

GPS 反射信号信噪比与 NDVI 相关性研究

郑南山^{1,2} 丰秋林¹ 刘 晨¹ 周晓敏¹

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116
2 江苏省资源环境信息工程重点实验室,江苏 徐州,221116

摘 要:归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)作为重要的植被生长状况植被指数,对其进行有效实时监测具有重要科学意义。选择 4 个大陆板块边界观测网(plate boundary observatory,PBO)观测站的 GPS 信噪比观测值,提取反射信号信噪比并计算归一化振幅,通过与 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)NDVI 产品时序频谱特征的相关性分析,建立 GPS 反射信号植被指数线性反演模型和 BP 神经网络反演模型。分析发现:GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 指数存在显著年周期性和季候特性,NDVI 线性反演模型相关系数均约为 0.7,均方根误差处于 0.05~0.09 之间,BP 神经网络反演模型相关系数提高了约 5%。利用 GPS 反射信号反演 NDVI 变化趋势具有可行性,为获取高时间分辨率、低成本的 NDVI 指数提供了一种新思路。

关键词:GPS 反射信号;信噪比;归一化植被指数;植被指数反演;相关分析;多路径信号

中图分类号:P228.4 **文献标志码:**A

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,对全球物质能量的循环和调节起着至关重要的作用^[1-2]。植被指数(vegetation index,VI)是一种能反映地表植被生长状况的简单、有效和经验的指标,具有明显的年际变化和季候特点。在目前已经定义的 40 多种植被指数中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)最为常用,广泛应用于土地利用和植被覆盖变化研究^[3-4]。目前 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)、AVHRR(advanced very high resolution radiometer)等遥感数据产品是 NDVI 数据的主要来源。但是上述产品还是普遍存在易受天气影响、噪点引起信息损失、时空分辨率受限以及高成本等不足^[5-6]。

由于 GPS 卫星发射的 L 波段信号能够穿透云雾,且对植被和土壤水含量的变化十分敏感,所以采用普通测量型接收机的 GPS-IR(global positioning system interferometric reflection)成为一种探测 GPS 测站周边环境特征变化的新技术^[7-8]。在国外,Bilich 等利用信噪比(signal to noise ratio,SNR)幅频特性建立相关模型,并成功提取出动态时变的多路径参数(包括直达信号

和反射信号干涉后的振幅幅度以及相位差),最终实现了对载波相位观测值的改正^[9-10];Chew 等利用美国大陆板块边界观测网(plate boundary observatory,PBO)信噪比观测数据与相关站点实测土壤湿度数据验证了多路径干涉相位、振幅以及通过频率计算得出的有效高度与土壤湿度间存在强相关性^[11-12];Small 等通过大量实验验证了 GPS 伪距多路径均方根误差(root mean square error,RMSE)与植被高度、植被含水量之间都存在良好的负相关性^[13];Larson 等以 GPS 伪距和相位观测值为基础,提出了归一化微波反射指数(normalized microwave reflection index,NMRI)的概念,发现 NMRI 与植被水分含量之间存在相关性^[14]。国内有学者通过仿真和实验验证了 GPS 信噪比观测值的振幅能反映土壤湿度变化趋势,且多路径延迟相位与土壤湿度之间存在一定指数关系^[15]。另外,采用改进的反射信号参数估计方法,提高了利用 GPS 反射信号反演土壤湿度的精度^[16]。Wan 等建立了 GPS 信噪比数据振幅与草类植物含水量之间的线性模型,且利用这一模型反演植物含水量误差小于 1 kg/m²^[17]。

本文利用 PBO 的 4 个测站分析研究 NDVI

植被指数与 GPS 反射信号信噪比振幅之间的相关性,进一步研究并验证由 GPS 反射信号信噪比归一化振幅反演 NDVI 植被指数的可行性,为获取高时间分辨率、低成本的 NDVI 数据探索了一种新思路和方法。

