

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205131

GPS/BDS 组合的 RTK 多路径抑制方法^{*}

黎标幸 夏海英 宋树祥 杨 军 黄 健
(广西师范大学电子工程学院 桂林 541004)

摘 要:在 GPS/BDS 组合系统中,BDS 系统的 MEO 轨道卫星与 BDS(GEO、IGSO)/GPS 轨道卫星的回归周期存在较大差异,表现为与其对应的恒星日滤波模型不唯一,其多路径误差的抑制效果也千差万别。为了取得更好的形变监测效果,采用 CEEMDAN-WT 联合滤波消除基线坐标序列的噪声影响,然后构建适用于 GPS/BDS 组合的恒星日滤波模型,基于模型提取到的多路径信息,对后一天基线序列的多路径误差进行改正。实测结果表明,经 BDS(GEO、IGSO)/GPS 组合的恒星日滤波模型抑制多路径误差后,基线的水平定位精度小于 5 mm,高程定位精度小于 1.33 cm,总体定位精度提升在 40% 以上。

关键词: GPS/BDS 组合;CEEMDAN-WT;恒星日滤波;多路径抑制

中图分类号: TN967.2; P228.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

GPS/BDS combined RTK multipath suppression method

Li Biaoxing Xia Haiying Song Shuxiang Yang Jun Huang Jian
(College of Electronic Engineering of Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In GPS/BDS combined system, the regression period of MEO orbit satellite of BDS system is different from that of BDS (GEO, IGSO)/GPS orbit satellite, which shows that the corresponding sidereal daily filter model is not unique, and the multipath error suppression effect is also different. In order to achieve better deformation monitoring effect, CEEMDAN-WT joint filtering was used to eliminate the noise effect of the baseline coordinate sequence, and then a sidereal daily filtering model suitable for GPS/BDS combination was constructed. Based on the multipath information extracted from the model, the multipath error of the baseline sequence of the next day was corrected. The measured results show that the horizontal positioning accuracy of baseline is less than 5 mm, the elevation positioning accuracy is less than 1.33 cm, and the overall positioning accuracy is improved over 40% after the multipath error is suppressed by the sidereal daily filtering model combined with BDS (GEO, IGSO) and GPS.

Keywords: GPS/BDS combination; CEEMDAN-WT; sidereal filtering; multipath suppression

0 引 言

卫星形变监测精度取决于参与解算卫星数量及卫星的几何图形结构,在城市环境下,由于卫星接收机观测卫星数目较少、几何精度因子差和周跳频繁等因素,从而导致卫星形变监测精度严重下降。文献[1]提出通过 BDS/GPS 组合定位,可以有效地增加卫星数量,降低几何精度因子,比单个卫星定位系统能取得更高的定位精度。在城市区域,通过多系统组合解算,定位精度还是有

限,卫星信号传播路径复杂,墙体和玻璃等会反射卫星的载波信号,导致基线解算出现周期重复的多路径效应,如果不消除多路径效应,将严重限制卫星定位在城市区域应用^[2-5]。

由于多路径效应空间相关性弱,只与接收机天线的具体监测环境有关,通常多路径效应造成的误差影响达到 1/4 载波波长,对于 GPS 的 L1 和 L2 载波,多路径效应造成的最大误差分别为 4.8 cm 和 6.1 cm,且无法通过差分进行消除,已成为高精度定位的主要误差^[6-7]。

近年来,国内外相关学者消弱多路径效应措施大体

可以分为 3 类:天线设计、接收机信号处理以及数据后处理。在数据后处理常用方法中,有信噪比法^[8]、半球格网点建模法^[9]以及非监督学习法^[10]等方法,最常用的后处理方法是恒星日滤波^[11-12]。在 GNSS 形变监测领域,接收机处于相对静止状态,由于卫星运动周期的重复性,卫星和接收机周围任何固定反射物的几何关系在约一个恒星日周期后重复。利用前一天的基线序列的多路径误差来改善后一天的定位结果,称为恒星日滤波。北斗系统星座运行周期复杂,BDS(IGSO、GEO)轨道卫星和 GPS 系统卫星的回归周期接近,大概为 1 d,而 BDS 系统的 MEO 轨道回归周期为 7 d,传统的坐标域恒星日滤波需要轨道回归周期接近,加入了 BDS 的 MEO 轨道卫星后,传统的坐标域恒星日滤波将不再适用^[13]。为了解决上述窘迫,易清根等^[14]于 2017 年在 GPS/BDS(GEO、IGSO)组合系统上,首次提出基于 EMD-WT 进行 GPS/BDS 变形监测中的多路径误差削弱方法。谢秉辰等^[15]于 2021 年针对 BDS 卫星产生的多路径误差,采用以 7 d 为周期进行的恒星日滤波,抑制了 BDS 系统在坐标域上多路径影响。

