

# 类星体3C 446射电光变非线性特性分析\*

唐洁<sup>†</sup>

(陕西理工大学物理与电信工程学院 汉中 723000)

**摘要** 类星体有剧烈、大幅度的光变现象, 光变研究有助于建立与观测相符的理论模型. 这篇文章从密歇根大学射电天文台数据库收集了类星体3C 446射电4.8、8.0和14.5 GHz波段的长期观测数据. 传统的线性方法难以分析复杂的光变现象, 文章采用了集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)方法和非线性分析方法相结合, 从混沌动力学特性、分形特性和周期性多角度对类星体光变随时间演化的规律进行了较全面的分析, 并重点对比分析了除去周期成分或混沌成分前后, 光变的周期性和非线性特性是否存在明显区别. 分析结果表明, 类星体3C 446射电波段光变资料由周期成分、趋势成分和混沌成分组成, 光变具有周期性、混沌性和分形特性. 除去混沌成分和趋势成分后的光变周期与原始光变资料的周期完全相同, 而两者的混沌和分形特性有明显不同. 从饱和关联维数来看, 重构动力学系统时, 除去周期成分和趋势成分后的光变资料比原始光变资料需要更多的独立参量, Kolmogorov熵值表明前者信息的损失率比后者大, 系统的混沌程度更高, 系统也更复杂, Hurst值表明后者自相似性和长程相关性比前者略强.

**关键词** 星系: 活动, 类星体: 个别: 3C 446, 方法: 数据分析

**中图分类号**: P158; **文献标识码**: A

## 1 引言

20世纪60年代以来, 许多形态非常像恒星的类星体被发现, 高光度、高红移是其显著特征, 类星体距离我们人类极其遥远, 部分红移较大的类星体和地球的距离超过100亿光年, 尽管类星体的尺寸比星系小, 但其中心区域辐射出来的能量却远远超过星系. 类星体具有其辐射流量随时间快速而又没有规则的光变现象, 从低频的射电、红外、光学、紫外到高能伽玛波段, 几乎在整个电磁波段观测到剧烈的光变现象<sup>[1]</sup>. 到目前为止, 光变起源依旧是学术界一个较重要的争论点, 还没有一个光变理论模型能完美解释所有的观测现象, 通过对类星体不同光变产生机制的研究, 有助于我们构建一个能

量化的、与观测相吻合的光变理论模型.

现有的文献资料已就类星体光变随时间演化特性从不同角度做了许多的探讨. 一些研究发现部分类星体的光变存在着准周期性<sup>[2-7]</sup>, 认为类星体光变是由有限个周期成分和随机噪声叠加而成, 并用功率谱分析方法, 离散相关函数法, Jurkevich方法和小波分析法等周期分析方法分析获得光变资料中主要长光变周期<sup>[4-6]</sup>. 有的研究将类星体光变视为一种随机活动<sup>[8-10]</sup>, 如Kelly等<sup>[8]</sup>发现阻尼随机游走过程的功率谱图中的斜率和类星体光变的功率谱指数基本相同, 用阻尼随机游走模型拟合类星体光变曲线. 主流类星体光变理论模型: 吸积盘模型<sup>[11]</sup>和超新星爆发模型<sup>[12]</sup>, 也认为光变是一种随机事件. 而有的学者认为类星体光变具有非

2023-03-07收到原稿, 2023-08-04收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11373008), 陕西省自然科学基金(2021JM-484)资助

<sup>†</sup>tj168@163.com

平稳和非线性特性, 光变除了周期成分外还有趋势成分和混沌成分<sup>[13]</sup>, 光变现象的产生缘于混沌成分和周期成分共同作用. Witt等<sup>[7]</sup>用阻尼随机游走过程叠加周期成分来模拟类星体光变曲线. Ciprini等<sup>[14]</sup>发现类星体GC 0109+224的射电流量的功率谱为幂律形式, 其光变是自组织临界过程的体现. Aschwanden<sup>[15]</sup>认为分形是自组织临界过程的本质属性, 用分形耗散自组织雪崩模型比较好地解释了自组织临界过程, 这又说明类星体光变具有分形特性. 唐洁<sup>[16]</sup>应用重标极差方法分析了斯隆数字巡天stripe 82天区中的类星体光变资料, 认为类星体光变存在自相似性和长程相关性, 类星体光变类似于分形布朗运动. 通过这些文献资料表明类星体光变可能具有周期性、混沌性、分形性, 对于具体的某个天体, 也许其3个或2个特性共存, 由于分析方法的局限性, 我们一般只分析其中一个特性, 其他特性可能影响最终的分析结果. 在分形特性分析中, 学者们也注意到了这个问题, 分形分析常用的方法是重标极差分析法, 为避免趋势成分对分析结果的影响, Peng等<sup>[17]</sup>基于脱氧核糖核酸机理提出了去趋势波动分析法, 尽管趋势成分的影响消除了, 但该方法仍然没有考虑周期成分的影响.

