引文格式：朱思明,陈海尊,李倩霞,等. 基于模态分解的GNSS观测环境影响辨识研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 70-75. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.07.013

# 基于模态分解的GNSS观测环境影响辨识研究

朱思明[1]，陈海尊[1]，李倩霞[2]，李晨阳[1*]，夏林元[2]
（1. 广州国测规划信息技术有限公司，广东 广州 510630；2. 中山大学 地理科学与规划学院，广东 广州 510006）

**摘　要：**针对GNSS复杂的环境影响因素，从GNSS观测量中包含的多路径和电离层影响分析入手，提出了基于模态分解与组合观测量序列频谱识别的GNSS典型影响因素监测与分析方法；采用Hilbert-Huang变换方法分析GNSS基本观测量所受的影响，重点诊断和分析低纬度区域的电离层异常以及城市环境的多路径影响。该方法在定位解算前直接对GNSS观测值的内蕴性进行模态分析，得到不同频程下的频谱特征结果，再结合典型影响事件及其固有能谱特征，形成两种典型影响事件的频谱与能谱对照，无需对多路径、电离层等复杂误差进行建模即可同时进行辨识分析。结果表明，该方法可同时辨识复杂的影响因素，具有独特技术优势与应用前景，扩展了GNSS定位系统的影响因素诊断与分析的技术体系。

**关键词：**GNSS观测量；电离层扰动；多路径效应；Hilbert-Huang变换
**中图分类号：**P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0070-06

# Identification of Environmental Impacts on GNSS Observations Based on Mode Decomposition

ZHU Siming[1], CHEN Haizun[1], LI Qianxia[2], LI Chenyang[1], XIA Linyuan[2]
(1. Guangzhou Guoce Planning Information Technology Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;
2. School of Geography and Planning, Sun Yate-Sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In view of the complex environmental influence factors of GNSS, starting from the multipath and ionospheric influence analysis contained in GNSS observations, we proposed a monitoring and analysis method for typical influence factors of GNSS based on mode decomposition and spectral identification of combined observation sequence. We adopted the Hilbert-Huang transformation method to analyze the influence factors on the basic observations of GNSS, with a focus on diagnosing and analyzing ionospheric anomalies in low-latitude regions and the multipath influence of urban environment. This method directly conducts mode analysis on the intrinsic properties of GNSS observations before positioning and solution, obtaining spectral characteristic results at different frequency bands. Then, by combining typical influence events and their inherent energy spectrum characteristics, the method forms a comparison of the spectra and energy spectra of two typical influence events, which can simultaneously carry out identification and analysis without modeling complex errors such as multipath and ionospheric errors. The results show that this method can simultaneously identify complex influence factors, has unique technical advantages and application prospects, and expands the technical system of diagnosing and analyzing influence factors in GNSS positioning systems.

**Key words:** GNSS observation, ionospheric disturbance, multipath effect, Hilbert-Huang transformation

随着我国北斗导航定位系统的广泛应用和多模GNSS的快速发展，广大用户尤其是消费级和AI行业用户对导航定位的精确性、安全性提出了更严格的要求[1-2]。因此，系统影响因素分析与完好性评估成为GNSS的重要关注课题[3-4]。GNSS误差影响源中的电离层扰动、多路径效应、对流层延迟和潜在干扰等因素仍是卫星导航定位的核心研究对象，对这些顽性误差进行建模、分析一直是精化定位性能的重要任务与研究热点[5-6]。在低空经济发展的推动下，城市环境中的无人驾驶、位置服务以及AI应用都需要GNSS导航定位的精确性保障，因此GNSS系统的影响因素监测与发现是研究与分析的重要内容。

在城市环境中，多样性建筑物和复杂地形使得多路径效应十分显著，导致导航信号的波动和衰减，从而影响定位服务的稳定性和准确性。目前降低多路径效应对导航定位精度影响的技术措施包括接收机硬件[7-8]和天线[8-9]改进，虽然可提高定位精度，但会增加设备重量和成本，在非测地型接收机上的应用受限。

项目来源：广东省重点研发计划资助项目（2020B0101130009）。
第一作者简介：朱思明（1980—），本科，高级工程师，从事工程测量、摄影测量与遥感以及地理信息系统工程工作，E-mail：117227294@qq.com。
通信作者：李晨阳（1993—），本科，工程师，从事工程测量、摄影测量与遥感以及地理信息系统工程工作，E-mail：876178181@qq.com。

