

北京一号小卫星 NDVI 时间序列重建方法研究

张霞^①, 张旭凯^{①,②}, 帅通^{①,②}

(^① 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; ^② 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用目前使用较广泛的 Savitzky-Golay 滤波拟合法和傅立叶谐波分析法对 NDVI 时间序列进行滤波处理, 分析植被指数时间序列滤波重建方法对北京一号小卫星数据的适用性。试验结果表明, 较之 Savitzky-Golay 方法, 傅立叶谐波改进算法的重建结果更能体现地物的物候变化规律, 且对原始数据的扰动较小, 更有利于基于植被指数时间序列的土地覆盖分类及作物估产等定量应用, 比较适合于北京一号小卫星 NDVI 时间序列的重建。

关键词: NDVI 时间序列; 北京一号小卫星; 傅立叶谐波分析

doi: 10. 3969/j. issn. 1000-3177. 2012. 01. 014

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)119-0068-05

Study on NDVI Time Series Reconstruction Algorithm of Beijing-1 Micro-satellite

ZHANG Xia^①, ZHANG Xu-kai^{①,②}, SHUAI Tong^{①,②}

(^① Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

^② Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Due to the cloud effect and atmosphere conditions and sensors, there is serious noise in the NDVI time series. It is necessary to filter effectively to remove the residual noise and reconstruct high-quality NDVI time series. This study compares the widely-used Savitzky-Golay fitting algorithm and Fourier harmonic analysis algorithm for Beijing-1 micro-satellite, based on NDVI time series reconstruction. It turns out that the result of improved Fourier harmonic analysis algorithm can reflect better the phenological rules of all the land cover types. In addition, it remains less disturbance to the original data values. Therefore, the NDVI time series reconstructed by the improved Fourier harmonic analysis algorithm is more useful for land cover classification and crop yield prediction and other quantitative applications. The improved Fourier harmonic analysis is found more applicable for Beijing-1 micro-satellite derived NDVI time series reconstruction.

Key words: NDVI time series; Beijing-1 micro-satellite; Fourier harmonic analysis

1 引言

基于 NOAA/AVHRR、SPOT/VGT 以及 TERRA/MODIS 等卫星得到的归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 时间序列数据载有反映地表物候特征之重要信息, 它能够反映长期土地利用和覆盖变化情况, 并且可在不同尺度(从全球到局部区域)建立陆地生态系统模

型^[1]。NDVI 时间序列数据已经成为科学研究、工程项目的重要数据源之一^[2~3], 在植被动态变化监测、宏观植被覆盖分类等方面得到了广泛的应用^[4]。

但是, 由于大气中的云层、臭氧、灰尘以及其他气溶胶通常会降低近红外光的反射率, 导致 NDVI 时间序列数据突降^[5], 此外, 视场角和较低的太阳高度角也会产生同样的效果^[6]。这些普遍存在的噪声阻碍了 NDVI 时间序列数据的有效应用^[7], 因此在

收稿日期: 2011-01-04 修订日期: 2011-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(40971205); 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011120077)。

作者简介: 张霞(1972~), 女, 副研究员, 博士。主要从事多源遥感图像处理与信息提取研究。

E-mail: zx@irsa. ac. cn

使用数据前必须有效地进行滤波处理去除残余噪声,重建高质量 NDVI 时间序列^[8]。为此,许多关于降低数据噪声并重建高质量 NDVI 时间序列的方法被提出、应用和评价^[9]。一些研究者对于近年来普遍使用的 NDVI 时间序列滤波重建方法进行了比较,总结了这些方法的原理和优缺点^[4,10]。其中,Savitzky-Golay 拟合法和傅立叶谐波分析法应用最为广泛,而针对傅立叶谐波方法的改进更是目前的研究热点^[10~11]。

