

GPS 高程导出的全球高程振荡运动及季节变化*

朱文耀^{①**} 符 养^{①②} 李 彦^①

(^①中国科学院上海天文台, 上海 200030; ^②西安测绘研究所, 西安 710054)

摘要 对全球分布的 GPS 连续观测站高程分量时间序列进行了谱分析和小波多分辨率分析, 分离了高程信号的平稳和非平稳信号, 用 AR 模型建立了平稳高程信号的离散模型. 比较表明, GPS 高程时间序列相关长度从 2 天到 31 天变化, 纠正了随机漫步过程从零时刻积分的不足. 通过分析, 发现地球存在以半周年和周年为周期的整体性扩张与收缩振荡运动, 半周年项的最大值出现在 3~4 月份和 10~11 月份, 周年项的最大值出现在 9~11 月份. 同时南北半球的变化规律存在差异, 南半球相对于北半球正在扩张.

关键词 GPS 高程 时间序列分析 小波分析

GPS 观测技术在地球物理研究中的应用已有 10 多年的历史. 1994 年正式成立的 IGS(国际 GPS 地球动力学服务)在全球范围建立了 GPS 连续观测网, 向全球发布 GPS 卫星精密星历、地球自转参数、ITRF 地球参考架参数及台站坐标以及观测台站的 GPS 原始观测数据等, 目前全球有近 200 个台站加入该组织^[1]. IGS 的成立极大地推进了 GPS 技术在地学研究中的应用. 从 1992 年 IGS 试运行到今, 人们积累了大量观测数据, 通过 IGS 数据分析中心的数据处理获得了 IGS 观测台站三维坐标的时间序列. 地球物理观测数据的时间序列频谱一般具有 $1/f^\alpha$ 形式. Langbein^[2]分析了双色电子测距仪观测数据的误差特性, 给出了白噪声加随机漫步噪声的频谱分析结果和最大似然函数解; Zhang^[3]对南加州 GPS 阵列两年的坐标时间序列进行分析, 由于时间序列较短, 未能分解 FLICK 噪声和随机漫步噪声的影响; Mao^[4]对全球分布的 23 个台站 GPS 时间序列噪声进行分析, 认为 GPS 时间序列以白噪声加 FLICK 噪声为主. 从他们的工作中可以看出, GPS 三维坐标的时间序列噪声高程方向比水平方向大, 其周期变化特性更为明显. 由于当时条件的限制, 他们对 GPS 高程测量时间序列的噪声特性未作深入的分析, 影响了测站高程变化监测结果的可靠性.

本文在前人工作的基础上对 GPS 高程方向时间序列噪声的特性进行深入研究, 利用改进的 Nelder-Mead 单形调优法同时求解白噪声、FLICK 噪声和随机漫步噪声的分量; 利用 AR 模型建模克服了随机漫步过程从零时刻积分的缺陷; 利用小波多分辨率分析对时间序列的非平稳特性进行研究. 在此基础上, 对全球 616 个 GPS 台站近 10 年的高程测量时间序列进行了预处理, 从中筛选出全球均匀分布的 178 个 GPS 台站观测数据. 对所筛选的数据进行了精细的数据处理和频谱分析, 给出了较可靠的 GPS 台站高程线性变化和周期性(包括周年、半周年和准两周年)变化的结果, 特别是新发现了地球明显呈现半周年整体振荡运动等特征.

2002-08-20 收稿

* 国家重点基础研究发展项目(批准号: G1998040703)、国家自然科学基金(批准号: 40174009, 10133010)和上海市科学技术发展基金(批准号: JC14012)资助

** E-mail: zhuw@center.shao.ac.cn

1 全球 GPS 站点高程连续时间序列的数据处理

1.1 GPS 导出的高程时间序列数据

本文以全球分布的 GPS 连续观测站观测数据为基础,分析中采用 JPL(Jet Propulsion Lab)1991年1月22日到2001年5月20日616个GPS站点坐标解结果(<http://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mbh/series.html>),JPL采用GIPSY软件处理GPS观测数据,采用全球分布的42个IGS核心站产生JPL精密星历,用精密点定位(PPP)方法分别对每一台站的三维坐标进行估计;在计算站点坐标时固定JPL产生的精密星历,截止高度角为 15° ,在初始模型中考虑站点极潮、固体潮和海潮改正;估计参数包括每一台站大气天顶延迟及其梯度参数,接收机钟差白噪声参数和模糊度实数解参数.数据处理采用统一软件版本和处理方案.

我们对616个站点的时间序列进行筛选,站点的选择原则为:1)全球均匀分布;2)站点建立时间在三年以上;3)在采用的时间跨度内累计有效观测数据多于60%;4)避免选择频繁更换设备、软件及观测墩的站点;5)时间序列中没有不确定的粗差.

符合上述条件的站点共有178个.

在时间序列中,有19个站点的数据存在数据分群现象(见表1).这些现象大多是由于天线高的变化、接收机软件版本升级等原因引起的.在数据预处理时对时间序列进行分段处理,然后进行合并.有9个站点在刚建立时故障率高,有效采样少.在预处理时将采样率低的时间段删除(见表2).

表 1 时间序列分群的站点及分群时间段

站点名称	分群时间段	站点名称	分群时间段
BLYT	1994.1628 ~ 1995.9808	PINY	2001.1636 ~ 2001.3224
BOR1	1999.2936 ~ 1999.4169	PVEP	1998.0397 ~ 2000.5968
CAS1	1997.1782 ~ 1997.8590	SIO3	2000.2902 ~ 2001.3224
CHAB	1995.6660 ~ 1996.2710	TRAK	1994.8611 ~ 1995.4387
COSO	1995.6660 ~ 1996.3340	UPAD	1995.0938 ~ 1997.9630
DUBO	1996.7968 ~ 1997.0131	VNDP	1994.3710 ~ 1995.8522
	1999.7590 ~ 2001.3224	WINT	1995.6660 ~ 1996.2656
GOPE	1999.9398 ~ 2000.5613	WLSN	1994.5435 ~ 1997.4894
	2000.7584 ~ 2001.3224	YELL	1991.0582 ~ 1996.6708
HOLP	1995.6660 ~ 1998.0068	ZIMM	1998.8884 ~ 2001.3224
MATE	1996.2985 ~ 1996.4764		

表 2 删除部分数据的站点及相应的时间段

站点名称	删除的时间段	站点名称	删除的时间段
BRAN	1994.9268 ~ 1995.6660	MONP	1994.5161 ~ 1995.6660
JOZE	1993.6509 ~ 1995.0938	PINY	1991.0582 ~ 1994.1628
JPLM	1991.0582 ~ 1995.6660	SIO3	1993.6509 ~ 1995.6715
LONG	1994.9241 ~ 1995.6660	VILL	1994.8939 ~ 1995.0582
		VNDP	1992.3998 ~ 1995.8549

谱分析和时间序列分析都要求原始数据为零均值,没有线性趋势项.为此,需要对时间序列进行线性拟合:

$$S_{dt} = S - (\hat{a} + \hat{b}t), \quad (1)$$

式中 S 为原始时间序列, S_{dt} 为消除常数项和线性项后的时间序列, \hat{a} 和 \hat{b} 是时间序列 S 加权最小二乘线性拟合参数. 其中 \hat{b} 是高程方向的线性变化速度, 对 178 个台站高程线性变化速度 \hat{b} 的估计见表 3.

