引文格式:李俊豪,王笑蕾.基于两种多路径参数的GNSS-MR植被指数反演特性对比与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1384-1394.DOI:10.13203/j.whugis20240411

Citation: LI Junhao, WANG Xiaolei. Comparison and Analysis of GNSS-MR Vegetation Index Inversion Characteristics Based on Two Multipath Parameters[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(7): 1384-1394. DOI: 10.13203/j.whugis20240411

基于两种多路径参数的GNSS-MR植被指数反演特性对比与分析

李俊豪[1] 王笑蕾[1]

1 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,211100

摘 要:归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是监测植被变化的重要参数之一。随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的不断发展,GNSS多路径反射测量技术被证明具有监测植被变化的潜力。基于GNSS信噪比数据提取的归一化振幅A_{norm}(normalized amplitude)和基于GNSS多路径数据提取的归一化微波反射指数(normalized microwave reflectance index, NMRI)是两类常用的NDVI反演参数。首先,利用板块边界观测网中P042、P052和P675 3个站点长达12年的GNSS数据进行实验,发现A_{norm}、NMRI与NDVI之间均存在良好的线性相关关系,相关系数介于0.58~0.86。然后,利用第五代欧洲中期数值预报中心大气再分析数据集及干旱数据,探讨气象干旱与NDVI、A_{norm}和NMRI之间的对应变化关系,当降水量较少、气候干旱时,对应的NDVI、A_{norm}和NMRI值均减小。最后,进一步提取了GPS、GLONASS和Galileo不同频点信号对应的NMRI参数,分析其与NDVI之间的相关性。结果表明,当站点周围植被类型为草地和农作物时,三大系统不同频点的NMRI均与NDVI呈现较好的对应关系,多模多频GNSS信号被证明具有植被指数可监测性。

关键词:GNSS-MR;NDVI;NMRI;归一化振幅;多模多频GNSS

中图分类号:P237;P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-05-09

DOI:10.13203/j.whugis20240411 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1384-11

Comparison and Analysis of GNSS-MR Vegetation Index Inversion Characteristics Based on Two Multipath Parameters

LI Junhao[1] *WANG Xiaolei*[1]

1 School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: **Objectives**: The normalized difference vegetation index (NDVI) is one of the important parameters for monitoring vegetation changes. With the continuous development of the global navigation satellite system (GNSS), GNSS multipath reflectometry technology has been proven to have the potential for monitoring vegetation changes. This paper aims to explore the correlations between NDVI and the normalized amplitude (A_{norm}) and normalized microwave reflectance index (NMRI) obtained from GNSS interferometry reflectometry to assess the application potential of GNSS signals in vegetation monitoring. **Methods**: The study used GNSS signal-to-noise ratio data to calculate A_{norm} and NMRI, analyzing their correlations with NDVI and change trends. In addition, total precipitation data from the European centre for medium-range weather forecasting reanalysis v5 and drought severity data were utilized to explore the relationship between precipitation/drought and A_{norm} and NMRI. Further analysis was conducted on the correlation between NMRI parameters and NDVI at different frequency points under the GPS, GLONASS, and Galileo systems. **Results**: Analysis of experimental data from three plate boundary observatory sites (P042, P052,

基金项目:国家自然科学基金(42474048,42004018)。

第一作者:李俊豪,硕士,研究方向为GNSS遥感。231309020010@hhu.edu.cn

通信作者:王笑蕾,博士,副教授。gnsswxl@hhu.edu.cn

and P675) reveal strong linear correlations between A_{norm} and NDVI, as well as between NMRI and NDVI, with correlation coefficients ranging from 0.58 to 0.86. When the surrounding vegetation types were grassland and crops, NMRI at different frequency points across all three GNSS systems demonstrate good correspondence with NDVI. Notably, among the three frequency bands, the L1-band NMRI exhibites the strongest correlation with NDVI, with coefficients ranging from 0.46 to 0.89, which may be attributed to the shortest wavelength of the L1 signal. **Conclusions:** The study shows that multi-constellation and multi-frequency GNSS signals can effectively monitor vegetation indices, which validates the application potential of GNSS interferometric reflectometry technology for monitoring vegetation changes and provides important data support for future research.

Key words: GNSS-multipath reflectometry (GNSS-MR); normalized difference vegetation index (NDVI); normalized microwave reflectance index(NMRI); normalized amplitude; multi-mode multi-frequency GNSS

归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)被广泛视为研究气候变化和干旱监测的重要参数之一,对农业、气候和生物多样性等具有重要意义[1]。目前,NDVI的获取主要依赖于光学遥感技术,但该技术受到大气噪声、云和雾的影响较大,常常导致数据丢失[2]。在植被覆盖率高的区域,遥感数据容易低估NDVI。此外,还存在时间分辨率较低的问题。近年来,随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)应用的不断拓展,出现了一种GNSS多路径反射测量(GNSS-multipath reflectomety, GNSS-MR)技术[3]。该技术基于传统大地测量型GNSS接收机便可实现对站点周围的环境参数的反演,且具有全天候、连续观测的优势,与传统遥感技术在时间分辨率和天气引起的数据缺失方面有很好的互补。该技术通过提取信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)数据的特征参数,反映如潮位[4-7]、雪深[8-9]、土壤湿度[10-13]和植被指数[14-18]等环境参数的变化情况。

目前,主要有两种基于GNSS-MR的NDVI反演思路。一种思路是利用归一化微波反射指数(normalized microwave reflectance index, NMRI)来表征NDVI。2010年,文献[19]发现NDVI与GPS伪距多路径均方根(root mean square, RMS)呈现负相关性;随后,文献[20]提出了NMRI的概念,并利用美国蒙大拿州多个GNSS站点进行实验,证明了NMRI与NDVI之间存在明显的线性相关关系;文献[21]选取了2008—2012年间美国西部184个GPS站点的数据进行实验,发现NMRI与NDVI在大多数站点呈现线性相关性,但是相关程度会因为站点周围植被类型的不同而有所差异;文献[22]分析了NMRI的时频分布特征,并分析了NMRI与NDVI之间的相关性,构建了基于全球定位系统(global positioning system,GPS)反射信号SNR的NDVI反演模型。另外一种思路是利用归一化振幅A_{norm}反演NDVI,文献[23]发现在含水量较低的植被中,GPS反射信号的数据振幅与NDVI之间呈现线性关系,并提出归一化振幅方法,解决卫星轨迹不均匀对振幅的影响;文献[24]利用板块边界观测网(plate boundary observatory, PBO)的4个站点,分析了A_{norm}与NDVI之间的相关性和周期性,证明了二者间具有较好的对应关系。

