

LUO Feixue, DAI Wujiao, TANG Chengpan, et al. EMD-ICA with Reference Signal Method and Its Application in GPS Multipath[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 366-371. (罗飞雪, 戴吾蛟, 唐成盼, 等. 参考经验模态分解-独立分量分析及其在 GPS 多路径误差处理中的应用[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 366-371.)

参考经验模态分解-独立分量分析及其在 GPS 多路径误差处理中的应用

罗飞雪^{1,2}, 戴吾蛟^{1,2}, 唐成盼^{1,2}, 黄大伟^{1,2}, 伍锡锈^{1,2}

1. 中南大学 测绘与国土信息工程系, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南省精密工程测量与形变灾害监测重点实验室, 湖南 长沙 410083

EMD-ICA with Reference Signal Method and Its Application in GPS Multipath

LUO Feixue^{1,2}, DAI Wujiao^{1,2}, TANG Chengpan^{1,2}, HUANG Dawei^{1,2}, WU Xixiu^{1,2}

1. Department of Surveying Engineering & Geo-Informatics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Precise Engineering Surveying and Deformation Disaster Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China

Abstract: Multipath error is a main influence on high-precision GPS dynamic deformation monitoring results as it is difficult to be mitigated by difference observation in most of applications. A method called EMD-ICA with reference signal is proposed. It combines empirical mode decomposition(EMD) with independent component analysis(ICA). The test shows the effectiveness of this method.

Key words: independent component analysis(ICA); empirical mode decomposition(EMD); GPS; multipath effect; dynamic monitoring

摘 要: 多路径误差在绝大部分应用中, 其测站间相关性很弱, 不能通过差分观测得到有效削弱, 成为高精度 GPS 动态变形监测中的主要误差源。针对 GPS 多路径误差的特点, 结合具有良好多尺度分解能力的经验模式分解方法(EMD)和具有良好盲分离能力的独立分量分析(ICA)方法, 提出带参考信号的 EMD-ICA 方法来削弱多路径效应的影响。应用实例的结果证明了该方法的有效性。

关键词: 独立分量分析; 经验模态分解; GPS; 多路径效应; 动态变形监测

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0366-06

基金项目: 国家自然科学基金(41074004); 湖南省高校创新平台开放基金(10K077)

1 引 言

在绝大部分应用中, 由于不同测站周围的环境差异较大, 多路径误差的测站间相关性很弱, 与电离层、对流层等误差相比, 它不能通过差分观测得到有效削弱, 从而成为高精度 GPS 测量的主要误差源。目前处理多路径效应误差的方法可以分为 3 类: 天线设计、接收机信号处理以及数据后处理^[1]。在动态变形监测中, 常采用数据后处理的方法, 其中又主要包括多路径重复性改正模型和频域滤波两类方法。多路径重复性改正模型法是利用 GPS 天线的位置及其周围环境基本不变或变化很小时, 多路径效应误差具有较强的周日重复性的特点, 在监测点不动时进行静态观测提取多路径误差模型(即认为测量得到的原始位移序列中仅含有多路径误差和噪声)^[2-3]。然而, 由于实际的卫星轨道重复周期比通常认为的恒星时轨道重复周期(236 s)超前, 并且不同的卫星重复周

期不一样, 约为 238~252 s, 平均约为 246 s^[4-6], 使得随着时间的推移, 多路径效应的重复性会逐渐降低^[7], 需经常性重建多路径误差改正模型, 但在实际应用中却很难重建。如桥梁监测中, 当开通运营后, 就很难通过静态观测重新建立多路径误差改正模型。频域滤波法是根据多路径效应误差主要部分表现为低频, 而振动位移信号为相对高频的假设, 通过小波等数字滤波方法直接提取振动位移信号^[8-9]。但实际上, 多路径误差占据的频率范围比较宽, 容易与振动位移的低频信号的频率混叠^[8], 因此频域滤波法会丢失表现为低频的结构物在风载等外力作用下的似静态位移信息。

独立分量分析(independent component analysis, ICA)是一种可以在对先验信息了解很少情况下, 假设源信号各分量互相独立, 仅利用观测信号就能恢复源信号的现代信号处理方法^[10], 同时对于信号分量存在频率混叠的情况, 利用