表 3 台站高程时间序列参数估计结果

台站	独立白噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	有色噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	ARMA 线性速度 估计/mm · a ⁻¹	周年项振幅 /mm	周年项 最大值月份	半年项 振幅/mm	半年项 最大值月份
北半球							
ALBH	-0.26 ± 0.06	-0.10 ± 0.61	-0.34 ± 0.16	2.64 ± 0.12	9~11	0.25 ± 0.74	4~6, 10~12
ALGO	1.81 ± 0.06	1.30 ± 0.67	1.55 ± 0.29	1.71 ± 0.14	7~10	0.60 ± 0.26	—
ANKR	0.93 ± 0.16	-0.01 ± 2.34	-0.39 ± 1.47	1.30 ± 0.24	10~12	0.61 ± 0.39	4~6, 10~12
AOA1	-0.96 ± 0.13	-0.86 ± 1.27	-1.58 ± 0.61	2.36 ± 0.12	10~11	2.47 ± 0.21	4~6, 10~12
AOML	-1.07 ± 0.33	0.17 ± 4.32	-0.70 ± 1.07	2.37 ± 0.34	5~6	1.51 ± 0.31	5, 11
AZU1	0.16 ± 0.22	-1.79 ± 16.57	-1.99 ± 2.77	3.64 ± 0.09	9~10	2.48 ± 0.32	4~6, 10~12
BAHR	0.24 ± 0.21	0.94 ± 45.81	-0.52 ± 1.43	4.95 ± 0.22	6	2.28 ± 0.29	2~4, 6~9
BILL	7.50 ± 0.36	6.99 ± 53.88	7.48 ± 0.65	6.05 ± 0.13	8~10	1.77 ± 0.28	4, 9~11
BKMS	-1.94 ± 0.37	-1.40 ± 27.96	-3.86 ± 4.89	2.07 ± 0.28	4~5	3.42 ± 0.19	4~6, 10~12
BLYT	0.85 ± 0.15	0.46 ± 2.44	0.20 ± 0.46	2.09 ± 0.19	7~10	2.60 ± 0.19	4~6, 10~12
BOR1	0.30 ± 0.10	0.58 ± 1.61	0.66 ± 0.28	1.12 ± 0.23	8~11	1.11 ± 0.23	4~6, 10~12
BRAN	-3.93 ± 0.17	-5.09 ± 18.64	-7.19 ± 2.15	1.93 ± 0.28	7~11	2.08 ± 0.29	4~7, 11~1
BRIB	2.23 ± 0.24	2.18 ± 5.39	1.00 ± 1.00	1.85 ± 0.34	4~8	2.56 ± 0.21	4~6, 11~12
BRMU	-0.56 ± 0.08	-0.78 ± 0.62	-0.70 ± 0.29	1.78 ± 0.21	3~5	1.38 ± 0.20	3~5, 8~11
BRU1	-2.40 ± 0.29	-2.75 ± 5.90	-2.11 ± 0.97	2.92 ± 0.34	7~10	3.08 ± 0.27	4~6, 10~12
BRUS	1.95 ± 0.09	1.90 ± 0.96	2.08 ± 0.44	1.18 ± 0.20	10~12	0.67 ± 0.24	4~6, 10~12
CAGL	-0.85 ± 0.18	-0.97 ± 2.22	-1.01 ± 0.38	0.44 ± 0.60	5~8	1.19 ± 0.28	1~3, 5~7
CASA	2.69 ± 0.19	1.37 ± 21.14	0.78 ± 1.35	1.28 ± 0.23	—	1.41 ± 0.28	—
CAT1	-0.76 ± 0.14	-0.56 ± 1.83	-1.39 ± 0.93	1.58 ± 0.19	9~11	2.31 ± 0.23	4~6, 11~12
CHAB	-0.04 ± 0.19	1.00 ± 2.79	-0.07 ± 0.20	2.58 ± 0.11	7~9	2.76 ± 0.16	4~6, 11~12
CHIL	-0.68 ± 0.15	-0.03 ± 2.27	-0.29 ± 0.29	1.52 ± 0.19	9~11	1.39 ± 0.22	4~6, 10~12
CHUR	9.82 ± 0.19	8.73 ± 3.14	9.43 ± 1.73	3.97 ± 0.30	7~9	0.97 ± 0.34	4~6, 10~12
CICE	-3.98 ± 0.28	-2.81 ± 5.06	-3.52 ± 0.32	1.91 ± 0.34	—	3.00 ± 0.12	6, 12~2
CIT1	-0.62 ± 0.13	-0.41 ± 1.55	-1.35 ± 0.59	2.09 ± 0.14	9~10	1.98 ± 0.17	4~6, 10~12
CLAR	2.54 ± 0.16	2.75 ± 17.52	2.37 ± 0.93	2.83 ± 0.19	10~11	1.57 ± 0.25	4~6, 10~12
CME1	-3.77 ± 0.34	-3.76 ± 5.95	-5.86 ± 5.91	1.91 ± 0.36	8~9	2.31 ± 0.26	4~6, 10~12
CMP9	-0.44 ± 0.18	-0.55 ± 3.02	-1.05 ± 1.31	2.85 ± 0.25	10~12	2.01 ± 0.25	4~6, 11~12
COSO	-2.96 ± 0.17	-1.79 ± 3.95	-1.76 ± 1.06	1.49 ± 0.21	10~11	2.69 ± 0.23	4~6, 11~12
CRO1	-0.42 ± 0.45	-1.41 ± 39.18	-0.26 ± 0.80	1.60 ± 0.34	4	1.38 ± 0.46	4, 9
CSDH	3.08 ± 0.32	2.57 ± 5.07	3.15 ± 1.10	2.52 ± 0.28	9~10	1.63 ± 0.26	4~6, 10~12
CSN1	0.67 ± 0.18	-0.51 ± 2.06	-0.57 ± 1.12	3.20 ± 0.13	9~11	1.85 ± 0.27	4~6, 10~12
CVHS	-2.85 ± 0.35	-2.94 ± 7.11	-2.01 ± 0.89	2.80 ± 0.13	8~10	1.69 ± 0.26	4~6, 10~12
DAM1	-2.82 ± 0.26	-1.23 ± 32.28	-1.43 ± 3.32	3.20 ± 0.18	7~9	3.00 ± 0.14	1~2, 6~7
DAM2	-0.80 ± 0.23	-2.68 ± 66.62	-1.78 ± 0.59	6.29 ± 0.12	9	2.56 ± 0.17	4~5, 11~12
DHLG	-0.09 ± 0.17	-0.58 ± 2.07	-1.07 ± 1.49	2.79 ± 0.10	8~9	1.37 ± 0.23	4~6, 11~12
DUBO	-0.09 ± 0.17	-0.22 ± 3.04	0.08 ± 0.34	2.16 ± 0.14	9~10	2.13 ± 0.14	4~6, 10~12
DYHS	-1.33 ± 0.35	-0.72 ± 5.73	-1.79 ± 0.97	2.00 ± 0.18	3~5	2.50 ± 0.18	4~6, 10~12
EBRE	-1.79 ± 0.19	-2.06 ± 2.55	-3.50 ± 1.05	2.35 ± 0.16	2~3	0.42 ± 0.55	4~6, 10~12
ENG1	-1.90 ± 0.44	-4.33 ± 35.83	-5.02 ± 0.52	4.27 ± 0.31	—	3.95 ± 0.49	6, 12~1
FAIR	-4.59 ± 0.10	-3.04 ± 2.18	-3.25 ± 0.42	5.01 ± 0.22	1~3	0.35 ± 0.31	2~4, 7~9
FLIN	1.30 ± 0.19	1.50 ± 4.62	1.50 ± 0.45	2.07 ± 0.16	—	0.33 ± 1.02	4~6, 10~12

(续表 3)

