

胡媛, 袁鑫泰, 刘卫, 等. 基于 VMD 和 WinLSP 相结合的 GNSS-R 海平面高度估测模型[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 170–178, doi:10.12284/hyxb2022139

Hu Yuan, Yuan Xintai, Liu Wei, et al. GNSS-R sea level height estimation model based on the combination of VMD and WinLSP[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11): 170–178, doi:10.12284/hyxb2022139

基于 VMD 和 WinLSP 相结合的 GNSS-R 海平面高度估测模型

胡媛¹, 袁鑫泰¹, 刘卫^{2*}, 胡庆松¹, 江志豪¹, 钟李程¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 全球导航卫星系统反射 (Global Navigation Satellite System-Reflectometry, GNSS-R) 技术是一种新兴的监测海平面高度变化的技术。本文依据 GNSS-R 技术中的信噪比分析法的原理, 通过分析其分离趋势项和提取振荡频率的过程, 建立了新的估测模型以提高反演精度。针对传统模型存在的信号分离不佳的问题, 本文提出使用变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD) 算法替换传统的最小二乘拟合法 (Least Squares Fitting, LSF) 进行趋势项分量的分离。在此基础上, 本文引入基于凯塞窗函数改进的 LSP (Lomb-Scargle Periodogram) 频谱分析法 (记为 WinLSP) 来减弱因频谱泄露带来的反演误差。在瑞典翁萨拉的 GTGU 站和美国阿拉斯加州的 SC02 站开展的海平面高度反演实验结果表明, 本文建立的估测模型相比于传统模型具有更高的反演精度。基于 VMD+WinLSP 估测模型得到的 GTGU 站反演结果的均方根误差 (RMSE)、相关系数和反演点数分别为 4.70 cm、0.98 和 5 647。与传统的 LSF+LSP 估测模型相比, 反演精度和 GNSS 数据利用率分别提高了约 29.7% 和 15.0%。SC02 站的 RMSE、相关系数和反演点数分别为 14.34 cm、0.99 和 1 785, 反演精度和 GNSS 数据利用率分别提高了约 12.3% 和 9.4%。

关键词: GNSS-R; 信噪比; 变分模态分解; 凯塞窗函数

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)11-0170-09

1 引言

海洋对人类社会生存和发展具有重要意义。全球气候变化造成的海平面上升严重威胁到人们的生命和财产安全。因此, 观测海平面高度的变化有利于监测自然界的变化, 对于海洋学的研究和人类的发展具有重要意义^[1]。随着全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) 的不断发展, GNSS 反射 (GNSS-Reflectometry, GNSS-R) 技术作为一种新兴的卫星遥感技术被广泛应用于海平面测高领域。

相比于传统的测量手段, 基于地基 GNSS-R 的海平面高度反演技术具有全天候、覆盖面广、时空分辨率高、信号源多和成本低等优势。目前基于地基 GNSS-R 技术的海平面高度监测方法一般可以分为双天线模式的伪随机码^[2-5]、载波相位分析^[6-9]方法以及单天线模式的信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 分析法^[10-13]。双天线模式指的是 GNSS 接收机安装有右旋圆极化 (Right-Handed Circular Polarization, RHCP) 天线和左旋圆极化 (Left-Handed Circular Polarization, LHCP) 天线。RHCP 天线和 LHCP 天线分别接收卫星直射信号和海

收稿日期: 2021-09-11; 修订日期: 2022-06-21。

基金项目: 上海市自然科学基金 (19ZR1422800); 国家自然科学基金 (52071199); 国家重点研发计划 (2019YFD0901303)。

作者简介: 胡媛 (1981—), 女, 江西省萍乡市人, 博士, 副教授, 主要从事海洋遥感和 GNSS 应用技术研究。E-mail: y-hu@shou.edu.cn

* 通信作者: 刘卫 (1981—), 男, 上海市人, 博士, 教授, 主要从事 GNSS 信号处理和遥感应用研究。E-mail: Liu@Satnav.cn

平面的反射信号,根据两信号中伪随机码或载波相位的差别进行高度反演。伪随机码测高方法受限于码片宽度,反演精度最低;载波相位分析方法的精度比较好但需要专业的接收机,成本较高不适合大规模应用。SNR分析法则仅需一根RHCP天线同时接收直射信号和反射信号,研究两者干涉产生的合成SNR信号进行高度反演。而且,SNR分析法对粗糙海平面具有更好的鲁棒性。

SNR分析法的关键之处在于趋势项分离和振荡频率提取,传统模型常采用最小二乘拟合法(Least Squares Fitting, LSF)^[14]和LSP(Lomb-Scargle Periodogram)频谱分析法^[15]分别进行趋势项分离和振荡频率的提取。LSF通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,一般为低阶多项式。LSF得到的趋势项存在特定的目标函数与之匹配,这导致其与复杂的SNR数据进行拟合时存在局限,影响反演精度。同时,由于LSP频谱分析法在提取振荡频率过程中,会先截断输入信号,然后再进行周期扩展处理,得到一个虚拟的无限信号。但是,SNR数据不是周期信号,因此这种截断过程会造成频谱能量的泄漏,从而导致误差^[16]。