尽管NDVI可以通过A_{norm}、NMRI两种思路表征,但以往的研究主要集中在其中一种。为了比较这两种思路在反演NDVI方面的差异,本文首先分析A_{norm}、NMRI与NDVI之间的相关性,然后进一步探索降水与A_{norm}和NMRI参数间的变化对应关系,最后研究GPS、GLONASS和Galileo不同频点的NMRI与NDVI之间的相关性,验证多模多频信号的NDVI可监测性。

1　原理与方法

1.1　GNSS-MR原理

在一次反射情况下,GNSS接收机天线接收到的信号是直射信号与反射信号叠加形成的混合信号[25],如图1所示。SNR观测值中直射信号远远大于反射信号,直射信号的变化趋势决定了SNR整体的变化趋势。通过多项式拟合的方法去除SNR观测值中直射信号和少量反射信号的趋势项后,剩余部分D_{SNR}可以用某一固定频率的余弦函数来近似表示[26]:

$$D_{SNR}=A\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin e+\phi\right) \tag{1}$$

式中,A为振幅;e为卫星高度角;λ为GNSS信号

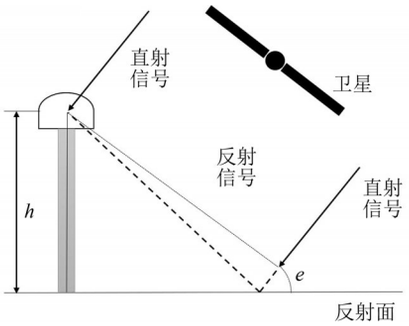


图1 反射测量原理图

Fig. 1 Reflection Measurement Schematic

波长;h为反射面到天线的高度;ϕ为初始相位。

通过Lomb-Scargle频谱分析法(Lomb-Scargle periodogram,LSP)提取反射信号中的频率f_{LSP},通过该频率计算反射面高度h_{LSP}[27],二者转换关系如下:

$$h_{\mathrm{LSP}}=\frac{f_{\mathrm{LSP}}\cdot\lambda}{2} \tag{2}$$

式(1)中的振幅和相位一般采用最小二乘拟合方法估计,然而,该方法受初值影响大、易发散。因此,本文提出一种基于最优化的参数解算方法,通过定义公式并限制各个参数的取值范围,解决数据发散问题,保证数据质量。残差V的计算式为:

$$V=A\cdot\mathrm{e}^{-k^2d^2\sin^2e}\cdot\cos\left(\frac{4\pi h\sin e}{\lambda}+\phi\right)-E_{\mathrm{SNR}} \tag{3}$$

式中,k为常量,表示为$k=\frac{2\pi}{\lambda}$;d为衰减系数;E_{SNR}为SNR数据。根据残差平方和最小原则,最优化约束问题表示为:

$$\min \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V} \tag{4}$$

定义约束条件为:

$$\begin{cases}0\leqslant d\leqslant 1\\ -\pi\leqslant\phi\leqslant\pi\\ h_{\mathrm{LSP}}-0.2\leqslant h\leqslant h_{\mathrm{LSP}}+0.2\end{cases} \tag{5}$$

结合非线性规划方法计算最优式(4),可以获得振幅、相位和衰减系数等参数。

1.2 计算A_{norm}和NMRI

振幅的变化与GNSS站点周围植被的变化密切相关,为了研究振幅与NDVI之间的关系,将振幅进行归一化处理[24],A_{norm}的计算式为:

$$A_{\mathrm{norm}}=\frac{\max(A_{\mathrm{day}})-A_{\mathrm{doy}}}{\max(A_{\mathrm{day}})} \tag{6}$$

式中,A_{day}为每日振幅序列;$\max(A_{\mathrm{day}})$为计算时段内的最大A_{day}值。在计算A_{norm}的过程中,需同步进行粗差剔除与日均值滤波处理。具体操作为:针对每日由所有卫星反演得到的振幅序列,首先剔除大于3倍中误差的粗差值,随后对剩余有效值取平均,即可得到当天的日均振幅A_{day}。

NMRI的反演基于载波相位观测值和伪距多路径观测值,其观测方程为:

$$P=\left|R_{\mathrm{sat}}-R_{\mathrm{rcv}}\right|+c\left(\Delta t^s-\Delta t_r\right)+V_{\mathrm{trop}}+V_{\mathrm{ion}}+V_{\mathrm{cor}}+M_P+\varepsilon_P \tag{7}$$

$$\Phi\cdot\lambda=\left|R_{\mathrm{sat}}-R_{\mathrm{rcv}}\right|+c\left(\Delta t^s-\Delta t_r\right)+V_{\mathrm{trop}}-V_{\mathrm{ion}}+V_{\mathrm{cor}}-N\cdot\lambda+M_\Phi+\varepsilon_\Phi \tag{8}$$

式中,P为伪距多路径观测值;R_{sat}、R_{rcv}分别为卫星、接收机位置;c为光速;Δt^s、Δt_r分别为卫星钟差和接收机钟差;V_{trop}、V_{ion}、V_{cor}分别为对流层延迟、电离层延迟、系统误差修正;Φ为载波相位观测值;N为整周模糊度;M_P、M_Φ分别为伪距多路径测量和载波相位测量中的多路径误差;ε_P和ε_Φ分别为伪距多路径测量和载波相位测量中的观测噪声。

根据式(7)、式(8),利用无电离层组合和无几何组合模型的多径组合算法(multipath combination, MPC)计算多路径误差和观测噪声。根据不同的频点提取不同的多路径值,其中,L1频点上伪距多路径序列$E_{\mathrm{MP_1}}$[28]的计算式为:

$$E_{\mathrm{MP_1}}=P_1-\frac{f_1^{\,2}+f_2^{\,2}}{f_1^{\,2}-f_2^{\,2}}\lambda_1\varphi_1+\frac{2f_2^{\,2}}{f_1^{\,2}-f_2^{\,2}}\lambda_2\varphi_2 \tag{9}$$

式中,P_1为L1频点上伪距多路径观测值;f_1、f_2分别为L1、L2频点的频率;λ_1、λ_2分别为L1、L2频点的波长;φ_1、φ_2分别为L1、L2频点的载波相位观测值。

本文使用RTKlib软件计算多路径值,该软件包含基于MPC算法的多路径计算模块;还可剔除周跳和粗差,保证计算结果的准确性。计算NMRI序列E_{NMRI}的核心在于计算$E_{\mathrm{MP_1}}$的RMS,具体为[22]:

$$E_{\mathrm{NMRI}}=\frac{\max(R_{\mathrm{MP_1}})-R_{\mathrm{MP_1}}}{\max(R_{\mathrm{MP_1}})} \tag{10}$$