本文旨在分析植被指数时间序列滤波重建方法对北京一号小卫星数据的适用性。北京一号小卫星是我国第一颗实用型、对地观测微小卫星,也是“国际灾难监测星座(DMC)”的成员星,它在空间分辨率(多光谱 32m,全色 4m)、重访周期(2~3 天)、波段设置(3 个多光谱波段分别对应 TM 的 4,3,2 波段)、侧摆能力($\pm 30^\circ$)方面都具备同类大卫星的能力,一景北京一号卫星图像相当于 10 多景 TM 图像拼接后的总面积,因此,它在资源调查、变化检测、灾害监测等方面有广阔的应用前景^[12]。本文研究分析适用于北京一号小卫星的植被指数时间序列重建算法,以改善小卫星在土地覆盖、作物估产等方法的应用效果。

2 数据和方法

2.1 数据源介绍

本次试验所用数据为北京一号小卫星 2008 年 1 月到 2008 年 12 月期间采集的华北地区多光谱图像(绿波段:520nm~620nm,红波段:630nm~690nm,近红外波段:760nm~900nm),图像每月一景共 12 幅,图像均经过辐射校正,空间分辨率为 32m,图像大小为 9984×9984 像元。作为辅助数据,试验还用一幅经过精几何校正的北京一号卫星图像,获取时间为 2005 年 11 月 14 日,命名为 20051114beijing_p,其覆盖地理范围为 $37^\circ 55' \sim 42^\circ 19' N, 116^\circ 49' \sim 119^\circ 51' E$,将其作为基准图像对 12 幅时间序列图像进行配准。

2.2 数据预处理

数据预处理包括辐射定标、图像配准和植被指数时间序列生成 3 个步骤。首先,采用 2008 年 9 月在敦煌辐射定标场得到的北京一号小卫星辐射定标系数,其定标总精度优于 9%^[13],最终将试验数据标定为反射率;其次,以带有精确地理坐标的 20051114beijing_p 图像作为参考图像对其他 12 幅北京一号小卫星多光谱图像进行配准,配准误差控制在 0.5 个像素以内;最后,对经过配准的 12 幅图

像逐一进行 NDVI 的计算,并将其合成一个 12 波段的 NDVI 图像时间序列。

时间序列选取 12 幅 NDVI 图像的公共区域,图像大小 1576×4104 像素,覆盖地理范围为 $37^\circ 59' \sim 39^\circ 11' N, 116^\circ 53' \sim 117^\circ 46' E$ 。相应的 NDVI 时间立方体见图 1,其中 R、G、B 分别对应波段为 4 月、7 月、10 月的 NDVI 图像。

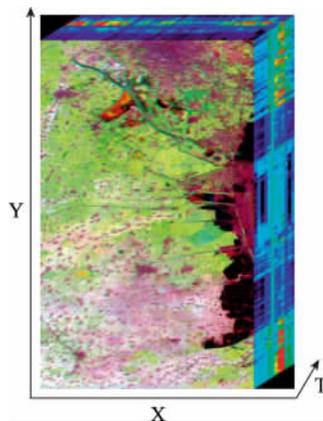


图 1 华北地区局部北京一号小卫星 NDVI 时间立方体

2.3 滤波方法介绍

(1) Savitzky-Golay 滤波拟合法

Savitzky-Golay 滤波拟合法原型最早由 Savitzky 和 Golay 于 1964 年提出,它是一种平滑和计算一组相邻值或光谱值导数的最小二乘卷积法,可以简单理解为一种权重滑动平均滤波法,其权重取决于在一个滤波窗口范围内做多项式最小二乘拟合的多项式次数^[14]。该方法可用如下公式表示:

$$Y_j^* = \sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i} / N \quad (1)$$

式中: Y 是 NDVI 的原始值, Y^* 是 NDVI 的拟合值, C_i 是第 i 个 NDVI 值滤波时的系数, N 是卷积数目,也等于滑动数组的宽度($2m+1$),系数 j 是原始 NDVI 数组的系数,滑动数组包含有($2m+1$) 个点^[15]。