在 BDS/GPS 组合系统中,本文采用 CEEMDAN-WT 联合滤波消除基线坐标序列的噪声影响,对降噪后基线序列进行了周期为单天和周期为 7 d 的恒星日滤波实验,通过对比实验验证,周期为单天的恒星日滤波模型在抑制多路径误差后,定位精度提升均超过了 40%。

1 回归周期计算

根据卫星广播星历所提供的轨道参数,计算得到各卫星的运行周期,即几何重复期。由开普勒第三定律,根据广播星历中提供轨道长半轴平方根 A_s 与平均角速度改正参数 d_n ,求得卫星运行平均角速度 n 为:

$$n = \frac{\sqrt{GM}}{A_s^3} + d_n \quad (1)$$

式中: G 为万有引力常数, M 为地球质量,则 $GM = 3.986\,005 \cdot 1\,014\,M3/S^2$ 。卫星沿轨道周期运作一周的时间为:

$$T_0 = \frac{2\pi}{n} \quad (2)$$

经过计算,BDS 的 MEO 卫星轨道周期 T_{01} 为 12 h 53 min,轨道重复周期 T_{s1} 约为 7 个恒星日,BDS 的 GEO 和 IGSO 轨道卫星轨道周期 T_{02} 和轨道重复周期 T_{s2} 都为 23 h 56 min,GPS 的 MEO 轨道卫星的轨道周期 T_{03} 为 11 h 58 min,GPS 轨道重复周期 T_{s3} 为 23 h 56 min,各个轨道重复周期为:

$$\begin{cases} T_{s1} = 13 \cdot T_{01} \\ T_{s2} = T_{02} \\ T_{s3} = 2 \cdot T_{03} \end{cases} \quad (3)$$

卫星每天的提前时间为:

$$t = 86\,400 - T_s \quad (4)$$

2 CEEMDAN-WT 联合滤波

2.1 CEEMDAN 分解原理

EEMD 滤波在待分解信号中加入高斯白噪声或者正负成对的白噪声来消除模态混叠问题,然而,加入的白噪声会残留在分解得到的模态本征分量中,无法从重构信号中完全消去,造成重构信号与原信号出现较大的偏差^[16-17]。CEEMDAN 在各个分解阶段添加自适应的高斯白噪声,得到模态分量后立即进行平均计算,后续分解过程执行同样操作,有效解决白噪声残余问题^[18-19]。CEEMDAN 分解的具体步骤如下:

1) 将高斯白噪声加入到原始信号 $y(t)$ 中,构成新的信号 $y(t) + \varepsilon v_i(t)$,其中 ε 为高斯白噪声 $v_i(t)$ 的标准差。对新信号进行 EMD 分解得到第 1 级本征模态分量 C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IMF_1^i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_1(y(t) + \varepsilon v_i(t)) \quad (5)$$

其中, IMF_1^i 为原信号 $y(t)$ 加入第 i 次高斯白噪声, $v_i(t)$ 为经过 EMD 分解得到的第 1 阶本征模态分量, C_1 为第 1 阶本征模态分量的平均。 $E_i(*)$ 为 EMD 分解的第 i 阶本征模态分量。

2) 原始信号去除第 1 阶本征模态分量后的残差 r_1 表达式为:

$$r_1 = z(t) - C_1 \quad (6)$$

3) 把 r_1 作为原始信号 $z(t)$,再加入高斯白噪声,经过 EMD 分解的第 1 阶本征模态分量 $E_1(v_i(t))$,构成新信号 $z(t) + \varepsilon E_1(v_i(t))$,再重复步骤 1)、2),直到 r_i 不能再 EMD 分解。