式中,$R_{\mathrm{MP_1}}$为根据$E_{\mathrm{MP_1}}$计算得到的每日RMS值;$\max(R_{\mathrm{MP_1}})$为将$R_{\mathrm{MP_1}}$序列从大到小排序,取前5%的值的平均值,因此,NMRI值的范围一般在0~1,极少数情况下NMRI值可能小于0。值得注意的是,在无周跳的情况下,整周模糊度不会影响RMS值的计算,因此整周模糊度不会造成NMRI的误差。计算NMRI数据的过程中,进行粗差剔除和日均值滤波操作。与文献[19]的方法相同,

首先对每日的E_{MP_1}按卫星号进行划分,剔除每颗卫星E_{MP_1}粗差,计算不同卫星的每日R_{MP_1},并统计每颗卫星的日序列E_{MP_1}个数;然后根据个数定权,加权平均各卫星的当日R_{MP_1},获得每日R_{MP_1}值。

2　实验与分析

2.1　数据来源

本文选取了PBO网络中P042、P052、P675 3个站点进行实验,其接收机、天线类型、卫星信号、高度角和方位角信息如表1所示。3个站点周围视野开阔,地势平坦,没有高大障碍物阻挡,观测环境良好。P042站点位于美国怀俄明州的惠特兰市,周围植被大多数为草地;P052站点位于美国蒙大拿州的洛根县,周围植被大多数为农作物;P675站点位于美国亚利桑那州的霍尔布鲁克市,周围植被大多数为灌木丛,站点环境如图2所示。

表1　站点接收机参数

Table 1　Station Receiver Parameters

站点	时间	接收机	天线类型	卫星系统	采样间隔/s	高度角/(°)	方位角/(°)
P042	2012-01-01—2021-09-16	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	GPS	30	5～25	0～360
	2021-09-17—2021-12-31	数据缺失					
	2022-01-01—2023-12-31	SEPT POLARX5	TRM59800.99	GPS、GLONASS、Galileo	30	5～25	0～360
P052	2012-01-01—2019-11-14	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	GPS	30	5～25	0～360
	2019-11-15—2023-12-31	TRIMBLE NETR9	TRM59800.99	GPS、GLONASS、Galileo	30	5～25	0～360
P675	2012-01-01—2023-12-31	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	GPS	30	5～25	0～360



P042　　P052　　P675

图2　GNSS站点环境

Fig. 2　Environment of GNSS Stations

本文的总降水量数据来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)第5代气候再分析数据集(ECMWF reanalysis v5, ERA5),时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.1°×0.1°。利用覆盖GNSS站点的ERA5网格数据,根据站点经纬度,使用最邻近插值的方法提取以站点为中心的每日总降水量数据。

干旱数据来源于美国内布拉斯加大学林肯分校国家干旱缓解中心发布的美国干旱检测(U.S. Drought Monitor, USDM)数据集。根据GNSS站点经纬度,提取其所处行政州的干旱数据。本文NDVI数据来自于美国国家航空航天局戈达德航天中心提供的MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)植被指数产品MOD13Q1,其空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d。利用ENVI软件,根据GNSS站点经纬度,提取以站点为中心周围植被的NDVI值。

2.2　A_{norm}和NMRI的反演分析

根据§1.1和§1.2原理,利用3个站点2012—2023年共12年的GNSS观测数据,计算该期间内A_{norm}和NMRI的时间序列。利用滑动窗口分割两者的时间序列,剔除窗口内大于3倍中误差的粗差,窗口的步长设置为1 d;考虑到植被生长变化的可监测周期一般为5～10 d,窗口长度设置为8 d。此外,根据ERA5降雪数据,剔除降雪时间段内的A_{norm}和NMRI数据及受云层污染的MODIS NDVI数据。质量控制后3个站点的A_{norm}和NMRI序列如图3所示。其中,P042站点自2021年9月17日至2021年底为天线更换阶段,GNSS数据缺失,无法计算A_{norm}和NMRI,故图3(a)中用虚线框标注数据空白。

由图3可以看出,在P042(草地)、P052(农作物)和P675(灌木丛)3个站点中,NMRI与NDVI时间序列之间存在良好的对应关系,而A_{norm}数据则有不同表现。在P042和P052站点,A_{norm}与NDVI时间序列之间存在良好的对应关系;在P675站点,对应关系较差。在3个不同植被类型的站点中,NMRI反演结果整体较为理想,而A_{norm}反演结果存在差异。这可能是由于NMRI在反演NDVI时,伪距多路径反映的是信号受植被影响的量级,因此植被茂盛情况和该值直接相关;而SNR的振幅值则主要与镜面反射分量相

