 时, $\varphi_c = \pi/2$, 可以引起 1/4 周的最大误差。如 L_1 信号

的波长为 19.05 cm, 其最大误差为 4.8 cm; L_2 信号的波长为 24.42 cm, 其最大误差为 6.1 cm。对于 L_1 和 L_2 的线性组合, 宽巷最大误差为 21.5 cm, 窄巷的最大误差为 2.7 cm, 这么高的误差是工程变形监测所不允许的。

1.2 GPS 干扰误差分析

GPS 卫星运行周期为 11 h 58 min, 所以在同一地点观测到相同的卫星分布, 第二天会比第一天提前 4 min, 可以利用多路径的相关性对监测到的信号进行修正。因为 GPS 多路径信号是一种时变信号, 它的统计特性随时间会发生变化, 经典的固定滤波器已经无能为力, 而采用自适应噪声干扰抵消器可以较好地达到这一目的。自适应噪声干扰抵消器是基于自适应滤波原理的一种扩展, 它把自适应滤波器的期望信号输入端改为信号加噪声干扰的原始输入端, 而它的输入端改为噪声干扰端, 由递归最小二乘法 (recursive least square, RLS) 等横向滤波器的参数调节输出, 以将原始输入中的噪声干扰抵消掉。

图 1 为本文设计的单通道的自适应噪声抵消器 GPS 接收机的实测结果, 即抵消器的原始输入包括结构的真实形变 S_k 、路径信号 N_k 和 GPS 接收机的系统噪声 M_{0k} 。参考输入为第二天 GPS 接收机的系统噪声 M_{1k} 与 $N_k \cdot H_k$, 这里 $N_k \cdot H_k$ 为噪声源 N_k 经过转移函数 H_k 的通道加入到参考输入端的信号, 即第二天的多路径信

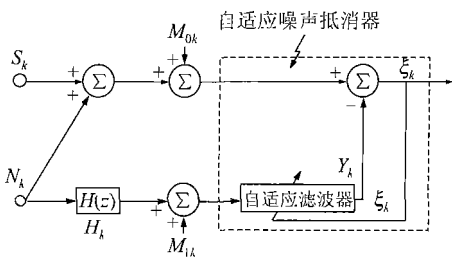


图 1 GPS 自适应噪声抵消原理

Fig. 1 Schematic Diagram of the GPS ANC

号, 因为它与原始输入中噪声 N_k 来自同一个噪声源, 所以它们存在相关性, 且与信号 S_k 无关。 M_{1k} 为参考输入端接收机的系统噪声, M_{0k} 和 M_{1k} 互不相关, 而且与 N_k 和 $N_k \cdot H_k$ 也不相关, 则自适应噪声抵消器的输出误差为:

$$\xi_k = S_k + (N_k + M_{0k}) - Y_k \quad (3)$$

将上式重新整理, 两边平方, 得:

$$\xi_k^2 = S_k^2 + (N_k + M_{0k} - Y_k)^2 + 2S_k(N_k + M_{0k} - Y_k) \quad (4)$$

取数学期望, 因 S_k 与 N_k 、 M_{0k} 和 Y_k 不相关, 所以,

$$E[\xi_k^2] = E[S_k^2] + E[(N_k + M_{0k} - Y_k)^2] +$$

$$2E[S_k(N_k + M_{0k} - Y_k)] = E[S_k^2] + E[(N_k + M_{0k} - Y_k)^2] \quad (5)$$

当调节滤波器参数使 $E[\xi_k^2]$ 最小化时, 信号能量 $E[S_k^2]$ 应不受影响, 从而使最小输出能量为:

$$E_{\min}[\xi_k^2] = E[S_k^2] + E_{\min}[(N_k + M_{0k} - Y_k)^2] \quad (6)$$

可以看到, 当滤波器参数改变使 $E[\xi_k^2]$ 减小时, $E[(N_k + M_{0k} - Y_k)^2]$ 也同时被减小, 滤波器的输出 Y_k 是原始输入噪声 $N_k + M_{0k}$ 的最小方差估计。