混沌动力学理论和分形理论是非线性动力学理论的2个重要研究分支, 该理论提出后, 获得了迅速发展, 通过和其他研究方向交叉融合, 广泛地应用到众多领域. 类星体光变可能由周期成分、混沌成分和趋势成分叠加而成, 尽管从周期性和非线性特性的角度研究类星体光变已有部分研究成果, 但是这些研究大多数仅单一侧重于多时间尺度、复杂性、混沌性和分形特性某一个方面来研究, 缺乏从全方位, 多角度视角地探讨类星体光变本质规律. 同时, 在分析光变的周期性、混沌性和分形特性时, 我们一般将光变资料直接用相应的数据处理方法进行分析, 由于混沌成分、周期成分和趋势成分非常复杂地叠加在一起, 并没有考虑另外的2个成分对分析结果的影响, 这种忽略其他成分的影响, 获得的结论有可能具有较大的误差, 甚至可能得到完全相反的结论.

Yuan和Fan<sup>[18]</sup>研究了类星体3C 446谱指数和流量密度的关系, Kudryavtseva等<sup>[19]</sup>、Sukharev<sup>[20]</sup>

分别用Jurkevich方法和小波分析方法分析了3C 446多个射电波段光变的周期. 本文收集了类星体3C 446在射电4.8、8.0和14.5 GHz波段从1976年到2012年长达35 yr的观测数据, 利用集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)方法将光变分解成混沌项、周期项和趋势项. 在分析周期性时, 将只有周期项和含有混沌项、周期项和趋势项的原始光变数据进行对比, 通过比较, 确定是否相同, 并分析原因. 通过我们的研究, 对类星体光变的非线性动力学特性作一个全面的分析, 光变若存在混沌和分形特性, 就可以借助非线性动力学模型来建立类星体光变理论模型, 数据除去混沌项或周期项前后非线性动力学特性的异同, 也可以为其他领域的研究者提供一个参考.

## 2 观测数据和分析方法

### 2.1 数据收集与处理

大型望远镜是天文观测数据的主要来源, 本文收集的类星体3C 446观测数据来源于密歇根大学射电天文台射电监测计划. 该监测项目使用的是26 m的抛物面射电望远镜, 观测波段主要为射电波段4.8、8.0和14.5 GHz, 较多的类星体积累有几十年的观测数据. 类星体3C 446从1976年到2012年在3个射电波段4.8、8.0和14.5 GHz都有大量的较高质量的观测数据. 由于天气或望远镜自身原因, 4.8和14.5 GHz在1976年到1979年期间, 8.0 GHz在1976年到1977年期间观测数据较少, 为了获得可靠的分析结果, 我们选取4.8和14.5 GHz在1980年到2012年期间的观测数据, 8.0 GHz从1978年到2012年期间的观测数据为分析对象.

### 2.2 集合经验模态分解方法

传统的时频分析方法如基于傅里叶变换的周期图谱估计方法、小波变换方法在分析具有非线性、非平稳特征的时间序列时存在一定的缺陷, Huang等<sup>[21]</sup>在1998年提出了经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD), 尽管EMD方法能较好地分析非线性、非平稳特征的时间序列, 并被广泛地使用在许多研究领域, 但在应用过程中发现其具有模态混叠现象. 为了解

决模态混叠这个问题, Zhao等<sup>[22]</sup>在EMD方法的基础上提出了具有更强时频分析能力的EEMD方法. EEMD方法将需要分析的时间序列分解成若干个从高频到低频依次排列的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个趋势项. 假设有一个时间序列 $y(t)$ , 在信号中多次加入均值为0、标准差为常量的高斯白噪声 $\varepsilon_i(t)$ , 其表达式为<sup>[21]</sup>:

$$y_i(t) = y(t) + \varepsilon_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

$i$ 为加入白噪声的次数,  $N$ 为最大次数. 再将 $y_i(t)$ 分解成数个本征IMF和一个趋势项:

$$y_i(t) = x_{ij}(t) + r_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

其中 $x_{ij}(t)$ 代表第 $j$ 个本征IMF,  $r_i(t)$ 为趋势项. 对所有的本征IMF求平均值, 获得第 $j$ 个固有IMF分量 $x_j(t)$ :

$$x_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij}(t). \quad (3)$$

再对具有实际物理意义的每一个IMF分量进行谱分析, 从而获得该时间序列的边际谱.