台站	独立白噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	有色噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	ARMA 线性速度 估计/mm · a ⁻¹	周年项振幅 /mm	周年项 最大值月份	半年项 振幅/mm	半年项 最大值月份
FZHS	3.34 ± 0.44	2.50 ± 7.63	3.17 ± 1.89	4.43 ± 0.11	9	2.59 ± 0.23	4~6, 10~12
GGAO	-1.31 ± 0.09	-1.56 ± 0.68	-1.89 ± 0.36	1.85 ± 0.16	8~10	0.85 ± 0.26	4~6, 10~12
GLSV	2.02 ± 0.36	1.77 ± 1.08	1.67 ± 1.46	4.70 ± 0.35	8~9	1.37 ± 0.34	4~5, 9~11
GOL2	-0.87 ± 0.12	-1.12 ± 1.21	-0.91 ± 0.67	2.87 ± 0.19	6~8	1.83 ± 0.24	5~6, 12~1
GOLD	-1.42 ± 0.09	-1.34 ± 1.18	-2.96 ± 0.46	3.22 ± 0.20	7~9	1.82 ± 0.25	5~6, 1~2
GRAS	-0.01 ± 0.13	0.14 ± 1.51	0.12 ± 0.40	0.57 ± 0.46	—	1.39 ± 0.26	—
GRAZ	-0.36 ± 0.08	-0.77 ± 0.75	-1.80 ± 0.33	1.24 ± 0.20	7~9	0.39 ± 0.27	4~6, 11~1
GUAM	4.90 ± 0.19	4.86 ± 2.99	5.39 ± 0.82	2.29 ± 0.23	9~11	1.77 ± 0.38	6, 12~1
HARV	-11.00 ± 0.11	-10.64 ± 1.47	-10.78 ± 1.02	2.80 ± 0.10	9~11	2.62 ± 0.27	5~6, 11~12
HERS	2.15 ± 0.09	1.75 ± 0.88	1.28 ± 0.35	1.16 ± 0.23	4~6	0.71 ± 0.33	4~6, 10~12
HFLK	1.48 ± 0.22	1.50 ± 0.43	1.51 ± 0.29	3.83 ± 0.29	9~10	0.32 ± 0.33	4~6, 11~1
HNPT	-5.34 ± 0.23	-6.39 ± 11.64	-4.45 ± 2.89	1.24 ± 0.34	—	1.03 ± 0.35	3~7, 11~1
HOFN	3.12 ± 0.32	2.59 ± 36.71	3.10 ± 0.73	3.82 ± 0.28	11~12	0.86 ± 0.36	2~4, 6~8
HOLB	3.70 ± 0.23	3.91 ± 2.72	3.56 ± 1.04	2.74 ± 0.16	7~11	1.08 ± 0.27	4~6, 10~12
HOLC	-0.18 ± 0.17	0.59 ± 2.51	-0.57 ± 1.10	1.52 ± 0.22	9~12	1.77 ± 0.25	5~6, 10~12
HOLP	14.00 ± 0.20	14.78 ± 3.68	15.21 ± 1.43	0.74 ± 0.46	7~11	3.09 ± 0.24	4~6, 10~12
HOPB	3.66 ± 0.20	3.33 ± 40.77	3.03 ± 0.91	3.38 ± 0.25	—	1.82 ± 0.21	4~6, 10~12
IRKT	0.29 ± 0.19	0.70 ± 4.21	0.52 ± 0.92	5.16 ± 0.27	7~9	1.46 ± 0.31	4~6, 10~12
JOZE	-0.39 ± 0.14	0.07 ± 0.98	0.24 ± 0.58	2.92 ± 0.26	9~10	1.98 ± 0.22	4~6, 10~12
JPLM	-0.84 ± 0.15	-0.61 ± 1.93	-1.90 ± 0.91	2.19 ± 0.15	9~12	2.26 ± 0.19	4~6, 10~12
KELY	-2.37 ± 0.20	-3.45 ± 2.59	-2.67 ± 0.41	1.71 ± 0.26	9~12	2.14 ± 0.28	2~4, 7~8
KIRU	6.97 ± 0.13	6.42 ± 3.15	6.43 ± 0.35	4.45 ± 0.18	11~1	2.49 ± 0.18	2~4, 7~8
KIT3	-1.82 ± 0.15	-1.58 ± 2.21	-3.75 ± 1.10	0.35 ± 0.33	—	1.79 ± 0.27	4~6, 10~12
KOKB	-2.10 ± 0.11	-2.02 ± 5.29	-3.85 ± 1.31	1.80 ± 0.21	2~5	1.81 ± 0.19	—
KOSG	0.31 ± 0.05	-0.29 ± 0.44	-0.92 ± 0.18	0.88 ± 0.20	—	0.61 ± 0.19	—
KOUR	3.07 ± 0.14	3.23 ± 1.92	4.56 ± 2.63	2.18 ± 0.15	11~12	1.71 ± 0.31	2~3, 8~10
KWJ1	-2.99 ± 0.37	-2.70 ± 2.98	-3.13 ± 1.00	1.22 ± 0.35	1~3	1.38 ± 0.39	3, 8~9
LAMA	-2.23 ± 0.16	-1.88 ± 2.44	-1.38 ± 0.25	1.74 ± 0.19	8~11	0.29 ± 0.92	4~6, 10~12
LBCH	-6.37 ± 0.29	-7.55 ± 5.20	-9.48 ± 1.92	0.86 ± 0.42	—	3.35 ± 0.37	4~6, 11~12
LEEP	-2.03 ± 0.15	-2.00 ± 1.99	-2.46 ± 0.54	1.26 ± 0.21	9~12	2.64 ± 0.18	4~6, 10~12
LHAS	0.61 ± 0.19	1.86 ± 9.87	2.28 ± 2.27	3.15 ± 0.12	2~4	1.56 ± 0.20	3~5, 9~11
MAD2	-8.37 ± 0.41	-6.93 ± 123.25	-9.12 ± 2.58	1.77 ± 0.34	—	2.03 ± 0.50	4~6, 10~12
MADR	1.92 ± 0.12	0.62 ± 17.71	2.41 ± 0.37	2.48 ± 0.23	10~12	1.15 ± 0.30	4~6, 10~12
MAG0	0.70 ± 0.27	0.80 ± 5.11	1.10 ± 3.14	0.29 ± 0.67	—	1.48 ± 0.29	4~6, 10~12
MAS1	1.57 ± 0.10	1.94 ± 1.45	2.05 ± 0.61	2.49 ± 0.11	1~3	0.46 ± 0.56	—
MATE	-0.04 ± 0.07	-0.02 ± 0.71	-0.34 ± 0.36	1.10 ± 0.21	6~7	1.44 ± 0.17	4~6, 10~12
MDO1	0.65 ± 0.08	0.77 ± 0.83	1.09 ± 0.38	2.04 ± 0.24	10~11	0.87 ± 0.27	—
MDVO	-0.54 ± 0.20	-1.61 ± 5.71	-1.58 ± 0.40	3.65 ± 0.21	7~10	2.70 ± 0.35	4~6, 10~12
MEDI	-2.30 ± 0.18	-2.85 ± 2.47	-2.64 ± 0.32	1.87 ± 0.16	8~9	0.75 ± 0.40	4~6, 10~12
MKEA	0.95 ± 0.21	1.64 ± 3.42	0.89 ± 3.15	2.44 ± 0.24	1~3	3.11 ± 0.31	4, 10~12
MONP	1.03 ± 0.15	1.02 ± 1.93	-0.44 ± 0.71	2.28 ± 0.12	9~10	2.00 ± 0.21	4~6, 11~12
NALL	6.40 ± 0.09	7.17 ± 1.01	7.26 ± 0.26	1.85 ± 0.23	10~12	1.80 ± 0.14	2~3, 7~8
NANO	2.11 ± 0.34	1.59 ± 9.01	-0.13 ± 3.72	6.55 ± 0.06	10~11	1.90 ± 0.23	1~5, 10~11
NICO	4.10 ± 0.23	4.24 ± 2.00	3.63 ± 1.11	1.70 ± 0.32	7~9	0.91 ± 0.34	2~4, 7~9
NLIB	-2.61 ± 0.08	-2.96 ± 1.01	-2.80 ± 0.70	2.12 ± 0.14	8~12	2.44 ± 0.23	4~6, 10~12
NOTO	-2.14 ± 0.18	-1.59 ± 2.94	-2.30 ± 0.28	1.20 ± 0.30	—	0.60 ± 0.49	—
NRC1	2.38 ± 0.22	1.66 ± 4.27	2.59 ± 0.94	3.87 ± 0.27	7~9	2.32 ± 0.23	4~6, 10~12
NYA1	4.93 ± 0.41	7.36 ± 83.17	8.39 ± 3.74	2.29 ± 0.31	11	3.51 ± 0.33	2~3, 7~8