Savitzky-Golay 滤波拟合法应用时共有两个参数控制其滤波效果,其中一个参数是滤波窗口大小 m ,通常 m 值越大,所得到的结果会越光滑;另一个参数是平滑多项式的次数 d (通常设置为 2~4),较小的 d 值可以得到更平滑的结果,但会保留异常值,较大的 d 值可以去掉异常值但又过拟合,造成新噪声出现。本次试验在 MATLAB 平台上基于其提供的 Savitzky-Golay 滤波函数,采用辜智慧^[16]提出的 Savitzky-Golay 滤波方法对数据进行处理。

(2) 傅立叶谐波分析法

傅立叶谐波分析法是基于离散傅立叶变换的谐

波分析方法, 可用来分析呈周期性波动的 NDVI 时间序列的波动特征, 并且可以对高噪声的 NDVI 时间序列数据进行降噪。传统的应用傅立叶谐波分析法的软件如 HANTS(Harmonic Analysis Of Time Series), 它是采用 National Aerospace Laboratory 编程实现的封装软件包。

本次试验采用张霞^[1]提出的基于傅立叶谐波分析的改进算法, 就异常值检测、拟合影响因子的自动迭代计算等方面进行改进, 使原方法由依经验定参数向依准则定参数靠拢, 减小主观干预造成的不确定性。改进的傅立叶谐波分析法需要输入的参数比 HANTS 少很多, 主要是输入值的有效范围、最大最小频数的确定和处理异常点的临界点个数。最大最小频数的确定应该根据试验区域地理位置的不同而选定; 对于最小频数, 如果谐波个数过少, 则会导致拟合曲线过于平滑而缺失信息, 所以, 除个别特殊地区(如沙漠、常年积雪区等), 最小频数可统一设定为 2, 本次试验将最小频数设定为 2。最大频数的设定要同时考虑试验区域内的植被生长峰值数以及处理异常点的临界点个数, 对于试验区域华北地区, 一年内植被生长峰值不会超过 5, 所以本次试验初步将最大频数设定为 5; 处理异常点的临界点个数与 HANTS 中的超定度概念相当, 只要参与拟合点个数超过 $2 \times \text{频数} - 1$ 即可, 代入初步设定的最大频数 5 得到 9, 小于本次试验参与拟合点个数 12, 符合要求。所以, 本次试验最大频数设定为 5, 处理异常点的临界点个数确定为 9。

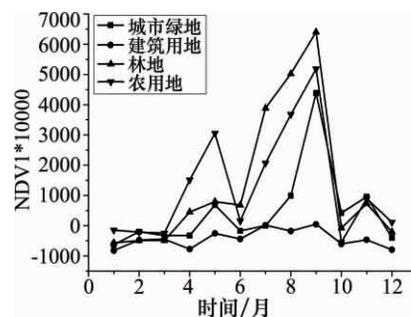
3 结果与讨论

3.1 两种滤波得到的 NDVI 曲线的分析比较

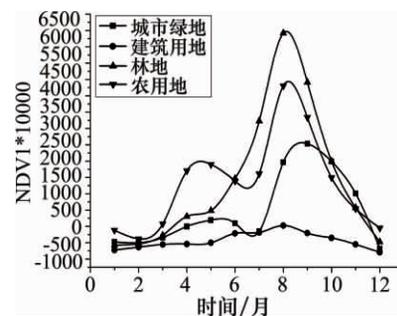
为了对 NDVI 时间序列滤波方法的通用性进行分析, 本次试验选取城市绿地、建筑用地、林地、农用地、城市水体、海水、内陆水体和闲置地共 8 种典型地物作为试验对象, 8 种典型地物已经将 NDVI 取值区间覆盖。采用 Savitzky-Golay 滤波拟合法(下称 S-G 滤波法)和改进的傅立叶谐波分析法(下称傅立叶谐波改进方法)对原始数据进行处理, 得到结果如图 2、图 3 所示。