4) 则原信号 $z(t)$ 被分解为:

$$z(t) = \sum_{i=1}^N C_k + r_k \quad (7)$$

2.2 小波阈值对高频分量 IMF 进行降噪处理

CEEMDAN 实际上是将原始信号进行一个高频至低频的分解,高频分量的固有模态函数(IMF),仍然保留部分有用信息,不能直接摒弃,采用排列熵进行高低频分量划分,本征模态分量的熵大于 0.5,认为是含有噪声的高频分量^[20]。选用 GNSS 变形监测中常用的 Sym7 小波基函数,对高频分量进行 3 层小波分解,通过软阈值函数对高频分量上的噪声进行舍弃,提取到在高频分量上的多路径信息,再和低频分量上的多路径信息进行重构,得到了去噪后的多路径模型。CEEMDAN-WT 降噪算法流程如图 1 所示。

2.3 滤波仿真分析

为了验证 CEEMDAN-WT 联合滤波抑制噪声的可行

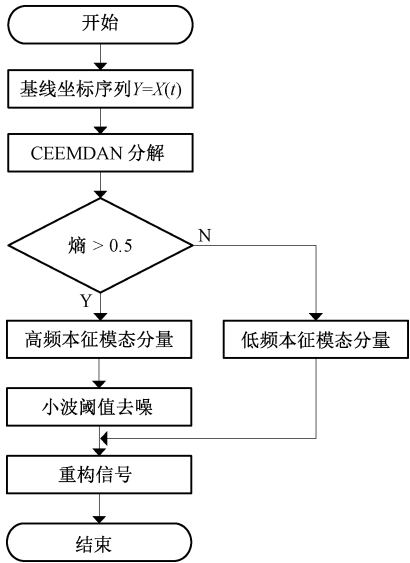


图 1 CEEMDAN-WT 滤波算法流程
Fig. 1 CEEMDAN-WT filtering algorithm flow

性,设计了一个仿真信号进行滤波效果分析,仿真信号的表达式为:

$$\begin{cases} y_1 = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t/1\,500); \\ y_2 = \sin(2 \cdot \pi \cdot t/500); \\ y_3 = \sin(2 \cdot \pi \cdot t/200); \\ y = y_1 + y_2 + y_3 + n(t); \end{cases} \quad (8)$$

式中: $t=[0:1:2\,000]$, $n(t)$ 为 1 dB 的高斯白噪声。图 2(a)为加载噪声的原始信号,对该信号采用 CEEMDAN 进行分解,得到 7 个 IMF 分量和 1 个残余项,各分量如图 2(b)所示,随着分解的次数的增加信号越来越平滑,表明高斯白噪声主要分布在高频分量上。对高频分量使用小波阈值去噪,提取低频有效信息,再和 CEEMDAN 分解的低频分量进行重构得到的去噪信号,去噪结果如图 3 所示,有效抑制了高频噪声。与传统的滤波方法在去噪效果比较如表 1 所示,CEEMDAN-WT 联合滤波在均方根和信噪比指标上均优于传统的滤波方法。

表 1 仿真数据去噪效果对比

评价指标	Sym7 小波 4 层 阈值去噪	EMD	CEEMDAN	CEEMDAN-WT
SNR/dB	23.77	22.52	24.8	25.01
RMSE/cm	0.08	0.088	0.07	0.066