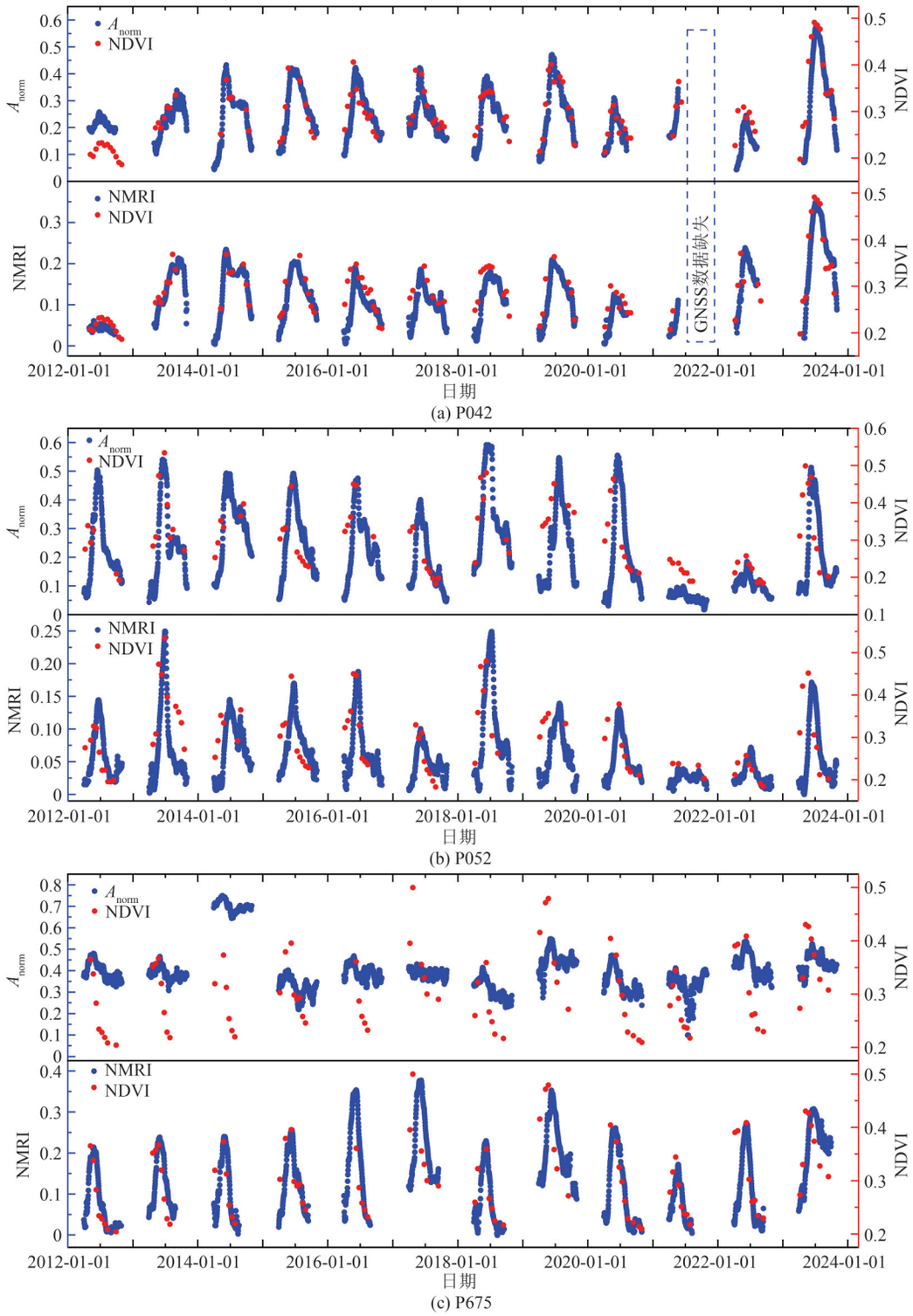


图3 A_{norm}、NMRI与NDVI序列

Fig. 3 Time Series of A_{norm}, NMRI and NDVI

关,在复杂植被环境下,即使植被不茂盛,其振幅也可能受复杂反射结构的影响,呈现衰减[19]。

同时,A_{norm}、NMRI和NDVI时间序列均表现出明显的年周期特性,这反映了植被随季节生长和衰退的过程。为了更好地探究A_{norm}、NMRI和NDVI时间序列的趋势变化原因,引入了ERA5日降水量、每年累积降水量、5年平均降水量数据及该地区所处行政州干旱数据按干旱程度划分的区域面积占比,如图4所示。

图4中玫红色点表示ERA5提供的日降水量数据,蓝色点线绘制每年累积降水量,该序列由日降水量逐日累加得到:例如,当年第2天的数值为第1天与第2天降水量之和,第3天为第1~3天降水量的累计和,依此类推,直至当年最后一天,

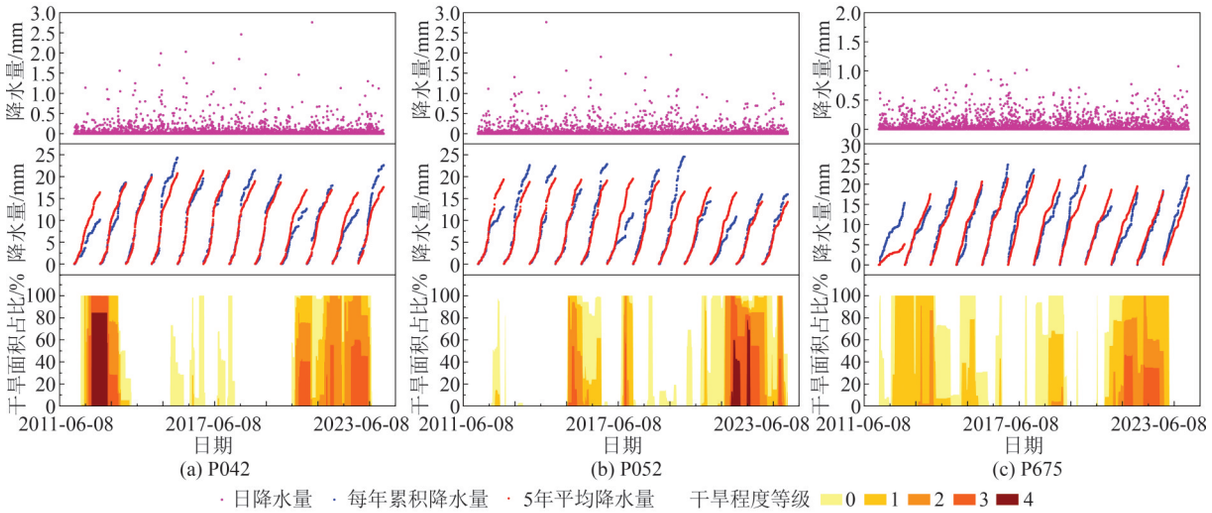


图 4　3个站点的降水量数据及干旱程度

Fig. 4　Time Series of Precipitation and Drought Degree of Three Stations

累积降水量能够较好地反映年度降水总量水平。红色点线表示5年滑动平均累积降水量,即当年及其前后各两年(共5年)累积降水量的均值,可用于分析当年降水量相对于邻近年份的变化趋势。干旱程度等级序列中,干旱状况不仅取决于降水,还受到温度、水汽等多种气象因子的综合影响。由图4可以看出,P042站在2012年、2020年和2022年的年累积降水量明显低于5年平均降水量,表明这几年的降水量相对来说比较短缺。而对应的时间段均表现出较为严重的干旱程度,图3(a)中与之对应年份的A_{norm}、NMRI和NDVI值也明显偏低,反映出植被的生长状态不太好。特别是2012年,该地区由于降水不足等原因,发生了长达半年之久、干旱程度等级为4的严重干旱。图3(a)中的NDVI值以及反演得到的A_{norm}和NMRI值均明显低于其他年份,这与2012年美国中西部地区发生了严重的干旱有关[29]。类似地,P052站在2021年和2022年也表现出降水不足的特征,导致这两年的A_{norm}、NMRI和NDVI值明显偏低,进一步验证了降水异常与植被生长状况的密切关联。

2.3　A_{norm}和NMRI的相关性与回归分析

由§2.2分析可知,A_{norm}和NMRI时间序列与NDVI时间序列之间存在良好的对应关系。为进一步探索这种对应关系,绘制相关性分布散点图和误差分布图,如图5所示。由图5可以看出,A_{norm}和NMRI与NDVI之间存在明显的线性关系。采用线性回归的方法拟合线性函数,并利用P值进行显著性检验,拟合过程中的A_{norm}、NDVI与MODIS NDVI之间的均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数等如表2所示。