基于上述问题,本文采用瑞典翁萨拉(Onlasa)的GTGU站2016年DOY(Day of Year)1-80和美国阿拉斯加州的SC02站2021年DOY 152-211的GPS观测数据,构建一种基于变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)和凯塞窗函数改进的LSP(记为WinLSP)的GNSS-R海平面高度估测模型,并利用翁萨拉空间天文台和美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的验潮站数据进行模型精度的验证,该模型可为区域性海平面高度测量提供参考。

2 GNSS-R海平面高度估测原理

2.1 经典GNSS-R海平面高度估测模型

SNR数据分析法进行海平面高度反演只需放置一个RHCP天线同时接收卫星直射信号和海平面的反射信号。图1展示了估测模型的几何关系图。

如图1所示,天线到海平面的反射器高度为 h ,卫星仰角为 θ 。根据反射信号相对于直射信号存在的额外的路径和仰角 θ ,由几何关系可求得反射器高度 h ,进而可求得相位差为

$$\phi_r = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin\theta, \quad (1)$$

式中, λ 为载波波长。RHCP天线接收直、反射信号的

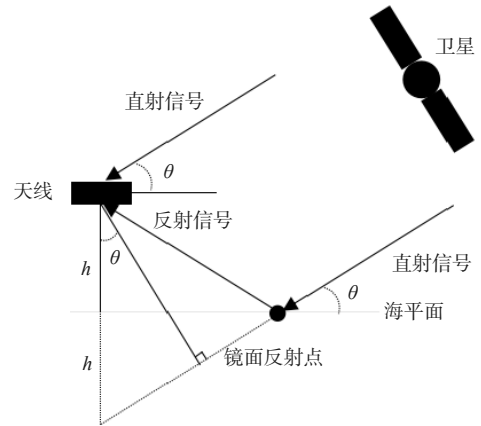


图1 全球导航卫星系统反射(GNSS-R)海平面高度估测模型几何关系图

Fig. 1 Global navigation satellite systems-reflectometry (GNSS-R) sea level height estimation model geometric relationship diagram

能量时,对于前者会最大程度的接收。对于后者则表现为抑制,但没能完全抑制。因此,接收机接收到的SNR信号可以表示为^[17]

$$\text{SNR} = \sqrt{(A_d)^2 + (A_r)^2 + 2A_d A_r \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin\theta\right)}, \quad (2)$$

式中, $(A_d)^2 + (A_r)^2$ 是导致信号上升的趋势项,是一个干扰项。分离趋势项后,获得的 SNR_v 为干涉引起的SNR振荡项,表示为

$$\text{SNR}_v = 2A_d A_r \cos\phi_r = 2A_d A_r \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin\theta\right), \quad (3)$$

由式(3)可以发现,反射器高度 h 与 SNR_v 角频率有关,即:

$$\omega_{\text{SNR}} = \frac{4\pi h}{\lambda} = 2\pi f_{\text{SNR}}, \quad (4)$$

式中, f_{SNR} 为SNR振荡项的振荡频率。则海平面高度为

$$h = \frac{\lambda f_{\text{SNR}}}{2}. \quad (5)$$

2.2 变分模态分解理论

VMD是由Dragomiretskiy和Zosso^[18]提出的自适应、完全非递归的信号分离方法。VMD通过迭代搜寻变分模型最优解来确定每个分量的频率中心及带宽,实现原信号的频域剖分和本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量的分离。此外,VMD有效地解决了经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)存在的模态混叠、端点效应以及分解层数不可控的问题^[19-20]。根据VMD的分解原理可得^[21]:

$$X(t) = \sum_{k=1}^K u_k(t) + r_n(t), \quad (6)$$

式中, $X(t)$ 表示输入的原信号; $u_k(t)$ 表示分解得到的第 k 个IMF分量; K 表示分解层数; $r_n(t)$ 表示残余项,一

一般为噪声。VMD 分解得到的 IMF 分量为一个非平稳的调幅调频信号, 即

$$u_k(t) = A_k(t) \cos [\varphi_k(t)], \quad (7)$$

式中, 相位 $\varphi_k(t)$ 满足 $\varphi_k'(t) \geq 0$; 包络线 $A_k(t)$ 满足 $A_k(t) \geq 0$ 。瞬时频率 $\omega_k(t) = \varphi_k'(t)$, $A_k(t)$ 变化缓慢, 而 $\varphi_k(t)$ 变化较为迅速。

式(2)和式(3)说明了 GNSS-R 海平面高度估测模型中需要分离出 SNR 数据的趋势项, 即干扰项, 才能通过频谱分析方法提取振荡频率。针对传统方法信号分离不佳的问题, VMD 能够不局限于特定的表达式, 而是基于原始信号本身的特征进行趋势项分离, 为估测模型提供更高质量的 SNR 数据。为了说明 VMD 对 SNR 数据趋势项的分离效果, 选择了 GTGU 站 2016 年 DOY 1 的 PRN02 的 $5^\circ \sim 30^\circ$ 卫星仰角范围的原始 SNR 数据进行 VMD 分解, 如图 2 所示。可以明显地看到 VMD 有效地将原始 SNR 数据分解成具有不同频率的信号。由式(6)可知, VMD 分解得到的 IMF 分量频率从高到低排列分别是 IMF1-IMF4, 同时还有一个残差项。通过比较可以看到 IMF4 分量与原始 SNR 数据的相关性最高, 即为趋势项。GNSS 天线实际收集信号时, 不仅仅接收卫星的直射信号和