图 2 为城市绿地、建筑用地、林地和农用地的原始 NDVI 曲线以及经两种滤波算法处理后的曲线。由图 2(a)可以看出农用地 NDVI 原始数据波动较大, S-G 滤波法(图 2(b))和傅立叶谐波改进方法(图 2(c))处理后的 NDVI 曲线拟合效果都较好, 并且反映该种植模式一年两峰值的特征, 与华北地区

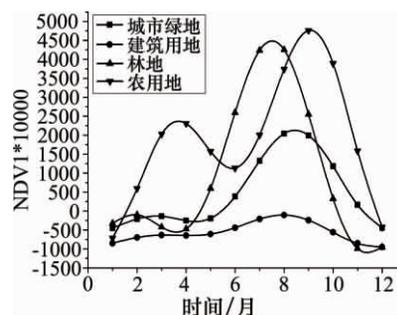
多采用小麦—玉米双季种植模式的现状相一致。冬小麦在进入春季以后开始进入返青期, 叶绿素含量开始增加, 相应的 NDVI 值缓慢增加, 5 月以后, 小麦开始进入开花成熟期, 叶绿素含量开始减少, NDVI 达到最大值并开始有所下降, 相应曲线在此时迎来第一个峰值; 5 月到 6 月为冬小麦的收割期, NDVI 急剧下降, 相应曲线在此时迎来一个谷值; 冬小麦收割后, 开始进入玉米的种植期, 随着玉米的播种、成长, 其 NDVI 逐渐上升, 并在 8 月到 9 月达到最大, 相应曲线在此时迎来第二个峰值; 随着玉米的成熟、收割, 叶绿素逐渐减少, NDVI 随之下落, 两种方法处理后的 NDVI 曲线可与当地物候资料相印证。



(a) 原始 NDVI 曲线



(b) S-G 滤波处理后 NDVI 曲线

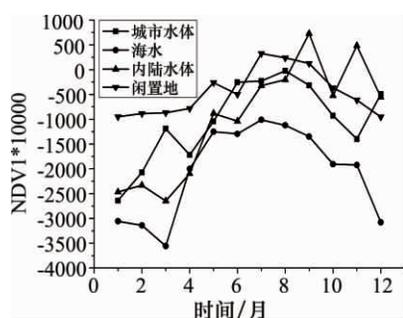


(c) 傅立叶谐波改进方法处理后 NDVI 曲线

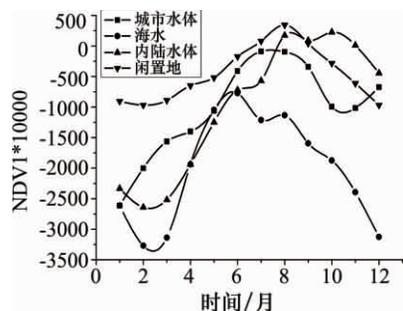
图 2 城市绿地、建筑用地、林地和农用地 NDVI 时间曲线滤波处理效果

由于林木一年有一次生长期, 所以其 NDVI 曲线一年有一个峰值, S-G 滤波法(图 2(b))和傅立叶谐波改进方法(图 2(c))都较好反映了这一特征。

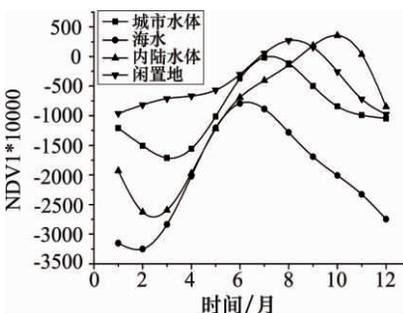
林木在进入春季之后开始进入生长期,叶绿素逐渐升高,其 NDVI 逐渐上升;8 月进入林木的繁茂期,其叶绿素含量最高,NDVI 在此时达到最大,相应曲线在此时迎来峰值;进入秋季,林木的叶绿素开始减少,NDVI 开始下降,相应曲线随之下降。