1 原理与方法

GNSS 接收机每个历元不仅记录导航电文、伪距与载波相位观测值,还记录了 GNSS 信号强度,即信噪比观测值。由于多路径效应影响,直射信号与经地表的反射信号在 GNSS 接收机天线处发生干涉效应,如图 1 所示,图中横坐标 I 表示与接收机载波相位跟踪环信号同相空间,纵坐标 Q 表示与其正交空间。当存在多路径效应时,接收机接收到的信号为直射信号与反射信号的矢量叠加。从图 1 中可以看出,当接收信号中仅含有一次反射时,SNR 观测值可表示为:

$$SNR^2 = A_c^2 = A_d^2 + A_m^2 = 2A_dA_m\cos\psi \quad (1)$$

式中, A_d 为直射信号中信噪比的矢量振幅; A_m 为反射信号中信噪比的振幅; ψ 为反射信号与直射信号的相位差,随着卫星高度角的变化而变化。

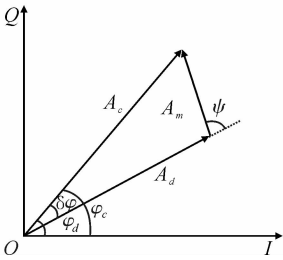


图 1 信号干涉效应示意图

Fig. 1 Signal Interference Effect Diagram

对于一般的测量型 GNSS 接收机,通常采用抑径板等装置来抑制多路径效应影响,故直射信号振幅远远大于反射信号振幅,意味着 SNR 观测值中直射信号占主要成分,并决定合成信号的主要趋势,而反射信号则呈现局部的周期性波动。因此,可采用二阶多项式拟合来消除直射信号分量,进而分离提取反射信号分量。对于去除直射信号后剩余的反射信号分量 SNR 与 $\sin\theta$ 之间,一般可采用某一固定频率的余弦函数来拟合处理^[18]:

$$SNR_m = A_m\cos(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin\theta + \phi) \quad (2)$$

式中, θ 为卫星高度角; λ 为 GNSS 信号波长; h 为接收机天线高度; ϕ 为与反射信号信噪比对应的相位延迟。通过对上述反射分量的拟合可以得

到反射信号中信噪比的振幅 A_m 和相位 ϕ , A_m 和 ϕ 的大小与天线周围环境特征密切相关。其中振幅 A_m 的变化受测站周边植被覆盖特征影响较大。为了更好地研究与 NDVI 植被指数之间的相关性,削弱其他因素的影响,对振幅值进行改化,可得归一化振幅为:

$$A_{norm} = \frac{-\max(A_m) + A_m}{-\max(A_m)} \quad (3)$$

式中, A_m 表示每天观测值计算得到的振幅; $\max(A_m)$ 表示振幅序列中的最大值,归一化振幅处于 0~1 之间,与 NDVI 值基本一致。

2 实验与分析

2.1 数据来源

PBO 网中安装了超过 1 000 台用于大地测量的高质量 GPS 接收机,其中大部分位于美国西部地区和阿拉斯加地区,其观测环境较好,没有高大障碍物的影响。其中 P033、P038 站点周围覆盖植被为低矮灌木,P037、P039 站点的周围地表覆盖为草地,同时这 4 个站点的植被覆盖有着明显的年际变化和季候特点,一年中 NDVI 的最高差值均达到 0.4 以上,而且这 4 个站点的年积雪时长较短,减少了冰雪覆盖对实验的影响。本文实验选择 4 个 PBO 站点的 GPS 观测数据作为实验数据,相关 PBO 测站的观测环境如图 2 所示。

AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 作为时间记录最长和时空分辨率较高的典型数据代表,是植被动态监测重要的数据源^[19-20],本文选用美国地质调查局陆地过程分布式数据档案中心的 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1 作为对比数据(见图 2),其空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,数据集版本号为 005,经 ENVI 计算各站点的数据影像,并计算以测站为中心的 NDVI 值。

2.2 GPS 反射信号与 NDVI 植被指数相关性分析

2.2.1 时序特征分析

先按照上述原理分析提取 PBO 测站 GPS 反射信号信噪比振幅 A_m ,再按照式(3)计算归一化振幅 A_{norm} ,利用 ENVI 软件提取站点 NDVI 值,其时间序列如图 3 所示。归一化振幅 A_{norm} 具有明显周期特性,且与植被年际变化和季节特征一致,同时 4 个站点的 GPS 反射信号信噪比归一化振幅与相应 NDVI 变化存在很好的一致性。夏季 NDVI 值与归一化振幅基本达到最大值,且 P037 站点 NDVI 值在 2015 年夏季达到相邻年的