1.3 自适应噪声抵消与小波滤波相结合方法

从式 (5) 可知, 当 $E[(N_k + M_{0k} - Y_k)^2] = 0$ 时, 得到最小输出功率为 $E_{\min}[\xi_k^2] = E[S_k^2]$, 此时的最小化输出结果完全没有噪声, 这是自适应滤波的理想情况。但这种情况实际上是不存在的, 因为连续 2 d 多路径误差的相关性在较好的条件下只有 85% 左右^[9], 且接收机的随机噪声 M_{0k} 和 M_{1k} 以高频噪声为主, 互不相关, 不可避免, 自适应噪声抵消器起不到作用, 但结构形变信号和多路径噪声以低频为主, 利用小波具有多分辨率的性质^[10], 可将信号按频率高低进行精细分解。通过对每一层选择合适的阈值对高频噪声进行收缩处理, 然后根据第 N 层的低频系数和第 1 层到第 N 层的经过修改的高频系数, 对信号进行重构, 最终得到结构的形变信号。小波这种多分辨率的特性与自适应噪声抵消器正好互为补充。

采用小波进行滤波时应根据信号特征来选择合适的分解层数, 分解层数过多, 会造成真实信号的信息丢失, 同时运算量加大, 分解层数太少则消噪效果不理想。

2 GPS 多路径试验及数据分析

2.1 试验方案与过程

试验地点选在大连理工大学综合试验楼楼顶。基准站 S 由试验楼楼顶的库房上 1 个 1 m 高的钢筋混凝土柱组成, 流动站 R_1 放在与基准站的对角处, 因周围没有遮挡, 不会产生多路径效应, 其主要误差源是接收机的系统噪声。流动站 R_2 放在库房旁边, 利用库房侧面来产生多路径信号, R_2 测得的结果将与 R_1 进行对比。流动站选用三角架支撑, 是为了能灵活地选择合适的测点, 因为离墙面太近可能会引起周跳现象, 而离得太远则多路径效应不明显, 所有支架顶部均安装基座以保持天线水平。GPS 接收机选用的是 Trimble 5700 双频接收机, 采样频率设为 1 Hz, 从 2005 年 8 月 26 日开始, 在每天上午的 9:30~11:00 进

行了连续 3 d 的实时动态数据采集, 前两天天气晴朗, 第 3 d 有细雨, 但均无风。

2.2 实测结果及数据分析

数据处理采用动态轨迹估计法, 逐历元解算出测点的动态轨迹。由于基准站与流动站的距离只有 10 几 m, 所以对监测点坐标的影响主要源于多路径效应和接收机的高频噪声。连续 3 d 相对应的 50 min 南北方向、东西方向和高程方向的相关系数见表 1。从表中可以看到, 流动站 R_1 测得的信号无论在水平方向还是在高程方向相关性都很小, 最大相关系数只有 0.163 8。信号主要由一些高频噪声组成, 且噪声幅值水平方向均小于 1 cm, 高程在 2.2 cm 以内, 这与接收机的标称误差是基本吻合的。与 R_1 相对应的 R_2 的监测结果则具有强相关特性, 3 个方向连续 2 d 的相关系数介于 0.623 6 和 0.824 5 之间, 这进一步说明了多路径存在的客观性, 且多路径误差水平达 3 cm, 高程达 10 cm。这是高精度的结构变形监测所不允许的, 因为结构振动的真实信号可能会被完全掩盖。图 2 为流动站 R_2 实测的南北及高程方向坐标序列。

选取相关性较好的南北向信号进行分析, 假设结构实际变形信号为 $S_1 = 0.02 \sin(0.1 \pi t)$ (图 3(a)), 将 S_1 与 R_2 实测的第一天误差信号相叠