3 实例验证

将基站和测站安装在受多路径效应影响较为严重的复杂环境中。基站安装在距地面 60 cm 的水泥柱上,测站安装在定位精度为 1 mm 的形变测试平台上,两站相隔

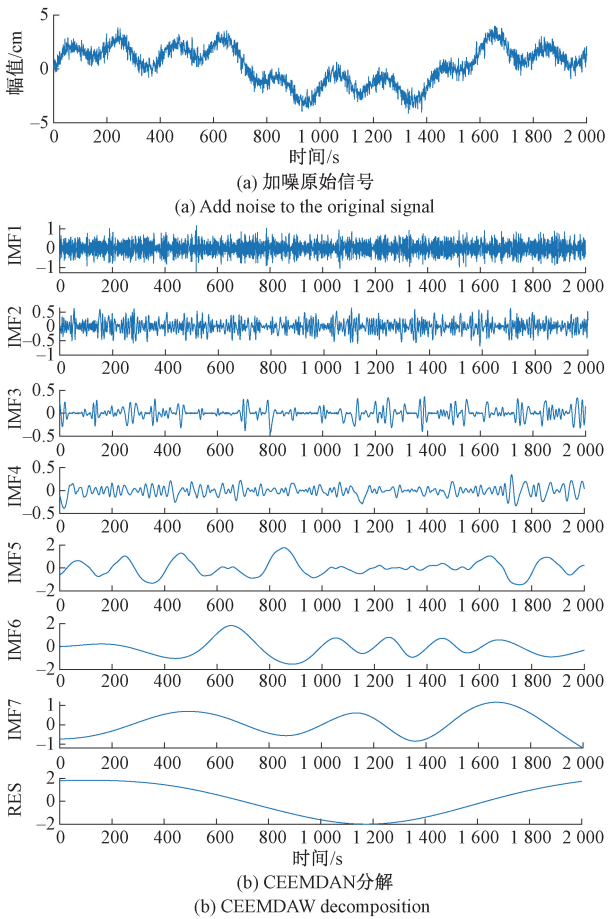


图 2 加噪原始信号及 CEEMDAN 分解结果
Fig. 2 Denoised original signal and CEEMDAN decomposition results

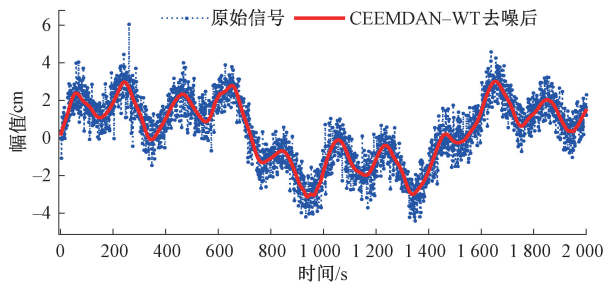


图 3 CEEMDAN-WT 去噪效果
Fig. 3 CEEMDAN-WT denoising effect

距离约为 1.2 m,基站和测站的西方向,距离高层建筑的墙面约 2 m 远,实验环境如图 4 所示。

在形变监测中,受多路径效应影响的基线序列也称为多路径误差序列。为了量定多路径效应对 RTK 定位的影响,在同一时间段选取相邻 6 d 的 GPS/BDS(GEO/IGSO)卫星数据进行 RTK 解算。经 RTK 解算得到 6 d 的多路径误差序列,按照东西、南北及高程方向进行时间对



图 4 实验环境图

Fig. 4 Experimental environment diagram

齐,再分别按天依次增加相同的数值,使 6 d 的多路径误差序列能画在一张子图上,结果如图 5 所示,可以看到相邻两天的多路径误差序列具有很强的重复性,而且后一天序列会比前一天序列周期提前,6 d 的多路径误差序在 3 个方向上的相关系数统计结果如表 2 所示,相邻两天的多路径误差序列的相关系数在 0.6 以上,表明相邻两天的基线数据存在很强相关性。