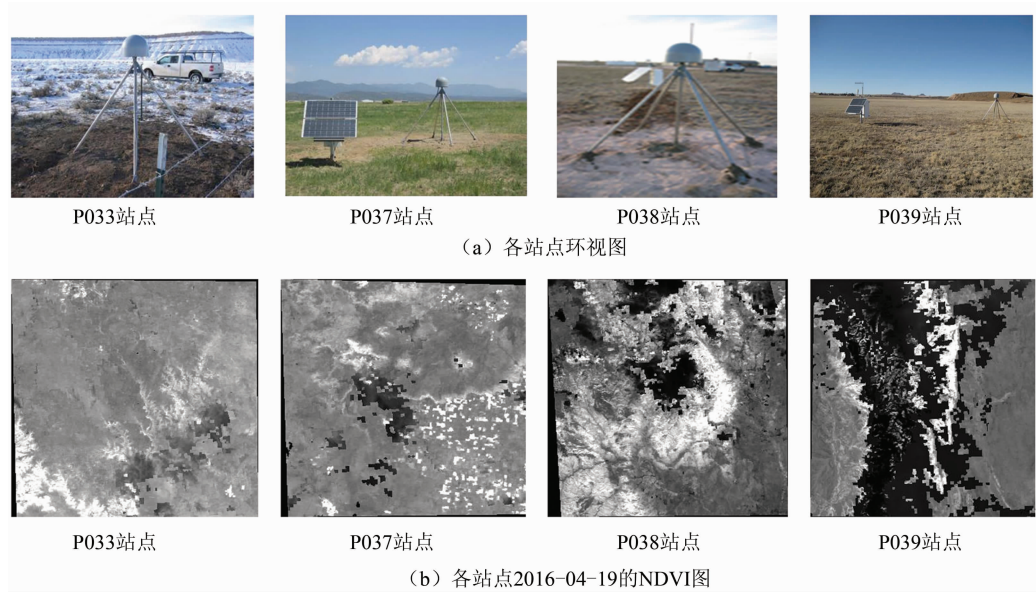


图 2 GPS 观测站点与其 2016-04-19 的 NDVI 数据

Fig. 2 GPS Observation Sites and Corresponding NDVI on April 19, 2016

峰值,归一化振幅也具有相同特征。但是每个站点在冬季会存在差异,P033 站点尤为明显,因为冬季站点会受到冰雪覆盖影响,导致振幅幅度明显增大,且 NDVI 值相应变为负值(文中分析处理时去除了 NDVI 负值),计算的归一化振幅与 NDVI 值变化出现不一致。

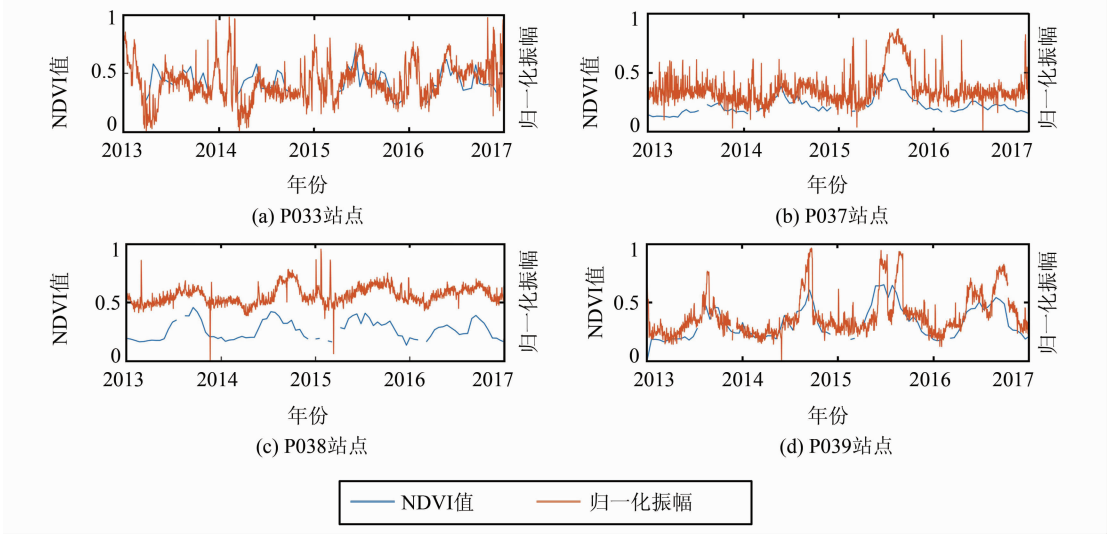


图 3 GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 时序特征分析

Fig. 3 Time Series Characteristics of the Normalized Amplitude of GPS Reflection Signal SNR and NDVI