(续表 3)

台站	独立白噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	有色噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	ARMA 线性速度 估计/mm · a ⁻¹	周年项振幅 /mm	周年项 最大值月份	半年项 振幅/mm	半年项 最大值月份
OAT2	4.09 ± 0.15	5.14 ± 1.98	3.75 ± 0.70	2.61 ± 0.21	9~10	2.50 ± 0.25	4~6, 10~12
OBER	-0.09 ± 0.17	-0.10 ± 3.27	-0.33 ± 0.67	2.38 ± 0.16	8~10	1.04 ± 0.29	4~6, 10~12
ONSA	1.37 ± 0.07	2.37 ± 0.78	2.33 ± 0.22	1.15 ± 0.21	9~1	0.26 ± 0.75	4~6, 10~12
PENC	-2.51 ± 0.19	-3.04 ± 3.94	-3.14 ± 0.50	3.21 ± 0.27	8~9	0.46 ± 0.62	1~3, 7~10
PENT	-1.79 ± 0.07	-1.90 ± 2.58	-2.01 ± 0.22	3.38 ± 0.09	10~11	0.70 ± 0.30	4~6, 10~12
PIE1	2.68 ± 0.07	2.53 ± 0.67	2.30 ± 0.22	2.50 ± 0.21	9~10	0.69 ± 0.29	4~6, 10~12
PIN2	-7.45 ± 0.29	-2.13 ± 41.60	-4.18 ± 2.57	1.61 ± 0.27	6~8	0.78 ± 0.53	4~6, 10~12
PINY	1.03 ± 0.12	0.84 ± 1.07	0.69 ± 0.56	1.35 ± 0.21	9~11	1.84 ± 0.23	4~6, 10~12
PMHS	-3.88 ± 0.40	-0.16 ± 66.96	-3.38 ± 4.29	5.13 ± 0.12	2~3	3.20 ± 0.18	4~6, 10~12
POL2	1.04 ± 0.15	1.09 ± 1.76	0.95 ± 0.32	2.27 ± 0.14	7~9	0.68 ± 0.38	3~6, 10~12
POTS	0.87 ± 0.11	1.55 ± 1.67	1.37 ± 0.40	1.05 ± 0.24	10~11	0.80 ± 0.28	4~6, 10~12
PRDS	-1.32 ± 0.23	-1.76 ± 5.78	-1.66 ± 0.48	2.44 ± 0.16	9~11	1.19 ± 0.28	6~7, 11~1
PVEP	0.45 ± 0.19	1.07 ± 3.53	0.37 ± 0.40	2.80 ± 0.15	7~10	2.18 ± 0.19	4~6, 10~12
QUIN	-3.72 ± 0.12	-3.51 ± 18.55	-3.61 ± 0.24	3.24 ± 0.25	8~10	1.03 ± 0.26	4~6, 10~12
RAMO	4.99 ± 0.40	5.71 ± 56.22	5.19 ± 0.35	4.75 ± 0.12	6~7	0.58 ± 0.60	3, 10~11
REYK	-2.72 ± 0.15	-1.96 ± 15.43	-3.36 ± 1.30	4.08 ± 0.20	12~1	1.08 ± 0.29	5~7, 10~12
ROCH	6.67 ± 0.24	6.80 ± 26.52	7.22 ± 2.98	4.52 ± 0.13	9	1.81 ± 0.24	4~6, 10~12
ROCK	2.20 ± 0.16	2.10 ± 2.33	2.32 ± 0.79	3.03 ± 0.16	9~11	2.71 ± 0.28	4~6, 10~12
SCH2	12.28 ± 0.25	11.56 ± 4.76	11.62 ± 0.71	1.88 ± 0.20	—	3.71 ± 0.24	12~1, 6~7
SELE	-0.26 ± 0.24	-0.93 ± 3.79	-0.20 ± 0.54	3.43 ± 0.19	8	0.96 ± 0.33	3~6, 10~12
SHAO	0.88 ± 0.15	1.37 ± 2.18	1.50 ± 0.28	3.79 ± 0.15	6~7	2.34 ± 0.20	1~3, 8~11
SHK1	-4.83 ± 0.27	-4.32 ± 5.90	-2.43 ± 3.61	3.24 ± 0.35	5~6	1.91 ± 0.22	4~6, 10~12
SIO3	1.92 ± 0.17	1.65 ± 3.56	1.71 ± 0.16	0.65 ± 0.46	—	1.29 ± 0.30	5~7, 12~1
SN11	-1.98 ± 0.26	-2.98 ± 7.92	-0.61 ± 1.62	2.47 ± 0.18	6~9	3.15 ± 0.11	4~6, 11~12
SOL1	-3.19 ± 0.17	-2.46 ± 2.19	-2.13 ± 0.98	1.30 ± 0.29	7~8	1.02 ± 0.31	—
SPK1	0.30 ± 0.16	0.20 ± 1.94	-0.50 ± 1.17	1.99 ± 0.16	9~12	2.30 ± 0.24	4~6, 10~1
STJO	-0.44 ± 0.06	-0.25 ± 0.64	-1.82 ± 0.28	2.17 ± 0.20	6~7	2.19 ± 0.10	4~6, 10~12
SUWN	3.40 ± 0.33	3.25 ± 6.43	2.76 ± 2.12	3.30 ± 0.31	6~7	0.93 ± 0.37	4~6, 11~12
TABL	0.23 ± 0.17	-0.96 ± 22.94	-0.02 ± 2.08	2.52 ± 0.12	9~10	2.52 ± 0.24	5~6, 11~12
TAEJ	2.94 ± 0.35	4.30 ± 5.84	3.21 ± 0.83	2.42 ± 0.21	4~6	0.26 ± 0.43	—
TAIS	-5.44 ± 0.34	-3.55 ± 9.67	-4.03 ± 0.59	2.84 ± 0.37	—	1.69 ± 0.43	3, 7~9
THU1	2.86 ± 0.14	3.16 ± 2.28	2.32 ± 0.48	1.77 ± 0.23	12~2	0.47 ± 0.35	3~4, 8~10
TIBB	10.64 ± 0.49	0.33 ± 177.79	5.30 ± 2.49	5.17 ± 0.47	7~8	2.93 ± 0.50	—
TORP	0.72 ± 0.21	-0.19 ± 18.72	0.45 ± 2.81	2.97 ± 0.30	7~9	2.09 ± 0.26	4~6, 10~12
TRAK	-0.79 ± 0.13	-0.45 ± 1.78	-1.09 ± 0.36	2.40 ± 0.14	9~10	2.19 ± 0.24	4~6, 10~12
TRO1	2.75 ± 0.41	0.31 ± 10.72	2.31 ± 2.97	4.53 ± 0.41	10~11	3.04 ± 0.23	1~3, 7~8
TSKB	-0.87 ± 0.15	-6.47 ± 8.73	-0.028 ± 0.74	3.06 ± 0.21	2~3	0.87 ± 0.29	4~6, 12~1
UCLP	-0.14 ± 0.14	0.45 ± 1.56	0.73 ± 0.79	1.86 ± 0.15	8~11	2.65 ± 0.20	4~6, 10~12
UPAD	-0.57 ± 0.16	-1.66 ± 1.92	-0.77 ± 0.35	0.78 ± 0.28	10~12	0.80 ± 0.33	4~6, 10~12
USC1	-4.90 ± 0.15	-3.86 ± 6.42	-4.79 ± 1.28	1.50 ± 0.20	8~11	1.76 ± 0.22	4~6, 10~12
USNA	1.22 ± 0.15	0.80 ± 1.38	1.25 ± 0.59	1.74 ± 0.27	—	0.54 ± 0.48	—
USNO	-3.56 ± 0.20	-3.28 ± 2.00	-3.26 ± 1.80	2.77 ± 0.12	7~9	1.38 ± 0.30	4~7, 12~1
USUD	0.96 ± 0.12	-0.05 ± 2.47	-0.49 ± 0.34	2.66 ± 0.26	6~7	0.59 ± 0.49	4~6, 11~1
VILL	-1.42 ± 0.11	-1.49 ± 0.77	0.39 ± 0.67	1.55 ± 0.19	3~4	0.34 ± 0.51	—
VNDP	-0.65 ± 0.17	-0.64 ± 2.73	0.56 ± 0.24	2.20 ± 0.16	9~11	2.03 ± 0.29	5~6, 12~1
VYAS	-1.80 ± 0.34	-1.91 ± 5.68	-0.13 ± 0.55	2.36 ± 0.19	8~9	2.66 ± 0.30	5~6, 12~1
WEST	-0.92 ± 0.09	-1.14 ± 0.91	-1.10 ± 1.10	2.46 ± 0.22	9~10	0.98 ± 0.24	3~6, 10~12
WETB	-2.59 ± 0.21	-1.41 ± 2.53	-1.26 ± 0.36	1.01 ± 0.28	—	0.49 ± 0.57	—