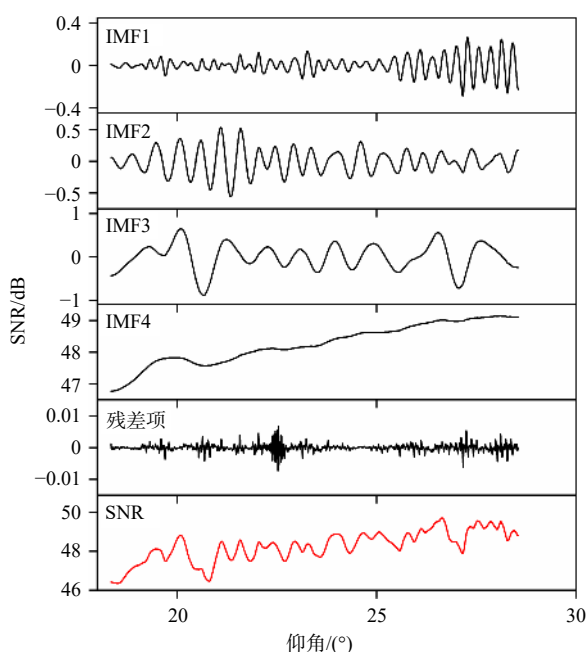


图 2 信噪比(SNR)数据的本征模态函数(IMF)分量的组成, 从上到下, 依次是 IMF 分量(频率从高到低)、残差和原始 SNR 数据(红线)

Fig. 2 Composition of the intrinsic mode function (IMF) component of the signal-to-noise ratio (SNR) data, from top to bottom, followed by IMF components (from high frequency to low frequency), residual and original SNR (red line)

经海平面反射的反射信号, 同时还接收周围环境产生的噪声信号。这些噪声是非平稳的高斯白噪声, 可能会导致频谱分析时提取频率出现误差。VMD 在重构振荡项的同时也减弱了噪声对反演精度的影响。

2.3 凯塞窗函数

不同于周期图法和 Welch 算法^[22], LSP 频谱分析法适用于对非均匀采样的时域信号进行频谱分析。在反演过程中, LSP 频谱分析法在提取非均匀采样的 SNR 数据的振荡频率时可能因频谱泄露导致反演误差的增大。窗函数能使时域信号更好地满足频谱分析处理的周期性要求, 减少因频谱泄露导致的泄露, 使得所需的振荡频率被更好地提取。窗函数的主瓣宽度和旁瓣幅度分别影响到频谱分析过程中频率的分辨率过滤干扰信号的能力。最理想的窗函数是主瓣宽度最窄, 旁瓣最小衰减度最大。但在实际的频谱分析过程中很难找到同时满足这两个要求的窗函数。

本文选用基于凯塞窗改进的 LSP 频谱分析法结合进行振荡频率的提取。凯塞窗^[23]是一个比较灵活的窗函数, 它可以通过改变参数来调整窗口形状, 进而达到改变主瓣宽度和旁瓣幅度的功能。凯塞窗是由第一类零阶贝塞尔函数 I_0 构成的窗函数:

$$w(n) = \frac{I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2n}{N-1}\right)^2} \right]}{I_0(\beta)}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (8)$$

式中, N 表示窗口长度; β 表示形状因子。 β 的选择会影响主瓣宽度和旁瓣幅度^[24]。 β 的值越大, 凯塞窗的两端越尖, 则旁瓣幅度越低, 旁瓣衰减速度越大, 但是主瓣宽度也越大。 β 的值越小, 情况则相反, 凯塞窗的两端越宽, 旁瓣幅度越高, 旁瓣衰减速度越小, 主瓣宽度越窄。本文选取 β 的值为 2。

3 海平面高度反演实验

3.1 GTGU 站海平面高度反演实验

位于海拔高度 40.420 m 的 GTGU 站 (57.392 954 9° N, 11.913 488 6 $^\circ$ E) 由瑞典查尔姆斯理工大学翁萨拉空间天文台运营。天线的平均垂直位置约为距平均海平面上方 4 m, 海平面波动约为 2 m。如图 3 所示, 该站点配备了两个 Leica GRX1200 接收器和 Leica AR 25 天线, 可提供时间分辨率为 1 s 的 GPS 观测数据^[25]。为了最大化卫星轨道的数量, GTGU 站天线安装在正南方向。GTGU 站位置避开了海浪, 海平面变化主要受潮汐的影响。本实验采用 GTGU 站 2016 年 DOY 1-80 的 GPS L1 频段观测数据用于海平面高度反

演。为确保 SNR 数据来自海平面反射,方位角范围选取 $70^{\circ}\sim 210^{\circ}$ 。距离 GTGU 站约 1 km 的翁萨拉验潮站每分钟测量一次海平面高度,可用于 GNSS-R 海平面高度估测模型精度的验证。



图3 GTGU 站的环境和位置

Fig. 3 Environment and location of GTGU station

分离趋势项后,LSP 频谱分析法可用于提取 SNR 振荡项的振荡频率,并利用下列准则进行有效测高的质量控制:

- (1) LSP 频谱的最大幅度高于 20 V(1 s 的采样数据);
- (2) LSP 频谱的最大幅度高于 2 倍平均背景噪声;
- (3) LSP 频谱至少有 10 个以上的峰值;
- (4) LPS 频谱的最大幅度高于第二峰值幅度的 1.5 倍;
- (5) 有效海平面高度阈值 [2, 6]。