2.2.2 频谱特征分析

为了揭示由 GPS 观测值计算的归一化振幅 A_{norm} 与 NDVI 值之间的潜在关系以及二者的时频特征,本文对归一化振幅 A_{norm} 和 NDVI 值予以频谱分析。利用快速傅里叶变换将时间域中的离散信号数据转变为频率域的频谱,进而对信号周期性作定量解释和分析。图 4 是利用快速傅里叶变换后得到的频谱图。分析表明,二者在频率为 1 a 时达到最大,即二者都存在较为明显的 1 a 周期项。P033 站点受到冰雪天气影响较大,导致其

2 a 周期项信号也较为明显。

2.2.3 相关性分析

为了衡量 GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 植被指数之间的相关性,采取计算相关系数并经显著性检验予以分析验证。由于归一化振幅时间分辨率是 1 d,远高于 NDVI 的时间分辨率,所以本文将时间分辨率高的归一化振幅采取重采样,获取与 NDVI 同样时间分辨率的数据,采用线性相关处理,二者的相关系数和显著性验证结果如图 5 所示。由图 5 分析看出,除 P033 站

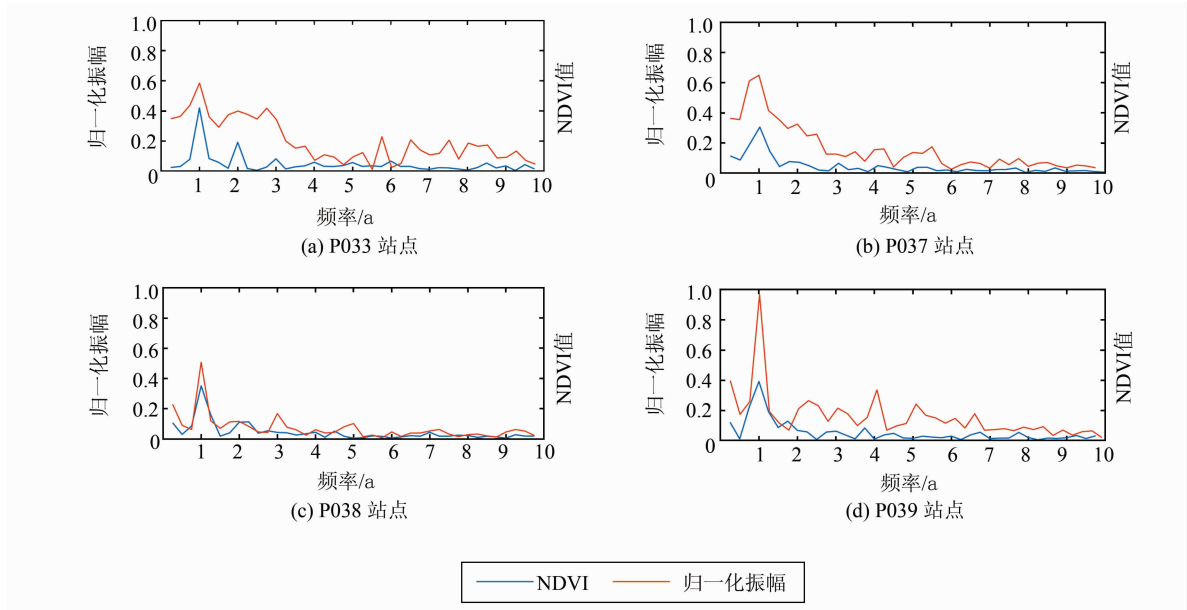


图 4 反射信号信噪比归一化振幅值与 NDVI 频谱特征分析

Fig. 4 Frequency Spectrogram of the Normalized Amplitude GPS Reflection Signal SNR and NDVI

点外,其余站点归一化振幅与 NDVI 值之间的相关系数均达到 0.7,同时为保证相关系数的置信度,本文进行了显著性检验 (T 检验),通过查询 T 检验分布表,对于双边 0.002 的显著水平,样本数量为 80 时, $T_{0.002} = 3.195$ 。因此,实验选择的 4 个 PBO 站点的 GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 值之间存在显著的线性相关。