ICA方法也能有效地进行分离,恢复出原始信号的波形^[11]。从ICA的原理可知,ICA可以解决频域滤波方法同频不可分离的缺陷,但ICA本身则具有不能分离单通道信号源数据及幅值不确定性的缺点。为此,本文针对GPS动态变形监测中多路径效应误差的特点,对ICA方法进行了扩展,提出利用带参考信号的经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)ICA方法来削弱多路径效应的影响,并通过GPS实际观测数据对该方法进行了验证。

2 参考EMD-ICA方法

2.1 独立分量分析

假设 M 维信号 $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_M]^T$ 是由 N 维源信号 $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_N]$ 经过混合矩阵 A 线性混合而成,即 $X = AS$ 。

独立分量分析假设:① $M \geq N$; ② 源信号 S 之间相互独立,而不含任何关于混合矩阵和源信号的先验信息。按照某种优化准则和学习方法求解混矩阵 B ,使得 $Y = BX$,从而在观测信号 X 中恢复出独立成分 $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]$,其中 Y 是 S 的近似。

一般的ICA算法求解混矩阵 B 的过程可以分成两步:① 将观测信号 X 白化,即求取白化矩阵 W ,使得 $Z = WX$ 满足 $E(ZZ^T) = I$ (I 为单位矩阵);② 求取旋转矩阵 U ,使得 $Y = UZ$,满足特定的优化法则,成为源信号的最优近似。

从ICA的基本原理可以看出:① ICA需要处理的输入信号必须是多个,且大于或等于其输出信号的个数;② ICA分解出的独立分量具有幅值的不确定性和排序的不确定性。而GPS动态变形监测应用中,只有一个位移输入信号,输出则至少有多路径和振动位移两个信号,且输出信号的幅值,即位移大小却非常重要。因此,利用ICA处理GPS变形监测数据还需要解决单通道信号分离与幅值恢复两个问题。

2.2 基于EMD的单通道ICA

在实际工程应用中,通常只有一个传感器接收源观测数据,且接收到的源信号中包含多个信号分量,因此需要对现有的ICA方法进行扩展,使之能够处理单通道信号源的数据,即单通道ICA。通过多尺度分解的方式解决单通道ICA是一种有效的方法。如利用小波变换,经验模式分解(EMD)等方法,将单通道信号分解成虚拟的多

通道信号。EMD是由文献[12]提出的一种新的信号处理方法。它认为任何复杂的单通道信号 $X(t)$ 由一些互不相同的、简单的、非正弦的分量信号组成。EMD将复杂的信号分解成从高频到低频排列的IMF分量,并提取出该复杂信号的趋势项。EMD能很好地处理非线性、非平稳信号,且具有仅依据处理数据本身进行分解,无需先验信息的特点。将EMD和ICA结合起来可较好的解决单通道信号分离的问题。文献[11, 13]的试验结果表明EMD-ICA方法不仅能分离含重叠谱的信号,而且能将信号的形状很好的重构出来。

2.3 参考ICA

由ICA的数学模型可知,ICA存在着其内在的不确定性:分离信号排序不确定性和幅值不确定性。目前有通过相关性来消除排序不确定性以及利用频谱相似测度来恢复幅值的方法^[13],但该方法在实际应用中效果不明显。文献[14]表明,如果感兴趣的信号分量存在一个这样的参考信号,此参考信号与混合信号中的某一信号有较强的相关性,而与其他信号相关性较弱时,可以利用该参考信号,结合快速ICA方法就能将信号分离出来,并且分离出来的第一个信号分量就是我们所需要的那个信号分量。这种方法叫做参考独立分量分析(ICA-R)或增强独立分量分析(cICA)。它是尽可能地利用源信号的先验信息,将它以参考信号的形式引入到快速ICA方法中,从而只提取与参考信号最为接近的期望源信号。它解决了分离信号排序不确定性问题,提高了运算效率和分离性能,在语音分离、核磁共振成像信号分析、图像分离等领域取得了很好的应用成果^[15]。