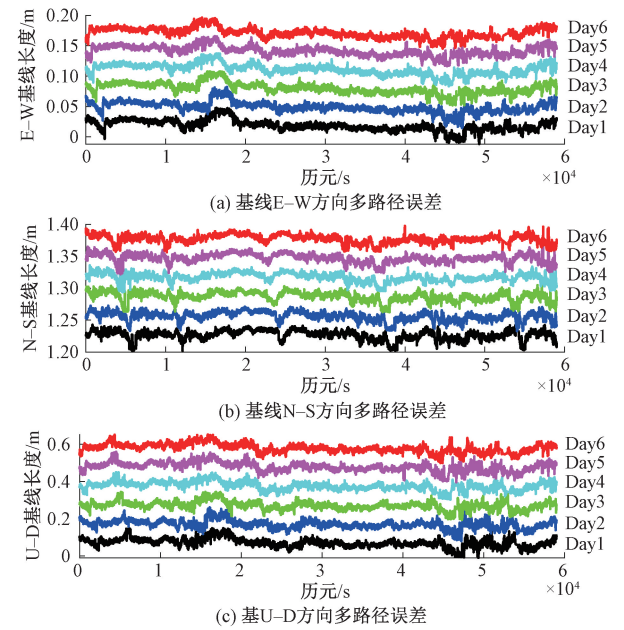


图 5 多路径误差序列

Fig. 5 Multipath error sequence

表 2 多路径误差序列的相关系数统计

Table 2 Multipath error sequence correlation coefficient statistics

基线 方向	前后两天的相关系数 R				
	Day1/Day2	Day2/Day3	Day3/Day4	Day4/Day5	Day5/Day6
东西	0.76	0.64	0.70	0.75	0.72
南北	0.61	0.68	0.65	0.64	0.62
高程	0.61	0.62	0.60	0.67	0.71

恒星日滤波需要卫星的回归周期接近,由于 GPS/BDS(GEO、IGSO)轨道卫星和 BDS 的 MEO 轨道卫星的回归周期差距较大,为了更好地约束系统所受到的多路径误差影响,论证分析滤波周期为 7 d 的 BDS(GEO、IGSO、MEO)/GPS 组合恒星日滤波模型和滤波周期为一天的 BDS(GEO、IGSO)/GPS 组合恒星日滤波模型的优劣性。卫星测站采集频率为 1Hz,RTK 解算高度角设为 10° 。

1) BDS(GEO、IGSO、MEO)/GPS 恒星日滤波

在 BDS(GEO、IGSO、MEO)/GPS 组合系统中,BDS 的 MEO 轨道卫星回归周期为 7 d,其他轨道卫星的回归周期为单天,为了兼顾 BDS 的 MEO 轨道卫星,构建了滤波周期为 7 d 的恒星日滤波模型,以抑制其多路径误差影响。从图 6(a)可以看出 Day1 和 Day8 在基线序列上存在系统性波动,其变化趋势一致。由于基线序列中包含噪声和多路径误差,采用 CEEMDAN-WT 联合滤波抑制噪声影响,得到了基线序列中的低频多路径误差,结果如图 6(b)所示。卫星受摄动力影响,回归周期会存在提前,所以 Day8 的基线序列在时间序列上提前于 Day1 基线序列,将 Day8 的多路径误差序列和 Day1 的多路径误差序列在最大相关系数位置进行对齐相减,就能很好地去除多路径效应的影响,去除多路径效应后的基线结果如图 6(c)所示。抑制了多路径的影响后,基线数据变得更集中,更为接近静态基线的监测状态,基线数据在一条直线上波动。基线在东西、南北、高程 3 个方向上的多路径抑制效果如图 7 所示,抑制多路径后,定位精度提升统计结果如表 3 所示。