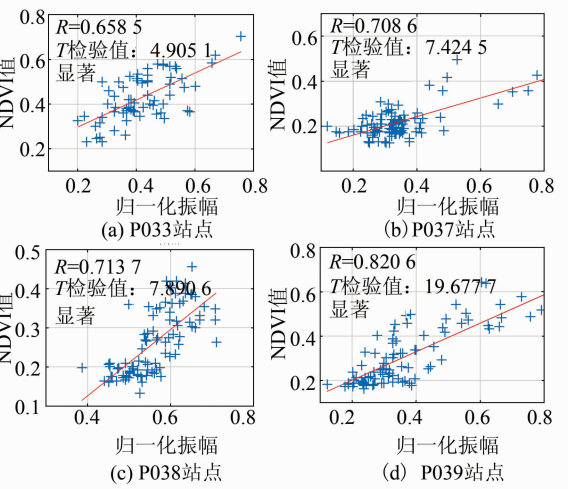


图 5 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 的相关性分析

Fig. 5 Correlation Analysis Between the Normalized Amplitude of GPS Reflection Signal SNR and NDVI

2.3 GPS 反射信号信噪比反演 NDVI 植被

上述分析表明,GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 之间存在显著相关性,本文分别利用 4 个站点 2013—2015 年数据建立线性反演模型,并利用 2016 年数据予以验证。图 6 为各站点

线性回归分析结果。

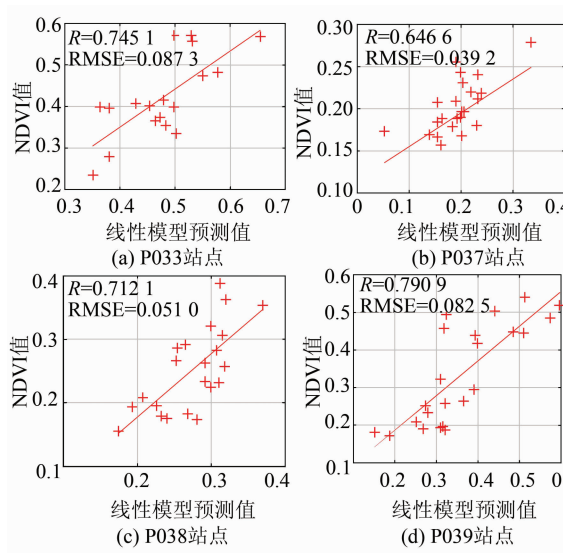


图 6 线性回归模型反演结果统计

Fig. 6 Statistics of Linear Regression Model Inversion Results

比较图 6 发现,4 个站点的线性回归反演模型相关性系数均不同,原因可归结为站点地理位置、周边植被覆盖类型以及接收机硬件差异造成归一化振幅值的变化,与时序特征和相关性分析结果一致。但每个站点线性回归反演模型的预测值与 NDVI 值基本一致,二者相关性系数约为 0.7,说明 NDVI 与 GPS 反射信号信噪比振幅存在较为显著的线性关系,它们之间的均方根误差分别为 0.087 3、0.039 2、0.051 0、0.082 5,与对应的 NDVI 数值相比,均满足其衡量标准,同样表明 NDVI 与 GPS 反射信号信噪比振幅之间有较好

的线性关系,表明线性反演模型具有一定的可用性。但是,NDVI 植被指数线性回归模型的相关系数并没有达到较高水平,究其原因土壤湿度、地表植被覆盖度等其他环境因素对 NDVI 可能产生一定影响。为提高模型反演效果,引入土壤湿度信息重新构建反演模型,但是由于该环境变量对结果的影响呈现为隐含关系,且不利于采用具体函数表达,因此,选择利用 BP(back propagation)神经网络来分析其复杂关系,构建基于 BP 神经网络的 NDVI 植被指数反演模型。

BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络模型,其本质是将一组样本的输入与输出问题转化为一个非线性优化问题,并通过负梯度下降算法,利用迭代运算求解权值问题的一种学习方法。本文采用常规 3 层模型,即振幅和土壤湿度作为输入项,组建输入层;采用一个中间层,主要负责通过激活函数进行信息处理与变换,后传向输出层各神经元;NDVI 值视为输出项,作为输出层。其中振幅和 NDVI 数据采用前文相同实验数据,土壤湿度数据来源于美国国家自然科学基金和美国国家航空航天局资助的水循环产品,其反演结果如图 7 所示。