3.1.1 基于 VMD+LSP 的估测模型精度分析

实验数据选取 GTGU 站 2016 年 DOY 1-80 的 GPS L1 频段信号的 SNR 数据。为了验证 VMD 在处理 SNR 数据中的可行性,选取了一段 SNR 数据进行 VMD 与 LSF 趋势项拟合效果对比分析,其结果如图 4 所示。可以看出基于 LSF 得到的拟合结果对于复杂多变的 SNR 数据分离效果不佳;而 VMD 得到的 SNR 趋势项是基于 SNR 数据本身进行的拟合,其分离效果较佳而且保留了 SNR 数据的局部特征,为接下来 LSP 频谱分析提供了质量较高的时域信号。

实验期间选取 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 不同仰角范围的 SNR 数据用于探究低、高仰角对反演结果的影响,实验结果记录在表 1 中。从表 1 中可以看到,基于 VMD+LSP 的 GNSS-R 海平面高度反演结果的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)约为 5 cm,相关系数达到 0.98。从结果上看,低仰角范围的反演精度更高,但受限于 SNR 数据导致有效的反

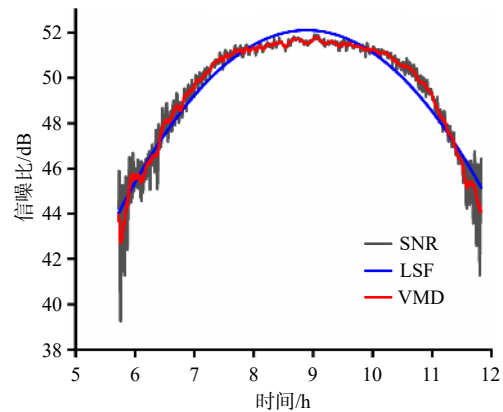


图4 趋势项拟合效果对比

Fig. 4 Comparison of the trend term fitting effect

黑色曲线表示原始的信噪比(SNR)数据,蓝、红色曲线分别表示通过最小二乘拟合法(LSF)和变分模态分解算法(VMD)拟合得到的趋势项

The black curve represents the original signal to noise ratio (SNR) data, and the blue and red curves represent the trend terms fitted by the least squares fitting (LSF) method and the variational mode decomposition (VMD) algorithm, respectively

表1 基于变分模态分解(VMD)算法的不同仰角范围的海平面高度反演结果

Table 1 Inversion results of sea level height in different elevation angle ranges based on variational mode decomposition (VMD)

仰角范围	RMSE/cm	相关系数	反演点数
$5^{\circ}\sim 15^{\circ}$	5.01	0.98	2 852
$5^{\circ}\sim 25^{\circ}$	5.18	0.98	4 545
$5^{\circ}\sim 30^{\circ}$	5.50	0.98	5 268

演点数较少。随着卫星仰角增大,多径信号与直射信号的相干成分越少,干涉效应越不明显,反演结果的 RMSE 越来越大,但由于 SNR 数据增多得到的有效反演高度也越来越多。因此, $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 仰角范围的 SNR 数据被用于接下来的实验。

在验证基于 VMD+LSP 的 GNSS-R 海平面高度估测模型精度同时,本文使用 LSF+LSP 和 EMD+LSP 等模型的反演结果进行精度对比分析,如图 5 所示。从图 5 可见,不同趋势项拟合方法的反演结果都与验潮站数据高度一致,具体的反演结果记录在表 2 中。从表 2 中,可以看到基于 VMD+LSP 的新模型反演精度最好,其 RMSE、相关系数和有效的反演点数分别为 5.50 cm、0.98 和 5 268,在 RMSE 和反演点数上相比于 LSF+LSP 的 6.69 cm 和 4 909 分别提高了约 17.8% 和 7.3%。EMD+LSP 的反演精度次之,其 RMSE、相

关系数和有效的反演点数分别为 5.58 cm、0.97 和 4 641, 相比于 LSF+LSP 在精度也有 16.6% 的提升, 但反演点数则有所减少。总体上, VMD+LSP 的反演精度优于 EMD+LSP 和 LSF+LSP, 这说明 VMD 能够更好地拟合 SNR 数据的趋势项, 分离信号后得到了更高质量的 SNR 振荡项用于频谱分析提取振荡频率。

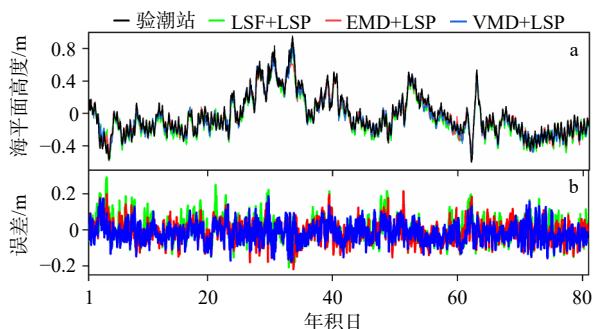


图 5 GTGU 站基于不同趋势项拟合方法的反演结果与验潮站数据的对比情况(a)以及海平面高度误差情况(b)

Fig. 5 Comparison of inversion results of GTGU Station based on different trend term fitting methods with tide gauge (a) and sea level height error (b)

