

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：多频多模 GNSS-IR 三种多路径指标对植被参数的响应特性对比分析
作者：魏浩翰，江中天，王泽乾，郑加柱，陈健
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0468
收稿日期：2026-07-07
网络首发日期：2026-09-09
引用格式：魏浩翰，江中天，王泽乾，郑加柱，陈健．多频多模 GNSS-IR 三种多路径指标对植被参数的响应特性对比分析[J/OL]．北京航空航天大学学报.
https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0468



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

多频多模 GNSS-IR 三种多路径指标对植被参数的响应特性对比分析

魏浩翰[1,✉]，江中天[1]，王泽乾[2]，郑加柱[1]，陈健[1]

（1. 南京林业大学 土木工程学院，南京 210037；2. 南京航空航天大学 基建处，南京 210016）

*通信作者 魏浩翰 E-mail：weihaohan@njfu.edu.cn

摘要 归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）和植被冠层高度（Vegetation Canopy Height，VCH）是表征植被生长状况的重要参数，对其同步监测具有科学意义与实用价值。GNSS 干涉反射测量（GNSS Interferometric Reflectometry，GNSS-IR）具有监测植被参数的潜力。本文利用自建 GNSS 观测站 2024 年全年观测数据，提取多频多模反射信号的归一化振幅（Normalized Amplitude，A_{norm}）、归一化微波反射指数（Normalized Microwave Reflection Index，NMRI）及其低频信号分量的峰值功率（Peak Spectral Power，P_{peak}），分析三种指标对 NDVI 的响应特性，并基于 P_{peak} 提取冠层有效反射高度。结果表明：多频多模 A_{norm} 和 NMRI 对 NDVI 变化均具有较明显响应，相关系数范围分别为 0.6738~0.8895 和 0.4885~0.8858，不同系统和频点的响应强度存在差异。不同 GNSS 系统的重叠频率信号表现出一定的响应相似性，载波频率可能是影响因素之一。北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）的响应特性与 GPS、Galileo 和 GLONASS 总体一致。P_{peak} 对 NDVI 具有一定响应，整体稳定性弱于 A_{norm} 和 NMRI。采用多候选谱峰法提取的植被冠层有效高度与实测 VCH 有较好的相关性，其相关系数 R、均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）和平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE）分别为 0.9805、0.1521 m 和 0.1263 m。与主导谱峰法相比，RMSE 降低 45.66%。研究表明，A_{norm} 和 NMRI 两种多路径指标可用于 NDVI 监测，而 P_{peak} 及其谱峰频率信息可用于冠层高度变化监测。研究结果可为 GNSS-IR 植被参数连续监测中的指标选择提供参考。

关键词 多频多模 GNSS-IR；归一化振幅；归一化微波反射指数；频谱峰值功率；归一化植被指数；植被冠层高度

中图分类号 P228.4 文献标志码 A DOI: DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0468

Comparative Analysis of Multi-Frequency Multi-Constellation GNSS-IR Multipath Metrics for Vegetation Parameters

WEI Haohan[1,✉], JIANG Zhongtian[1], WANG Zeqian[2], ZHENG Jiazhu[1], CHEN Jian[1]

（1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China；

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Infrastructure Department, Nanjing 210016, China）

* E-mail: weihaohan@njfu.edu.cn

Abstract The normalized difference vegetation index (NDVI) and vegetation canopy height (VCH) are important parameters for characterizing vegetation growth, and their simultaneous monitoring is of both scientific and practical significance. Global Navigation Satellite System interferometric reflectometry (GNSS-IR) has demonstrated potential for monitoring vegetation parameters. Using year-round observations collected in 2024 at a self-established GNSS station, this study extracted three indicators from multi-frequency and multi-constellation GNSS reflected signals: normalized amplitude (A_{norm}), normalized microwave reflection index (NMRI), and peak spectral power (P_{peak}) of the low-frequency signal components. The responses

收稿日期：2026-07-07

网络首发时间：2026-09-09 11:50:21 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20260908.1820.004

of these three indicators to NDVI were analyzed, and the effective canopy reflection height was retrieved based on P_{peak}. The results showed that A_{norm} and NMRI derived from multi-frequency and multi-constellation GNSS signals exhibited clear responses to NDVI variations, with correlation coefficients ranging from 0.6738 to 0.8895 and from 0.4885 to 0.8858, respectively, although the response strength varied among GNSS constellations and frequency bands. Signals at overlapping frequencies from different GNSS constellations exhibited similar responses to some extent, suggesting that carrier frequency may be one of the contributing factors. The response characteristics of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS) were generally consistent with those of GPS, Galileo, and GLONASS. P_{peak} also showed a certain response to NDVI variations, although its overall stability was lower than that of A_{norm} and NMRI. The effective vegetation canopy height retrieved using the multi-candidate spectral-peak method showed good agreement with the measured VCH, with a correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE) of 0.9805, 0.1521 m, and 0.1263 m, respectively. Compared with the dominant spectral-peak method, the multi-candidate spectral-peak method reduced the RMSE by 45.66%. The results indicate that A_{norm} and NMRI can be used for NDVI monitoring, whereas P_{peak} and its associated spectral-peak frequency information can support the monitoring of canopy-height variations. These findings provide a reference for indicator selection in continuous vegetation parameter monitoring using GNSS-IR..

Key words multi-frequency and multi-constellation GNSS-IR; normalized amplitude; normalized microwave reflection index; peak spectral power; normalized difference vegetation index; vegetation canopy height

植被参数是表征地表植被生长状态、生态系统过程及其对环境变化响应的重要指标，已广泛应用于植被动态监测、生态环境评估、农业管理及干旱等灾害预警领域[1-4]。其中，归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）可有效表征植被绿度及其光谱活性[5]，植被冠层高度（Vegetation Canopy Height，VCH）可用于刻画植被生长状况、冠层结构特征及群落发育水平[6]。传统植被参数获取主要依赖光学遥感、地面调查和主动遥感等手段。光学遥感具有大范围、快速获取植被信息的优势，但其观测结果易受云雾遮挡、大气条件变化及重访周期等因素限制，在高覆盖植被区域存在光谱饱和问题[7-9]。地面实测虽能提供较为可靠的观测结果，但存在效率低、成本高及时空连续性不足等局限，难以满足植被参数连续动态监测的需求[10]。因此，探索低成本、高时间分辨率且可实现连续观测的植被参数反演方法具有重要意义。

全球导航卫星系统干涉反射测量（Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry，GNSS-IR）利用卫星直射信号与地表反射信号的干涉效应开展近地表参数反演，具有全天时、低成本、连续观测和高时间分辨率等优势[11-12]，近年来已在雪深[13]、潮位[14]、土壤湿度[15]和植被监测[16]等领域得到广泛应用。

现有基于 GNSS-IR 的植被监测研究多数针对 NDVI[17-21]，也有部分学者研究 VCH 的反演方法[22-24]，主要的反演思路有三种，分别是利用 GNSS 反射信号的归一化微波反射指数（Normalized Microwave Reflection Index，NMRI）[17]、归一化振幅（Normalized Amplitude，A_{norm}）[20-21]和峰值功率（Peak Spectral Power，P_{peak}）[22-24]等多路径指标来反演植被参数。Small 等[16]利用美国板块边界观测计划（Plate Boundary Observatory，PBO）的观测数据较早证明了全球定位系统（Global Positioning System，GPS）反射信号对植被生长变化的敏感性，Larson 等[17]首次提出 NMRI 指标并将其用于表征植被状态。Wan 等[18]发现在低植被含水量下 A_{norm} 对 NDVI 具有较强敏感性。吴继忠等[19]验证了 NMRI 与 NDVI 之间存在显著线性相关。郑南山等[20]验证了 A_{norm} 与 NDVI 存在较好的相关性。李俊豪等[21]进一步同步分析 A_{norm} 和 NMRI 与 NDVI 的关系，结果表明二者均与 NDVI 呈显著相关性。Zhang 等[22]采用小波分析提取信噪比（Signal-to-Noise Ratio，SNR）平均功率谱的主导周期，实现了小麦高度反演。Li 等[23]采用 Lomb–Scargle 周期图提取 P_{peak} 结合多层等效介质模型估计小麦高度。Li 等[24]通过 P_{peak} 分离地表和玉米冠层反射信号，根据跨卫星反演高度差的方差判别反射界面。已有结果表明，三种指标均具有植被监测潜力，但其响应受植被类型、观测环境及数据处理方法影响。

A_{norm}、NMRI 和 P_{peak} 分别来源于 SNR 振荡振幅、码-相位多路径组合和低频频谱特征，其物理信息及适用范围不同。上述研究多基于单一系统、少量频点或单一指标开展，缺少包含（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）在内的多频多模信号进行同站、同时段条件下的比较。此外，植被覆盖期可能同时存在地表、冠层内部和冠层顶部反射，固定本征模态函数（Intrinsic Mode Function，IMF）编号或单一最大谱峰难以稳定对应同一反射界面。

针对上述问题，本文利用自建测站 2024 年全年观测数据，在统一处理条件下比较 BDS、GPS、Galileo 和 GLONASS 多频信号的 A_{norm}、NMRI 和 P_{peak} 对 NDVI 响应特性，验证相关指标对 BDS 信号的适用性，并采用多候选谱峰法提取冠层有效高度，以主导谱峰法为基线，并结合实测 VCH 评价其提取精度。

1 理论与方法

1.1 GNSS-IR 基本原理

GNSS-IR 是一种利用卫星直射信号与地表反射信号干涉效应开展近地表环境参数反演的被动遥感技术。当地基 GNSS 接收机同时接收来自卫星的直射信号和地表反射信号时，两者在接收端叠加形成多路径干涉，并在信噪比观测值 SNR 中表现为随卫星仰角变化的周期性振荡[11-12]。GNSS-IR 基本观测几何关系如图 1 所示。

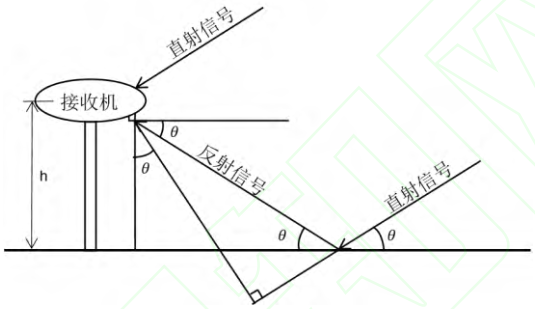


图 1 GNSS-IR 基本观测几何关系示意图
Fig. 1 Schematic of the basic GNSS-IR observation geometry