由表2和图5可知,3个站点A_{norm}与NDVI的相关系数介于0.580 7~0.796 2,RMSE介于0.030 9~0.058 0;3个站点NMRI与NDVI的相关系数介于0.632 5~0.864 7,RMSE介于0.030 9~0.058 0。在显著性检验中,所有P值均小于0.05,且误差分布集中于0附近,没有明显的系统性偏差。因此可以认为,A_{norm}和NMRI与NDVI之间具有显著的线性对应关系。此外,无论是草地、农作物还是灌木丛,NMRI的反演结果始终优于A_{norm}的反演结果,且NMRI草地的反演结果优于农作物和灌木丛的反演结果。

2.4　多模多频的NMRI分析

P042和P052站点分别于2022年和2020年启用新天线,接收多模多频GNSS数据。实验选取了P042站点2022—2023年以及P052站点2020—2023年的GNSS数据进行多模多频反演实验。根据§2.3分析可知,NMRI参数有更好的表现,因此,本节使用该参数分析多模多频数据表现。根据§1.2所述原理,计算了GPS、GLONASS和Galileo 3个系统不同频点的NMRI时间序列,质量控制方法同§2.2所述。计算的3个系统不同频点的NMRI序列如图6所示,其中G、R和E分别表示GPS、GLONASS和Galileo系统。

从图6可以看出,在P042和P052两个站点中,GPS、GLONASS和Galileo 3个系统不同频点的NMRI幅度变化存在差异,但是均与NDVI的峰值和峰谷出现的时间基本吻合,且与NDVI的变化趋势基本一致。为进一步探索多模多频信号的NMRI与NDVI之间的相关程度,采用线

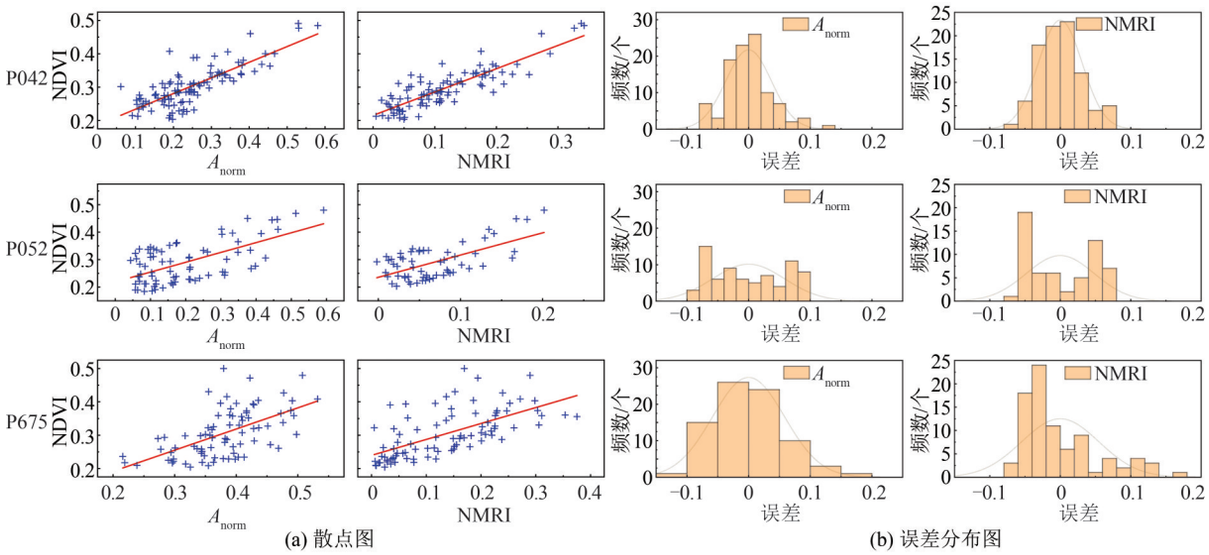


图5 A_{norm}和NMRI与NDVI相关性分析

Fig. 5 Correlation Analysis of A_{norm}, NMRI, and NDVI

表2 相关性分析参数表

Table 2 Correlation Analysis Parameters Table

站点	数据类型	相关系数	斜率	截距	RMSE	P值
P042	A_{norm}	0.796 2	0.469 6	0.186 8	0.036 9	$2.220\,4\times10^{-16}$
	NMRI	0.864 7	0.698 0	0.215 6	0.030 9	$2.220\,4\times10^{-16}$
P052	A_{norm}	0.627 9	0.357 8	0.218 8	0.057 9	$2.129\,5\times10^{-9}$
	NMRI	0.634 6	0.839 0	0.234 7	0.047 8	$6.782\,8\times10^{-8}$
P675	A_{norm}	0.580 7	0.635 0	0.064 5	0.058 0	$1.639\,1\times10^{-8}$
	NMRI	0.632 5	0.478 2	0.239 4	0.054 5	$6.452\,8\times10^{-11}$

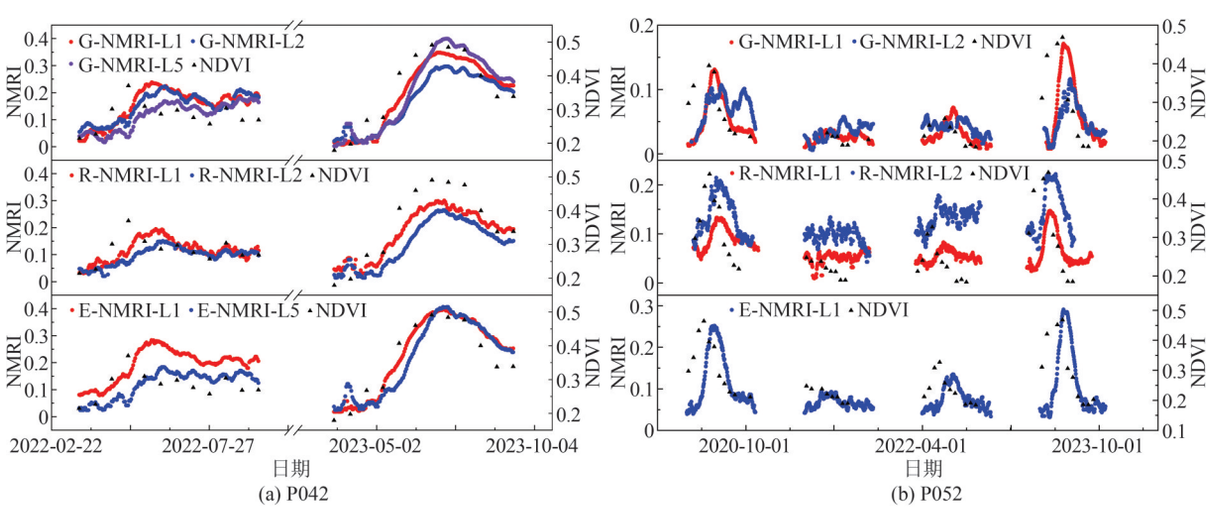


图6 3个系统不同频点NMRI与NDVI对比

Fig. 6 Comparison of NMRI and NDVI at Different Frequencies of Three Systems

性回归的方法分别拟合3个系统不同频点的NMRI参数与NDVI之间的关系。相关性分布散点图和误差分布图分别如图7、图8所示,利用P值进行显著性检验,拟合过程中NDVI与MODIS NDVI之间的RMSE、相关系数、斜率、截距等如表3所示。