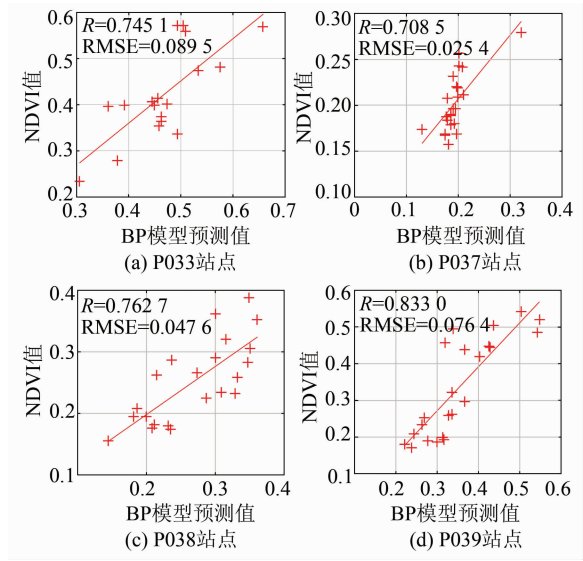


图 7 BP 神经网络模型反演结果统计
Fig. 7 Statistics of BP Neural Network Model Inversion Results

对比 BP 神经网络反演模型与线性反演模型结果发现,引入土壤湿度信息后,除 P033 站点外,其余站点反演结果质量均显著提升,P037、P038、P039 站点的相关系数分别提升了 9.5%、7.1%、5.3%,均方根误差也相应减小,表明引入土壤湿度信息可在一定程度提升 NDVI 反演精度。经查询降雨和气象数据发现,P033 站点降雨

量相对较少,所处位置气候相对干燥,且冬季降雪较多,可能导致土壤湿度的影响作用不够显著,同时因有植被覆盖的 NDVI 数据较少,所以在考虑土壤湿度后,并没有改进 P033 站点 NDVI 反演结果质量。但总体来说,利用 GPS 反射信号信噪比振幅反演 NDVI 仍具有一定可行性,且引入土壤湿度参数,反演模型精度有所提升。

3 结 语

本文通过分析研究 GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 植被指数的时序特征、频谱特征及其相关性,构建了基于 GPS 反射信号信噪比的 NDVI 植被指数线性回归反演模型和 BP 神经网络反演模型。主要结论如下。

1)GPS 反射信号信噪比归一化振幅、NDVI 时序数据存在明显的年周期性和季候特性。

2)GPS 反射信号信噪比归一化振幅与 NDVI 植被指数具有一定相关性,相关系数在 0.6~0.8 之间,因此利用归一化振幅反演 NDVI 变化趋势是可行的。

3)比较分析 GPS 反射信号反演 NDVI 植被指数线性回归模型和 BP 神经网络反演模型,结果表明 BP 神经网络反演模型由于引入土壤湿度参数,在一定程度上改进了线性回归模型效果,提升了反演精度,进一步证明利用 GPS 反射信号信噪比振幅反演 NDVI 具有可行性。

随着北斗、伽利略等卫星导航系统的不断发展和完善,地面 GNSS 连续运行参考站密度不断增加,信号采集方便、成本低等优势更加显现,有望成为高时间分辨率 NDVI 植被指数获取的有益补充设施。但由于站点位置受到地理位置、冰雪天气、周边植被覆盖等因素的影响,需进一步研究并构建适宜的经验植被指数反演模型。

参 考 文 献

[1] Xia Chuanfu, Li Jing, Liu Qinghuo. Review of Advances in Vegetation Phenology Monitoring by Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013,17(1): 1-16(夏传福,李静,柳钦火.植被物候遥感监测研究进展[J]. *遥感学报*, 2013, 17(1): 1-16)

[2] Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Spatiotemporal Changes in Vegetation Coverage in China During 1982—2012[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(16): 5 331-5 342(刘宪锋,朱秀芳,潘耀