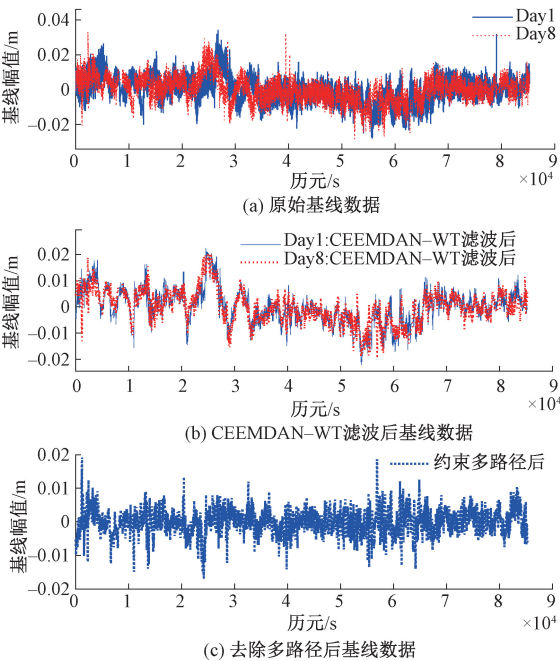


图 6 恒星日滤波结果

Fig. 6 Sidereal day filtering results

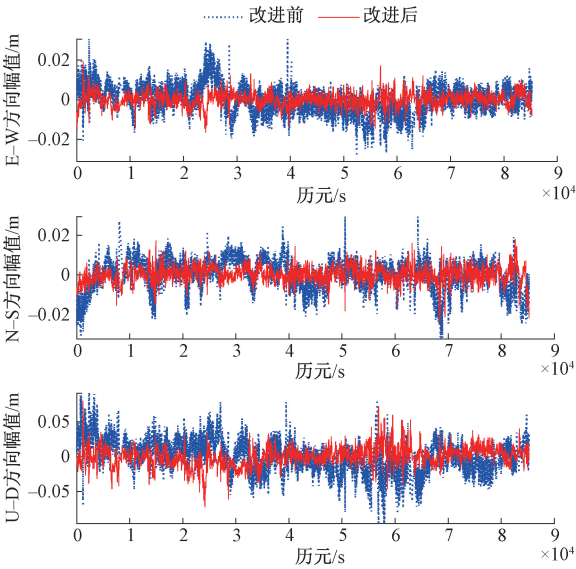


图 7 恒星日滤波对基线 3 个方向的改进效果

Fig. 7 Improvement of sidereal day filter in three directions of baseline

表 3 滤波周期为 7 d 的恒星日滤波精度提升统计结果

Table 3 Statistical results of sidereal day filtering accuracy improvement with filtering period of seven days

Day	东西方向 RMS/mm			南北方向 RMS/mm			高程方向 RMS/mm		
	原始	滤波后	提升率	原始	滤波后	提升率	原始	滤波后	提升率
d1~d7	6.2	4.5	27%	8.3	5.0	39%	17.3	14.0	19%
d2~d8	6.7	4.1	38%	7.3	5.2	28%	21.5	15.4	28%
d3~d10	6.6	3.6	45%	7.4	4.1	44%	21.6	14.2	34%

2) BDS(GEO、IGSO)/GPS 恒星日滤波

在 BDS(GEO、IGSO)/GPS 组合系统中,各轨道卫星的回归周期均为 1 d,且回归周期的提前时间接近,因此 BDS(GEO、IGSO)/GPS 恒星日滤波模型的滤波周期采用单天。Day1 和 Day2 两天的原始基线序列如图 8(a)所示,受多路径影响,其基线数据在时间序列上变化趋势基本一致。采用 CEEMDAN-WT 进行降噪处理后,得到了低频多路径误差序列,结果如图 8(b)所示,再用 Day2 的多路径误差序列和 Day1 的多路径误差序列在最大相关系数位置进行对齐相减,就得到了去除多路径的恒星日滤波结果,如图 8(c)所示,多路径误差得到了明显消弱。基线在东西、南北、高程 3 个方向上的多路径抑制效果如图 9,抑制多路径效应后,定位精度提升统计结果如表 4 所示。