由表3可知,不论是P042(草地)还是P052(农作物),GPS、GLONASS和Galileo各个频点的NMRI回归方程,其斜率和截距都不相同,这与站点硬件处理反射信号的方式有关,也与硬件的类型和固件的版本有关[30-31]。P042站点的相关系数介于0.69~0.90,P052站点的相关系数介

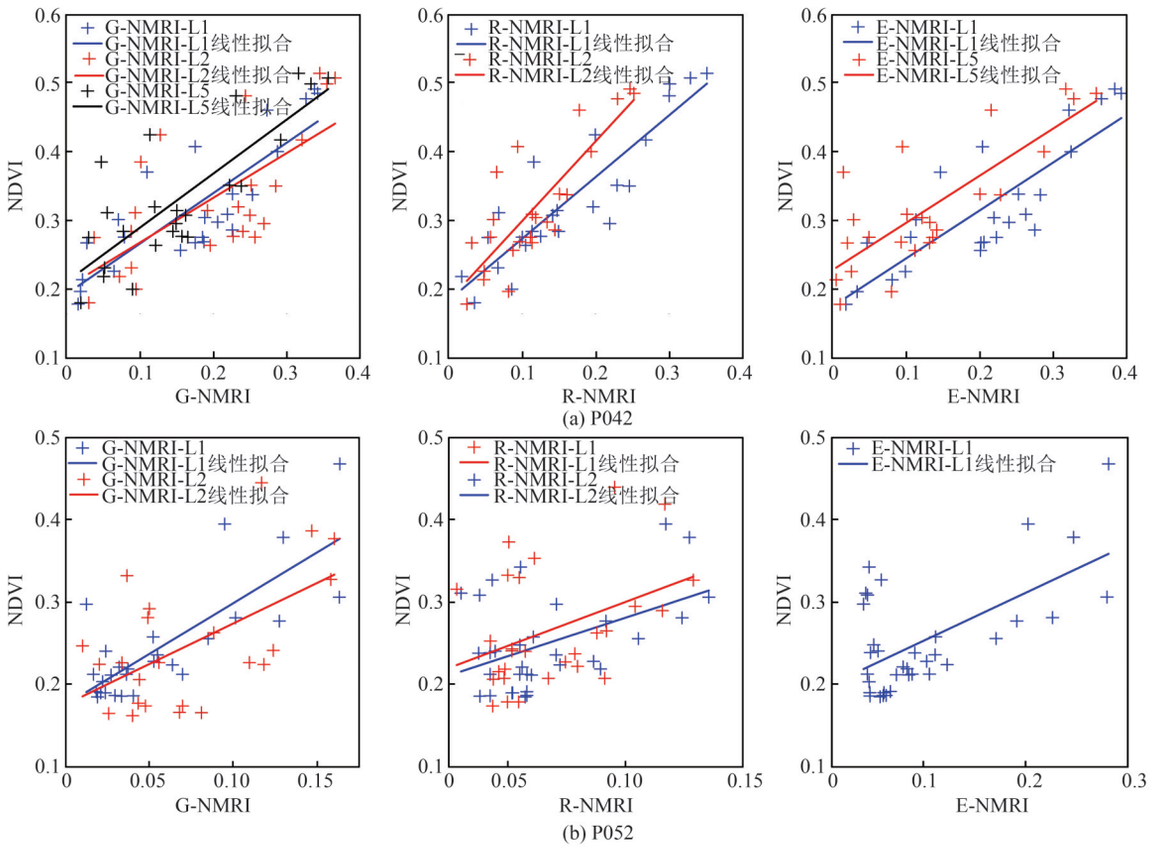


图 7　多模多频信号 NMRI 与 NDVI 散点图

Fig. 7　NMRI and NDVI Scatter Plots of Multi-mode and Multi-frequency Signals

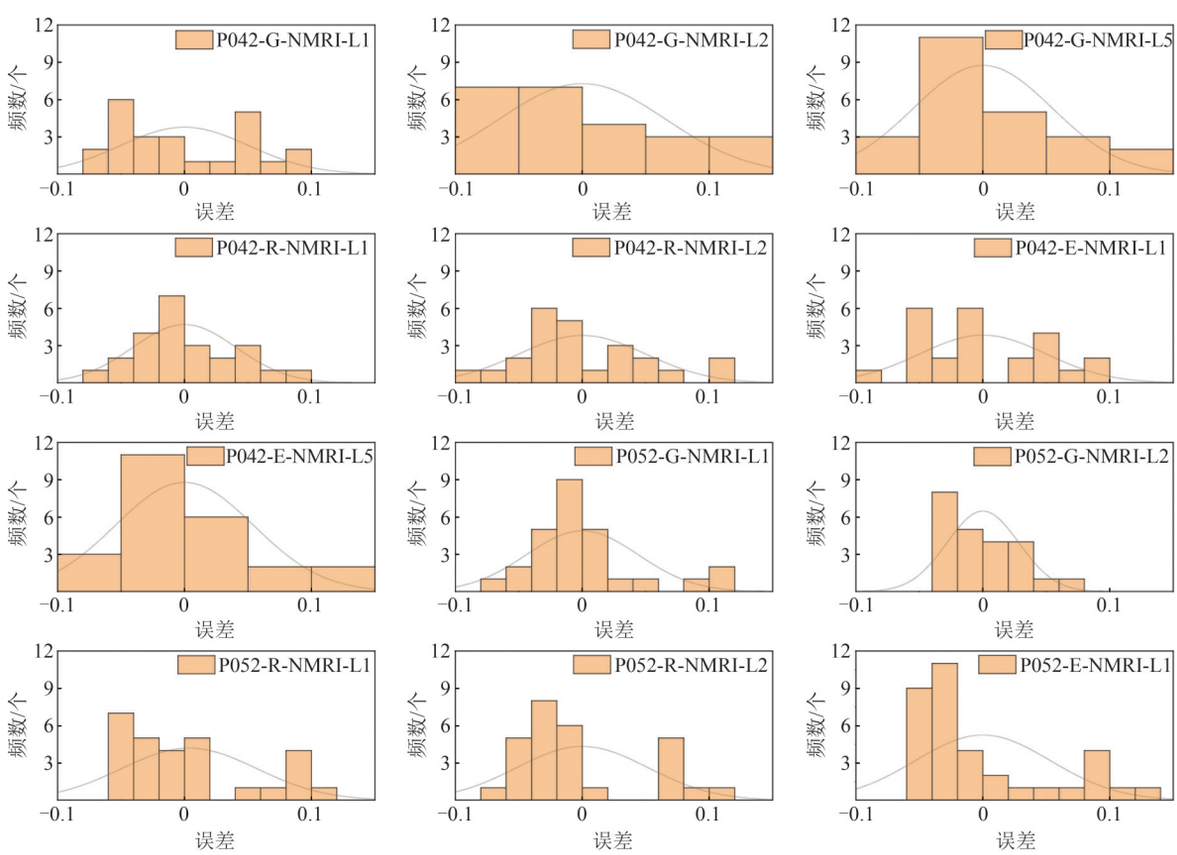


图 8　多模多频误差分布

Fig. 8　Error Distribution of Multi-mode and Multi-frequency Signals

表3 不同系统不同频点NMRI与NDVI间的拟合参数表

Table 3 Correlation Parameter Table for Different Systems and Frequencies

站点	系统类型	频点	斜率	截距	RMSE	相关系数	P值
P042	GPS	L1	0.729 8	0.194 0	0.049 6	0.830 5	$5.091\,4\times10^{-7}$
		L2	0.736 8	0.203 6	0.064 3	0.691 6	$1.817\,6\times10^{-4}$
		L5	0.623 1	0.220 9	0.053 6	0.799 2	$2.820\,7\times10^{-6}$
	GLONASS	L1	1.095 8	0.161 3	0.039 9	0.893 8	$4.043\,5\times10^{-9}$
		L2	1.154 8	0.183 9	0.049 2	0.834 0	$4.123\,6\times10^{-7}$
	Galileo	L1	0.694 1	0.176 2	0.048 8	0.836 4	$3.563\,8\times10^{-7}$
		L5	0.644 4	0.211 8	0.053 3	0.801 0	$2.574\,6\times10^{-6}$
P052	GPS	L1	1.238 2	0.174 8	0.043 3	0.783 5	$1.343\,7\times10^{-6}$
		L2	0.847 9	0.174 4	0.027 7	0.561 1	$5.343\,3\times10^{-3}$
	GLONASS	L1	0.934 1	0.187 4	0.050 4	0.462 7	$7.670\,6\times10^{-3}$
		L2	0.145 7	0.184 5	0.050 7	0.395 6	$3.718\,6\times10^{-2}$
	Galileo	L1	0.585 7	0.194 0	0.052 5	0.612 3	$9.262\,9\times10^{-5}$

于0.39～0.79。P042站点整体反演结果相关系数要高于P052站点,这与§2.3的结论一致。从图8中可以看出,在显著性检验下,P值均小于0.05,且误差集中分布在0附近,没有明显的系统偏差。因此可以认为,当站点周围植被类型为草地和农作物时,不同系统不同频点的NMRI与NDVI之间存在显著或较显著的线性对应关系。

3 结 语

本文基于GNSS观测数据中SNR数据、伪距多路径观测值和载波相位观测值,计算了长时序数据中的A_{norm}和NMRI,并分析了二者与NDVI之间的对应关系及相关性。引入了ERA5降水量数据,探讨降水引起A_{norm}、NMRI和NDVI变化的原因。本文进一步分析了多模多频GNSS信号的NMRI与NDVI之间的相关性,主要结论如下:

1)基于GNSS数据获得的A_{norm}和NMRI与NDVI之间存在良好的线性对应关系,且A_{norm}、NMRI和NDVI三者均存在明显的年周期特性,这是植被生成和衰退过程的体现。

2)当站点周围植被类型(草地、农作物和灌木丛)不同时,NMRI反演结果均优于A_{norm}反演结果,且在3种植被类型的NDVI反演实验中,草地的反演结果最优。

3)A_{norm}、NMRI和NDVI大小的变化与降水量的多少存在良好的对应关系,在降水量较少、气候较为干旱时,植被生长状态较差,对应的A_{norm}、NMRI和NDVI值均减小。

4)在反演草地和农作物的NDVI实验中,GPS、GLONASS和Galileo不同频点的NMRI与NDVI之间均存在良好的线性对应关系,且不同信号对应的线性函数不同。

本文的创新点主要在于:(1)SNR振幅一般采用最小二乘拟合方法估计,然而,该方法受初值影响大、易发散。因此,本文提出了一种基于最优化的参数解算方法,通过定义公式,并限制各个参数的取值范围来解决数据发散问题,从而保证数据质量。(2)分析了GNSS信号A_{norm}与NMRI的不同表现以及多模多频NMRI的不同表现。尽管GNSS-MR技术在植被指数反演中具有低成本、全天时和高时间分辨率等优势,但在反演过程中仍面临一些挑战。首先,降水会使得反射面介质产生变化,进而引起A_{norm}或NMRI的较大变化,从而引起NDVI的反演误差。虽然本文所使用的滑动窗口粗差剔除方法对这种误差有削弱作用,但是,依然不能保证完全剔除该误差。其次,利用滑动窗口的方法平滑数据时,选择的窗口长度较大,在这种情况下,虽然质量能得到较好的控制,但是也可能会掩盖某些有效信息。最后,GNSS-MR植被反演技术中面临的最大挑战是缺少一个普适的A_{norm}或NMRI与NDVI间的数学对应公式。正如§2.4所述,即使是同一个站点,不同的信号间都存在不同的线性对应关系。而只有获得了一个普适的数学关系,GNSS-MR才能在不依赖外部数据的情况下,实现独立的植被指数反演能力,并进一步实现多模多频融合等质量控制方法。后续会持续关注这一问题,通过多站、多环境下的站点分析,并加入其他气象数据,结合机器学习等方法进行非线性的研究,尝试解决该问题。

参 考 文 献

[1] 孟健, 刘天琦, 周寒, 等. 榆林市植被覆盖度动态变化监测[J]. 北京测绘, 2021, 35(11): 1400-1404.
MENG Jian, LIU Tianqi, ZHOU Han, et al. Monitoring Dynamic Change of Vegetation Coverage in Yulin[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2021, 35(11): 1400-1404.

[2] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
QI Shuhua, WANG Changyao, NIU Zheng. Evaluating Soil Moisture Status in China Using the Temperature/Vegetation Dryness Index (TVDI)[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2003, 7(5): 420-427.

[3] BILICH A, AXELRAD P, LARSON K M. Scientific Utility of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) Reported by Geodetic GPS Receivers[C]//The 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Fort Worth, USA, 2007.