(续表 3)

台站	独立白噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	有色噪声 线性速度估计 /mm · a ⁻¹	ARMA 线性速度 估计/mm · a ⁻¹	周年项振幅 /mm	周年项 最大值月份	半年项 振幅/mm	半年项 最大值月份
WHC1	-4.58 ± 0.14	-4.49 ± 1.71	-2.53 ± 1.48	1.71 ± 0.16	9~10	1.80 ± 0.21	4~6, 10~12
WHIT	-0.86 ± 0.18	-1.79 ± 3.78	-1.62 ± 2.18	3.66 ± 0.29	8~10	0.50 ± 0.32	3~5, 7~10
WIDC	14.02 ± 0.36	12.65 ± 4.98	11.10 ± 0.59	1.92 ± 0.21	9~11	3.08 ± 0.20	4~6, 10~12
WILL	1.00 ± 0.29	0.31 ± 5.80	-2.48 ± 0.96	4.93 ± 0.08	10~11	0.85 ± 0.35	4~6, 10~12
WLSN	0.35 ± 0.16	1.13 ± 2.53	-1.73 ± 1.54	2.11 ± 0.14	3~4	3.74 ± 0.30	4~6, 10~12
WSLR	-7.79 ± 0.54	1.95 ± 292.09	5.53 ± 3.96	13.64 ± 0.09	5~6	0.24 ± 0.47	2~4, 7~9
WSRT	1.53 ± 0.21	1.83 ± 3.78	2.53 ± 0.70	0.69 ± 0.35	—	1.88 ± 0.19	4~6, 10~12
WTZR	0.60 ± 0.14	0.40 ± 1.23	0.69 ± 0.32	1.86 ± 0.17	10~12	0.99 ± 0.27	4~6, 10~12
WUHN	-2.20 ± 0.21	-1.01 ± 2.41	-1.35 ± 1.42	3.85 ± 0.22	4~5	0.47 ± 0.46	1~4, 8~10
YAKZ	1.47 ± 0.35	0.91 ± 8.94	0.77 ± 0.19	3.46 ± 0.26	6~7	3.11 ± 0.29	2~4, 7~9
YELL	8.28 ± 0.06	7.44 ± 0.98	8.05 ± 3.16	0.67 ± 0.31	9~11	0.37 ± 0.58	1~4, 6~8
ZECK	4.31 ± 0.31	4.98 ± 5.26	4.49 ± 0.35	4.80 ± 0.15	8~10	1.55 ± 0.30	4~6, 10~12
ZIMM	0.14 ± 0.13	-0.06 ± 1.54	0.43 ± 1.54	1.65 ± 0.25	11~2	0.65 ± 0.29	4~6, 10~12
ZWEN	-1.64 ± 0.18	-2.30 ± 4.83	-1.91 ± 0.24	2.62 ± 0.15	7~11	0.70 ± 0.37	4~6, 10~12
南半球							
AREQ	0.48 ± 0.13	0.24 ± 1.95	0.50 ± 0.37	3.36 ± 0.11	10~12	0.43 ± 0.69	4, 11
ASC1	-1.05 ± 0.30	-0.82 ± 6.55	-0.88 ± 0.84	2.71 ± 0.16	12~2	2.37 ± 0.37	3, 9
AUCK	3.16 ± 0.15	3.38 ± 2.28	4.64 ± 1.42	2.64 ± 0.24	12~1	0.35 ± 0.78	3, 9
CANB	0.29 ± 0.12	1.12 ± 16.80	2.77 ± 2.44	4.20 ± 0.29	12~1	1.15 ± 0.29	2~3, 9~11
CAS1	3.77 ± 0.15	4.24 ± 3.20	3.99 ± 1.29	2.32 ± 0.28	3~5	1.44 ± 0.26	3, 9
CHAT	2.57 ± 0.16	2.24 ± 3.14	0.29 ± 3.29	3.51 ± 0.27	11~12	1.33 ± 0.31	6, 11~2
COCO	-0.52 ± 0.27	-0.14 ± 4.47	-1.66 ± 3.81	0.91 ± 0.37	—	2.22 ± 0.23	4, 11
DAV1	2.13 ± 0.16	2.58 ± 1.88	2.21 ± 0.20	0.66 ± 0.43	—	1.27 ± 0.29	3, 9
DGAR	3.30 ± 0.30	2.75 ± 3.14	2.38 ± 1.46	2.96 ± 0.40	1~2	2.42 ± 0.18	3, 9
EISL	0.98 ± 0.19	-0.05 ± 2.92	0.75 ± 2.16	3.24 ± 0.25	11~2	1.31 ± 0.37	5~7, 12~1
FORT	-1.10 ± 0.17	0.85 ± 17.57	0.85 ± 2.58	2.30 ± 0.34	12~2	0.62 ± 0.38	3, 9
GALA	-0.54 ± 0.25	0.20 ± 2.87	-0.49 ± 0.25	0.75 ± 0.49	12~1	1.01 ± 0.37	3, 9
HART	1.16 ± 0.42	2.24 ± 16.64	2.27 ± 2.17	1.65 ± 0.42	—	1.34 ± 0.35	4, 10
HOB2	1.59 ± 0.14	3.20 ± 12.46	2.80 ± 0.95	3.61 ± 0.24	1~2	0.51 ± 0.49	5, 11
HRAO	1.96 ± 0.31	2.35 ± 4.08	4.22 ± 2.46	3.35 ± 0.13	12~2	2.40 ± 0.32	3, 9
KERG	2.40 ± 0.15	2.19 ± 2.26	2.29 ± 0.19	1.31 ± 0.28	9~12	2.06 ± 0.27	3, 9
LPGS	4.72 ± 0.27	4.72 ± 4.99	2.85 ± 2.63	2.92 ± 0.14	12	0.19 ± 1.08	1~3, 8~9
MAC1	0.95 ± 0.12	1.08 ± 1.18	0.89 ± 0.87	1.92 ± 0.25	11~2	0.67 ± 0.28	—
MALI	-0.26 ± 0.36	0.15 ± 9.73	2.08 ± 6.32	1.52 ± 0.31	—	2.30 ± 0.44	6, 12
MCM4	1.87 ± 0.22	3.59 ± 10.91	2.63 ± 1.36	2.28 ± 0.19	3	1.85 ± 0.31	4, 7~9
NOUM	0.64 ± 0.46	2.06 ± 23.16	5.58 ± 8.33	2.78 ± 0.41	12~3	1.30 ± 0.45	3, 9
PAMA	2.59 ± 0.51	2.67 ± 12.28	1.10 ± 2.17	1.00 ± 0.44	—	1.02 ± 0.43	4, 11
PERT	-2.20 ± 0.14	-2.43 ± 1.78	-4.30 ± 1.38	3.81 ± 0.30	11~1	0.11 ± 0.36	3, 9~10
SANT	4.31 ± 0.12	4.24 ± 2.31	3.92 ± 0.98	1.83 ± 0.18	12~1	1.69 ± 0.29	3, 9
SUTH	-0.10 ± 0.46	-0.71 ± 114.22	-0.08 ± 3.90	3.81 ± 0.20	2	3.60 ± 0.13	3, 9
TID2	-0.34 ± 0.19	0.70 ± 36.40	-1.10 ± 2.79	5.41 ± 0.26	12~2	0.25 ± 0.85	2~3, 10~11
YAR1	0.79 ± 0.11	0.21 ± 1.36	-0.53 ± 1.72	4.07 ± 0.07	12~2	0.83 ± 0.32	3, 9