由图 1 可知，接收机同时接收来自卫星的直射信号和经地表反射后的反射信号。随着卫星仰角的变化，直射路径与反射路径之间的路径差不断改变，从而引起 SNR 观测值的周期性振荡。通常可将原始 SNR 观测值表示为趋势项与多路径振荡之和，即：

$$SNR = SNR_d + SNR_m \tag{1}$$

式中，SNR_d为由直射信号主导的平滑趋势项，SNR_m为由反射信号引起的多路径振荡项。

为提取反射信息，对原始 SNR 数据进行去趋势项处理，消除由天线增益模式、卫星发射功率及传播路径变化等因素引起的背景项。去趋势项后得到的SNR_m可近似表示为随卫星仰角变化的余弦振荡形式，即：

$$SNR_m = A\cos(4\pi\frac{h}{\lambda}\sin\theta + \varphi) \tag{2}$$

式中，A 为振幅，h为有效反射高度，λ为载波波长，θ为卫星高度角，φ为初始相位。

1.2 GNSS-IR 三种多路径指标

本文采用 BDS、GPS、Galileo 和 GLONASS 多系统多频 GNSS 观测数据。为避免不同指标中频点名称与接收机独立交换格式（Receiver Independent Exchange Format，RINEX）观测码混用，全文统一采用“系统-频点-观测码”的标识方式，各频点载波频率及对应 RINEX SNR 观测码见表 1。

BDS 包含地球静止轨道（Geostationary Earth Orbit，GEO）、倾斜地球同步轨道（Inclined Geosynchronous Orbit，IGSO）和中圆地球轨道（Medium Earth Orbit，MEO）卫星。考虑到不同轨道类型在空间运动特征、方位角覆盖和地面轨迹重复性方面存在差异，弧段提取时保留卫星轨道类型标识，并对升轨和降轨弧段分别处理。

表 1 多GNSS系统频点、载波频率与RINEX SNR观测码对应关系

Tab. 1 Correspondence among frequency points, carrier frequencies and RINEX SNR observation codes for multi-GNSS signals

卫星系统	频点	观测码	系统-频点-观测码	载波频率/MHz
BDS	B1I	S2I	BDS-B1I-S2I	1561.098
	B3I	S6I	BDS-B3I-S6I	1268.52
	B2I	S7I	BDS-B2I-S7I	1207.14
GPS	L1	S1C	GPS-L1-S1C	1575.42
	L2	S2W	GPS-L2-S2W	1227.6
	L2	S2X	GPS-L2-S2X	1227.6
	L5	S5I	GPS-L5-S5I	1176.45
Galileo	E1	S1X	Galileo-E1-S1X	1575.42
	E5a	S5X	Galileo-E5a-S5X	1176.45
	E5b	S7X	Galileo-E5b-S7X	1207.14
GLONASS	G1	S1C	GLONASS-G1-S1C	$(1602+_k\times0.5625)$
	G2	S2P	GLONASS-G2-S2P	$(1246+_k\times0.4375)$

注：GLONASS 采用频分多址（Frequency Division Multiple Access，FDMA）体制，其 G1 和 G2 载波频率分别为 $1602+k\times0.5625$ MHz 和 $1246+k\times0.4375$ MHz，其中k为卫星频率通道号。

1.2.1 归一化振幅 A_{norm}

首先对不同卫星弧段的 SNR_m 进行频谱分析，提取弧段振幅参数，并按日统计得到日尺度振幅序列 A_{doy}。考虑到不同频率信号的振幅存在差异，根据不同系统、不同频段分别进行振幅提取和归一化处理。归一化振幅定义[20]为：

$$A_{norm}=\frac{max(A_{doy})-A_{doy}}{max(A_{doy})} \tag{3}$$

式中，A_{doy}表示日尺度振幅，$max(A_{doy})$表示对应序列中的最大值。

1.2.2 归一化微波反射指数 NMRI

首先利用多径组合算法计算伪距观测值与载波相位观测值的多路径误差和观测噪声，提取不同频段下的多路径MP_i值：

$$MP_i=P_i-\frac{f_i^2+f_g^2}{f_i^2-f_g^2}l_i j_i+\frac{2f_g^2}{f_i^2-f_g^2}l_g j_g \tag{4}$$

式中，P_i为L_i频段上伪距多路径观测值，f_i和f_g分别表示L_i和L_g频段的频率，λ_i、λ_g和φ_i、φ_g分别表示对应频段的波长和载波相位观测值。

在此基础上，对同一系统、同一频段下的日尺度多路径均方根RMS_{MP}序列进行归一化处理，得到NMRI[21]：

$$NMRI=\frac{max(RMS_{MP})-RMS_{MP}}{max(RMS_{MP})} \tag{5}$$

式中，RMS_{MP}表示日尺度多路径均方根值，$max(RMS_{MP})$表示将该序列按从大到小排序后前 5%数值的平均值。该归一化基准沿用 NMRI 相关研究的处理方式[17]，可降低单个异常极值的影响。

A_{norm} 和 NMRI 分别基于 SNR 振荡振幅和码-相位多路径组合，其归一化基准及数值含义不同，因此本文不比较二者的绝对数值，而依据其与 NDVI 的相关系数、误差和显著性评价响应能力。P_{peak} 表征低频分量的频谱特征，主要用于分析有效反射尺度。本文不重新定义上述指标，重点是在统一观测和处理条件下比较其物理响应、统计表现和适用范围。

1.2.3 峰值功率 P_{peak}

对 SNRm 振荡序列进行经验模态分解（Empirical Mode Decomposition，EMD），将其自适应分解为若干 IMF 及残余项[25]。IMF 数量和频率尺度会随信号长度、噪声及观测环境变化，因此本文所

述 IMF5 和 IMF6 仅表示当前数据条件下的低频分量，不赋予其跨数据集固定的物理含义。采用 Lomb-Scargle 周期图（Lomb-Scargle periodogram，LS）提取各 IMF 的主导频率、峰值功率及对应周期[26]，功率谱计算公式如下：

$$P(f)=\frac{1}{2}\left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{N}x_i\cos 2\pi f(t_i-t)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\cos^2 2\pi f(t_i-t)}+\frac{\left(\sum_{i=1}^{N}x_i\sin 2\pi f(t_i-t)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\sin^2 2\pi f(t_i-t)}\right] \tag{6}$$

式中，x_i表示第 i 个观测历元对应的去趋势项后信号值，t_i为对应自变量，一般取$\sin\theta_i$或与卫星高度角相关的变换量，N 为样本数。τ 为时间平移量，用于消除正弦项与余弦项之间的耦合，其表达式为：

$$\tan(4\pi f\tau)=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sin(4\pi ft_i)}{\sum_{i=1}^{N}\cos(4\pi ft_i)} \tag{7}$$

对各低频 IMF 分量的 LS 功率谱提取功率较高的前三个有效谱峰，并按谱峰功率由大到小排序。第 j 个谱峰的功率记为$P_{peak,j}$,对应频率记为$f_{peak,j}$（j=1,2,3）。其中，$P_{peak,1}$为功率最大的第一主峰，文中用于 NDVI 相关性分析的 P_{peak} 特指$P_{peak,1}$；第二、第三谱峰作为候选谱峰用于后续反射尺度和冠层有效高度分析。谱峰信息包括峰值功率$P_{peak,j}$及其对应频率$f_{peak,j}$。

第一主峰满足：

$$P_{peak,1}=\max_f P(f) \tag{8}$$

对应的峰值频率记为：

$$f_{peak,1}=\arg\max_f P(f) \tag{9}$$

由各候选峰对应频率计算得到的有效反射高度记为H_{eff}，表示 GNSS 天线相位中心至主要反射层之间的等效垂直距离。频谱峰频率与有效反射高度之间的基本关系可写为：

$$H_{peak,j}=\frac{\lambda\cdot f_{peak,j}}{2},\ j=1,2,3 \tag{10}$$

其中，H_{eff}为天线有效反射高度，λ为载波波长，$f_{peak,j}$为第 j 个谱峰对应的频率，j=1,2,3。

当地表反射占主导时，有效反射高度记为H_{eff_S}；当植被覆盖条件下存在冠层反射时，相应候选有效反射高度记为H_{eff_V}。二者之差可表示候选冠层有效反射高度H_V：

$$H_V=H_{eff_S}-H_{eff_V} \tag{11}$$

其中，H_V表示由 GNSS 反射几何得到的冠层候选有效高度。H_V反映的是菲涅尔反射区域内的等效冠层反射尺度，并不等同于单株植被顶部高度；本文实测 VCH 仅用于后续独立验证，不参与 IMF 分量或谱峰的选择。

以卫星高度角正弦值为自变量时，谱峰频率与有效反射高度近似呈线性关系。裸土阶段的主要反射界面接近地表；植被生长后，反射界面可能转移至冠层内部或顶部。因此，地表参考有效高度与植被覆盖期有效反射高度之差可用于表征冠层有效高度。该高度表示菲涅尔反射区域内的等效反射尺度，并不等同于单株植被顶部高度。

本文首先在不使用 NDVI 和实测 VCH 的条件下，统计低频 IMF 候选谱峰的频率、有效反射高度及跨日期、跨卫星稳定性，再分析 P_{peak},1 与 NDVI 的关系。冠层高度提取不固定使用某一 IMF 编号或单一主峰，而是将多个低频 IMF 的前三个谱峰转换为候选有效反射高度，并通过物理范围、日内聚类、簇内离散程度和时间连续性确定主要反射层，具体流程见 2.3 节。

2 实验与分析

2.1 数据来源

2.1.1 多频多模 GNSS 观测数据

GNSS 数据来源于位于江苏省南京市溧水区的自建观测站，接收多频多模 GNSS 观测数据。

接收机型号为司南 M300，天线高 4.2 m，采样率 15 s，采样时间为 2024 全年（年积日（Day of Year，DOY）1~366）。测站所属区域为北亚热带季风气候区，夏季湿热多雨对植被的生长有较好的气候条件。如图 2 所示，测站北部区域以裸土为主，西南部分布大量植被，以加拿大一枝黄花为主。