采用数据处理优化算法[10-12]也可削弱多路径效应的影响，但只适用于静态观测。近年来许多学者利用城市3D地图和周边建筑物高程信息来识别并消除多路径效应影响[13-14]，但需要额外提供观测环境的三维数字模型和高程资料，不便于大众导航用户使用。大气延迟是GNSS导航定位环境的另一个显著影响因素，尤其是电离层延迟与扰动。电离层受太阳高能辐射和宇宙线的激励而产生部分或完全电离的带电粒子，其电子密度和厚度随着太阳活动周期、地理位置和时间的变化而变化，直接影响GNSS卫星信号的传播速度和路径，在太阳活动活跃时将直接导致定位误差增加或定位无法进行，在低纬地区经常导致野外观测和导航服务异常。目前应对电离层干扰的方法包括合适观测时间选择、经验模型估算、差分数据处理、双频或多频接收机选用、区域或全球观测网络建模等。单频接收机利用经验数学模型估算电离层延迟，通常可减少约60%的电离层影响[15]。双频或多频接收机可通过不同频率的信号组合来测定电离层延迟，通常可以消除电离层的线性项，但残余高阶项延迟仍会对定位产生一定的影响[16]。差分数据处理利用一定区域范围内的电离层相似性削弱其影响，但大范围的电离层延迟影响则需采取多基站观测，形成去相关的模型与数据处理方法，如我国北斗导航系统采用专门的导航电文发布电离层参数，形成广域增强的电离层延迟应对框架[16-17]。电离层影响的复杂性、对低纬度地区影响严重、观测环境中多路径效应以及城市中无线电信号多样性与潜在干扰，共同形成了GNSS观测环境的脆弱性[18]。除针对单一影响因素进行建模外，部分学者[19-20]在GNSS定位数据处理与粗差发现方面，结合卡尔曼滤波和残差统计检验过程进行粗差发现、诊断、加权处理与削减，并形成了动态自适应的抗差控制与优化数据处理算法。这类方法未对复杂的误差源进行区分与识别，各类误差的综合影响以耦合的模式进行加权控制。在评估GNSS观测量的误差预处理方面，美国卫星导航系统与地壳形变观测研究大学联合体于2019年2月25日发布了新版本的TEQC软件包，支持GNSS地学研究的监测数据管理服务，其质量检核可反映GNSS观测数据的电离层延迟、多路径影响、接收机周跳、卫星信号信噪比等信息，其中伪距多路径由相位与伪距差的均值得到，电离层延迟则由双频或多频观测组合值计算得到[21]。综上所述，导航定位环境的复杂性导致了GNSS导航定位的环境脆弱性，在导航服务产业不断推进的形势下，如何有效提升这种环境影响的辨识能力，是国内外关注的学术与技术热点。

本文从GNSS观测量及其组合出发，同步分析观测量中包含的电离层、多路径两个典型环境影响因素；并以Hilbert-Huang变换的模态识别为基础，充分利用经验模态分解（EMD）的自适应性，克服了分析模型对观测序列的正态性要求，摆脱了平稳性与线性的局限。本文方法无需对单一影响因素建立模型，可直接辨识静态、动态导航环境下GNSS观测中包含的电离层延迟与多路径影响，形成了GNSS观测中复杂误差一体化处理模式。

## 1　GNSS观测量及其组合

在GNSS的基本观测量表达中，忽略导航信号的内部延迟，假设系统的各项偏差（码偏差、频偏差）已按照相关信息进行改正，则伪距和相位的观测方程可表示为：

$$\rho=\rho_0+c\delta t_r-c\delta t^s-I-T+M_\rho+\varepsilon_\rho \tag{1}$$

$$\lambda_\varphi=\rho_0+c\delta t_r-c\delta t^s-\lambda N+I-T+M_\varphi+\varepsilon_\varphi \tag{2}$$

式中，$\rho$ 为伪距观测值；$\varphi$ 为相位观测值；$\rho_0$ 为接收机到卫星的欧氏距离；c 为光速；$\delta t_r$ 为接收机钟差；$\delta t^s$ 为卫星钟差；$\lambda$ 为波长；$N$ 为载波相位的整周模糊度；$I$ 为电离层延迟改正值；$T$ 为对流层延迟改正值；$M$ 为多路径效应；$\varepsilon$ 为观测噪声、接收机硬件延迟等误差的总和。