a) —表示该项不明显

对 GPS 连续观测站要求在数年里均匀采样是不现实的. 利用周期图进行谱分析时数据采样可以非均匀, 但计算时间较长. 利用 FFT 进行谱分析时要求均匀采样, 在 GPS 高程时间序列中存在不均匀采样, 应用 FFT 谱分析和小波分析时就需要进行插值, 以获得均匀采样的时间序列. 插值的原则为: (1) 如时间序列间断时间小于 15 天, 则用间断前后的 5 天数据进行线性内插, 并加 GAUSS 分布为 $N(0, 10 \text{ mm})$ 的随机噪声; (2) 如时间序列间断长于 15 天, 则在断点处直接加 GAUSS 分布为 $N(0, 10 \text{ mm})$ 的随机噪声.

到此我们获得了经上述预处理的时间序列.

1.2 谱分析

地球物理现象功率谱函数为 $1/f^\alpha$ 形式^[5], GPS 高程时间序列也不例外. GPS 高程时间序列噪声含有高斯白噪声和有色噪声, 其功率谱为两部分之和:

$$P(f) = P_0(f^{-\alpha} + f_0^{-\alpha}), \tag{2}$$

式中 f_0 是有色噪声分量和高斯白噪声分量的交叉频率; P_0, f_0 和 α 是待求参数.

通过比较, 在我们的时间序列中, 周期图与 FFT 功率谱没有明显差异, 所以我们采用 FFT 方法获得时间序列的功率谱. 台站时间序列谱分析结果见表 3.

如果时间序列的噪声以有色噪声为主, 则(2)式可简化为

$$P(f) = P_0 f^{-\alpha}. \tag{3}$$

利用(3)式的谱分析结果同时列于表 3.

从表 3 看出, (2)式估计值有 57 个时间序列不收敛, 而(3)式估计值全部收敛. 可见, 所研究的时间序列以有色噪声为主, 178 个台站的 α 值在 1.49~2.49 之间. 因此, GPS 高程分量的时间序列存在“分形布朗运动”^[6]. 图 1 是上海站的功率谱图.

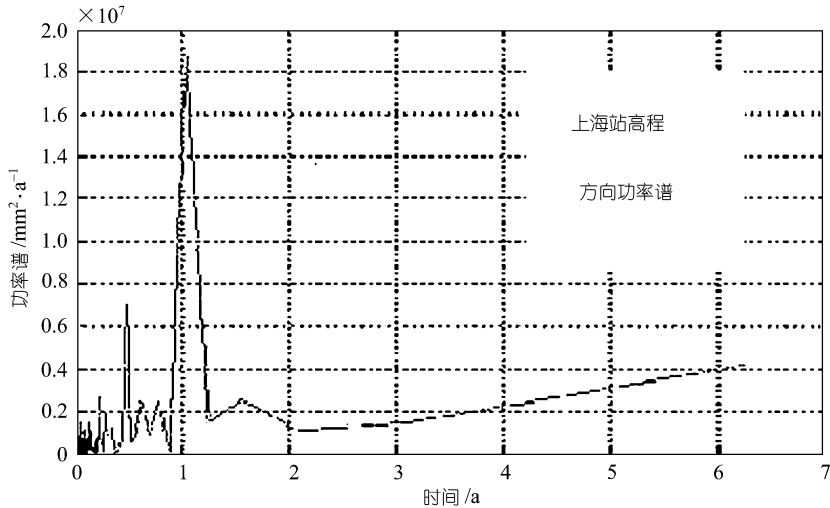


图 1 上海站功率谱图

通过 FFT 分析可知, GPS 高程分量的时间序列存在周年和半周年的周期运动项. 但周期图功率谱或 FFT 分析只能在频域讨论问题, 两种方法不能同时在时频域分析问题, 只有通过小波分析才能同时获得时频信息.

1.3 有色噪声的最大似然估计

从谱分析的结果可知, GPS 高程时间序列存在有色噪声. 我们采用以下模型估计有色噪声分量^[5]:

$$Q = \sigma_w^2 I + \sigma_f^2 R_f + \sigma_{rw}^2 R_{rw}, \tag{4}$$

式中 Q 是时间序列 S 的协方差矩阵; σ_w^2 , σ_f^2 和 σ_{rw}^2 分别是时间序列的白噪声分量、 $\alpha = -1$ 的 Flick 噪声分量和 $\alpha = -2$ 的随机漫步噪声分量; I 是单位矩阵; R_f 和 R_{rw} 分别是单位 Flick 噪声和随机漫步噪声协方差矩阵:

$$R_{rw} = \begin{bmatrix} \Delta t_1 & \Delta t_1 & \cdots & \Delta t_1 \\ \Delta t_1 & \Delta t_2 & \cdots & \Delta t_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta t_1 & \Delta t_2 & \cdots & \Delta t_n \end{bmatrix}, \quad R_{f:ij} = \begin{cases} \left(\frac{3}{4}\right)^2 \times 2 & t_i = t_j, \\ \left(\frac{3}{4}\right)^2 \times \left(2 - \frac{\log|t_i - t_j| / \log 2 + 2}{12}\right) & t_i \neq t_j, \end{cases} \tag{5}$$

式中 $\Delta t_i = t_i - t_0$, t_0 是随机漫步初始时间, 一般假设为零.

由 Q 协方差矩阵, 我们构造以下最大似然函数:

$$\ln L(X, \sigma_w, \sigma_{rw}, \sigma_f) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln|Q| - \frac{1}{2} S^T Q^{-1} S. \tag{6}$$

在 $\ln(L)$ 取最大值的条件下, 对每一台站的时间序列求出 σ_w , σ_f 和 σ_{rw} . 利用(6)式求解时, 有 46 个台站可同时得到 σ_w , σ_f 和 σ_{rw} , 其余台站求出的 σ_{rw} 为零. 出现这种情况不是因为缺少 σ_{rw} , 而是 σ_f 占主要地位, 掩盖了 σ_{rw} . 这时我们可以进行组合求解, 分别假设时间序列只含 $\sigma_w + \sigma_f$ 和 $\sigma_w + \sigma_{rw}$, 求出 σ_w , σ_f 和 σ_{rw} , 取最大似然函数较小的解代表台站的有色噪声. 计算表明, $\sigma_w + \sigma_f$ 组合的最大似然值比 $\sigma_w + \sigma_{rw}$ 组合的最大似然值要小, 验证了三个分量同时求解的正确性.

通过对时间序列噪声分析可以看出, GPS 台站坐标受有色噪声的污染, 有色噪声分量比白噪声分量要大.

1.4 时间序列的小波分析和 AR 模型建模

谱分析方法可以分析有色噪声的特性, 发现时间序列的周期性趋势项. 但是, 台站坐标的时间序列受多种地球物理现象的共同影响, 有随机变化的因数, 部分时间段里可能有奇异变化, 谱分析方法不能识别这段奇异区间, 小波分析可以弥补谱分析的不足.