表 2 基于最小二乘拟合+频谱分析 (LSF+LSP)、经验模态分解+频谱分析 (EMD+LSP) 和变分模态分解+频谱分析 (VMD+LSP) 的 GTGU 站海平面高度反演结果的精度对比
Table 2 Accuracy comparison of sea level height inversion results of GTGU Station based on least squares fitting+lomb-scargle periodogram (LSF+LSP), empirical mode decomposition+lomb-scargle periodogram (EMD+LSP) and variational mode decomposition+lomb-scargle periodogram (VMD+LSP)

方法	RMSE/cm	相关系数	反演点数
LSF+LSP	6.69	0.96	4 909
EMD+LSP	5.58	0.97	4 641
VMD+LSP	5.50	0.98	5 268

3.1.2 基于 VMD+WinLSP 的估测模型精度分析

本文在构建基于 VMD 的 GNSS-R 海平面高度估测模型的基础上, 利用 WinLSP 频谱分析法结合提高海平面高度的反演精度。图 6 展示了 LSF+WinLSP、EMD+WinLSP 和 VMD+WinLSP 的海平面高度反演结果。从图 6 中可以看出各模型的反演结果与验潮站数据高度一致, 结果记录在表 3 中。对比表 2 和表 3, 可以看出不同趋势项拟合方法基于 WinLSP 的反演结果的精度相比于 LSP 有所提升。从 RMSE 上看, 加窗前、后基于 LSF 的海平面高度反演结果精度提升得最明显, 由原本的 6.69 cm 减小到 5.50 cm, 减少了

18%。VMD 的提升效果次之, RMSE 减小了 15%, 由 5.50 cm 减少到 4.70 cm; 而 EMD 的 RMSE 由 5.58 cm 减小到 5.51 cm, 几乎无变化。从得到的有效反演点数上看, WinLSP 相比于 LSP 提高了振荡频率提取的精度, 使得更多的结果符合质量控制的要求。加窗前、后基于 LSF、EMD 和 VMD 的反演点数分别增加了 11%、17% 和 7%。在各个组合中, 基于 VMD+WinLSP 的 GNSS-R 海平面高度估测模型的精度最高。相比于传统模型的 LSF+LSP, VMD+WinLSP 的反演结果的 RMSE 减小了 1.99 cm, 并且增加了 738 点反演点数, 即精度和 GNSS 数据利用率分别提高了 29.7% 和 15%。

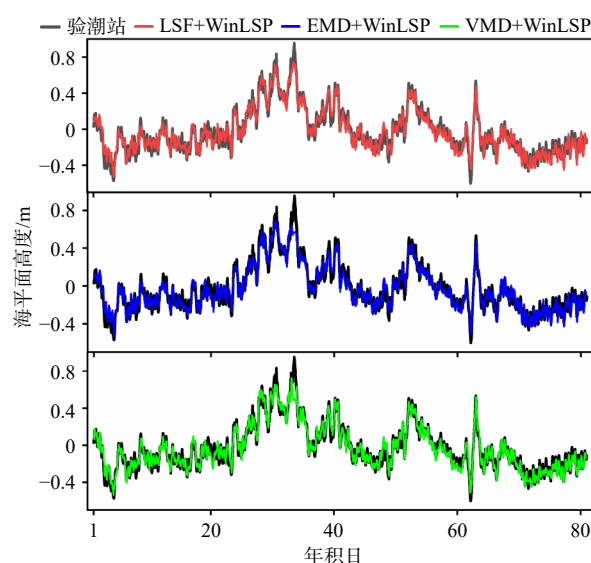


图 6 GTGU 站基于加窗的频谱分析 (WinLSP) 反演结果与验潮站数据的对比情况

Fig. 6 Comparison of inversion results based on lomb-scargle periodogram with window (WinLSP) of GTGU Station with tide gauge

表 3 基于最小二乘拟合+加窗的频谱分析 (LSF+WinLSP)、经验模态分解+加窗的频谱分析 (EMD+WinLSP) 和变分模态分解+加窗的频谱分析 (VMD+WinLSP) 的 GTGU 站海平面高度反演结果的精度对比
Table 3 Accuracy comparison of sea level height inversion results of GTGU Station based on least squares fitting+lomb-scargle periodogram with window (LSF+WinLSP), empirical mode decomposition+lomb-scargle periodogram with window (EMD+WinLSP) and variational mode decomposition+lomb-scargle periodogram with window (VMD+WinLSP)

方法	RMSE/cm	相关系数	反演点数
LSF+WinLSP	5.50	0.97	5 439
EMD+WinLSP	5.51	0.97	5 450
VMD+WinLSP	4.70	0.98	5 647

3.2 SC02站海平面高度反演实验

SC02(48.5°N, 123.0°W)站位于美国西海岸的华盛顿州星期五港口,天线的平均垂直位置约在距海平面以上5.5 m,海平面波动约3 m。该测站装置包括一个与Trimble NETRS GPS接收器相连的Trimble TRM29659.00天线,以15 s为一个采样周期记录数据。本文使用了2021年DOY 152-211的GPS L1频段数据开展海平面高度反演实验。为保障SNR数据来自海平面反射,选取该站的仰角范围为5°~15°,方位角范围为50°~240°。Friday Harbor验潮站由NOAA运营,位于SC02站以西约300 m处并以6 min的采样间隔记录海平面观测数据。有效高度的质量控制准则与GTGU站点类似,其中的有效海平面高度阈值改为[2, 9]。