伪距与相位的组合观测量为：

$$P_L=\rho-\lambda_\varphi=\lambda N-2I+(M_\rho-M_\varphi)+(\varepsilon_\rho-\varepsilon_\varphi) \tag{3}$$

在 $P_L$ 中若载波相位不发生周跳或经过周跳修复，则 $N$ 具有不变性，为一个常数，因此 $P_L$ 的变化是由 $I$、多路径效应 $(M_\rho-M_\varphi)$ 以及噪声误差 $(\varepsilon_\rho-\varepsilon_\varphi)$ 引起的。电离层延迟会随时间发生变化，多路径误差也会随着卫星的移动而变化，因此在混合序列中无法区分与辨识电离层延迟和多路径误差，需要借助模态分解和频谱分析方法进行综合辨识。为与双频条件下的另一种多路径误差表达相对照，在式（1）、（2）表达式和指标含义不变的情况下，接收机可获得双频相位观测量时，伪距观测值中的多路径影响可表示为[21]：

$$M_\rho=\rho-\frac{f_1^2+f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\lambda_1\varphi_1+\frac{2f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\lambda_2\varphi_2+k(N_1,N_2,\varepsilon_\rho) \tag{4}$$

式中，$f_1$、$f_2$ 为载波频率。

由式（4）可知，由于利用双频相位消除了电离层延迟，若相位观测值中没有周跳且保持卫星连续锁定，则该组合主要反映伪码的多路径误差和观测噪

声，而噪声通常具有高斯性质，因此伪码的多路径表达比较清晰。这种组合需要双频接收机，但大众终端难以采用双频设备，因此本文分析主要采用单频观测量，利用式（3）的组合序列方式同步分析电离层延迟和多路径效应。

## 2 Hilbert-Huang变换

直接在观测域进行GNSS观测环境影响辨识分析，虽然避免了复杂的建模，但卫星导航定位受电离层扰动、卫星健康状况、多路径效应、潜在信号干扰、仪器热噪声等诸多因素影响，其观测序列或组合观测值序列具有非线性、非平稳性特征，给分析方法带来了挑战。小波变换可对序列进行多时频的层次分解，为描述隐含的某事件信号的时频变化提供基础；但小波函数的选择具有主观性，且时频尺度划分的归一性限制了其应用。1998年Norden E等提出了本征模函数（IMF）的概念，形成了将任意信号或序列分解为IMF的EMD方法，并引入了Hilbert谱的概念和Hilbert分析方法。美国国家航空和宇航局将该方法命名为Hilbert-Huang变换（HHT）[22]，主要包括EMD和Hilbert谱分析两个部分。

EMD是一种适用于非线性、非平稳信号处理的自适应分解方法，根据信号自身的时间尺度特征获得若干个IMF，每个IMF均需满足两个条件：①零点数目与极值点数目相等或差值最大为1；②IMF上下包络线的均值在任意时刻都为0。假设原始信号为 $y(t)$，EMD的分解原理为[22-23]：①找出信号 $y(t)$ 所有的极大值和极小值点序列，基于二者利用三次样条函数构造 $y(t)$ 的上、下包络线；②计算上下包络线的均值序列 $m(t)$，提取信号细节 $h(t) = y(t) - m(t)$；③检验 $h(t)$ 是否满足IMF的两个条件，若不满足，则对 $h(t)$ 重复步骤①、②，直至满足条件，记为 $c(t) = h(t)$；④计算分解后的残余项 $r(t) = y(t) - h(t)$；⑤对 $r(t)$ 重复上述步骤，直至满足预先设定的停止准则，即可得到多个IMF和一个残余项。由此信号可表示为 $y(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i(t)+r_n(t)$。停止准则可设定为当最后一个IMF $(t)$ 或 $r(t)$ 比预期小时停止或当 $r(t)$ 变为单调函数无法再分解出IMF分量时停止。根据GNSS组合序列的分解残余项特性，本文采用第二个停止准则。各IMF分量是不同频率的平稳非线性信号，具有在时域上的局部化特征；而残余分量是趋势分量，可代表原始信号长期的变化趋势或平均态。