ICA-R方法是在文献[10]提出的负熵最大化基础上,根据先验信息加入约束条件^[16]

$$\left. \begin{aligned} & \text{选择 } w_j, \text{ 使 } J(w_j) = [E\{G(w_j x) - E\{G(v)\}}]^2 \text{ 极大} \\ & \text{约束条件: } \begin{cases} g(w) = \varepsilon(y, r) - \xi \leq 0 \\ H(w) = E(y^2) - 1 = 0 \\ E(r^2) - 1 = 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(y, r)$ 是提取信号 y_j 和参考信号 r 的接近程度,通常可用 y_j 与 r 间的均方根误差或互相关作为接近程度的度量; ξ 是其阈值。

式(1)属于受约束的优化问题,可以利用增广的拉格朗日函数,结合似牛顿的学习算法调节 w 和拉格朗日参数来求解,得到权 w 的迭代公式^[14]

$$w_{k+1} = w_k - \eta R_x^{-1} \cdot \frac{\bar{\rho} E\{xG'_y(y)\} - \frac{1}{2}\mu E\{xg'_y(y)\} - \lambda E\{xy\}}{\bar{\rho} E\{xG''_{y^2}(y)\} - \frac{1}{2}\mu E\{xg''_{y^2}(y)\} - \lambda} \quad (2)$$

式中, $R_x = E\{xx^T\}$; $\bar{\rho} = \rho \text{sign}(E\{G(y)\} - E\{G(v)\})$, $\rho = E\{G(y)\} - E\{G(v)\}$; G'_y , G''_{y^2} 和 g'_y , g''_{y^2} 分别为 G_y 和 g_y 关于 y 的一阶导数和二阶导数; 优化因子 u 和 λ 可分别由式(3)和式(4)获得

$$u_{k+1} = \max\{0, u_k + \gamma g(w_k)\} \quad (3)$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \gamma h(w_k) \quad (4)$$

参考 ICA 的实现步骤为: ① 白化观测数据; ② 产生随机解混向量 w , 并化为单位范数向量; ③ 构造参考信号 r , 按照式(2)进行迭代直至算法收敛; ④ 求取独立分量 $y = wZ$ 。

2.4 参考 EMD-ICA 算法

利用 ICA 方法从 GPS 动态变形监测数据中分离出频带较宽的多路径效应误差, 需要对 ICA 方法进行扩展, 使之能够处理单通道数据及准确恢复幅值。为此, 提出了带参考信号的 EMD-ICA 方法。该方法的基本思想是: 利用第 1 天的多路径误差模型作为参考信号, 将当天 GPS 动态观测的原始位移序列作 EMD 分解, 然后对分解得到的 IMF 序列利用参考 ICA 方法把当天的多路径误差提取出来, 同时又作为下一天的参考多路径信号。利用参考 EMD-ICA 的处理多路径效应误差的算法步骤如下:

(1) 将第 1 天静态观测的原始位移序列通过小波滤波去噪, 将结果作为多路径误差模型的参考信号 r_i ;

(2) 对后面一天的原始位移序列进行 EMD 分解, 得到 R 个的 IMF 分量;

(3) 将步骤(2)EMD 分解后得到的 IMF 分量作为虚拟观测数据 $X_{L \times R} = [(IMF_1^{(i)})^T, (IMF_2^{(i)})^T, \dots, (IMF_R^{(i)})^T]$, 利用 ICA-R 方法, 提取出当天多路径误差信号 y_i ;