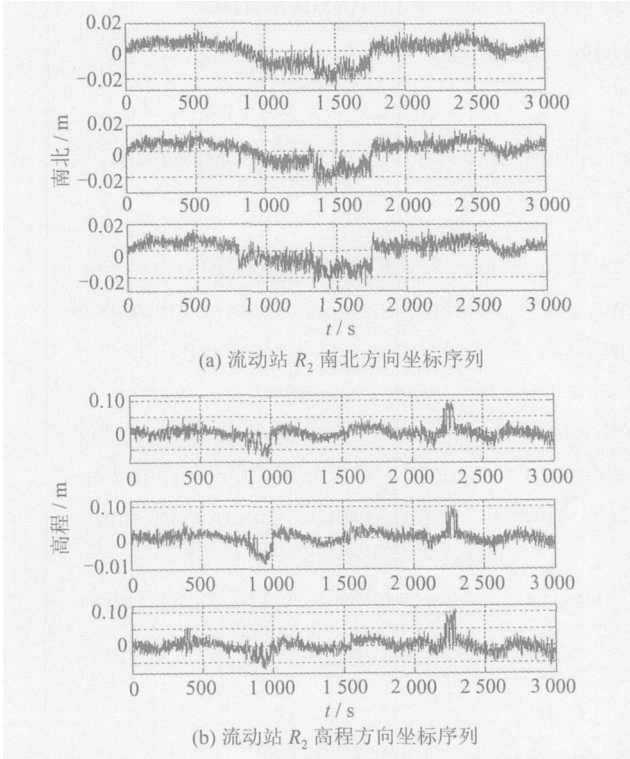


图 2 流动站 R_2 实测结果

Fig. 2 Measured Time Series for Three Consecutive Days at Rover Station R_2

表 1 坐标序列相关系数

Tab. 1 Correlation Coefficient Between Different Time Series

流动站	天	东西向	南北向	垂直向
R_1	1, 2	0.050 4	0.163 8	0.037 1
	2, 3	-0.099 1	0.056 5	0.040 0
	1, 3	0.020 0	-0.009 4	0.039 0
R_2	1, 2	0.807 1	0.824 5	0.632 5
	2, 3	0.818 8	0.817 7	0.623 6
	1, 3	0.791 9	0.799 8	0.610 1

加, 作为 GPS 实测的结构变形信号(图 3(c)), 可以看到由于多路径误差及高频噪声的污染, 振幅明显增大, 由原来的最大 2 cm 变为 4 cm, 信号整体波动趋势随多路径信号发生偏移, 变得具有非平稳特性。采用基于 RLS 的自适应噪声抵消器对信号首先进行多路径消除, 得到图 3(e), 可以看到真实信号的整体波动趋势及振幅已经得到修正, 但仍受到高频噪声的干扰。然后选用 sym4 小波对图 3(e) 进行 4 层小波分解, 采用基于 Stein 无偏似然估计方法估计每层的阈值, 使用软阈值进行降噪, 然后对信号进行重构得到图 3(f), 真实的信号已基本提取出, 效果较为理想。图 3(g) 为用本文方法提取出的信号与真实信号 S_1 的差别。图 3 中, 纵坐标为幅值(m)。从表 2 可以看到, 经多路径污染后信号与原信号的标准差相差 13.48%, 经过两次修正, 它们的差别已经很小, 只有 1.42%, 满足工程要求。