对 $L^2(\mathcal{R})$ 空间的规范正交基 $\{\varphi_{k, n}\}$, 信号 S 可分解为小波级数:

$$S(t) = \sum_{k, l=-\infty}^{+\infty} c_{k, l} \varphi_{k, l}(t), \tag{7}$$

$$\varphi_{k, l} = 2^{-k/2} \varphi(2^{-k} t - l), \quad k, l \in \mathbb{Z}. \tag{8}$$

上述 $\varphi_{k, l}$ 为二进小波, 二进小波对信号的分解具有数学显微镜的作用.

根据 Mallat 的思想, 在多分辨分析的意义下, 信号 S 可分解为

$$S = S_N + \sum_{k=1}^N D_k, \tag{9}$$

式中 S_N 是分辨率为 2^{-N} 的 S 低频部分, D_k 是分辨率为 2^{-k} ($1 \leq k \leq N$) 的 S 高频部分. 小波多分辨分析可对时间序列的周年项和半年项分解, 它相当于一个周年数学滤波器和半年数学滤波器. 我们采用 Coiflets 小波滤波器对 178 个台站的时间序列进行分析. 图 2 是其中的上海站

的分析结果.

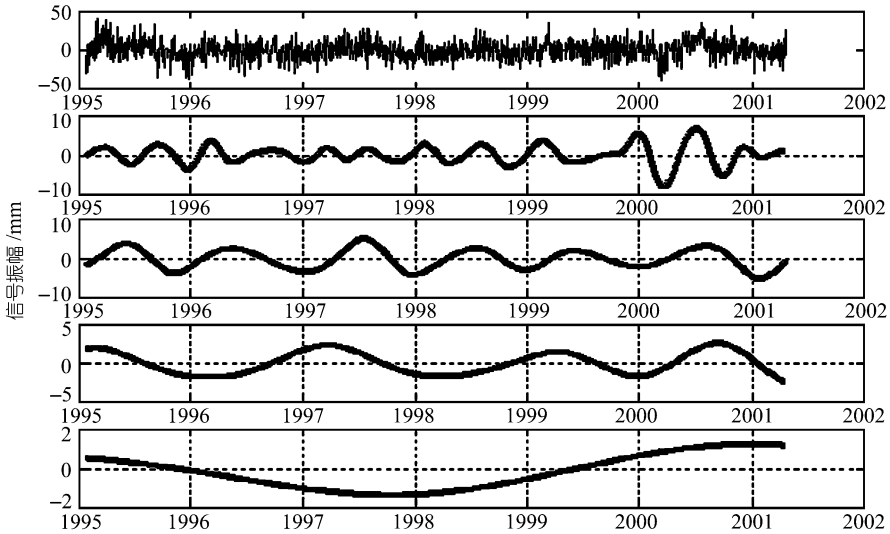


图 2 上海站多分辨分析图

图 2 中第一行是原始信号, 第二行是半周年信号, 第三行是周年信号, 第四行是两周年信号, 最后一行是长期项信号.

从图 1 知道, 上海站时间序列有明显的周年运动和半周年运动. 图 2 的小波分析结果给我们进一步的信息. 小波分析同样提供了半周年和周年项的信息, 给出在 1996 年中期到 1997 年中期、1999 年后半年半周年项的异常, 显示周年项在 1998 年中期到 2000 年初周年振幅变小, 提示存在振幅为 2~3 mm 的准两周年运动以及 1998 年初上海站达到高程最低点.

小波分析结果表明, 台站高程的季节变化呈现周期性, 绝大部分台站存在半周年、周年和两周年的变化. 以多分辨分析分离的周年项和半周年项信号为基础, 利用三角函数进行拟合, 信号的协方差采用 AR 模型导出值. 拟合结果列于表 3.

在 AR 模型建模过程中, 要求时间序列是一个平稳信号. 本文利用三角函数拟合周期性趋势项消除周期性非平稳性, 在拟合过程中采用逐步回归方法. 拟合结果见表 3.

ARMA 系列模型是研究时间序列的有效手段, ARMA 模型从系统识别的角度研究只知系统输出时的系统特性. ARMA 系列有 AR, MA 和 ARMA 模型之分. 在高程时间序列中主要采用 AR 模型和 ARMA 模型建模. ARMA 模型为

$$A(q)S(t) = C(q) \cdot e(t), \tag{10}$$

式中 A 和 C 是系数矩阵, S 是时间序列, e 是白噪声. 如果 C 为单位阵, 则上述 ARMA 模型演变为 AR 模型:

$$S(t) = a_{t-1}S(t-1) + a_{t-2}S(t-2) + \dots + a_{t-n}S(t-n) + e(t). \tag{11}$$

本文采用 FPE 最小的标准对全球 178 个 GPS 站建模, 模型阶数见表 3. 图 3 和 4 给出上海站 ARMA 模型建模的功率谱和 ARMA 模型的零极点图.

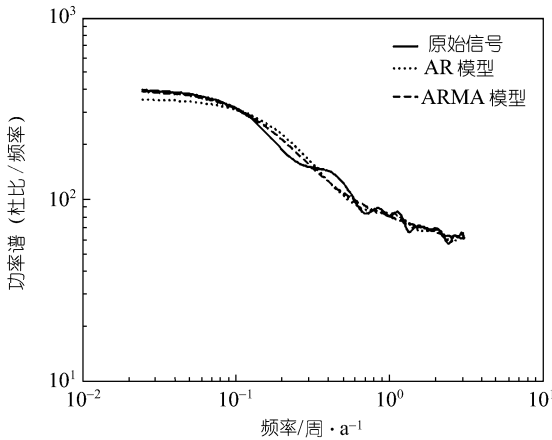


图 3 上海站 ARMA 模型功率谱

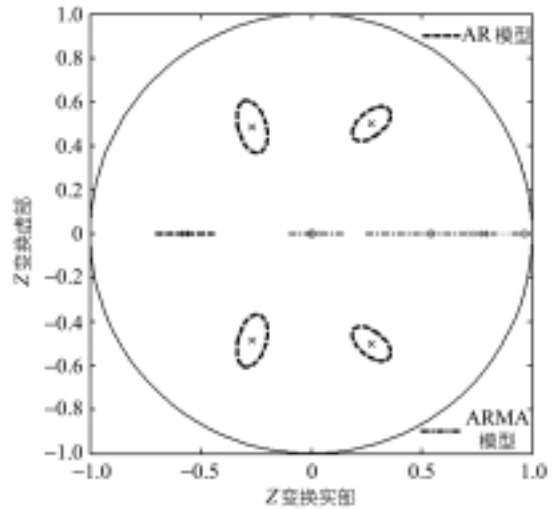


图 4 上海站 ARMA 模型零极点

从图 3 和 4 可以看出, ARMA 和 AR 模型对 GPS 高程时间序列有较好的反映. ARMA 模型是非线性模型, AR 模型是线性模型, AR 模型相对于 ARMA 模型较为简单. 因此, 我们采用 AR 模型.

1.5 讨论

1.5.1 时间序列噪声特性 通过谱分析和最大似然估计得出, GPS 高程时间序列噪声以有色噪声为主. 在 178 个台站中, 白噪声分量平均为 7.57 mm, $\sigma_w + \sigma_f$ 组合的最大似然值比 $\sigma_w + \sigma_{rw}$ 组合的最大似然值都小, 平均小 21.90. 在有色噪声成分中, 大部分台站以 FLICK 噪声为主, FLICK 噪声平均为 11.40 mm. 因此, 在参数估计时必须顾及有色噪声的影响(如时间序列的线性速度等), 顾及有色噪声影响的速度估计列于表 3.