利用EMD方法对原始信号进行分解，得到 $n$ 个IMF分量；再对每个IMF函数 $c_i(t)$ 进行Hilbert变换，即

$$\tilde{c}_i(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{c_i(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

构造复变解析函数，则有：

$$z_i(t)=c_i(t)+j\tilde{c}_i(t)=a_i(t)e^{j\phi_i(t)} \tag{6}$$

式中，$a_i(t)$、$\phi_i(t)$ 为 $z_i(t)$ 的幅值和相位。

瞬时频率的表达式为：

$$f_i(t)=\frac{1}{2\pi}\omega_i(t)=\frac{1}{2\pi}\frac{d\times\phi_i(t)}{d\times t} \tag{7}$$

式中，$\omega_i(t)$ 为角速度。

$$y(t)=RP\sum_{i=1}^{n}a_i(t)e^{j\phi_i(t)}=RP\sum_{i=1}^{n}a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)\mathrm{d}t} \tag{8}$$

式中，$RP$ 为取实部；由于 $r_n(t)$ 是一个单调函数，因此省略。

Hilbert幅值谱，即Hilbert谱，记为：

$$H(\omega,t)=RP\sum_{i=1}^{n}a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)\mathrm{d}t} \tag{9}$$

由此可以得到边际谱为：

$$h(\omega)=\int_0^T H(\omega,t)\mathrm{d}t \tag{10}$$

$H(\omega,t)$ 精确描述了信号幅值在整个频率段上随时间和频率的变化规律，是时频谱；$h(\omega)$ 则反映了信号的每个频率在全局上的幅度贡献，代表统计意义上幅值在整个时间跨度上的累积幅值[22]。HHT的瞬时频率是通过对Hilbert变换求得的相位函数进行求导得到的，是局部性的；而傅立叶变换的频率是全局性的，小波变换的频率是区域性的。HHT能在筛选产生IMF时自适应产生基函数，不同于傅立叶变换和小波变换的人为选定基函数，能反映被分析数据或信号的客观特性，可使时间和频率同时达到很高的精度，且摆脱了线性和平稳性的束缚，适用于分析非线性非平稳信号[23]。

## 3 基于模态识别的GNSS观测环境影响辨识

### 3.1 GNSS组合观测量和HHT分析

根据上述理论框架，本文对广州市CORS基准站的GNSS实际观测数据进行模态分解，以揭示GNSS组合观测序列中各频率层次的分解结果与时频谱分布。实验利用Unicore UB370接收机进行数据采集，观测时间为2014年1月8日，采样率设置为1 s；选取北斗系统的GEO、IGSO、MEO卫星以及GPS卫星的观测量分别按式（3）形成组合观测量进行分解与分析。GEO轨道的C01卫星、IGSO轨道的C07卫星、MEO轨道的C11卫星以及GPS卫星G17在BDS B1、GPS L1频点下得到的伪距与相位组合观测值见图1，可以看出，C01和C07卫星由于轨道比MEO更高，且在天空的