(4) 求幅值恢复的比例系数 a , $a = avg(a_i)$,

$$a_i = \frac{r_i}{y_i} \quad (t=1, 2, \dots, n), n \text{ 为历元数};$$

(5) 恢复分离得到的多路径误差信号的幅值, $s = ay_i$, 并以此作为误差改正模型, 对振动位移观测数据进行改正。

3 试验及结果分析

本次试验地点位于香港理工大学的教学楼楼顶(教学楼 7 层, 高约 20 m), 周围有产生多路径效应的强反射面。参考站采用 Topcon 双频接收机和 Topcon CR3 扼流圈天线, 流动站采用 Septentrio 单频接收机和普通的测地型天线。基线长度约为 4 m, 组成短基线差分观测, 自 2006 年 8 月 4 日起作连续观测, 大约半个月的时间(13 天, 其中第 7 天和第 8 天由于供电故障原因以致观测数据部分缺失)。采样间隔设置为 1 s, 卫星截止高度角 15° 。数据解算利用 GPSSM 软件, 先通过静态基线解算得到静态基线向量, 再逐个历元的解算出流动站的动态轨迹, 得到该基线向量的三维坐标残差序列。图 1 是 GPS 观测的原始位移序列(以 X 方向为例, 已经通过时间对齐, 分别将各天的结果依次增加 20 mm, 使各天数据画在一张子图方便比较)。从图中可以看到原始位移序列具有很强的重复性, 计算相邻两天 3 个方向位移序列间的相关系数如表 1 所示, 从中可知相邻两天间的相关系数都在 0.6 以上, 表明相邻两天的原始位移序列存在强相关性。

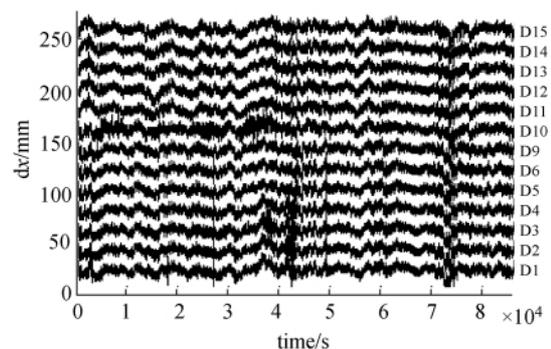


图 1 X 方向的原始位移序列
Fig. 1 Raw coordinates of X direction

表 1 相邻两天原始位移序列间的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients between two days consecutive multipath series

方向	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—9	9—10	10—11	11—12	12—13	13—14	14—15
X	0.898	0.888	0.892	0.865	0.888	0.857	0.604	0.692	0.901	0.898	0.897	0.884
Y	0.828	0.881	0.893	0.863	0.885	0.836	0.595	0.739	0.924	0.927	0.916	0.904
H	0.924	0.931	0.945	0.877	0.944	0.909	0.699	0.837	0.937	0.939	0.940	0.916

通过差分观测,卫星轨道误差、对流层延迟、电离层延迟等误差得到极大的削弱,原始位移序列主要包含随机噪声和多路径误差。首先选用光滑性和消噪效果较好的 db8 小波对原始位移序列进行强制去噪,得到多路径误差序列,其中 X 方向的去噪结果如图 2 所示。通常我们利用多路径的重复性建模来削弱多路径的影响。表 2 是后面各天与第 1 天多路径误差模型的相关系数,从中可以看出,随着日期的增加,多路径效应的相关性逐渐降低。图 3 是利用重复性建模改正后 X 方向的多路径误差差值序列,从中可以看出随着时间的推移,利用重复性模型改正的效果越来越不明显。X、Y、H 3 个方向去噪后位移序列的均方根误差(RMS)和多路径重复性建模改正后位移序列的均方根误差如表 3 所示。从表 3 中可知,去噪后每天的均方根误差都比较一致,X、Y 方向约为 3 mm,H 方向约为 10 mm。利用重复性模型改正后,对于前面几天,改正效果明显,至少约能削弱 50% 的多路径误差,但随着时间的推移,改正效果逐渐下降,到后面几天(约第 10 天起),改正效果逐渐下降,甚至不如改正前的结果。

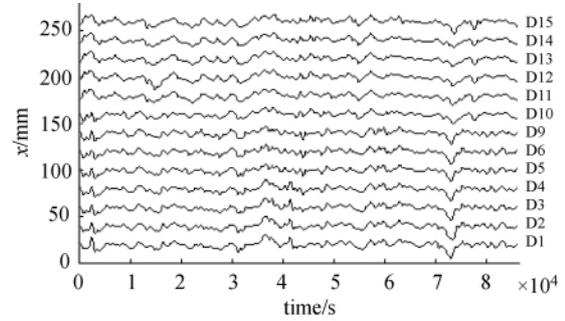


图 2 X 方向多路径误差序列

Fig. 2 Multipath series of X direction

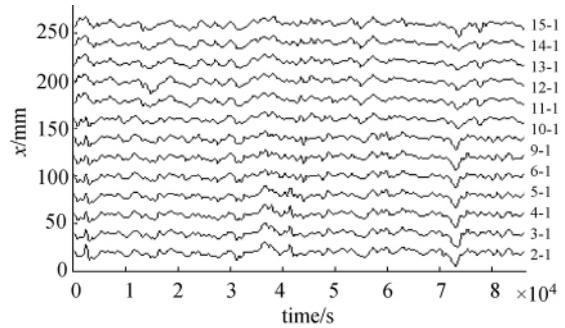


图 3 X 方向改正后的多路径残差序列

Fig. 3 Coordinate series of residual after repetitive Modeling in X direction

表 2 后面各天多路径误差序列与第 1 天多路径误差序列的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of multipath series between the first day and subsequent days