BDS 包含 GEO、IGSO 和 MEO 卫星[27-28]，不同轨道类型在高度角变化、方位角分布和有效观测时段等方面存在差异。为分析其对多系统比较的影响，基于 2024 年全年有效弧段统计各系统及 BDS 不同轨道类型的实际观测几何。

GNSS 观测数据依据卫星高度角、方位角及时间连续性划分有效观测弧段，并对异常观测进行剔除。A_{norm} 处理中采用 5°～25°高度角范围，将 SNR 观测值限制在 10～70 dB-Hz；相邻历元时间间隔超过 120 s 或高度角变化方向发生反转时重新划分弧段，对升轨和降轨弧段分别处理，每条弧段有效样本数不少于 40，并采用二阶多项式去除 SNR 趋势项。LS 频谱对应有效反射高度搜索范围为 0.2～8.0 m，并要求谱峰显著性指标不低于 5.0、周期拟合决定系数 $R^2 \geq 0.30$，且有效振荡周期数不少于 1.5；日内弧段振幅采用均值±3σ 准则剔除异常值，形成日尺度结果后进一步采用滑动窗口 3σ 准则进行质量控制。NMRI 处理中同样采用 5°～25°高度角范围，并设置 30 dB-Hz 的 SNR 最低阈值；当相邻历元时间间隔超过 60 s、多路径组合值跳变超过 5 m 或几何无关组合跳变超过 1 m 时重新划分弧段，同时剔除绝对值超过 200 m 的异常多路径观测，每条有效弧段不少于 10 个采样点，弧段内采用 5 倍中位数绝对偏差（Median Absolute Deviation，MAD）准则剔除离群值；日尺度多路径 RMS 序列进一步采用滑动窗口 3σ 准则进行质量控制。

由表 2 可知，不同轨道构型对 GNSS-IR 实际观测几何具有明显影响。BDS－GEO 有效弧段的高度角变化中位数仅为 0.16°，方位角集中度达到 0.9997，且主要集中于单一方位扇区，表明其相对于固定测站的观测几何变化较缓；BDS-IGSO 的高度角变化增大至 5.07°，但方位角仍具有较强的方向集中性。相比之下，BDS-MEO 的高度角变化中位数为 5.61°，方位角集中度降至 0.0735，其高度角和方位角分布与 GPS、Galileo 和 GLONASS 的 MEO 卫星总体更加接近。说明 BDS 整体观测几何与其他系统之间的差异部分来源于 GEO、IGSO 和 MEO 组成的混合星座构型，而在 MEO 卫星之间，不同系统的实际观测几何差异明显减小。

为进一步评价跨系统同频比较中观测几何差异的影响，本文对 GPS-L1-S1C / Galileo-E1-S1X、GPS-L5-S5I / Galileo-E5a-S5X 和 BDS-B2I-S7I / Galileo-E5b-S7X 三组重叠中心频率信号进行了时间—几何约束敏感性分析。在相同自然日条件下，进一步限制两系统有效弧段的中间时刻差不超过 60 min、圆周方位角差不超过 30°、平均高度角差不超过 2°、弧段持续时间差不超过 5 min，仅保留具有跨系统时间—几何共同支撑的有效弧段，并按照原有指标计算和质量控制流程重新进行 NDVI 响应分析。若某一系统的有效弧段能够在另一系统中找到至少一条同时满足上述时间和几何约束条件的有效弧段，则认为该弧段具有跨系统时间—几何共同支撑并予以保留。



图 2 GNSS 测站周边环境
Fig. 2 Surrounding Environment of the GNSS Station

表 2 不同GNSS系统及BDS不同轨道类型的有效观测几何统计
Tab. 2 Statistics of effective observation geometry for different GNSS systems and BDS orbit types

系统/轨道类型	有效卫星数	有效弧段数	平均高度角/(°)	弧段高度角变化中位数/(°)	方位角 30° 扇区覆盖	方位角集中度 R	弧段时长中位数/min
BDS-GEO	1	3412	16.54±0.85	0.16	1/12	0.9997	53.75
BDS-IGSO	10	6603	14.50±5.42	5.07	3/12	0.9609	27
BDS-MEO	27	19548	14.53±5.17	5.61	10/12	0.0735	22
GPS-MEO	31	25631	14.72±5.17	4.82	10/12	0.1188	16
Galileo-MEO	23	21490	14.81±5.35	4.16	10/12	0.0738	17.75
GLONASS-MEO	21	13803	14.41±5.16	5.09	12/12	0.127	15.25

注：统计基于 2024 年全年满足质量控制要求的 GNSS-IR 有效观测弧段。弧段高度角变化为单条弧段最大高度角与最小高度角之差；方位角 30°扇区覆盖表示 12 个 30°方位区间中存在有效观测弧段的区间数；方位角集中度 R 为圆统计合成向量长度，R 越接近 0 表示方位分布越均匀，越接近 1 表示方位分布越集中。

2.1.2 植被参数数据

NDVI 数据基于谷歌地球引擎（Google Earth Engine，GEE）云平台处理与获取，选用 Sentinel-2 多光谱影像，空间分辨率为 10 m，重访周期约 5 d。为提高 GNSS-IR 观测区域与遥感植被参数的空间一致性，根据实际 GNSS 观测弧段的卫星方位角、高度角及载波频率计算一阶菲涅尔反射足迹。在 5 °～25 °高度角范围内，镜面反射点距测站约 9～48 m，相应菲涅尔足迹半长轴约 3.3～39.9 m、半短轴约 1.4～3.5 m。以该反射足迹为约束提取 Sentinel-2 NDVI，并经云雾等质量控制后构建 15 d 时间尺度的 NDVI 序列。受云覆盖及质量控制影响，2024 年 6 月 9 日对应时段未获得有效 NDVI 值，该点保持缺失，不进行插值补齐。

VCH 通过地面实测获取（3-10 月），采样频率为每周 1 次。采样时，在研究区内均匀设置多个样方，每个样方内随机选取若干株具有代表性的植株，采用卷尺测量其从地表至冠层顶部的垂直距离，各样方内多株测值统计后得到样方植被高度，取平均后作为实测冠层高度。样方主要布设在测站西南侧植被覆盖区域内，该区域与本文 GNSS-IR 植被反射分析所采用的方位角范围基本一致。考虑到 GNSS-IR 反演高度代表菲涅尔反射区内的等效冠层响应，而非单株植被高度，本文在研究区内设置多个样方，并对各样方内多株植被高度取平均，以表征主要植被反射区域的平均冠层高度。

2.2 多路径指标与 NDVI 的相关性分析

GNSS-IR 指标为日尺度数据，NDVI 受影像重访及云质量控制影响，时间间隔相对较长。本文采用 5 d 滑动平均对 A_{norm}、NMRI 和 P_{peak} 进行平滑，并按 NDVI 日期对齐；空间上采用与一阶菲涅尔反射足迹匹配的 NDVI 结果，以降低日尺度随机波动和短时扰动的影响。

为检验滑动窗口长度对相关性结果的影响，采用 3 d、5 d、7 d 和 15 d 滑动窗口进行敏感性分析。结果如表 3 所示。

由表 3 可知，各时间窗口下三种指标的响应方向和相对特征总体一致，部分指标随窗口增大相关性提高、误差降低，但不存在统一最优窗口。考虑到 5 d 窗口兼顾平滑效果和时间分辨率，后续采用该窗口进行分析。

表 3 不同滑动窗口下三类GNSS-IR多路径指标与NDVI关系的敏感性分析

Tab. 3 Sensitivity analysis of the relationships between three GNSS-IR multipath indicators and NDVI under different moving-window lengths

时间窗口/d	A_{norm}			时间窗口/d	NMRI		
	平均 R	平均 RMSE	平均 MAE		平均 R	平均 RMSE	平均 MAE
3	0.7591	0.1009	0.0808	3	0.7309	0.1042	0.0876
5	0.8081	0.0917	0.0741	5	0.7585	0.0992	0.0820
7	0.8151	0.0902	0.0718	7	0.7568	0.0994	0.0824
15	0.8329	0.0853	0.0689	15	0.7755	0.0945	0.0780
时间窗口/d	IMF5-P_{peak}			时间窗口/d	IMF6-P_{peak}		
	平均|R|	平均 RMSE	平均 MAE		平均 R	平均 RMSE	平均 MAE
3	0.4447	0.1387	0.1189	3	0.3319	0.1492	0.1317
5	0.5691	0.1280	0.1060	5	0.4111	0.1429	0.1248
7	0.6031	0.1235	0.1011	7	0.4147	0.1420	0.1242
15	0.5442	0.1271	0.1051	15	0.5216	0.1333	0.1156

注：为消除不同时间窗口下有效样本数量差异的影响，各窗口均采用共同有效的 20 期 NDVI 数据进行统计，因此，表 3 中 5 d 窗口的统计值与表 4、表 5 和表 9 基于全部有效样本所得结果存在少量差异。A_{norm}、NMRI 和 IMF6-P_{peak} 采用各系统—频点—观测码组合相关系数的平均值；IMF5-P_{peak} 与 NDVI 呈负相关，采用相关系数绝对值表征相关强度。

2.2.1 A_{norm} 与 NDVI 的相关性分析

为分析多频多模 GNSS 信号 A_{norm} 对 NDVI 的响应能力，分别计算了各 A_{norm} 与 NDVI 的 Pearson 相关系数，并采用线性回归分析二者的响应关系。散点分布图如图 3 所示，相关系数 R、95%置信区间（95% Confidence Interval，95% CI）、显著性水平 p、RMSE 和 MAE 等统计结果见表 4。

由表 4 可知，不同系统和频点的 A_{norm} 均与 NDVI 呈显著正相关，相关系数为 0.6738~0.8895，且所有信号组合均达到 $p<0.001$，其 95%置信区间均未跨越 0，表明 A_{norm} 对 NDVI 变化具有较稳定的响应。其中，GPS-L1-S1C 相关性最高（R=0.8895），BDS-B3I-S6I 和 BDS-B1I-S2I 次之，相关系数分别为 0.8804 和 0.8788，对应 RMSE 分别为 0.0736 和 0.0741，表现出较好的拟合精度。相比之下，GPS-L2-S2W 和 BDS-B2I-S7I 的相关系数相对较低，分别为 0.6738 和 0.6946，但仍保持显著正相关。上述结果说明，在本站实验条件下，多频多模 A_{norm} 能够较好表征 NDVI 的季节变化，但不同系统和频点的响应强度存在一定差异。