移动范围有限（GEO 卫星理论上不移动，仅小范围漂移），因此组合观测量整体趋势呈直线，而MEO卫星由于绕地球运行，对应的组合观测量则呈微小弧线。

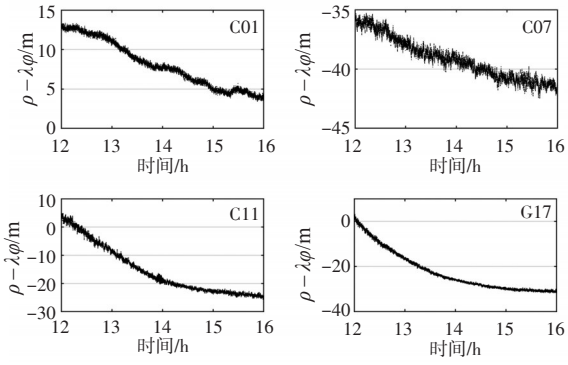



图 1　BDS/GPS 卫星伪距与相位差组合观测序列

根据 HHT 的基本原理分析 $P_L$ 的频谱特性，利用 2014 年 1 月 8 日广州 CORS 基准站数据，以北斗系统 IGSO 轨道的 C02 卫星为例，对其 B1 频点观测的 $P_L$ 进行 HHT 分析。C02 卫星在 22:00:45—22:20:44（20 min）正常观测信号的伪距与相位差见图 2a；对该组合序列进行EMD，得到的IMF和残余部分见图2c，可以看出从IMF1到IMF7的频率逐渐降低；对7个IMF进行Hilbert谱分析，形成HHT时频谱（图2b）。结果表明，组合观测序列中包含不同的频率谱值，根据GNSS定位中的误差因素特性，接收机噪声部分频率最高，表现在IMF1分解层次中；分析电离层与多路径的表现可知，电离层活动的持续周期（国际上播发电离层参数的频率为30 min或1 h）通常比多路径长，且活动频率较低；由分解结果可知，组合序列低频部分的振幅比高频部分大，说明电离层的频谱幅度较大，二者表现出的频率与振幅差异是其辨识区分的依据。

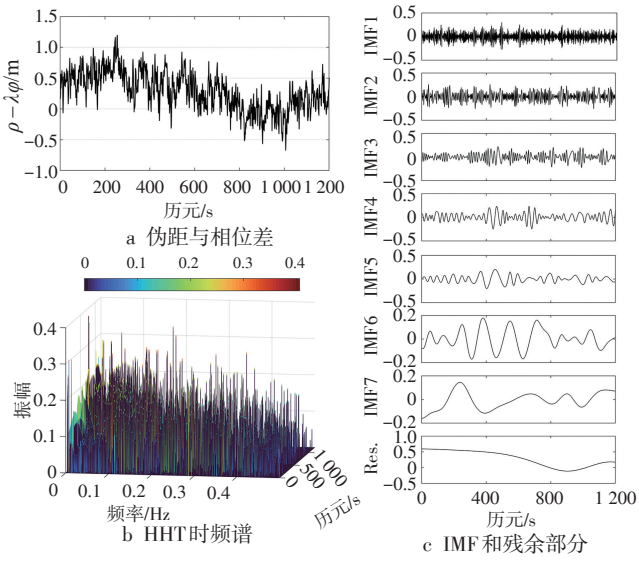



图 2　C02 卫星的伪距相位差、EMD 与时频谱结果

### 3.2　电离层闪烁辨识

由式（3）可知，卫星观测的伪距与相位差包含两倍电离层延迟、多路径等影响因素和整周模糊度等，若不存在周跳或周跳已被探测修复，整周模糊度为一个常数；多路径效应在短时间内（如几分钟）可认为变化较小，若发生电离层闪烁，将会引起电离层延迟的较大变化，导致定位误差变大甚至无法定位。国际上通常根据电离层闪烁强度指数 S4 进行对照判断。2015 年 10 月 19 日 11:00—18:00（UTC）在广州、中国香港等低纬度地区曾发生电离层闪烁现象，本文选取当天 G21 卫星 10:00—10:20 时段作为无电离层闪烁的样本数据，12:45—13:05 时段作为电离层闪烁下的样本数据，分别进行 HHT 分析，两个时段的伪距与相位差见图 3，因受到电离层闪烁影响，伪距与相位差的趋势发生了变化。对两种电离层条件下的伪距与相位差序列进行 EMD，得到的 IMF 结果见图 4；再对各 IMF 分量进行频谱变换，得到各 IMF 分量的频幅曲线（图 5）。由图 4 可知，EMD 对电离层平稳时的序列进行了 8 层分解，而对电离层活跃时的序列进行了 9 层分解，得到更细致的低频层次结果；电离层闪烁对伪距与相位差的影响主要集中在较低频部分的信号中。由图 5 可知，电离层闪烁对高频部分信号的振幅影响比低频部分小很多，实验中 0.05 Hz 以下的低频部分振幅大幅增加，说明电离层闪烁对该组合序列的影响主要在 0.05 Hz 以下的低频部分，主频率成分集中在 0.001 Hz 左右，相当于 20 min 左右的持续时间。