3.2.1 基于VMD+LSP的估测模型精度分析

与GTGU站点一致,本文采用LSF、EMD和VMD 3种不同的趋势项拟合方法结合LSP频谱分析法在SC02站开展海平面高度反演实验,如图7所示。从图7中可以观察到SC02站的海平面波动相比于GTGU站更剧烈但更加符合潮水涨退的规律。基于LSF+LSP、EMD+LSP和VMD+LSP的海平面高度反演结果都取得了不错的反演精度,而且似乎更多的反演结果都集中在低于实验期间平均海平面处。此外,一些离散的反演结果仍然存在,但都在可以接受的范围内。不同方法的反演精度记录在表4中。不同方法的反演结果的精度没有显著差别,相关系数都达到了0.99,不过可以看到VMD相比于LSF和EMD在

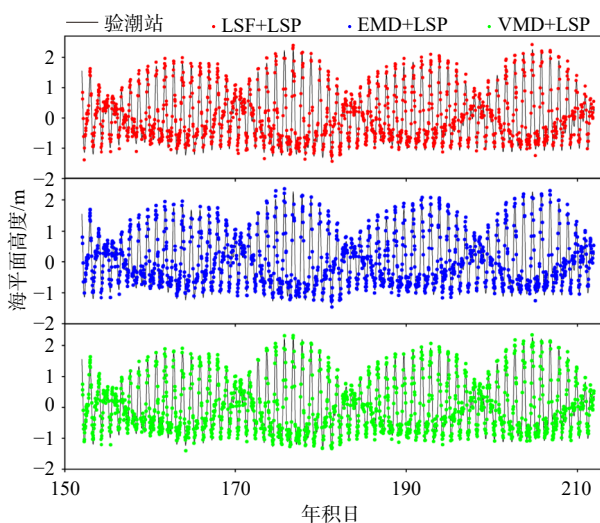


图7 SC02站基于不同趋势项拟合方法的反演结果与验潮站数据的对比情况

Fig. 7 Comparison of the inversion results of SC02 Station based on different trend term fitting methods with the tide gauge

表4 基于最小二乘拟合+频谱分析(LSF+LSP)、经验模态分解+频谱分析(EMD+LSP)和变分模态分解+频谱分析(VMD+LSP)的SC02站海平面高度反演结果的精度对比

Table 4 Accuracy comparison of sea level height inversion results of SC02 Station based on least squares fitting+lomb-scargle periodogram (LSF+LSP), empirical mode decomposition+lomb-scargle periodogram (EMD+LSP) and variational mode decomposition+lomb-scargle periodogram (VMD+LSP)

方法	RMSE/cm	相关系数	反演点数
LSF+LSP	16.36	0.99	1 632
EMD+LSP	15.83	0.99	1 641
VMD+LSP	14.46	0.99	1 723

RMSE和反演点数上具有一定的优势。LSF+LSP、EMD+LSP和VMD+LSP三者的RMSE分别是16.36 cm、15.83 cm和14.46 cm,反演点数分别是1 632、1 641和1 723。相比于传统的LSF+LSP估测模型,本文提出的VMD+LSP在RMSE上减小了1.9 cm且增加了91的反演点数,即RMSE和GNSS数据的利用率分别提高了11.6%和5.6%。

3.2.2 基于VMD+WinLSP的估测模型精度分析

在GTGU站的海平面高度反演实验的结果表明,WinLSP频谱分析法提取SNR振荡项的频率能够减弱因频谱泄露带来的影响,即提高反演精度。为验证提出的WinLSP方法在不同观测站的可行性,本文在SC02站开展重复实验。图8展示了实验期间SC02站基于LSF+WinLSP、EMD+WinLSP和VMD+WinLSP的海平面高度反演结果。与图7相似,从图8中可以看到实验期间平均海平面上、下区域的反演结果并不均匀,大多集中在下半区域。表5记录了基于WinLSP的估测模型的精度分析结果。对比表5中不同方法的反演精度,LSF+WinLSP和EMD+WinLSP的反演精度十分接近,VMD+WinLSP的反演精度则较优于前两者。对比表4和表5,可以看出基于WinLSP的反演结果的精度相比于LSP有所提升,而且适用于不同的趋势项拟合方法。从RMSE上看,加窗前、后LSF的海平面高度反演结果精度提升得最明显,由原本的16.36 cm减小到15.45 cm,减小了6%,而EMD和VMD的提升效果几乎可以忽略不计。从得到的有效反演点数上看,不同方法加窗后反演点数都得到了不同程度的提升。与传统的LSF+LSP对比发现,最优的VMD+WinLSP估测模型的反演结果的RMSE小了2.02 cm,并且增加了153点反演点数,即精度和GNSS数据利用率分别提高了约12.3%和9.4%。