方向	1—2	1—3	1—4	1—5	1—6	1—9	1—10	1—11	1—12	1—13	1—14	1—15
X	0.970	0.966	0.933	0.872	0.888	0.878	0.707	0.592	0.572	0.586	0.572	0.574
Y	0.916	0.906	0.878	0.808	0.799	0.813	0.549	0.446	0.434	0.458	0.455	0.455
H	0.970	0.969	0.950	0.867	0.862	0.864	0.668	0.632	0.637	0.625	0.612	0.620

任取一段多路径误差序列作频谱分析如图 4 所示,(a)图为通过最大熵功率谱估计得到的频谱图,(b)图为通过小波变换得到的时间-尺度变换图。从图中可知,此处多路径效应的频率大部分在 0.02 Hz 以下。为了说明参考 EMD-ICA 从实际振

动变形监测数据中提取多路径信号的能力,在第 2 天至第 15 天的原始位移序列中加入两个正弦模拟信号,其振幅均为 5 mm,频率分别为 0.15 Hz 和 0.015 Hz,以此代表结构振动位移的高频和低频部分,其中低频部分与多路径信号的频率混叠。

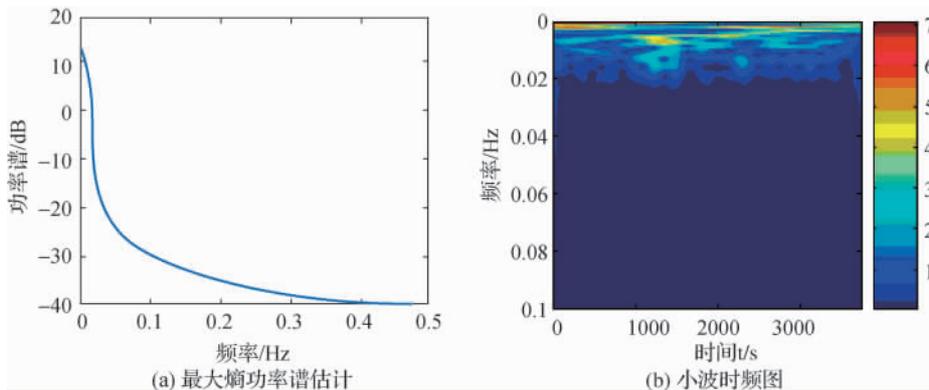


图 4 多路径误差的谱分析结果

Fig. 4 Spectral analysis results of multipath errors

图 5 是利用参考 EMD-ICA 方法求得的第 2 天至第 15 天 X 方向的多路径误差改正序列,图 6 是此改正序列与其相对应的多路径误差的差值序列。结合表 3 和表 4 的定量分析可知,利用参考 EMD-ICA 方法可以得到更为精确的多路径误差改正模型,其改正效果比利用重复性建模改正的效果要好很多,可约削弱 25%~70%的多路径误差。更重要的是,该方法是从振动位移信号与多路径信号混叠的数据序列中提取的多路径误差改正模型,即在实际动态变形监测应用中,多路径改正模型可以动态更新。为说明频率重叠信号的振幅对算法的影响,把加入的两个正弦模拟振动信号振幅调整为 2 mm、10 mm、20 mm、30 mm,重复以上试验。利用本文算法提取的多路径误差改正序列与其相对应的多路径误差的差值序列的 RMSE 分别为 1.044 mm、1.054 mm、1.032 mm、0.954 mm,这说明频率重叠信号的振幅对本文算法没有影响。