- 忠,等.1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J].生态学报,2015,35(16):5331-5342
- [3] Fabio F, Christian R, Tobias J, et al. Alpine Grassland Phenology as Seen in AVHRR, VEGETATION, and MODIS NDVI Time Series — A Comparison with In Situ Measurements[J]. *Sensors*, 2008, 8(4):2833-2853
- [4] Leon J R R, Leeuwen W J D V, Casady G M. Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(3):598-621
- [5] Hird J N, Mcdermid G J. Noise Reduction of NDVI Time Series: An Empirical Comparison of Selected Techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1):248-258
- [6] Cui Guangmang. Research on Image Quality Improvement and Assessment for Optical Remote Sensing Image[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(崔光茫. 光学遥感图像质量提升及评价技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016)
- [7] Wan Wei, Chen Xiuwan, Peng Xuefeng, et al. Overview and Outlook of GNSS Remote Sensing Technology and Applications[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5):858-874(万玮, 陈秀万, 彭学峰, 等. GNSS 遥感研究与应用进展和展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):858-874)
- [8] Liu Jingnan, Shao Lianjun, Zhang Xunxie. Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11):955-960(刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(11):955-960)
- [9] Bilich A, Larson K M, Axelrad P. Modeling GPS Phase Multipath with SNR: Case Study from the Salar de Uyuni, Bolivia[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 11314:317-323
- [10] Bilich A, Larson K M. Correction to “Mapping the GPS Multipath Environment Using the Signal-to-Noise Ratio (SNR)”[J]. *Radio Science*, 2008, 43(2):1
- [11] Chew C, Small E E, Larson K M. An Algorithm for Soil Moisture Estimation Using GPS-Interferometric Reflectometry for Bare and Vegetated Soil[J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(3):1-13
- [12] Chew C, Small E E, Larson K M, et al. Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1):537-543
- [13] Small E E, Larson K M, Braun J J. Sensing Vegetation Growth with Reflected GPS Signals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(12):245-269
- [14] 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 & Remote Sensing*, 2014, 7(5):1501-1511
- [15] Ao Minsi, Zhu Jianjun, Hu Youjian, et al. Comparative Experiments on Soil Moisture Monitoring with GPS SNR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1):117-120(敖敏思, 朱建军, 胡友健, 等. 利用 SNR 观测值进行 GPS 土壤湿度监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(1):117-120)
- [16] Wu Jizhong, Wang Tian, Wu Wei. Retrieval Model for Soil Moisture Content Using GPS-Interferometric Reflectometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6):887-892(吴继忠, 王天, 吴玮. 利用 GPS-IR 监测土壤含水量的反演模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6):887-892)
- [17] 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
- [18] 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*, 2010, 35(24):851-854
- [19] Liu Liangming, Liang Yitong, Ma Huiyun, et al. Relationship Research Between MODIS-NDVI and AVHRR-NDVI[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(4):307-310(刘良明, 梁益同, 马慧云, 等. MODIS 和 AVHRR 植被指数关系的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(4):307-310)
- [20] Liu Yuan, Zhou Maichun. A Comparative Analysis of AVHRR, SPOT-VGT and MODIS NDVI Remote Sensing Data over Hanjiang River Basin[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(1):106-112(刘远, 周买春. AVHRR、SPOT-VGT 和 MODIS 3 种 NDVI 遥感数据在韩江流域的对比分析[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(1):106-112)

Relationship Analysis Between GPS Reflection Signal SNR and NDVI

ZHENG Nanshan^{1,2} FENG Qiulin¹ LIU Chen¹ ZHOU Xiaomin¹

1 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
2 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221116, China

Abstract: NDVI (normalized difference vegetation index) is one of the most important vegetation index, which can reflect vegetation growth and coverage, and it is of great significance to perform real-time monitoring. In this paper, we first take advantage of the amplitude of single-to-noise generated from GPS reflected signal to calculate normalized amplitude, then the characteristics of time series, frequency spectrogram and correlation between the normalized amplitude and NDVI extracted from MODIS products are analyzed. At last, NDVI inversion models with linear regression and BP neural network based on GPS reflection signal are presented. The results show that there are significant annual and seasonal characteristics within the normalized amplitude calculated by GPS reflection signal and NDVI, the correlation coefficient of linear regression is about 0.7, RMSE is 0.05-0.09. Moreover, BP inversion model within consideration of soil moisture is superior to the linear inversion model, the correlation coefficient is increased by about 5%, RMSE is 0.03-0.09. It indicates that NDVI change inversion using GPS reflection signals is feasible, which will provide an alternative approach to monitoring NDVI with high temporal resolution and low cost.

Key words: GPS reflection signal; signal to noise ratio; NDVI; vegetation index inversion; correlation analysis; multipath signal

First author: ZHENG Nanshan, PhD, professor, specializes in GNSS navigation and signal inversion. E-mail: zns@cumt@163.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41730109, 51174206.