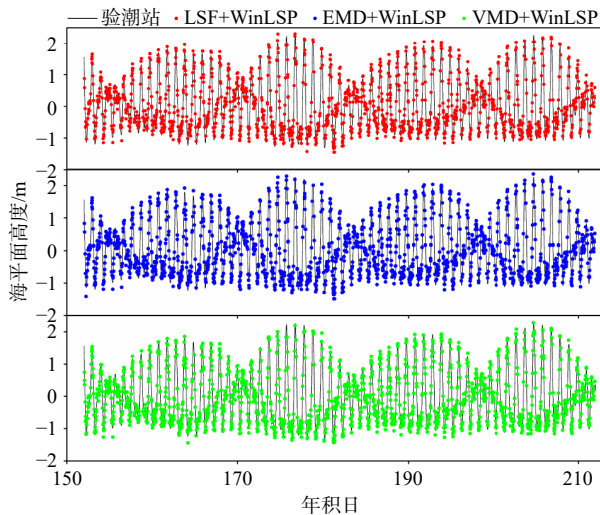


图 8 SC02 站基于加窗的频谱分析的反演结果与验潮站数据的对比情况

Fig. 8 Comparison of inversion results based on Lomb-Scargle Periodogram with window (WinLSP) of SC02 Station with tide gauge

表 5 基于最小二乘拟合+加窗的频谱分析 (LSF+WinLSP)、经验模态分解+加窗的频谱分析 (EMD+WinLSP) 和变分模态分解+加窗的频谱分析 (VMD+WinLSP) 的 SC02 站海平面高度反演结果的精度对比

Table 5 Accuracy comparison of sea level height inversion results of SC02 Station based on least squares fitting+lomb-scargle periodogram with window (LSF+WinLSP), empirical mode decomposition+lomb-scargle periodogram with window (EMD+WinLSP) and variational mode decomposition+lomb-scargle periodogram with window (VMD+WinLSP)

方法	RMSE/cm	相关系数	反演点数
LSF+WinLSP	15.45	0.99	1 696
EMD+WinLSP	15.44	0.99	1 725
VMD+WinLSP	14.34	0.99	1 785

3.3 讨论与分析

通过在 GTGU 站和 SC02 站的海平面高度反演实验的结果可见,不同观测站的反演精度以及本文提出的估测模型的提升效果皆存在差异。GTGU 站所处海平面波动较平稳,因此所得反演精度较高可达厘米级。相比而言,SC02 站所观测海平面波动较大,且由

参考文献:

- [1] Bindoff N L, Willebrand J, Artale V, et al. Observations: oceanic climate change and sea level[M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 385–433.
- [2] Martín-Neira M, Caparrini M, Font-Rossello J, et al. The PARIS concept: an experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 142–150.

于观测位置处于港口处,信号质量受到港口处频繁来往船只的影响。因此反演精度较低,仅为分米级。此外,GTGU 站和 SC02 站的采样频率也存在明显的差异,分别为 1 s 和 15 s。提出的估测模型的精度提升效果是多因素共同影响的结果。

4 结论与展望

高精度、低成本、长时间监测海平面高度变化对于气候学和水资源管理等研究具有重要的现实意义。根据传统的海平面高度估测模型存在的不足,本文构建了 VMD 和 WinLSP 结合的 GNSS-R 海平面高度估测模型,在提高反演精度的同时提高了 GNSS 数据的利用率。本文的主要结论如下:

(1)传统的趋势项拟合方法多依赖于最小二乘低阶多项式拟合法,受限于多项式的限制对 SNR 数据的拟合效果有效。VMD 对于 SNR 数据趋势项的拟合不拘于具体形式,能够根据中心频率的不同对原始数据进行分解,为频谱分析提供更高质量的 SNR 振荡项。

(2)传统模型采用 LSP 频谱分析法提取 SNR 振荡项中的振荡频率时有可能出现频谱泄露的问题,本文引入的基于凯塞窗函数改进的 LSP 频谱分析法减小了因频谱泄露导致的误差,提高了反演精度和 GNSS 数据利用率。

(3)通过在瑞典翁萨拉的 GTGU 站和美国阿拉斯加州的 SC02 站开展的海平面高度反演实验的结果表明,与传统模型精度相比,本文提出的 VMD+WinLSP 估测模型在 GTGU 站的反演精度和 GNSS 数据利用率分别提高了约 29.7% 和 15.0%;在 SC02 站的反演精度和 GNSS 数据利用率分别提高了约 12.3% 和 9.4%。

综上所述,本文提出的基于 VMD+WinLSP 的海平面高度估测模型是可行的,而且提高了反演精度和 GNSS 数据的利用率。此外,本文提出的海平面估测模型仍存在一些需要解决的问题,如 VMD 最佳分解层数的确定以及估测模型对于其他卫星系统的适用性等。在将来,也许能够结合 GNSS 接收机与提出的估测模型构建一套高精度的海平面高度数据产品并推广到全球范围。