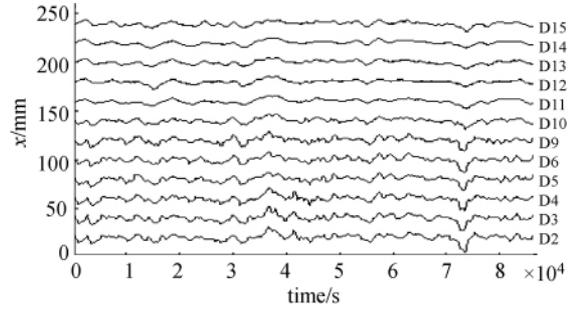


图 5 参考 EMD-ICA 求得的多路径位移序列
Fig. 5 Multipath series obtained by Reference EMD-ICA

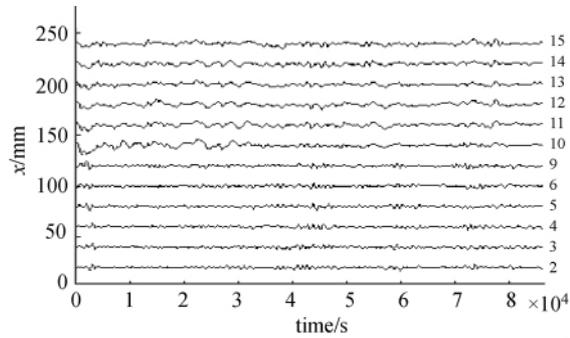


图 6 参考 EMD-ICA 改正后的多路径残差序列
Fig. 6 Coordinate series of residual after Reference EMD-ICA in X direction

表 3 改正前、后坐标序列的 RMS 值

Tab. 3 RMS of coordinate series before and after multipath correction

mm

天	X			Y			H		
	去噪后	C	R	去噪后	C	R	去噪后	C	R
2	3.383	0.821	0.717	3.536	1.509	1.054	11.584	3.191	2.729
3	3.203	0.871	0.775	3.322	1.591	0.914	11.33	3.313	2.377
4	3.125	1.205	0.819	3.322	1.795	0.952	10.781	4.193	2.719
5	2.855	1.651	0.804	3.196	2.214	1.035	9.959	6.45	3.018
6	2.914	1.547	0.855	3.165	2.257	1.063	10.242	6.513	2.965
9	2.931	1.601	0.878	3.226	2.192	1.113	9.713	6.552	3.392
10	2.932	2.44	0.924	3.588	3.489	2.134	9.235	9.517	3.051
11	3.166	2.956	1.577	3.684	3.914	2.296	9.097	9.941	2.771
12	3.395	3.125	1.693	3.747	3.988	2.389	9.605	9.948	3.797
13	3.066	2.937	1.319	3.692	3.875	2.347	8.98	10.008	3.308
14	3.028	2.973	1.408	3.6	3.838	2.303	8.956	10.151	4.925
15	3.257	3.057	1.451	3.322	3.883	2.249	9.42	10.121	3.761

注:C 表示重复性建模改正后的残差序列,R 表示参考 EMD-ICA 方法改正后的残差序列。

表 4 参考 EMD-ICA 方法求得的多路径误差序列与实际多路径误差序列的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients of multipath series between the correction of EMD-ICA and the actual sequence

天	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14	15
X	0.978	0.971	0.966	0.961	0.958	0.956	0.958	0.891	0.923	0.938	0.915	0.950
Y	0.955	0.963	0.958	0.946	0.942	0.939	0.821	0.840	0.842	0.817	0.802	0.864
H	0.971	0.977	0.968	0.953	0.959	0.953	0.945	0.957	0.919	0.931	0.845	0.918

4 结束语

ICA 是一种广泛应用的盲信号分离方法,本

文结合 GPS 动态变形监测应用的特点,利用 EMD 分解方法建立虚拟的多通道观测信号,并通过参考 ICA 方法恢复分离的多路径信号的幅

值,建立了基于参考EMD-ICA的多路径重复性模型动态更新方法。该方法解决了随时间推移多路径重复性下降而导致改正模型需经常更新的问题,也为频域滤波方法不能分离频率混叠信号问题提供解决思路。从本文的研究可以看出,ICA在测量数据处理领域将有广阔的应用前景,但ICA应用的条件比较严格,其理论与算法还需进一步完善,如非线性问题、不确定性问题等。