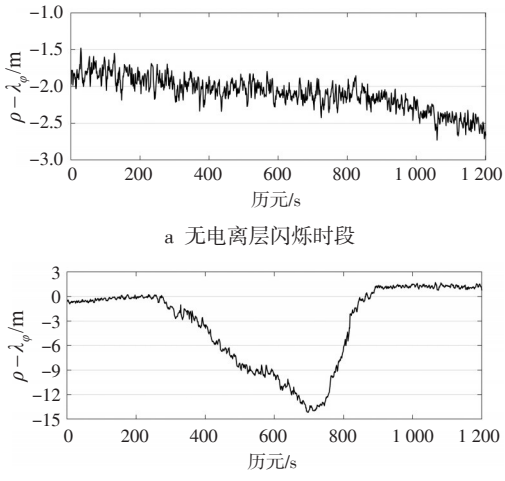
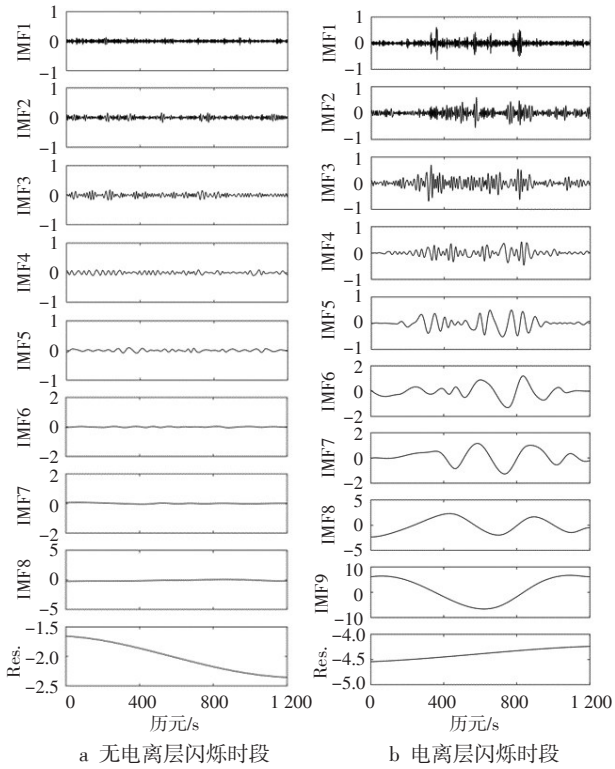


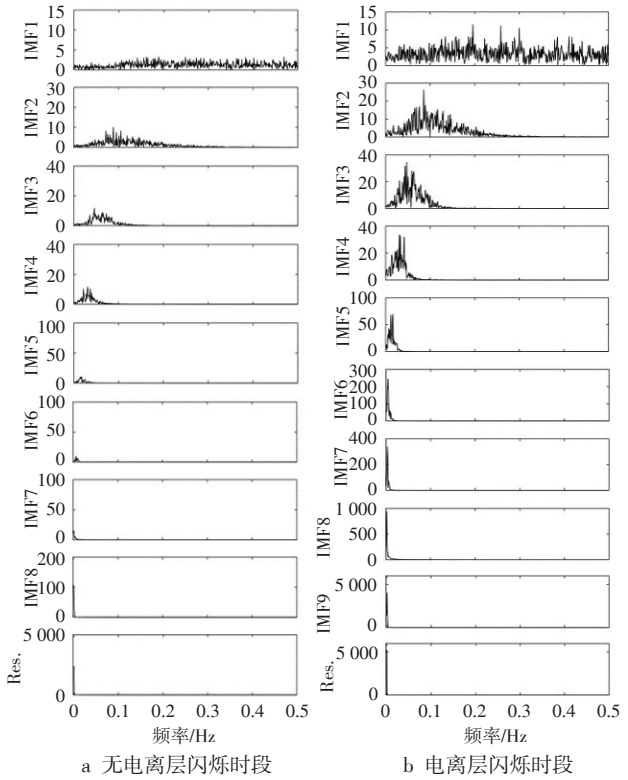

图 3　G21 卫星不同电离层条件的伪距与相位差序列

对两组信号的 IMF 分量进行 Hilbert 谱分析，得到的 HHT 时频谱（图 6），可以看出，电离层闪烁对 0.05 Hz 以下的低频信号影响较大，电离层闪烁主要存在于序列分解的低频信号部分（0.001 Hz），且信号频率越低，其幅值表现越明显，说明电离层闪烁时对观