- [3] Yoshihara T, Saito S, Fujii N, et al. A study on detection of sea level variation using GPS signal reflected by sea surface[C]//Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. Monterey: ION, 2006: 217–223.
- [4] 张勇, 符养, 李焯, 等. 一种新型星载GNSS-R系统的地面验证实验[J]. *海洋测绘*, 2013, 33(1): 18–21, 25.
Zhang Yong, Fu Yang, Li Ye, et al. A ground experiment to demonstrate a new satellite-based GNSS-R system[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(1): 18–21, 25.
- [5] Zhang Yun, Tian Luman, Meng Wanting, et al. Feasibility of code-level altimetry using coastal BeiDou reflection (BeiDou-R) setups[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 4130–4140.
- [6] Treuhaft R N, Lowe S T, Zuffada C, et al. 2-cm GPS altimetry over Crater Lake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(23): 4343–4346.
- [7] 姚彦鑫, 杨东凯, 张其善. 利用GNSS反射信号载波测量湖面高度变化[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(9): 1072–1075.
Yao Yanxin, Yang Dongkai, Zhang Qishan. Lake height variation measurement utilizing GNSS reflected signal carrier phase[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(9): 1072–1075.
- [8] Löfgren J S, Haas R, Johansson J M. Monitoring coastal sea level using reflected GNSS signals[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2): 213–220.
- [9] Zhang Yun, Li Binbin, Tian Luman, et al. Phase altimetry using reflected signals from BeiDou GEO satellites[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1410–1414.
- [10] Hu Yuan, Yuan Xintai, Liu Wei, et al. GNSS-IR model of sea level height estimation combining variational mode decomposition[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 10405–10414.
- [11] 胡媛, 袁鑫泰, 陈行杨, 等. 小波变换和改进Burg算法的GNSS-IR海面高度反演模型[J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(1): 21–24, 53.
Hu Yuan, Yuan Xintai, Chen Xingyang, et al. GNSS-IR model of sea level altimetry inversion combining wavelet transform with improved burg algorithm[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(1): 21–24, 53.
- [12] Larson K M, Ray R D, Nievinski F G, et al. The accidental tide gauge: a GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1200–1204.
- [13] Löfgren J S, Haas R, Scherneck H G. Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world[J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 80: 66–80.
- [14] York D. Least squares fitting of a straight line with correlated errors[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1968, 5: 320–324.
- [15] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 39(2): 447–462.
- [16] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Hu Gangshu. Digital Signal Processing: Theory, Algorithm and Implementatio[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [17] Nievinski F G, Larson K M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation—Part II: Application and validation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6564–6573.
- [18] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531–544.
- [19] Huang N E, Shen Zheng, 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: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903–995.
- [20] 张慧娟, 李冬. 相关系数判决的EMD在振动数据趋势项提取中的应用[J]. *舰船电子工程*, 2018, 38(5): 159–163.
Zhang Huijuan, Li Dong. Application of EMD of correlation coefficient judgment in the extraction of vibration data trend[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(5): 159–163.
- [21] 胡媛, 袁鑫泰, 刘卫, 等. 基于VMD-MA的GNSS-MR雪深监测方法[J/OL]. *北京航空航天大学学报*, 1–12[2022–06–01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=BJHK20220323001&uniplatform=NZKPT&v=OizuDw5HNuMENFcfLu3840zfDU9p8qGXT15-9q9hf8ZmWIDAORcjPsmh9G8awJe>. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0777
Hu Yuan, Yuan Xintai, Liu Wei, et al. GNSS-MR snow depth monitoring method based on variational mode decomposition and moving average[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1–12[2022–06–01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=BJHK20220323001&uniplatform=NZKPT&v=OizuDw5HNuMENFcfLu3840zfDU9p8qGXT15-9q9hf8ZmWIDAORcjPsmh9G8awJe>. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0777
- [22] 杨婧, 程乃平, 倪淑燕. Welch算法在弱信号检测中的性能分析[J]. *计算机仿真*, 2020, 37(5): 235–240.
Yang Jing, Cheng Naiping, Ni Shuyan. Performance analysis of welch algorithm in weak signal detection[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(5): 235–240.
- [23] Lin Yuanpei, Vaidyanathan P P. A Kaiser window approach for the design of prototype filters of cosine modulated filterbanks[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1998, 5(6): 132–134.
- [24] Arya R, Jaiswal S. Design of low pass FIR Filters using Kaiser window function with variable parameter Beta (β)[J]. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 2015, 3: 220–224.
- [25] Geremia-Nievinski F, Hobiger T, Haas R, et al. SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(8): 1–15.

GNSS-R sea level height estimation model based on the combination of VMD and WinLSP

Hu Yuan¹, Yuan Xintai¹, Liu Wei², Hu Qingsong¹, Jiang Zhihao¹, Zhong Licheng¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Global navigation satellite system-reflectometry (GNSS-R) technology is an emerging technology for monitoring sea level changes. Based on the principle of the signal to noise ratio (SNR) analysis method in GNSS-R technology, this paper established a new sea level height estimation model to improve the accuracy by analyzing the process of separating the trend term and extracting the oscillation frequency. Aiming at the problem of poor signal separation in the traditional model, this paper proposed to use the variational mode decomposition (VMD) algorithm to replace the traditional least squares fitting (LSF) to separate the trend term components. On this basis, this paper combined Lomb-Scargle Periodogram (LSP) spectral analysis method and Kaiser window function (referred to as WinLSP) to reduce the inversion error caused by spectral leakage. The results of sea level inversion experiments carried out at GTGU Station in Onsala, Sweden and SC02 Station in Alaska, USA show that the estimation model established in this paper has higher inversion accuracy than traditional model. The root mean square error (RMSE), correlation coefficient and number of inversion points of the inversion results of GTGU Station based on the VMD+WinLSP estimation model are 4.70 cm, 0.98 and 5 647, respectively. The inversion accuracy and GNSS data utilization are increased by about 29.7% and 15.0%, respectively; The RMSE, correlation coefficient, and inversion points of SC02 Station are 14.34 cm, 0.99 and 1 785, respectively, and the inversion accuracy and GNSS data utilization are increased by about 12.3 % and 9.4%.

Key words: global navigation satellite system-reflectometry; signal to noise ratio; variational mode decomposition; Kaiser window function