通过 ARMA 模型建模分析, 有色噪声的相关长度在 2~31 天之间(对应于 AR 模型的阶数). AR 模型阶数越长, 表明该台站与点位有关的运动(如台站观测墩子的布朗运动和地壳断裂运动)越明显. AR 模型的建立为分离地球物理因数和点位因数的影响提供有效工具, AR 模型的每一阶数对应于时间序列连续模型的一项运动因数. AR 阶数越多, 表明影响该时间序列的因数越复杂. 如何从时间序列 AR 模型建立时间序列代表的运动方式还需要进一步研究.

1.5.2 参数估计的协方差分量 一般情况下, 人们总假设时间序列各个采样只有白噪声存在, 每一采样点服从正态分布. 在研究地球物理量时, 通常这一前提不能很好地得到满足. 在求定时间序列线性速度时, 我们列出三种情况: 只有白噪声、有色噪声和 AR 模型噪声. 我们清楚地看到, 假设只有白噪声时, 速度估计量的方差(平均为 0.21 mm)明显小于存在有色噪声估计速度的方差(平均为 12.01 mm). 这表明, 在不考虑有色噪声时, 所获得估计量的方差不能反映实际精度.

另一方面, 在考虑有色噪声的影响时, 由于不清楚有色噪声的相关长度, 在考虑诸如布朗运动时总假设白噪声的积分从零时刻开始. 通过 AR 模型建模表明, 这一假设扩大了有色噪声的影响, 使估计量的方差偏大. 在我们的数据分析中, 有 4 个台站的线性速度方差大于 100 mm,

有 13 个台站的线性速度方差在 20~90 mm 之间. 时间序列的 AR 模型在给出系统特性的同时, 也给出了时间序列的相关长度, 也就是有色噪声的影响区间, 使我们可以获得估计量的真实方差(最大值为 8.33 mm, 大于 3 mm 的台站有 16 个, 平均为 1.23 mm). 因此, 在对 GPS 时间序列进行参数估计时, 应考虑有色噪声分量; 有色噪声的相关长度应以统计分析为依据, 时间序列的 AR 建模是有色噪声估计相关长度的有效方法.

2 全球 GPS 高程线性变化和周期性变化的监测结果与分析

根据上述, 我们利用不同的数学方法对筛选的 178 个 IGS 基准站高程时间序列建模. 表 3 列出了这些台站高程线性变化和周期性变化的监测结果. 如上所述, 三个高程线性速度估计中, AR 估计的结果应是最佳的. 从表 3 列出的结果中, 我们不难发现全球高程变化的一些新特征.

2.1 台站高程方向线性速度的不确定性

高程方向的变化特性不同于水平方向, 水平方向运动主要由板块运动引起, 其线性速度年变率远大于其他因数引起周年运动的振幅. 因此, 线性速度运动是水平运动的主要特征, 这种年变率达几厘米/年的线性速度较易用 GPS 的定期复测获得^[6,7], 而高程方向线性速度的监测要困难得多. 其原因一是 GPS 等空间技术高程方向测量精度要比水平方向低 2~3 倍; 二是台站高程方向的运动由诸多地球物理因数引起, 以季节性变化为主. 年变率较小(mm/a)的线性速度运动与诸多振幅较大的周期运动交叉在一起, 只有通过较长时间的连续观测和精细频谱分析才能得到可靠的高程运动监测结果. 本文所选的 178 个全球 GPS 台站满足了这个条件. 从表 3 看出, 70%的台站高程方向线性速度仅为 1~2 mm/a, 小于周年和半年运动的振幅, 运动量的大小与它的方差为同一量级. 通过检验, 有 89 个台站高程方向线性速度可以认为是零. 所有台站的时间序列存在两年以上的长期变化项. 对 5~10 年的时间段, 高程方向的线性速度与所研究的时间段有关. 如上海站, 其时间序列是 1995~2001 年, 对于 1995~1998 年, 高程的线性速度为-1.47 mm/a, 但对 1995~2001 年的时间段, 高程的线性速度为+1.50 mm/a. 从上海站的多分辨分析图可以看出, 在 1997 年底到 1998 年初长期项到达最低点. 因此, 高程方向线性速度与台站时间序列的长期项有密切关系, 其值在短时间的观测不能很好地确定, 研究其变化规律需要更长时间的连续观测.

2.2 全球性高程方向的整体振荡运动

表 3 列出 178 个台站高程方向季节性周期运动的结果. 我们发现, 全球高程方向的周期运动呈现整体性的振荡运动, 特别是半年项, 其中 90%的台站高程半年周期的最大值出现在 4~6 和 10~12 月份, 平均振幅为 1.60 mm, 而且南北半球并无显著差别. 由于高程方向这种整体性的涨落对应于地球的膨胀和收缩, 因此可以认为地球存在半年周期的膨胀和收缩振荡. 这种现象也出现在周年项中, 全球有 70%的台站周年运动的最大值出现在 10 月份前后, 平均振幅为 2.58 mm, 似乎地球也存在一种整体的周年振荡运动. 但这种周年振荡运动没有半年振荡那样明显, 其原因是诸多地球物理因数如海潮、大气潮、非潮汐海洋负载变化和地下水变化等都会在台站高程方向产生振幅达毫米级的周年运动, 这些因数对不同的台站产生不同的影响, 会有不同的振幅和相位, 多种不同振幅和相位的周年运动迭加在一起, 使可能存在的地球整体周年振荡不像半年振荡那样明显地显示出来. 地球呈现这种整体振荡的物理机理尚待进

一步研究.

2.3 南北半球高程变化的差异

就我们讨论的时间段内,南北半球的变化特征存在差异.对线性速度项,南半球 27 个台站有 20 个台站的值为正(升高),存在一定的系统性膨胀,27 个台站线性速度平均为 1.37 mm/a,为地球南北半球膨胀和收缩理论提供了一定的依据^[8].但由于南半球仅有 27 个台站,从统计的概念尚欠不足,此结论尚待进一步探求;北半球 151 个台站有 66 个台站的值为正,85 个台站的值为负,平均为 0.06 mm/a,没有明显的系统性.

对半年周期变化项,南半球最大值平均出现在 3 月和 9 月,平均振幅为 1.33 mm;北半球最大值平均出现在 4 月和 10 月,平均振幅为 1.65 mm.

对周年周期变化项,南半球最大值平均出现在 12 月,平均振幅为 2.62 mm;北半球最大值平均出现在 10 月,平均振幅为 2.57 mm.

从上述分析得到,在 1995~2000 年的时间里,南半球相对于北半球在扩张,扩张速度为 1.40 mm/a;对季节性变化,南半球与北半球在初相位上有差异,半年项南半球初相位比北半球提前 1 个月,周年项南半球初相位比北半球推迟 2 个月.

小波分析还表明,地壳的高程方向存在准两周年的周期运动,这一周期与大气的准两周年南北半球环流变化相吻合.

参 考 文 献

- 1 IGS Central Bureau. IGS 1999 Directory. Jet Propulsion Lab, USA, 1999
- 2 Langbein J, Hadley J. Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *J Geophys Res*, 1997, 102(B1): 591~603
- 3 Zhang J, Bock Y, Johnson H, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: error analysis of daily position estimates and site velocities. *J Geophys Res*, 1997, 102: 18035~18055
- 4 Mao Ailin, Christopher G, Harrison A, et al. Noise in GPS coordinate time series. *J Geophys Res*, 1999, 104: 2797~2816
- 5 Agnew D C. The time-domain behavior of power-law noises. *Geophys Res Lett*, 1992, 19(4): 333~336
- 6 Zhu Wenyao, Wang Xiaoya, Cheng Zongyi, et al. Crustal motion of Chinese mainland monitoring by GPS. *Science in China, Ser D*, 2000, 43(4): 394~400
- 7 Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymueller J T, et al. Present-time crustal deformation in China constrained by GPS measurement. *Science*, 2001, 294: 574~577
- 8 马宗晋, 宋晓东, 杜品仁, 等. 地球南北半球的非对称性. *地球物理学报*, 2002, 45(1): 26~32