a 无电离层闪烁时段　　b 电离层闪烁时段

图4　不同电离层条件下伪距与相位差序列的EMD分解结果

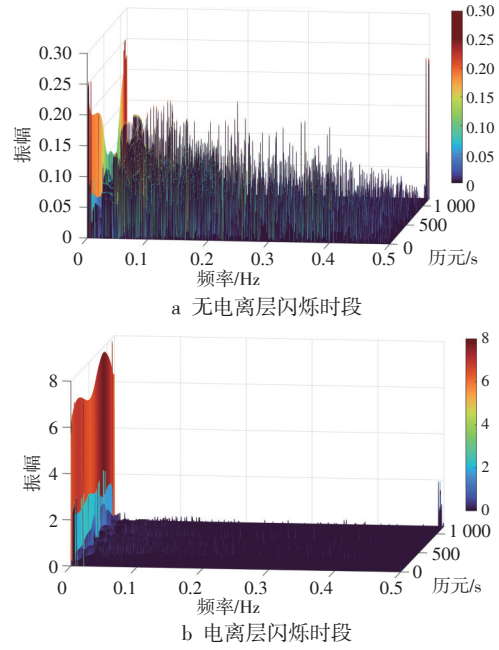



a 无电离层闪烁时段　　b 电离层闪烁时段

图5　不同电离层条件下伪距与相位差序列各IMF层次的频幅

测值的影响较大。

为分析比较本文方法的实际效果，利用HHT方法进行分析与辨识，得到闪烁时段的电离层影响量，并将其与国际电离层GIM模型建模结果进行比较（图7）。结果表明，HHT方法是从观测量及其组合出发，对穿过电离层的观测信号进行本征模态的分解与时频辨识，能发现并提取电离层的实际闪烁影响量；而国际GIM模型仅利用全球站点数据集进行电离层格网建模（分辨率通常为2 h），并通过时空拟合得到本地测站的电离层影响结果，因此时空现势性有限，无法如实反映短时间内（20 min）的闪烁细节变化。




a 无电离层闪烁时段

b 电离层闪烁时段

图6　不同电离层条件下伪距与相位差序列的HHT时频谱

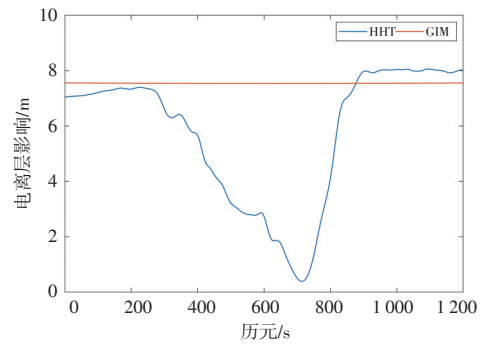
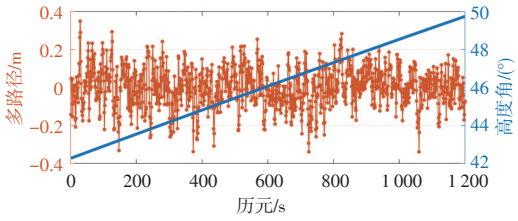



图7　HHT方法辨识电离层影响与GIM模型结果比较

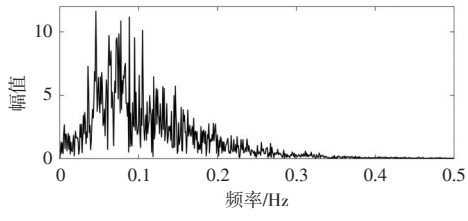
### 3.3　多路径效应辨识

为同时辨识分析多路径效应，采用无电离层闪烁的实验数据得到伪码多路径序列（图8a），G21卫星的高度角由42.28°升至49.74°；对照图4a，将伪码与相位差输入EMD模块进行分解，可以看出，与电离层活动的频率表现相比，多路径反射的影响主要体现在IMF2上，少部分较低频的成份在IMF3与IMF4上。进一步将多路径序列频谱结果（图8b）与HHT结果（图5a）进行对比，可以看出，多路径频率主要表现在HHT结果的IMF2上，部分低频率的成份在IMF3上，幅值也较接近，频率集中在0.07~0.1 Hz，多路径