4 结 论

本文使用 CEEMDAN-WT 联合滤波方法对多路径误差进行去噪处理,基于提取到低频的多路径信息,构建了

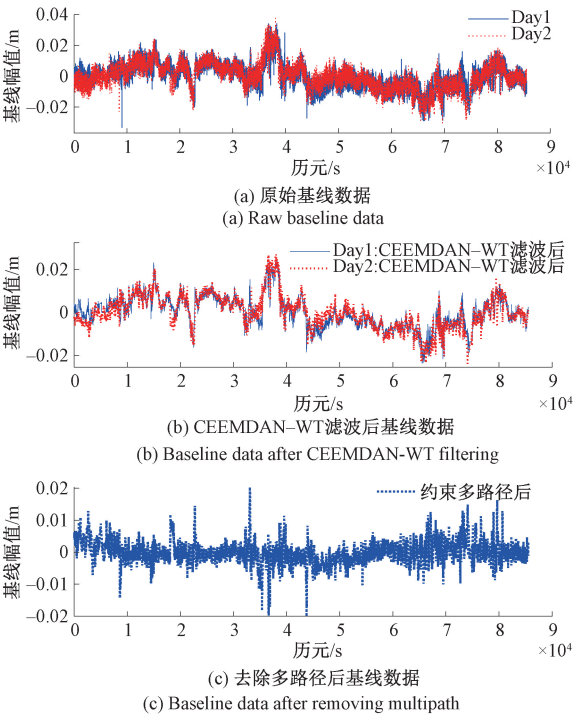


图 8 恒星日滤波结果

Fig. 8 Sidereal day filtering results

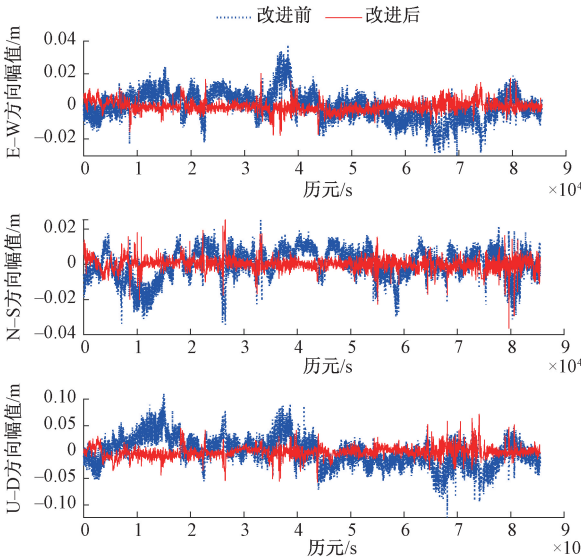


图 9 恒星日滤波对基线 3 个方向的改进效果

Fig. 9 Improvement of sidereal day filter in three directions of baseline

表 4 滤波周期为单天的恒星日滤波精度提升统计结果

Table 4 Statistical results of sidereal day filtering accuracy improvement with filtering period of single day

Day	东西方向 RMS/mm			南北方向 RMS/mm			高程方向 RMS/mm		
	原始	滤波后	提升率	原始	滤波后	提升率	原始	滤波后	提升率
d1~d2	7.8	3.6	54%	8.1	4.7	42%	24.4	13.3	45%
d2~d3	8.7	3.9	55%	8.2	4.8	41%	23.2	12.7	45%
d3~d4	8.2	3.4	58%	8.1	3.7	54%	25.8	10.7	58%

两种 GPS/BDS 组合的恒星日滤波模型。实验结果表明, CEEMDAN-WT 联合滤波算法可以有效地将基线序列中的高频噪声和低频多路径信息进行分离, 避免在 CEEMDAN 分解过程中, 丢失掉 IMF 高频分量上的部分多路径低频有效信息; 基于 CEEMDAN-WT 联合滤波算法构建的 BDS(GEO、IGSO)/GPS 组合的恒星日滤波模型, 相邻两天的基线序列具有强相关性, 抑制多路径后, 3 个方向上的精度提升均超过了 40%, 提高了基线坐标序列的稳定性; 在 BDS(GEO、IGSO) 卫星和 GPS 卫星数量较多, 满足基线解算的条件下, 可以采用周期为单天的恒星日滤波。当卫星数量不满足基线解算的条件, 可以采用周期为 7 d 的恒星日滤波。