(a)原始 NDVI 曲线



(b)S-G 滤波处理后 NDVI 曲线



(c)傅立叶谐波改进方法处理后 NDVI 曲线

图 3 城市水体、海水、内陆水体和闲置地 NDVI 时间曲线滤波处理效果

城市绿地一年也只有一次生长期,所以其 NDVI 曲线一年也只有一个峰值,生长周期和林木相近,与傅立叶谐波改进方法(图 2(c))相比,S-G 滤波法(图 2(b))处理后的数据波动仍较大,6 至 7 月本应是生长期,叶绿素逐渐增多,NDVI 逐渐上升,而 S-G 滤波法(图 2(b))对此异常值没能去除掉,出现一个谷值。除此明显问题外,两种算法对数据的拟合都较好,反映了城市绿地一年一峰值的特征。建筑用地 NDVI 全年无明显变化,相应曲线走势较平缓,S-G 滤波法(图 2(b))和傅立叶谐波改进方法(图 2(c))都较好反映这一特征,相比而

言,傅立叶谐波改进方法(图 2(c))的拟合效果更好一些。

由图 3 分析可知,闲置地和 3 种水体理想状况下应是一水平直线,但由于闲置地上长有植物以及水体中含有浮游生物,使得 NDVI 在一定程度上出现了波动。然而,闲置地上的植物和水体中的浮游生物对 NDVI 值影响能力有限,因而其 NDVI 真实曲线不会有起大落落的波动。从拟合曲线上看,傅立叶谐波改进方法(图 3(c))表现更好,更接近实际情况下的时间曲线。

通过对 S-G 滤波和傅立叶谐波改进方法对以上 8 种不同地物进行滤波处理后的结果进行分析比较后发现:对于植被而言,两种算法都能如实反映不同植被的生长(物候)特征,相比之下,傅立叶谐波改进方法能够更好地拟合,没有出现明显错误;对于水体而言,傅立叶谐波改进方法的拟合效果也表现更好,更接近实际情况下的时间曲线。

3.2 两种滤波方法对原始数据的扰动分析

通常情况下,在滤波处理过程中,会有 3 种原因对原数据产生扰动:①源于数据有效性判断导致的数据扰动;②算法迭代过程剔除偏离值过大数据造成的数据扰动;③使用拟合函数生产序列新数据导致的数据扰动。这 3 种干扰是不可避免的,只能尽可能地使拟合值接近原始值,进而减小算法对原序列数据的过度扰动^[2]。本次试验就原始序列样点数据分别与 S-G 滤波法结果和傅立叶谐波改进方法结果展开定量分析。试验共选取 16 个样本点,其中城市水体、海水、内陆水体、闲置地、城市绿地、建筑用地、林地和农用地分别各选取 2 个样本点,处理结果如表 1。由表 1 分析可知,原始值与 S-G 滤波法处理结果差的均方差为 810,原始值与傅立叶谐波改进方法处理结果差的均方差为 730,傅立叶谐波改进方法比 S-G 滤波法小 80;S-G 滤波法时相内的均方差最大值与最小值相差为 1022,傅立叶谐波改进方法时相内的均方差最大值与最小值相差 709,傅立叶谐波改进方法比 S-G 滤波法小 313;S-G 滤波法时相间的均方差最大值与最小值相差为 1418,傅立叶谐波改进方法时相间的均方差最大值与最小值相差 1182,傅立叶谐波改进方法比 S-G 滤波法小 236。通过上面分析对比,总体看来,傅立叶谐波改进方法对原始数据的扰动要小于 S-G 滤波法,傅立叶谐波改进方法较 S-G 滤波法结果更忠实于原始曲线。