效应的持续时间在10~15 s，比电离层闪烁的持续时间短。对比图6a可知，多路径和电离层不明显时，三维时频谱整体平稳；电离层活跃时，低频率部分能谱值比多路径大，形成了非常明显的时频谱特性差别。




a 伪码多路径序列




b 频谱

图8　G21卫星的伪码多路径序列及其频谱

## 4　结　语

结合GNSS服务的发展需求，针对GNSS观测环境中的电离层扰动和多路径干扰两个典型影响因素，运用基于模态分解与组合观测序列频谱识别的辨识分析方法，从GNSS基本观测量及其组合量入手，通过综合分析低纬度区域的电离层异常以及城市观测环境的多路径影响，在定位解算前直接对GNSS观测量进行模态分解，再结合典型影响事件及其固有特征，形成内蕴性的辨识技术框架，构成了新的预诊断分析理论线路和易于实施的技术方法。分析珠三角和粤港澳大湾区的观测实验数据发现，该方法具有独特的技术优势与应用前景。后续还需结合该方法进行多种验证，特别是如何进一步消除观测量中包含的误差影响。

## 参考文献

[1] 杜仲进. 基于u-blox的单频精密单点定位研究及其实现[J]. 地理空间信息,2017,15(3):69-71

[2] 丁兰兰,刘国栋. 搭载D-RTK GNSS的大疆M600无人机定位分析与误差改正[J]. 地理空间信息,2020,18(3):16-19

[3] 吴霖易. GNSS接收机自主完好性监测算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2023

[4] 陈蕾,裴凌,高为广,等. 北斗三号系统卫星自主完好性监测技术[J]. 导航定位与授时,2024,11(1):1-9

[5] 李晓宇,董绪荣,胡晓粉,等. 卫星导航系统完好性监测算法与模型研究综述[C]//卫星导航定位与北斗系统应用2013:应用北斗 光彩中国专题汇编,2013:305-311

[6] 刘钝,李锐. 卫星导航增强中的电离层扰动影响研究:基于系统可靠性工程的视角[J]. 全球定位系统,2023,48(1):3-13

[7] Hussain A, Ahmed A, Shah M A, et al. On Mitigating the Effects of Multipath on GNSS Using Environmental Context Detection[J]. Applied Sciences,2022,12(23):12389

[8] Xue Z, Lu Z, Xiao Z, et al. Overview of Multipath Mitigation Technology in Global Navigation Satellite System[J]. Frontiers in Physics,2022,10:1-18

[9] Xie L,Cui X,Zhao S,et al. Mitigating Multipath Bias Using a Dual-polarization Antenna: Theoretical Performance,Algorithm Design,and Simulation[J]. Sensors,2017,17(2):1-23

[10] Špánik P,García-Asenjo L,Baselga S. Optimal Combination and Reference Functions of Signal-to-noise Measurements for GNSS Multipath Detection[J]. Measurement Science and Technology,2019,30(4):1-13

[11] 刘太宗,何秀凤,贾东振,等. 观测值域恒星日滤波方法在高铁路基变形监测中的应用[J]. 导航定位学报,2023,11(1):39-47

[12] 韩军强,黄观文,李哲. 复杂环境下GNSS滑坡监测多路径效应分析及处理方法[J]. 地球科学与环境学报,2018,40(3):355-362

[13] 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

[14] Li S,Yang R,Zhan X. Characterization of Multi-band GNSS Multipath in Urban Canyons Using the 3D Ray-tracing Method[J]. GPS Solutions,2023,28(49):1-20

[15] 张强,赵齐乐,章红平,等. 北斗卫星导航系统Klobuchar模型精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(2):142-146

[16] 袁运斌,霍星亮,张宝成. 近年来我国GNSS电离层延迟精确建模及修正研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1364-1378

[17] 申丽丽. 支持海量用户的北斗/GPS多频网络RTK关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2020

[18] 刘春保. 卫星导航系统脆弱性评估与对策[J]. 卫星应用,2015(4):49-54

[19] 袁阳,周汝雁,张云. 扩展卡尔曼滤波的安卓手机定位算法研究[J]. 全球定位系统,2020,45(2):105-111

[20] Pullen S, Joerger M. GNSS Integrity and Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)[M]. Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century, Hoboken, John Wiley & Sons,2020

[21] 刘海锋,任超,郑中天,等. TEQC与QCVIEW32在GPS数据预处理中的应用[J]. 地理空间信息,2017,15(1):56-58

[22] Li Q, Xia L, Chan T, et al. Intrinsic Identification and Mitigation of Multipath for Enhanced GNSS Positioning[J]. Sensors,2021,21(1):1-21

[23] 杨永锋,吴亚锋. 经验模态分解在震动分析钟的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013