从不同系统重叠中心频率信号来看，完整观测数据中部分信号表现出一定的 NDVI 响应相似性。例如，GPS-L5-S5I 与 Galileo-E5a-S5X 的相关系数分别为 0.7386 和 0.7666，BDS-B2I-S7I 与 Galileo-E5b-S7X 分别为 0.6946 和 0.7460；GPS-L1-S1C 与 Galileo-E1-S1X 分别为 0.8895 和 0.8081，仍存在一定差异。结合 2.1.1 节观测几何统计及时间—几何约束敏感性分析可知，不同星座在卫星组成和实际观测条件方面仍存在差异，而严格约束后 A_{norm} 可形成的共同有效样本进一步减少。因此，完整数据中部分同频信号表现出的响应相似性仅说明载波频率可能是影响因素之一，尚不足以将该特征单独归因于载波频率。

图 4 表明，多数频点 A_{norm} 能够跟踪 NDVI 的季节变化，相关性较低的部分频点短期波动更明显。

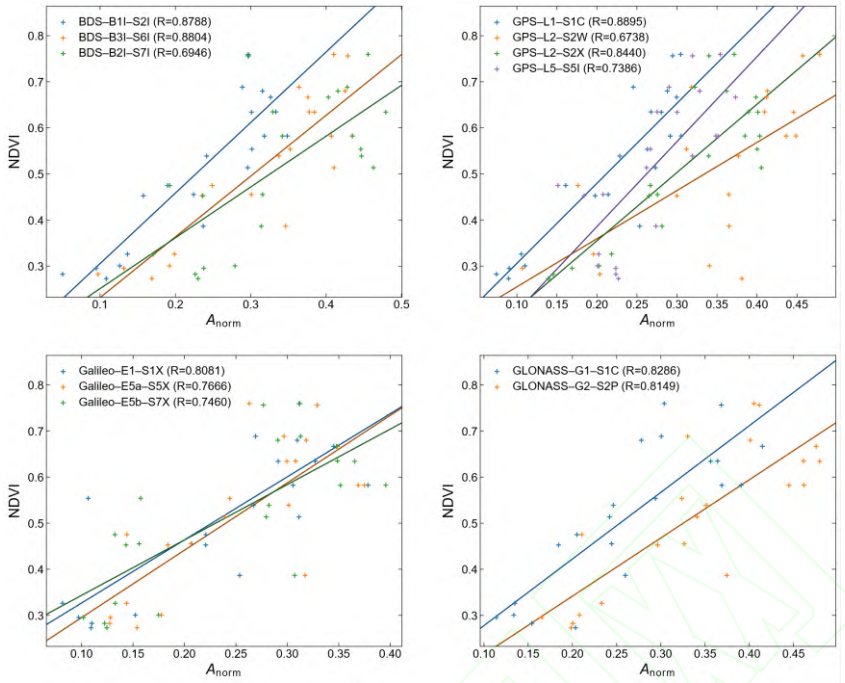


图 3 多频多模信号 A_{norm} 与 NDVI 散点图

Fig. 3 Scatter Plots of A_{norm} and NDVI for Multi-Frequency and Multi-Constellation GNSS Signals.

表 4 多频多模信号A_{norm}与NDVI 间的相关性分析参数表

Tab. 4 Fitting Statistics Between A_{norm} and NDVI for Multi-Frequency and Multi-Constellation GNSS Signals

系统—频点—观测码	R	95% CI	p	RMSE	MAE
BDS–B1I–S2I	0.8788	[0.7203,0.9501]	1.5968E-07	0.0741	0.0607
BDS–B3I–S6I	0.8804	[0.7238,0.9507]	1.4129E-07	0.0736	0.0608
BDS–B2I–S7I	0.6946	[0.3756,0.8665]	4.7525E-04	0.1117	0.0960
GPS–L1–S1C	0.8895	[0.7432,0.9546]	6.8964E-08	0.0709	0.0536
GPS–L2–S2W	0.6738	[0.3414,0.8564]	8.1196E-04	0.1147	0.0906
GPS–L2–S2X	0.8440	[0.6486,0.9350]	1.5202E-06	0.0833	0.0606
GPS–L5–S5I	0.7386	[0.4506,0.8874]	1.3147E-04	0.1046	0.0948
Galileo–E1–S1X	0.8081	[0.5780,0.9191]	9.3827E-06	0.0914	0.0712
Galileo–E5a–S5X	0.7666	[0.5005,0.9003]	5.0552E-05	0.0997	0.0793
Galileo–E5b–S7X	0.7460	[0.4635,0.8908]	1.0348E-04	0.1034	0.0875
GLONASS–G1–S1C	0.8286	[0.6179,0.9282]	3.4930E-06	0.0869	0.0687
GLONASS–G2–S2P	0.8149	[0.5911,0.9222]	6.8581E-06	0.0900	0.0719

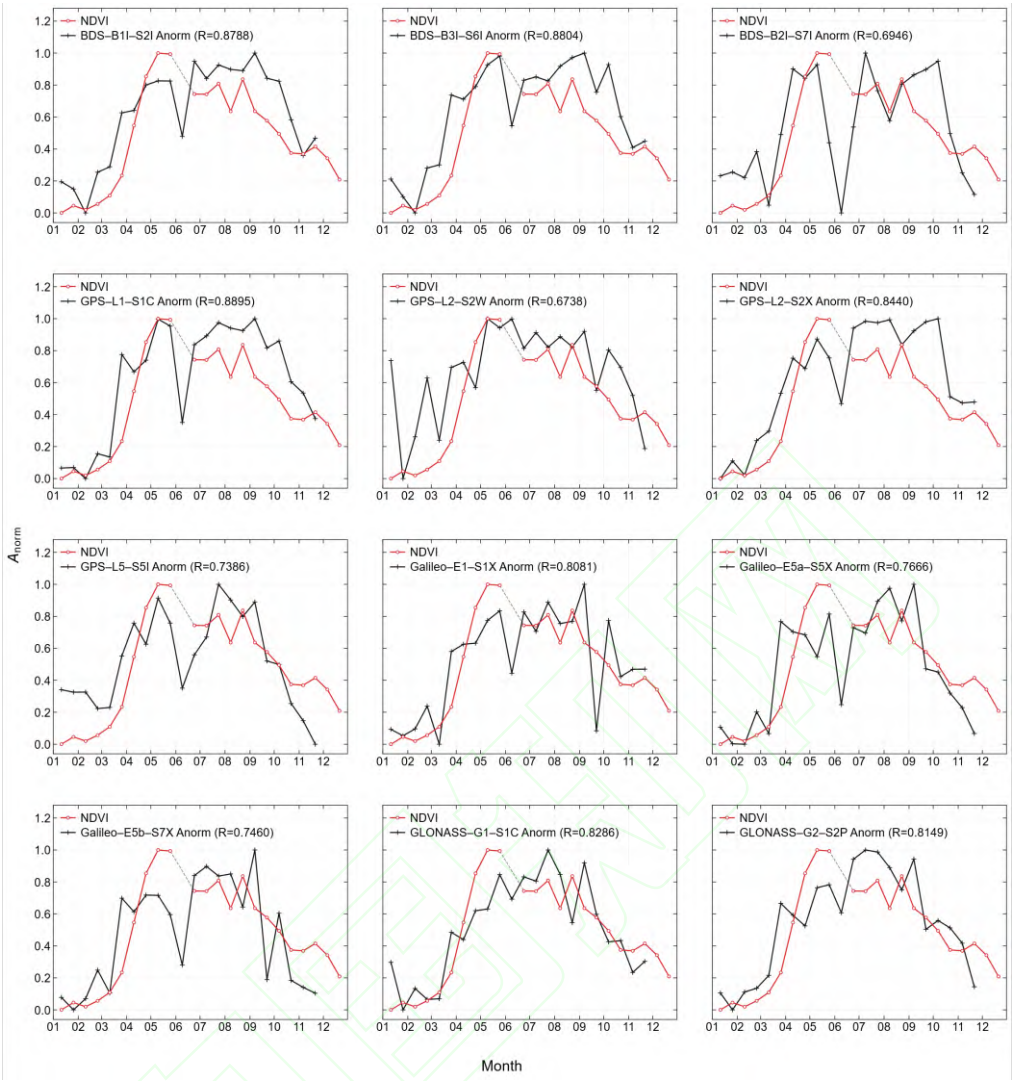


图 4 多频多模信号 A_{norm} 与 NDVI 时间序列对比图

Fig. 4 Time-series comparison between A_{norm} and NDVI for multi-frequency and multi-constellation GNSS signals.

注：2024 年 6 月 9 日 NDVI 数据缺失，灰色虚线仅用于连接缺失时段两侧的有效观测值以保持时序展示连续性，缺失值未参与相关性及回归计算。

2.2.2 NMRI 与 NDVI 的相关性分析

为分析多频多模 GNSS 信号 NMRI 对 NDVI 的响应能力，计算了各 NMRI 与 NDVI 的 Pearson 相关系数，采用线性回归分析二者的响应关系。散点分布如图 5 所示，相关系数 R、95%置信区间（95% CI）、显著性水平 p、RMSE 和 MAE 等统计结果见表 5。

由表 5 可知，不同系统和频点的 NMRI 均与 NDVI 呈显著正相关，相关系数为 0.4885～0.8858，所有信号组合均达到 $p<0.05$，且 95%置信区间均未跨越 0，表明 NMRI 能够较稳定地响应 NDVI 变化。其中，Galileo-E1-S1X 相关性最高（R=0.8858），GPS-L1-S1C、GLONASS-G2-S2P 和 GPS-L2-S2W/S2X 的相关系数分别为 0.8796、0.8506 和 0.8445，表现出较强的 NDVI 响应能力。相比之下，Galileo-E5b-S7X 和 BDS-B2I-S7I 的相关系数分别为 0.4885 和 0.4981，虽然相对较低，但仍通过显著性检验。上述结果说明，在本站实验条件下，NMRI 总体能够较好表征 NDVI 的季节变化，但其响应强度具有一定的系统和频点差异。