[4] 余锐, 刘洋, 王清泉, 等. 长时序多模多频GNSS-IR潮位反演综合比较分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(12): 2210-2222.
YU Rui, LIU Yang, WANG Qingquan, et al. Comprehensive Comparative Analysis of Long-Term, Multi-mode, and Multi-frequency GNSS-IR Tide Inversion[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12): 2210-2222.

[5] 赵涛, 叶世榕, 罗歆琪, 等. GNSS-IR潮位反演中高仰角数据质量控制方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 68-76.
ZHAO Tao, YE Shirong, LUO Xinqi, et al. A Data Quality Control Method for High Elevation Angle in GNSS-IR Tide Level Retrieval[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 68-76.

[6] 王笑蕾, 南阳, 何秀凤, 等. 考虑潮波特性的GNSS-IR潮位反演方法[J]. 测绘学报, 2024, 53(3): 482-492.
WANG Xiaolei, NAN Yang, HE Xiufeng, et al. GNSS-IR Retrieval Method with Consideration of Tidal Periodicity of Sea Level[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(3): 482-492.

[7] 何秀凤, 王杰, 王笑蕾, 等. 利用多模多频GNSS-IR信号反演沿海台风风暴潮[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1168-1178.
HE Xiufeng, WANG Jie, WANG Xiaolei, et al. Retrieval of Coastal Typhoon Storm Surge Using Multi-GNSS-IR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(9): 1168-1178.

[8] 曾棋, 张胜凯, 龚力, 等. 基于GNSS-IR技术的南极海冰积雪深度反演研究[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(3): 14-18.
ZENG Qi, ZHANG Shengkai, GONG Li, et al. Research on Inversion of Antarctic Sea Ice Snow Depth Based on GNSS-IR Technology[J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(3): 14-18.

[9] 梁静舒, 梁宏, 张洁, 等. 多频点组合GNSS-R积雪深度反演模型探讨[J]. 导航定位学报, 2026, 14(2): 185-194.
LIANG Jingshu, LIANG Hong, ZHANG Jie, et al. Discussion on Multi-frequency Combined GNSS-R Snow Depth Retrieval Model[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2026, 14(2): 185-194.

[10] 贾燕, 金双根, 肖智宇, 等. 全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感: 现状与机遇[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1784-1799.
JIA Yan, JIN Shuanggen, XIAO Zhiyu, et al. Soil Moisture Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System-Reflectometry: Current Status and Opportunity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1784-1799.

[11] 张永凤, 布金伟, 左小清. 基于注意力机制的BiGRU-CNN-Net深度学习模型的星载GNSS-R植被含水量反演方法[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2025, 61(4): 442-451.
ZHANG Yongfeng, BU Jinwei, ZUO Xiaoqing. An Attention Mechanism-Based BiGRU-CNN-Net Deep Learning Model for Retrieval of Vegetation Water Content in Spaceborne GNSS-R[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2025, 61(4): 442-451.

[12] 魏涛, 韩磊. 星载GNSS-R技术在地表冻融判别中的应用[J]. 北京测绘, 2025, 39(11): 1688-1694.
WEI Tao, HAN Lei. Application of Spaceborne GNSS-R Technology in Surface Freeze-Thaw Identification[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(11): 1688-1694.

[13] 郭斐, 陈惟杰, 朱逸凡, 等. 一种融合相位、振幅与频率的GNSS-IR土壤湿度反演方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 715-721.
GUO Fei, CHEN Weijie, ZHU Yifan, et al. A GNSS-IR Soil Moisture Inversion Method Integrating Phase, Amplitude and Frequency[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 715-721.

[14] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, CAMPS A, et al. Review of Crop Growth and Soil Moisture Monitoring from a Ground-Based Instrument Implementing the Interference Pattern GNSS-R Technique[J]. *Radio Science*, 2011, 46(6): 2011RS004680.

[15] PAN Y L, REN C, LIANG Y J, et al. Inversion of Surface Vegetation Water Content Based on GNSS-IR and MODIS Data Fusion[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 21.

[16] LI J, YANG D K, WANG F, et al. A New Algorithm for Measuring Vegetation Growth Using GNSS Interferometric Reflectometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 1033-1041.

[17] SMALL E, ROESLER C, LARSON K. Vegetation Response to the 2012—2014 California Drought from GPS and Optical Measurements[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 630.

[18] 肖星星, 吕伟才, 仲臣, 等. 基于GPS-IR的归一化植被指数反演[J]. 全球定位系统, 2021, 46(6): 118-124.
XIAO Xingxing, LÜ Weicai, ZHONG Chen, et al. Iversion of Normalized Difference Vegetation Index Based on GPS-IR[J]. *GNSS World of China*, 2021, 46(6): 118-124.

[19] SMALL E E, LARSON K M, BRAUN J J. Sensing Vegetation Growth with Reflected GPS Signals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(12): 2010GL042951.

[20] LARSON K M, SMALL E E. Normalized Microwave Reflection Index: A Vegetation Measurement Derived from GPS Networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1501-1511.

[21] EVANS S G, SMALL E E, LARSON K M. Comparison of Vegetation Phenology in the Western USA Determined from Reflected GPS Microwave Signals and NDVI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(9): 2996-3017.

[22] 吴继忠, 吴玮. 基于GPS-IR的美国中西部地区NDVI时间序列反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 183-188.
WU Jizhong, WU Wei. Retrieving NDVI in Midwestern America Using GPS-Interferometric Reflectometry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 183-188.

[23] WAN W, LARSON K M, SMALL E E, et al. Using Geodetic GPS Receivers to Measure Vegetation Water Content[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 237-248.

[24] 郑南山, 丰秋林, 刘晨, 等. GPS反射信号信噪比与NDVI相关性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1423-1429.
ZHENG Nanshan, FENG Qiulin, LIU Chen, et al. Relationship Analysis Between GPS Reflection Signal SNR and NDVI[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1423-1429.

[25] LARSON K M, NIEVINSKI F G. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 41-52.

[26] LARSON K M, SMALL E E, GUTMANN E D, et al. Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): 2008GL036013.

[27] 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.

[28] ESTEY L H, MEERTENS C M. TEQC: The Multi-purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data[J]. *GPS Solutions*, 1999, 3(1): 42-49.

[29] MALLYA G, ZHAO L, SONG X C, et al. 2012 Midwest Drought in the United States[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(7): 737-745.

[30] BILICH A, LARSON K M. Mapping the GPS Multipath Environment Using the Signal-to-Noise Ratio (SNR)[J]. *Radio Science*, 2007, 42(6): 2007RS003652.

[31] VÁZQUEZ G E, BENNETT R, SPINLER J. Assessment of Pseudorange Multipath at Continuous GPS Stations in Mexico[J]. *Positioning*, 2013, 4(3): 253-265.