表1 原始值与两种滤波方法处理结果差对照

	原始值与 S-G 滤波法处理结果差	原始值与傅立叶谐波改进方法处理结果差
绝对值最大值	3675	2855
绝对值最小值	0	1
均方差	810	730
时相内均方差最大值	1249	1081
时相内均方差最小值	227	372
时相间均方差最大值	1577	1340
时相间均方差最小值	159	158

4 结束语

本文针对北京一号小卫星获取的华北地区年变化时间序列数据,利用傅立叶谐波改进方法和 Savitzky-Golay 滤波拟合法对其进行 NDVI 时间序

列的滤波处理。通过对两种方法得到的 NDVI 曲线的分析比较可以得知,傅立叶谐波改进方法和 Savitzky-Golay 滤波拟合法的滤波结果都能与物候资料相印证,但相比而言,傅立叶谐波改进方法的拟合效果更好。通过对原始数据的扰动分析可知,傅立叶谐波改进方法较 S-G 滤波法结果更忠实于原始曲线值。除此,综合考虑参数确定的便利性和客观性,可以认为傅立叶谐波改进算法,至少在华北地区更适于北京一号小卫星 NDVI 时间序列的滤波处理。通过对 8 种地物的 NDVI 时间序列数据进行滤波处理,验证了傅立叶谐波改进方法的可靠性。对于北京一号小卫星数据,傅立叶谐波改进方法比 Savitzky-Golay 滤波拟合法更加适用,相信通过不断地尝试与创新,会找到最适合北京一号小卫星 NDVI 时间序列数据的滤波方法。

本文同时希望通过对北京一号小卫星 NDVI 时间序列的滤波处理,能够更好去除数据的噪声,为北京一号小卫星植被指数时间序列产品的生成奠定基础,以提高北京一号小卫星在土地覆盖分类与变化监测、作物生育关键期的预测、估产等方面的应用效果,相信经过滤波处理的小卫星数据也会给科研和生产带来更大效益。

参考文献

- [1] J. R. G. Townshend (Ed.). Improved global data for land applications[R]. IGBP Global Change Report, 1992.
- [2] 李儒. 遥感植被指数时间序列数据滤波重建算法研究[D]. 北京:中国科学院遥感受用研究所, 2008.
- [3] 王正兴, 刘闯, Huete A, 等. 植被指数研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [4] 顾娟, 李新, 黄春林. NDVI 时间序列数据集重建方法述评[J]. 遥感受用与技术, 2006, 21(4): 391-395.
- [5] Goward, S., Markham, B., Dye, D. Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. [J]. Remote Sensing of Environment, 1991(35): 257-277.
- [6] Gutman G. G. Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects[J]. Remote Sensing of Environment, 1991(35): 121-136.
- [7] Jennifer N. Hird, Gregory J. McDermid. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques[J]. Remote Sensing of Environment, 2009(113): 248-258.
- [8] 林忠辉, 莫兴国. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 138-144.
- [9] Chen J, Per J, Masayuki T, et al. A simple method for reconstructing a high quality NDVI time series data set based on the savitzky-golay filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004(91): 332-344.
- [10] 李儒, 张霞, 刘波, 等. 遥感时间序列数据滤波重建算法发展综述[J]. 遥感受用, 2009, 13(2): 335-341.
- [11] 张霞, 李儒, 岳跃民, 刘波, 刘海霞. 谐波改进的植被指数时间序列重建算法[J]. 遥感受用, 2010, 14(3): 437-447.
- [12] 童庆禧, 等. 北京一号小卫星及其数据应用[J]. 航天器工程, 2007, 16(2): 1-5.
- [13] 陈正超, 刘翔, 李俊生, 等. 北京一号小卫星多光谱遥感器交叉定标[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 637-643.
- [14] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 183-188.
- [15] Savitzky, A., Golay, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964(36): 1627-1639.
- [16] 辜智慧. 中国农业复种指数的遥感估算方法研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.