完整数据中，GPS-L1-S1C/Galileo-E1-S1X、GPS-L5-S5I/Galileo-E5a-S5X、BDS-B2I-S7I/Galileo-E5b-S7X 三组重叠中心频率信号的 NMRI 相关系数较为接近。进行 2.1.1 节的时间—几何约束后，前

两组相关系数差异增大，第三组因有效弧段支撑不足未作进一步解释。说明同频信号的 NDVI 响应仍受星座构型、观测几何和样本组成影响，不能单独归因于载波频率。图 6 显示，多数频点 NMRI 能够跟踪 NDVI 的季节变化，相关性较低的频点短期波动更明显。

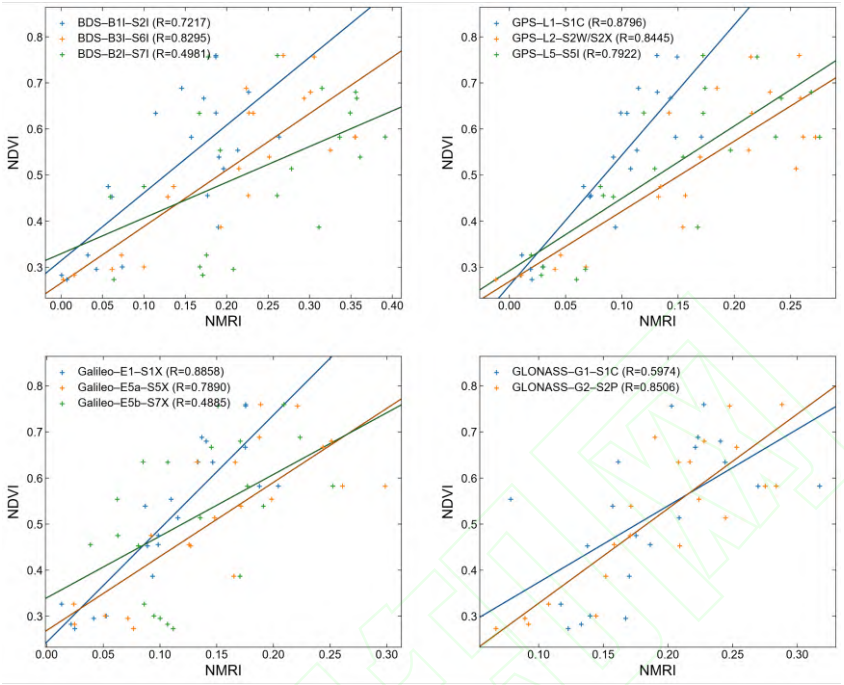


图 5 多频多模信号 NMRI 与 NDVI 散点图

Fig. 5 Scatter Plots of NMRI and NDVI for Multi-Frequency and Multi-Constellation GNSS Signals.

表 5 多频多模信号NMRI与NDVI间的相关性分析参数表

Tab. 5 Fitting Statistics Between NMRI and NDVI for Multi-Frequency and Multi-Constellation GNSS Signals

系统—频点—观测码	R	95% CI	p	RMSE	MAE
BDS–B1I–S2I	0.7217	[0.4212,0.8794]	2.2166E-04	0.1074	0.0941
BDS–B3I–S6I	0.8295	[0.6197,0.9286]	3.3340E-06	0.0867	0.0730
BDS–B2I–S7I	0.4981	[0.0846,0.7653]	2.1554E-02	0.1346	0.1141
GPS–L1–S1C	0.8796	[0.7220,0.9504]	1.5059E-07	0.0739	0.0577
GPS–L2–S2W/S2X	0.8445	[0.6497,0.9353]	1.4738E-06	0.0831	0.0646
GPS–L5–S5I	0.7922	[0.5479,0.9120]	1.8652E-05	0.0947	0.0753
Galileo–E1–S1X	0.8858	[0.7353,0.9531]	9.2912E-08	0.0720	0.0592
Galileo–E5a–S5X	0.7890	[0.5420,0.9106]	2.1260E-05	0.0954	0.0745
Galileo–E5b–S7X	0.4885	[0.0720,0.7599]	2.4648E-02	0.1354	0.1174
GLONASS–G1–S1C	0.5974	[0.2233,0.8181]	4.2410E-03	0.1245	0.1089
GLONASS–G2–S2P	0.8506	[0.6621,0.9379]	1.0330E-06	0.0816	0.0661

注：GPS L2 的 NMRI 为当前处理中的 L2 组合结果（S2W/S2X）。

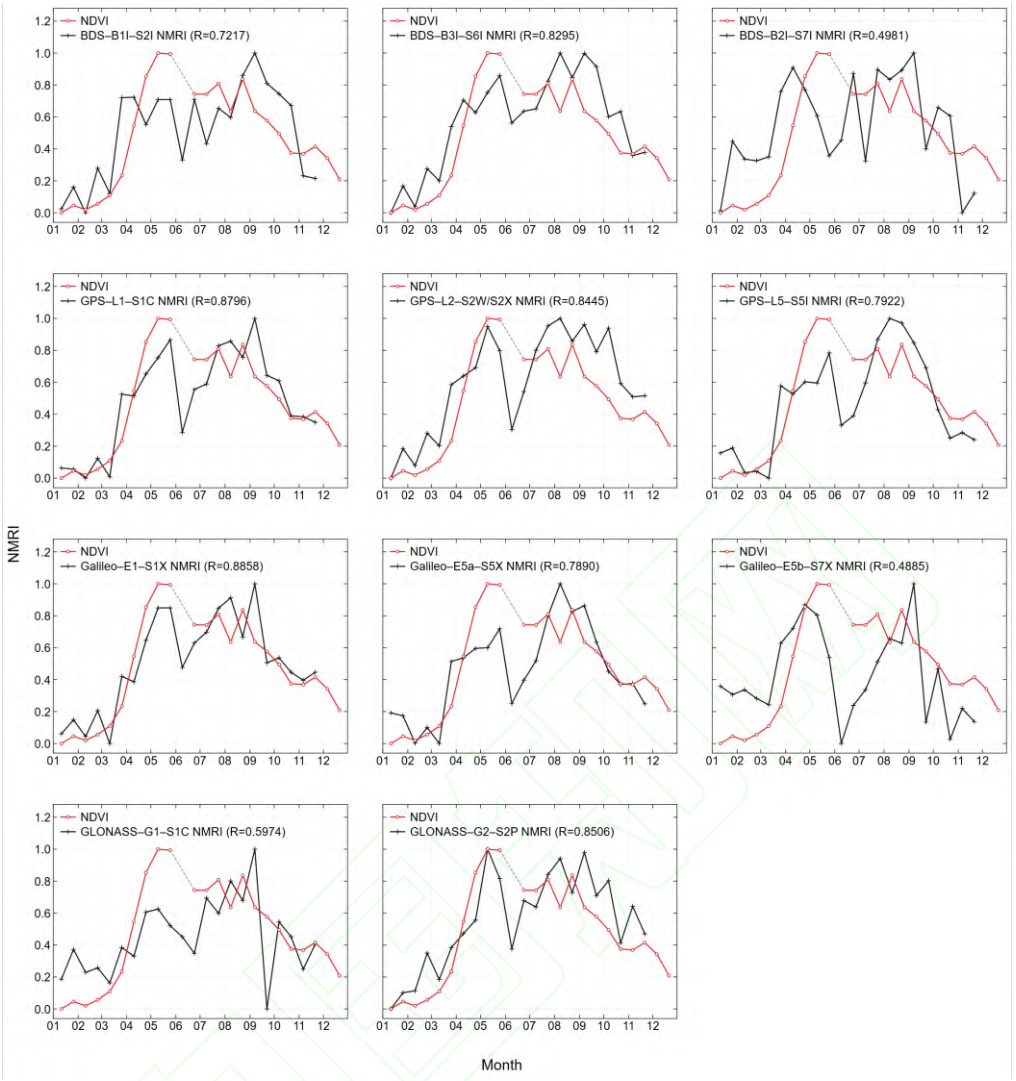


图 6 多频多模信号 NMRI 与 NDVI 时间序列对比图

Fig. 6 Time-series comparison between NMRI and NDVI for multi-frequency and multi-constellation GNSS signals.

注：2024 年 6 月 9 日 NDVI 数据缺失，灰色虚线仅用于连接缺失时段两侧的有效观测值以保持时序展示连续性，缺失值未参与相关性及回归计算。

2.2.3 A_{norm} 与 NMRI 对 NDVI 响应差异比较

A_{norm} 和 NMRI 来源于不同 GNSS 观测信息且归一化方式不同，因此本节依据二者与 NDVI 的相关关系及统计检验比较其响应差异。

5 d 滑动平均条件下，A_{norm} 与 NDVI 的相关系数为 0.6738～0.8895，平均值为 0.7970，平均 RMSE 和 MAE 分别为 0.0920 和 0.0747；NMRI 的相关系数为 0.4885～0.8858，平均值为 0.7434，平均 RMSE 和 MAE 分别为 0.0990 和 0.0823。A_{norm} 的平均相关性略高、误差略低，但二者在不同系统和频点上的相对表现并不一致，不能仅据描述性统计判断某一指标具有普遍优势。

为进一步检验两类指标相关系数差异是否具有统计意义，针对具有一致信号的组合进行比较。由于 A_{norm}-NDVI 和 NMRI-NDVI 的相关系数共享同一 NDVI 变量，二者并非相互独立，因此采用 Williams 相关系数差异检验[29]进行比较，并进一步采用 Benjamini–Hochberg 方法[30]进行错误发现率（False Discovery Rate，FDR）校正，以控制多重检验带来的假阳性风险。相关检验结果见表 6。

表 6 显示，未经校正时 BDS-B1I-S2I 和 Galileo-E5b-S7X 的两类指标相关系数差异达到 $p<0.05$；FDR 校正后，各信号组合的 q 值均大于 0.05，尚无充分证据表明 A_{norm} 或 NMRI 具有普遍的响应优