参考文献:

- [1] DAI Wujiao, DING Xiaoli, ZHU Jianjun, et al. EMD Filter Method and Its Application in GPS Multipath[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(43): 321-327. (戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军, 等. 基于经验模式分解的滤波去噪及其在GPS多路径效应中的应用[J]. 测绘学报, 2006, 35(43): 321-327.)
- [2] ROBERT S R. High Accuracy Deformation Monitoring via Multipath Mitigation by Day-to-day Correlation Analysis [C] // Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000). Salt Lake City: ION, 2000: 35-44.
- [3] RAGHEB A E, CLARKE P J, EDWARDS S J. GPS Sidereal Filtering: Coordinate and Carrier-phase-level Strategies[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(5): 325-335.
- [4] CHOI K, BILIEH A, KRISTINE M, et al. Modified Sidereal Filtering: Implications for High-rate GPS Positioning[J]. Geophysical Research Letter, 2004, 31(10): 1-4.
- [5] HSIEH C H, WU J. Multipath Reduction on Repetition in Time Series from the Permanent GPS Phase Residuals[C] // Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing: ISPRS, 2008: 911-916.
- [6] ZHONG Ping, YUAN Linguo, DING Xiaoli. Experimental Analysis of GPS Multipath Day-to-day Repeatability[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(2): 43-45. (钟萍, 袁林果, 丁晓利. GPS多路径重复性试验研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(2): 43-45.)
- [7] ZHONG P, DING X L, DAI W J, et al. Analysis of Variations of GPS Multipath Sidereal Day-to-day Repeatability Based on CVVF Method[C] // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005). Long Beach: ION, 2005: 2720-2727.
- [8] KIJEWski-CORREAT L. Full-scale Measurements and System Identification: A Time-frequency Perspective[D]. Notre Dame: University of Notre Dame, 2003.
- [9] HUANG Dingfa, DING Xiaoli, CHEN Yongqi. Wavelet Filters Based Separation of GPS Multi-path Effects and Engineering Structure Vibrations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 36-41. (黄丁发, 丁晓利, 陈永奇. GPS多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 36-41.)
- [10] HYVARINEN A, OJA E. Independent Component Analysis: Algorithms and Applications [J]. Neural Networks, 2000, 13(4-5): 411-430.
- [11] MIJOVIĆ B, VOS M D, GLIGORIJEVIĆ I, et al. Source Separation from Single-channel Recordings by Combining Empirical-mode Decomposition and Independent Component Analysis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(9): 2188-2196.
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [J]. Proceedings of the Royal Society: A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [13] XING Hongyan, HOU Jinyong. Electrocardiogram Noise Removal Based on Empirical Mode Decomposition and Independent Component Analysis[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2009, 13(4): 651-654. (行鸿彦, 侯进勇. 基于经验模式分解与独立分量分析的心电信号消噪方法[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(4): 651-654.)
- [14] JIAO Weidong, YANG Shixi, QIAN Suxiang, et al. A New Method for Recognition of Independent Noise Sources of Complex System under Strong Noisy Environment[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 673-676. (焦卫东, 杨世锡, 钱苏翔, 等. 基于FFT-MCC分析的ICA(BSS)盲不确定性消除[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 673-676.)
- [15] LU W, RAJAPAKSE J C. ICA with Reference[J]. Neurocomputing, 2006, 69(8): 2244-2257.
- [16] WANG Youfeng. FPGA Implementation of Fixed-point ICA-R Algorithm [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (王佑峰. 定点参考独立分量分析算法的FPGA实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.)
- [17] ZHANG Z L. Morphologically Constrained ICA for Extracting Weak Temporally Correlated Signals [J]. Neurocomputing, 2008, 71(7-9): 1669-1679.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2011-05-13

修回日期: 2011-10-26

第一作者简介: 罗飞雪(1986—),女,硕士,助教,研究方向为GNSS工程结构健康监测。

First author: LUO Feixue (1986—), female, master, teaching assistant, majors in structural health monitoring based on GNSS technology.

E-mail: misslfx@163.com

通讯作者: 戴吾蛟

Corresponding author: DAI Wujiao

E-mail: wjdai@mail.csu.edu.cn