参考文献

- [1] WANG M, SHAN T, ZHANG W, et al. Analysis of BDS/GPS signals characteristics and navigation accuracy for a geostationary satellite[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1967.
- [2] 汤灿阳. 关于 GPS 高精度定位技术中多路径误差消除的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
TANG C Y. Study on multipath error elimination in GPS high-precision positioning technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [3] 董雅璇. 城市区域伪距多路径改正方法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
DONG Y X. Research on pseudo-distance multipath correction method in urban area [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [4] 王桂人. 城市环境 GPS 多路径效应改正技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
WANG ZH R. Research on GPS multipath effect correction technology of urban environment [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [5] 邵梦杨, 郭磊, 王甫红. 城市典型环境下单频导航型 GNSS 接收机多路径误差特性分析[J]. *测绘通报*, 2018(9): 1-7.
SHAO M Y, GUO L, WANG P H. Multipath error analysis of single frequency navigation GNSS receiver in typical urban environment[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018 (9): 1-7.
- [6] SMOLYAKOV I. On environmental adaptation in GNSS-based integrated navigation systems [D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2020.
- [7] DONG D, WANG M, CHEN W, et al. Mitigation of multipath effect in GNSS short baseline positioning by the multipath hemispherical map [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 255-262.
- [8] UARATANAWONG V, SATIRAPOD C, TSUJII T. Evaluation of multipath mitigation performance using signal-to-noise ratio (SNR) based signal selection methods [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2021, 15(1): 75-85.
- [9] 王亚伟, 邹璇, 唐卫明, 等. 削弱 GNSS 多路径效应的半天球格网点建模方法[J]. *测绘学报*, 2020, 49(4): 461-468.
WANG Y W, ZOU X, TANG W M, et al. A method for mitigating GNSS multipath effect based on multi-point hemispherical grid model [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 461-468.
- [10] 朱彬, 杨诚, 刘岩. GNSS 多径信号 3 种非监督学习方法分析与比较[J]. *测绘学报*, 2021, 50(12): 1762-1771.
ZHU B, YANG CH, LIU Y. Analysis and comparison of three unsupervised learning clustering methods for GNSS multipath signals [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2021, 50(12): 1762-1771.
- [11] ATKINS C, ZIEBART M. Effectiveness of observation-domain sidereal filtering for GPS precise point positioning [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(1): 111-122.
- [12] ZHU T, CHANG G, CHEN C, et al. Continuous modelling of global navigation satellite system multipath errors for sidereal filtering [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 14(2): 303-312.
- [13] LIU C, TAO Y, XIN H, et al. A single-difference multipath hemispherical map for multipath mitigation in BDS-2/BDS-3 short baseline positioning [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 304.
- [14] 易清根, 刘心龙, 刘万科. 基于 EMD 和小波的 GPS/BDS 变形监测中的多路径误差削弱方法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37(5): 462-466.
YI Q G, LIU X L, LIU W K. Multi-path error reduction method for GPS/BDS deformation monitoring based on EMD and wavelet [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(5): 462-466.
- [15] 谢秉辰, 胡志刚. 基于坐标域的恒星日滤波法及其在北斗变形监测中的应用 [J/OL]. *测绘地理信息*, 2021(7): 1-11.
XIE B CH, HU ZH G. Sidereal daily filtering method based on coordinate domain and its application in Beidou deformation monitoring [J/OL]. *Surveying and Mapping Geographic Information*, 2021(7): 1-11.
- [16] XIE D, SUN H, QI J. A new feature extraction method based on improved variational mode decomposition, normalized maximal information coefficient and permutation entropy for ship-radiated noise [J]. *Entropy*,

- 2020, 22(6): 620.
- [17] 冉伟, 宁静, 陈杨, 等. 基于 EEMD-SVD-LTSA 的高速列车蛇行演变特征提取框架[J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 1-5.
- RAN W, NING J, CHEN Y, et al. Eemd-svd-ltsa based feature extraction framework for snaking evolution of high-speed trains [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(5): 1-5.
- [18] 古莹奎, 曾磊, 张敏, 等. 基于 CEEMDAN-SQI-SVD 的齿轮箱局部故障特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 78-88.
- GU Y K, ZENG L, ZHANG M, et al. Local fault feature extraction of gear box based on CEEMDAN-SQI-SVD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 78-88.
- [19] 栾孝驰, 徐石, 沙云东, 等. 基于 GWO-NLM 与 CEEMDAN 的滚动轴承故障诊断方法[J/OL]. 航空动力学报: 1-13.
- LUAN X CH, XU SH, SHA Y D, et al. Rolling bearing fault diagnosis method based on GWO-NLM and CEEMDAN [J/OL]. Journal of Aerospace Power: 1-13.
- [20] 耿读艳, 王晨旭, 赵杰, 等. 基于 CEEMDAN-PE 的心冲

击信号降噪方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 155-161.

GENG D Y, WANG CH X, ZHAO J, et al. Research on noise reduction method of cardiac impact signal based on ceemdan-pe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 155-161.

作者简介



黎标幸, 广西师范大学电子与通信工程专业硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 高精度形变检测及数据处理。

E-mail: 1501835941@qq.com

Li Biaoxing, M. Sc. candidate, major in Electronic and Communication Engineering, Guangxi Normal University. His research interests include GNSS high-precision deformation detection and data processing.



杨军(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为光纤传感技术。

E-mail: yjgioc@163.com

Yang Jun (Corresponding author), M. Sc. degree, senior engineer. His main research interest includes optical fiber sensing technology.