势。

A_{norm} 和 NMRI 均能表征本站 NDVI 变化，实际应用中应根据观测类型、信号质量和频点条件选择相应指标。

2.2.4 BDS 信号与其他 GNSS 系统的 NDVI 响应对比

为验证 BDS 信号在 GNSS-IR 植被监测中的适用性，将其三个频点的结果与其他系统进行比较（表 7）。BDS 的 A_{norm} 和 NMRI 相关系数分别为 0.6946～0.8804 和 0.4981～0.8295，均处于 GPS、Galileo 和 GLONASS 的总体范围内。BDS 的 IMF5-P_{peak} 与 NDVI 均呈负相关（R 为-0.7074～-0.4121），IMF6-P_{peak} 均呈正相关（R 为 0.2289～0.3002），相关方向与其他系统一致，但不同频点的响应强度存在差异。总体上，A_{norm} 和 NMRI 能够较稳定地表征 BDS 信号的植被响应；BDS 的 P_{peak} 与其他系统具有一致的相关方向，但其响应稳定性相对较弱。BDS 混合星座扩展了轨道和观测几何类型，但频点差异仍受星座构型、有效卫星数量、信号质量及局部反射环境等因素影响。

表 6 A_{norm}与NMRI对NDVI响应的相关系数差异检验

Tab. 6 Statistical Comparison of Correlation Coefficients Between A_{norm} and NMRI in Response to NDVI

系统—频点—观测码	R_A_{norm}	R_NMRI	ΔR	Williams p	FDR q
BDS–B1I–S2I	0.8788	0.7217	0.1571	0.0065	0.0648
BDS–B3I–S6I	0.8804	0.8295	0.0509	0.2580	0.4300
BDS–B2I–S7I	0.6946	0.4981	0.1965	0.2043	0.4086
GPS–L1–S1C	0.8895	0.8796	0.0099	0.7293	0.7293
GPS–L5–S5I	0.7386	0.7922	-0.0536	0.4830	0.6900
Galileo–E1–S1X	0.8081	0.8858	-0.0777	0.1428	0.3571
Galileo–E5a–S5X	0.7666	0.7890	-0.0224	0.7158	0.7293
Galileo–E5b–S7X	0.7460	0.4885	0.2575	0.0497	0.1805
GLONASS–G1–S1C	0.8286	0.5974	0.2312	0.0541	0.1805
GLONASS–G2–S2P	0.8149	0.8506	-0.0357	0.6103	0.7293

注：ΔR=R_A_{norm} −R_NMRI；Williams 检验用于比较共享同一 NDVI 变量的两个相关系数；q 为采用 Benjamini–Hochberg 方法进行 FDR 校正后的显著性水平，q<0.05 表示校正后差异显著；GPS L2 因 NMRI 采用 S2W/S2X 组合结果，与 A_{norm} 观测码无法严格一一对应，故未纳入正式成对比较。

表 7 BDS信号与其他GNSS系统三种指标的NDVI响应结果对比

Tab. 7 Comparison of the NDVI Responses of Three Indicators Between BDS Signals and Other GNSS Systems

系统-频点-观测码	R_A_{norm}	R_NMRI	R_IMF5-P_{peak}	R_IMF6-P_{peak}
BDS-B1I-S2I	0.8788	0.7217	-0.7019	0.3002
BDS-B3I-S6I	0.8804	0.8295	-0.7074	0.2690
BDS-B2I-S7I	0.6946	0.4981	-0.4121	0.2289
GPS、Galileo 和 GLONASS 各信号范围	0.6738～0.8895	0.4885～0.8858	-0.6949～-0.3390	0.2466～0.6370

2.2.5 低频 IMF 分量频谱特征及 P_{peak} 与 NDVI 的相关性分析

由于相同 IMF 编号在不同日期、卫星和观测弧段中不具有固定物理含义，本文在不使用 NDVI、实测 VCH 和植被生长期信息的条件下，统计 IMF5 和 IMF6 前三个 LS 谱峰的频率、有效反射高度及跨日期、跨卫星稳定性，结果见表 8。

表 8 显示，IMF5 第一谱峰的有效反射高度中位数为 4.04 m，四分位距（Interquartile Range，IQR）为 3.60～4.74 m，跨日期和跨卫星变异系数（Coefficient of Variation，CV）分别为 1.25%和 3.18%，具有较稳定的近地表反射尺度；其第二、第三谱峰分布更宽。IMF6 前三个谱峰的高度中位数分别为 1.56、2.04 和 2.50 m，第一谱峰跨卫星变异系数为 26.83%，表明其频谱尺度具有更明显的卫星和观测几何依赖性，反射信息并不集中于唯一主峰。

在上述独立频谱分析基础上，采用 IMF5 和 IMF6 第一主峰功率 $P_{peak,1}$ 评价其与 NDVI 的关系，结果见图 7、图 8 和表 9。NDVI 仅用于响应评价，不参与 IMF 物理属性或谱峰尺度判定。

IMF5-P_{peak} 与 NDVI 总体呈负相关，R 为-0.7074～-0.3390，10 组信号中 8 组达到 $p<0.05$，可能反映植被生长对近地表反射的遮挡和衰减。IMF6-P_{peak} 总体呈弱至中等正相关，R 为 0.2289～0.6370，仅 GPS-L2-S2X 和 GLONASS-G2-S2P 达到 $p<0.05$，其稳定性受频点、观测几何及多界面反射影响。部分重叠中心频率信号虽具有相同相关方向，但强度仍存在差异，不能仅用载波频率解释。

图 9 显示，IMF5 在部分信号上与 NDVI 呈相反的季节变化，IMF6 部分信号呈同向变化，但短期波动和频点差异更明显。

综上，P_{peak} 能够响应植被变化，但直接表征 NDVI 的稳定性弱于 A_{norm} 和 NMRI。IMF5 第一谱峰在本站条件下具有较稳定的近地表尺度，IMF6 则表现出更明显的多谱峰和观测几何依赖性，因此 P_{peak} 及其频率信息更适用于多反射界面和有效反射高度分析。

表 8 IMF5和IMF6前三谱峰频谱及有效反射高度稳定性统计

Tab. 8 Spectral and effective reflection height statistics of the first three peaks of IMF5 and IMF6

IMF 分量	谱峰序号	有效谱峰数	有效日期/d	有效卫星数	谱峰频率中位数/(cycles/sin e)	频率 IQR	(H_{eff})中位数/m	(H_{eff}) IQR/m	跨日期 (H_{eff}) CV/%	跨卫星 (H_{eff}) CV/%
IMF5	1	114166	322	110	38.25	31.12～43.79	4.04	3.60～4.74	1.25	3.18
IMF5	2	96572	322	110	30.9	20.94～41.20	3.3	2.32～4.42	4.06	7.04
IMF5	3	74539	322	110	27.42	16.66～41.37	2.92	1.84～4.50	5.18	7.82
IMF6	1	130277	322	110	14.37	10.79～20.88	1.56	1.18～2.28	3.8	26.83
IMF6	2	110390	322	110	18.71	11.63～26.40	2.04	1.24～2.90	8.29	17.59
IMF6	3	79867	322	110	23.12	15.77～31.94	2.5	1.68～3.48	8.76	10.36

注：谱峰序号按谱峰功率由大到小排列，第 1 谱峰对应$P_{peak,1}$和$f_{peak,1}$，第 2、3 谱峰分别为后续反射尺度分析的候选谱峰；IQR 为四分位距，表示第 75 百分位数与第 25 百分位数之差；CV 为变异系数，即标准差与均值之比。CV 用于评价有效反射高度在不同日期和不同卫星条件下的相对稳定性，CV 越小表示稳定性越高。

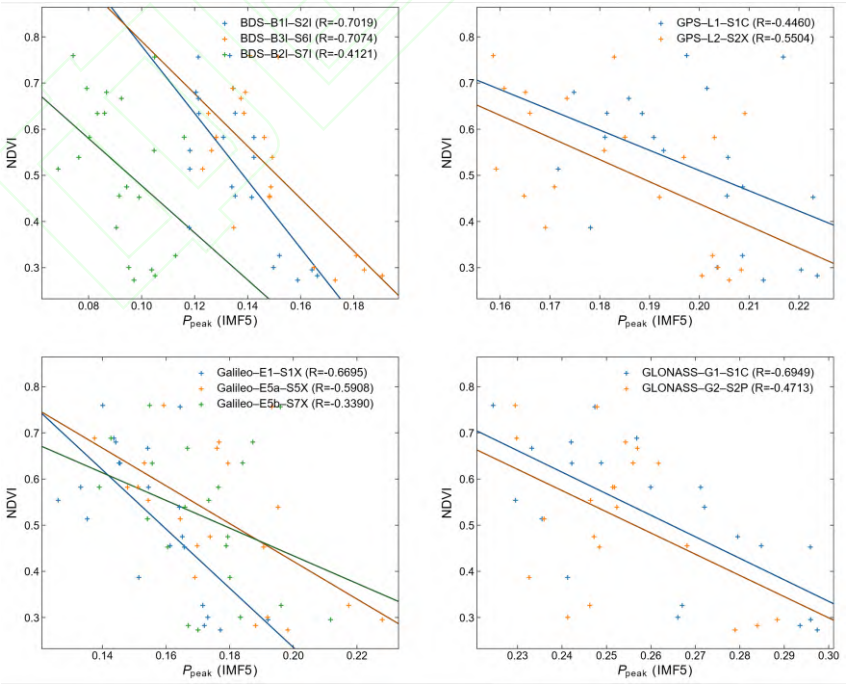


图 7 IMF5 分量多频多模信号 P_{peak} 与 NDVI 散点图

Fig. 7 Scatter Plots of P_{peak} Versus NDVI for Multi-Frequency and Multi-Constellation GNSS Signals in the IMF5 Component.