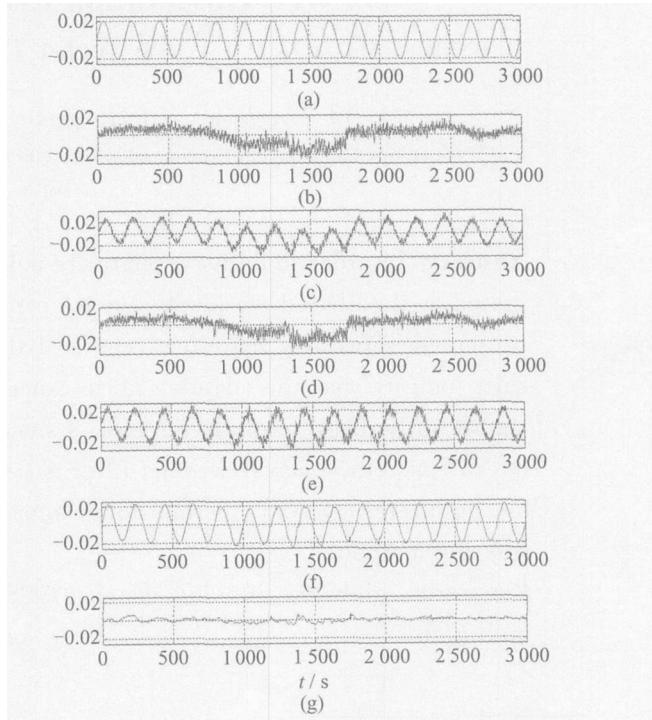


图 3 采用第 2 天误差修正第 1 天监测信号及小波滤波结果

Fig. 3 Filtering Results for GPS Observation Error for Day 1 and Day 2 Pair

表2 GPS坐标序列修正前后的标准差

Tab. 2 Standard Deviation of GPS Time Series

Before and After Correction

消噪 方式	标准差/m				误差/%
	图 3(a)	图 3(c)	图 3(e)	图 3(f)	
1, 2	0.014 1	0.016 0	0.014 7	0.014 3	13.48 4.26 1.42
1, 3	0.014 1	0.016 0	0.014 8	0.014 4	13.48 4.96 2.13

3 结 语

本文提出了基于自适应噪声抵消与小波滤波相结合的 GPS 噪声抑制方法,并进行了试验验证。观测结果表明,采用单一的滤波方法并不合理,应针对不同误差的特性,选用不同的滤波方法。采用本文提出的联合消噪方法对实测数据进行了分析,滤波结果令人满意。

参 考 文 献

- [1] 李宏男,伊廷华,王国新. GPS 在结构健康监测中的研究与应用进展[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(6): 122-130
- [2] 过静, 商瑞斌, 李毓麟. 多路径效应对 GPS 定位影响的研究[J]. 工程勘察, 1995, (2): 46-49
- [3] 黄丁发, 陈永奇, 丁晓利, 等. GPS 高层建筑物常荷

载振动测试的小波分析[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 12-15

- [4] 钟萍, 丁晓利, 郑大伟. CVVF 法用于 GPS 多路径效应的研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 161-167
- [5] Comp C J, Axelrad P. An Adaptive SNR-based Carrier Phase Multipath Mitigation Technique[J]. Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 264-276
- [6] Ge L L, Han S W, Rizos C, et al. GPS Multipath Change Detection at Permanent GPS Stations[J]. Survey Review, 2002, 36: 306-322
- [7] 袁林果, 黄丁发, 丁晓利, 等. GPS 载波相位测量中的信号多路径效应影响研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 210-215
- [8] Radovanovic R, Teskey W F. Development of a Precision GPS Monitoring System: Short Baseline Deformation Detection. Technical Report[R]. Dep of Geomatics Engineering, University of Calgary, 1999
- [9] 李宏男, 孙鸿敏. 小波分析在土木工程中的应用[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 16-22

第一作者简介: 伊廷华, 博士生。现从事结构健康监测研究。
E-mail: yitinghua@163.com

On GPS Observation Errors with ANC Principles and Wavelet Denoise Method

YI Tinghua¹ LI Hongnan¹ YI Xiaodong¹ WANG Guoxin¹

(1 State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, 2 Linggong Road, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to derive a relatively noise-free time series from the GPS results, an integrated method based on adaptive noise cancelling principles and wavelet de-noise method is presented. To verify the effectiveness of the method, an experiment is carried out, the results indicate that the adaptive noise canceller is a powerful signal decomposer, which can significantly mitigate multipath effects since multipath tends to exhibit the same pattern between consecutive days; wavelet filter is a suitable tool to separate stochastic noise that cannot be filtered by ANC method from signal. This kind of combination is superior to single filtering method.

Key words: global positioning system (GPS); adaptive noise cancellation (ANC); wavelet; multipath

About the first author: Yi Tinghua, Ph. D candidate, majors in data processing and structural health monitoring.

E-mail: yitinghua@163.com