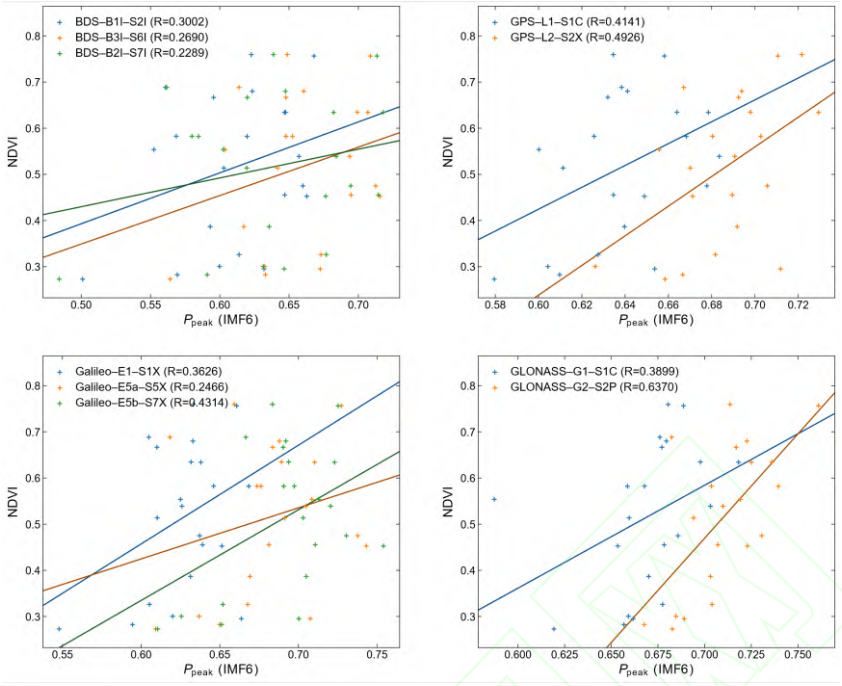


图 8 IMF6 分量多频多模信号 P_{peak} 与 NDVI 散点图

Fig. 8 Scatter Plots of P_{peak} Versus NDVI for Multi-Frequency and Multi-Constellation GNSS Signals in the IMF6 Component.

表 9 低频IMF分量P_{peak}与NDVI的相关性分析参数表

Tab. 9　Fitting Statistics Between P_{peak} and NDVI for Low-Frequency IMF Components

低频分量	系统—频点—观测码	R	95% CI	p	RMSE	MAE
IMF5	BDS–B1I–S2I	-0.7019	[-0.8700,-0.3876]	3.9073E-04	0.1106	0.0892
	BDS–B3I–S6I	-0.7074	[-0.8726,-0.3969]	3.3535E-04	0.1097	0.0865
	BDS–B2I–S7I	-0.4121	[-0.7163,0.0238]	6.3418E-02	0.1414	0.1229
	GPS–L1–S1C	-0.4460	[-0.7360,-0.0178]	4.2701E-02	0.1389	0.1099
	GPS–L2–S2X	-0.5504	[-0.7936,-0.1558]	9.7200E-03	0.1296	0.1153
	Galileo–E1–S1X	-0.6695	[-0.8543,-0.3345]	9.0106E-04	0.1153	0.0955
	Galileo–E5a–S5X	-0.5908	[-0.8147,-0.2136]	4.8004E-03	0.1252	0.0996
	Galileo–E5b–S7X	-0.3390	[-0.6723,0.1086]	1.3282E-01	0.1460	0.1206
	GLONASS–G1–S1C	-0.6949	[-0.8666,-0.3760]	4.7192E-04	0.1116	0.0976
	GLONASS–G2–S2P	-0.4713	[-0.7503,-0.0498]	3.1020E-02	0.1369	0.1155
IMF6	BDS–B1I–S2I	0.3002	[-0.1511,0.6479]	1.8617E-01	0.1481	0.1330
	BDS–B3I–S6I	0.2690	[-0.1841,0.6278]	2.3839E-01	0.1495	0.1328
	BDS–B2I–S7I	0.2289	[-0.2250,0.6012]	3.1820E-01	0.1511	0.1340
	GPS–L1–S1C	0.4141	[-0.0215,0.7175]	6.2040E-02	0.1413	0.1252
	GPS–L2–S2X	0.4926	[0.0774,0.7622]	2.3276E-02	0.1351	0.1120
	Galileo–E1–S1X	0.3626	[-0.0819,0.6868]	1.0623E-01	0.1447	0.1235
	Galileo–E5a–S5X	0.2466	[-0.2071,0.6131]	2.8111E-01	0.1504	0.1302
	Galileo–E5b–S7X	0.4314	[-0.0003,0.7276]	5.0836E-02	0.1400	0.1216
	GLONASS–G1–S1C	0.3899	[-0.0502,0.7032]	8.0569E-02	0.1429	0.1249
	GLONASS–G2–S2P	0.6370	[0.2832,0.8382]	1.9002E-03	0.1197	0.0963



图 9 IMF5 和 IMF6 分量多频多模信号 P_{peak} 与 NDVI 时间序列对比图

Fig. 9 Time-series comparison between NDVI and P_{peak} of multi-frequency and multi-constellation GNSS signals in the IMF5 and IMF6 components.

注：2024 年 6 月 9 日 NDVI 数据缺失，灰色虚线仅用于连接缺失时段两侧的有效观测值以保持时序展示连续性，缺失值未参与相关性及回归计算。

2.3 多候选谱峰法的冠层有效反射高度提取与精度评价

基于 1.2.3 节的方法，对低频 IMF 进行 LS 频谱分析，提取前三个候选谱峰并计算有效反射高度，再通过物理范围、日内聚类、稳健统计和时间连续性确定冠层反射层，流程见图 10。

首先利用裸土或低植被覆盖阶段的稳定近地表谱峰建立地表参考有效高度。植被覆盖期则根据式（11）计算各低频 IMF 前三个谱峰对应的候选冠层有效高度，剔除不合理值后，对同日不同卫星、频段和弧段的结果进行聚类，选择样本较多且离散程度较小的候选簇，并以中位数得到日尺度冠层有效高度。

候选高度范围用于保证反射尺度的物理可行性，日内聚类及簇内离散程度用于评价跨卫星观测支持度和稳定性，时间连续性用于排除噪声、局部散射及谱峰切换引起的异常突变。

以主导谱峰法作为基线，两种方法采用相同的原始数据、质量控制、地表参考高度、候选高度范围和日尺度合成条件。前者选择预设低频分量中的最大功率谱峰，后者联合多个低频分量的候选谱峰及日内聚类、离散程度和时间连续性确定反射层。

图 11—13 显示，裸土条件下近地表反射谱峰较突出；植被生长后频谱结构逐渐复杂，并出现多个与地表参考高度存在差异的候选峰，表明地表、冠层内部和顶部反射可能共同作用。因此，单一最

大谱峰难以稳定表征同一反射界面。

图 14 和图 15 显示，提取高度与实测 VCH 具有一致的季节变化，R、RMSE 和 MAE 分别为 0.9805、0.1521 m 和 0.1263 m。去趋势和一阶差分后的相关系数分别为 0.8658 和 0.5578，说明该结果并非完全由共同季节趋势造成，但对短期高度变化的跟踪能力相对较弱。提取结果整体略低于实测值，可能与 GNSS-IR 反映菲涅尔区域内的等效反射层有关。

表 11 可知，主导谱峰法的 R、RMSE 和 MAE 分别为 0.9324、0.2799 m 和 0.2259 m；多候选谱峰法分别为 0.9805、0.1521 m 和 0.1263 m，RMSE 降低 45.66%，表明多候选谱峰与时空约束能够减少反射层误判。

Zhang 等[22]、Li 等[23-24]分别采用小波主导周期、Lomb–Scargle 显著谱峰及 EMD 与跨卫星方差判别提取植被高度。本文沿用谱峰频率—有效反射高度的基本关系，主要改进在于利用多候选谱峰及物理、跨卫星和时间约束判别复杂冠层反射层。在相同处理条件下，其 RMSE 较主导谱峰法由 0.2799 m 降至 0.1521 m。由于不同研究的植被类型和观测条件不同，仅比较方法原理，不直接排序跨研究精度。

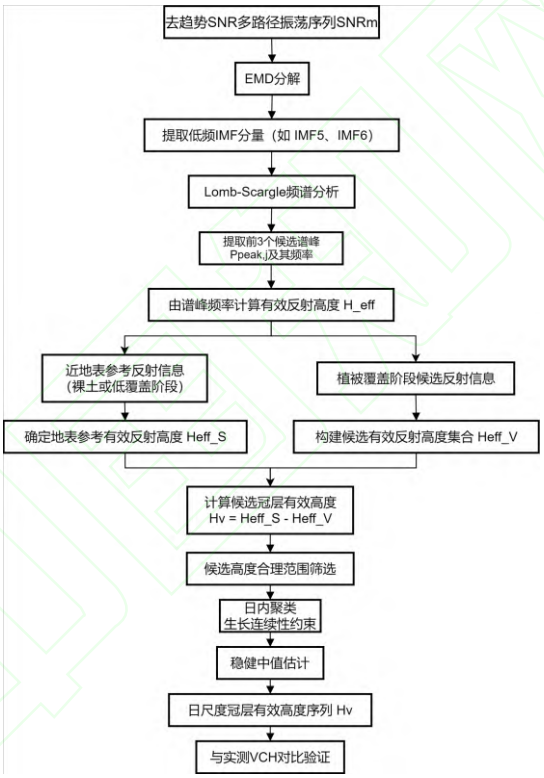


图 10 基于多候选谱峰法的植被冠层有效反射高度提取流程

Fig. 10 Workflow for Retrieving Effective Vegetation Canopy Reflection Height Using the Multi-Candidate Spectral-Peak Method

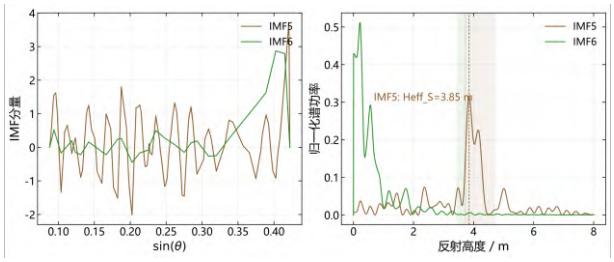


图 11 G02_S1C 低频 IMF 分量及反射高度提取结果（2024 年 1 月 6 日，地表为裸土状态）

Fig. 11 Low-Frequency IMF Components and Reflection Height Extraction Results for G02_S1C on January 6, 2024, Under Bare-Soil Conditions

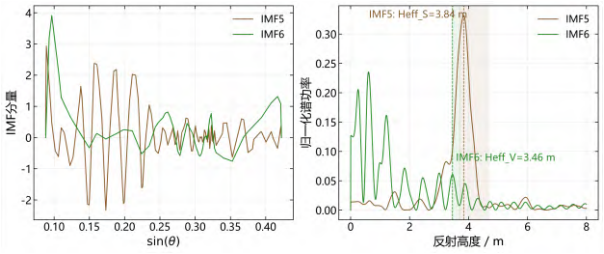


图 12 G02_S1C 低频 IMF 分量及反射高度提取结果（2024 年 5 月 20 日，地表为低矮植被状态）
Fig. 12 Low-Frequency IMF Components and Reflection Height Extraction Results for G02_S1C on May 20, 2024 Under Low-Vegetation Conditions

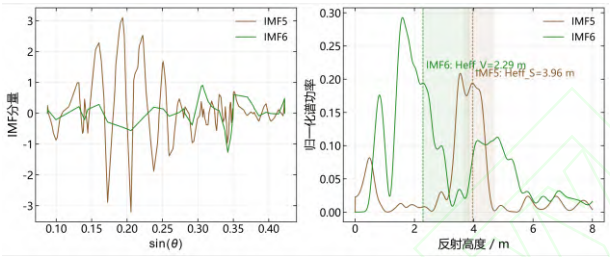


图 13 G02_S1C 低频 IMF 分量及反射高度提取结果（2024 年 8 月 14 日，地表为植被覆盖状态）
Fig. 13 Low-Frequency IMF Components and Reflection Height Extraction Results for G02_S1C on August 14, 2024 Under Vegetation-Covered Conditions

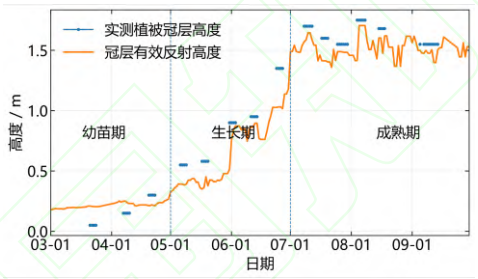


图 14 冠层有效反射高度时序变化图
Fig. 14 Time-Series Variation of Effective Vegetation Canopy Reflection Height

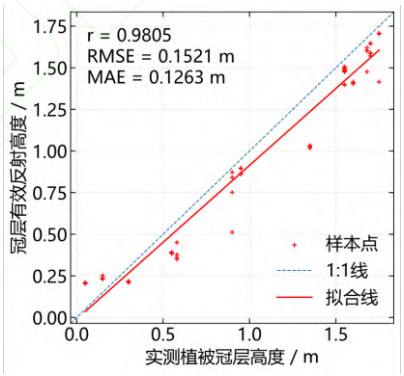


图 15 冠层有效反射高度与实测 VCH 散点图
Fig. 15 Scatter Plot of Effective Reflection Vegetation Canopy Height Versus Measured VCH

表 10 冠层有效反射高度与VCH在不同时间序列处理条件下的验证结果

Tab. 10 Validation Results of Effective Vegetation Canopy Reflection Height Against Measured VCH Under Different Time-Series Treatments

处理方式	样本数	R	RMSE/m	MAE/m
原始序列	34	0.9805	0.1521	0.1263
线性去趋势	34	0.8658	0.1129	0.0911
一阶差分	33	0.5578	0.0906	0.0509

表 11 不同谱峰提取方法的VCH反演结果

Tab. 11　VCH Retrieval Results Using Different Spectral-Peak Extraction Methods

方法	R	RMSE/m	MAE/m
主导谱峰法	0.9324	0.2799	0.2259
多候选谱峰法	0.9805	0.1521	0.1263

3 结 论

本文基于多频多模 GNSS-IR 的观测数据，提取 A_{norm}、NMRI 和 P_{peak} 等多路径指标，分析其对 NDVI 的响应特性，并基于 P_{peak} 提取冠层有效反射高度。主要结论如下：

1）A_{norm} 和 NMRI 均能响应 NDVI 变化，相关系数分别为 0.6738～0.8895 和 0.4885～0.8858，但响应强度存在系统和频点差异。

2）重叠中心频率信号表现出一定的 NDVI 响应相似性，但该特征还受星座构型和观测几何影响。BDS 信号的 A_{norm}、NMRI 及 P_{peak} 对 NDVI 的响应特性与 GPS、Galileo 和 GLONASS 总体一致。

3）低频 IMF 分量的 P_{peak} 对 NDVI 具有一定响应，但稳定性相对较弱。IMF5 相关系数为-0.7074～-0.3390；IMF6 总体呈正相关，相关系数为 0.2289～0.6370。与 A_{norm} 和 NMRI 相比，整体上 P_{peak} 对 NDVI 的直接响应稳定性较弱，但其多谱峰特征能够提供有效反射尺度和冠层高度方面的补充信息。

4）多候选谱峰法提取高度与实测 VCH 的 R、RMSE 和 MAE 分别为 0.9805、0.1521 m 和 0.1263 m，RMSE 较主导谱峰法降低 45.66%。去趋势和一阶差分结果表明，该方法主要适用于冠层高度季节变化监测，对短期变化的响应相对较弱。

A_{norm} 适用于仅具备 SNR 观测或强调处理简洁性的场景，NMRI 适用于伪距和载波相位质量较好的数据，P_{peak} 则更适合冠层有效高度分析。本文结果基于单一测站和单一植被类型，优势频段及指标响应可能具有场景依赖性，后续仍需通过多站点、多植被类型数据进一步区分载波频率、星座构型和局部反射环境的影响。同时结合气象和地形等因素优化数据筛选与定权方法，探索 A_{norm}、NMRI 与 P_{peak} 的互补融合，为不同场景下的指标选择和植被参数连续监测提供参考。

参考文献（References）

[1] 赵燕红， 侯鹏， 蒋金豹， 等． 植被生态遥感参数定量反演研究方法进展[J]． 遥感学报， 2021， 25（11）： 2173-2197．
Yanhong Z, Peng H, Jinbao J, et al. Progress in quantitative inversion of vegetation ecological remote sensing parameters[J]. National Remote Sensing Bulletin,2021,25(11):2173-2197.(in Chinese)

[2] Gong Z, Ge W, Guo J, et al. Satellite remote sensing of vegetation phenology: Progress, challenges, and opportunities[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 217: 149-164.

[3] 王丹钰，张唯，卢灿炯，等．融合气象和遥感植被信息的综合干旱指数构建及精度评价[J]．武汉大学学报（信息科学版），2024，49（10）：1953-1961．
Danyu W, Wei Z, Canjiong L, et al. Construction and Precision Evaluation of Comprehensive Drought Index Based on Meteorological and Remote Sensing Vegetation Information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(10):1953-1961.(in Chinese)

[4] 贺敏， 闻建光， 游冬琴， 等． 山地森林叶面积指数 （LAI） 遥感估算研究进展[J]． 遥感学报， 2022， 26（12）： 2451-2472．
Min H, Jianguang W, Dongqing Y, et al. Review of forest Leaf Area Index retrieval over rugged terrain based on remotely sensed data[J].National Remote Sensing Bulletin,2022,26(12):2451-2472.(in Chinese)

[5] Huang S, Tang L, Hupy J P, et al. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing[J]. Journal of forestry research, 2021, 32(1): 1-6.

[6] Alvites C, O'Sullivan H, Francini S, et al. High-resolution canopy height mapping: integrating NASA's global ecosystem dynamics investigation (GEDI) with multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2024, 16(7): 1281.

[7] Yan K, Gao S, Yan G, et al. A global systematic review of the remote sensing vegetation indices[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 139: 104560.
[8] Aklilu Tesfaye A, Gessesse Awoke B. Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem[J]. Spatial Information Research, 2021, 29(1): 109-121.
[9] Wang J, Xiang C, Liang A. Estimation of Forest Aboveground Biomass in China Based on GEDI and Sentinel-2 Data: Quantitative Analysis of Optical Remote Sensing Saturation Effect and Terrain Compensation Mechanisms[J]. Remote Sensing, 2025, 17(20): 3437.
[10] Humphrey V, Frankenberg C. Continuous ground monitoring of vegetation optical depth and water content with GPS signals[J]. Biogeosciences, 2023, 20(9): 1789-1811.
[11] Nievinski F G, Larson K M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications[J]. GPS solutions, 2014, 18(2): 309-322.
[12] Abdelhamid M, Maciuk K. The applications of GNSS-IR (global navigation satellite system interferometric reflectometry): A comprehensive review[J]. Advances in Space Research, 2025, 76(3): 1262-1280.
[13] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can we measure snow depth with GPS receivers?[J]. Geophysical research letters, 2009, 36(17).
[14] 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.
[15] Wei H, Yang X, Pan Y, et al. GNSS-IR soil moisture inversion derived from multi-GNSS and multi-frequency data accounting for vegetation effects[J]. Remote Sensing, 2023, 15(22): 5381.
[16] Small E E, Larson K M, Braun J J. Sensing vegetation growth with reflected GPS signals[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(12).
[17] 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.
[18] 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.
[19] 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．
Jizhong W, Wei W, Technology A S G O C, et al. Retrieving NDVI in midwestern America using GPS-interferometric reflectometry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(24):183-188.(in Chinese)
[20] 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．
Nanshan Z, Qiulin F, Chen L, et al.Relationship Analysis Between GPS Reflection Signal SNR and NDVI[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(10):1423-1429.(in Chinese)
[21] 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]． Geomatics & Information Science of Wuhan University， 2026， 51（7）： 1384．
Junhao L, Xiaolei W. Comparison and Analysis of GNSS-IR Vegetation Index Inversion Characteristics Based on Two Multipath Parameters[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,1-14.(in Chinese)
[22] Zhang S, Roussel N, Boniface K, et al. Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21: 4767-4784.
[23] Li Y, Yu K, Chang X, et al. Estimation of wheat height with snr observations collected by low-cost navigational GNSS chip and RHCP antenna[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 1-5.
[24] Li J, Hong X, Wang F, et al. Simultaneous retrieval of corn growth status and soil water content based on one GNSS antenna[J]. Remote sensing, 2023, 15(7): 1738.
[25] 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 of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
[26] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. Astrophysics and space science, 1976, 39(2): 447-462.
[27] Shen F, Sui M, Zhu Y, et al. Using BDS MEO and IGSO satellite SNR observations to measure soil moisture fluctuations based on the satellite repeat period[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 3967.
[28] Yan S H, Zhang N, Chen N C, et al. Using reflected signal power from the BeiDou geostationary satellites to estimate soil moisture[J]. Remote Sensing Letters, 2019, 10(1): 1-10.
[29] Williams E J. The comparison of regression variables[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1959, 21(2): 396-399.
[30] Benjamini Y, Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing[J]. Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological), 1995, 57(1): 289-300.