### 2.3 混沌特性识别方法

目前, 定性和定量分析方法都可以有效识别时间序列隐含的混沌特性, 但定性分析方法难以用精确的数学语言描述被分析的时间序列, 我们选择计算时间序列的饱和关联维数(Saturated Correlative Dimension)和Kolmogorov熵, 从不同角度分析时间序列的混沌动力学特性. 若求得的饱和关联维数不是整数, 则说明时间序列包含有混沌成分, 具有混沌特性. Kolmogorov熵值的大小可以描述时间序列的复杂程度, 值越大混沌程度越严重, 时间序列也越复杂. 对于一个动力学复杂系统, 假设其关联维数为 $D$ , 若想成功将时间序列嵌入到 $m$ 维相空间, 嵌入维数 $m$ 需要满足条件<sup>[23]</sup>:

$$m \geq 2D + 1, \quad D = \frac{\ln C(r)}{\ln r}, \quad (4)$$

式中 $C(r)$ 为关联积分,  $r$ 为给定的临界距离. 如果关联维数 $D$ 不随嵌入维数 $m$ 增大而增大, 而是增大到

一定程度时, 基本保持一个恒定的值, 呈现出饱和状态, 这个数值称为饱和关联维数. 反之, 时间序列如果是随机噪声, 关联维数 $D$ 随嵌入维数 $m$ 不会出现饱和现象, 从而, 通过饱和关联维数的存在可以确定时间序列具有混沌特性<sup>[20]</sup>. Kolmogorov熵可以表征时间序列的复杂程度. Kolmogorov熵, 也称为Kolmogorov-Sinai熵.  $n$ 阶广义熵的定义为<sup>[23]</sup>:

$$k_n = -\frac{1}{n-1} \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\tau} \log_2 \sum_{i_1 \dots i_d} P(i_1, i_2, \dots, i_d)^n, \quad (5)$$

$\tau$ 为延迟时间,  $P$ 是时间序列处在状态 $i$ 的概率,  $d$ 是状态 $i$ 的长度. 当 $n=2$ 时, 2阶广义熵 $k_2$ 也叫2阶Renyi熵, Kolmogorov熵值一般取 $k_2$ 的计算结果. Kolmogorov熵值等于0, 时间序列是周期时间序列, 熵值趋于无穷大, 时间序列是随机时间序列. 如果熵值是一有限的正数, 则说明时间序列具有混沌特性, 并且时间序列随熵值的增大, 变得也越复杂, 混沌系统也越不稳定.

### 2.4 重标极差分析法

重标极差分析法<sup>[24]</sup> (Rescaled range analysis method)也称为 $R/S$ 分析法, 起初由英国水文学家Hurst发现, 并成功应用在研究尼罗河流量变化规律上, 其后被经济学家推广到股票证券市场中. 该方法通过求得的Hurst值作为判断时间序列遵从经典布朗运动还是分形布朗运动的依据. 将时间序列分为若干个长度为 $m$ 的子序列, 其重标极差 $R/S$ 和 $m$ 满足的关系是:

$$R/S = (Cm)^H, \quad (6)$$

$R/S$ 由每个子序列的重标极差取平均获得,  $C$ 为常数,  $H$ 为Hurst值. 对上式两边取以10为底的对数<sup>[24]</sup>:

$$\lg(R/S) = H \lg(m) + \lg(C). \quad (7)$$

改变 $m$ 的值, 重复上面的计算过程, 求得不同长度 $\lg(m)$ 相对应的重标极差值 $\lg(R/S)$ , 再利用最

小二乘法线性回归就可以估算出Hurst值. Hurst值等于0.5, 时间序列具有随机性, 时间序列变化类似于经典布朗运动, Hurst值不等于0.5, 时间序列变化可视为分形布朗运动, 具有自相似性和长程相关性.

### 3 类星体3C 446射电光变非线性特性分析

类星体3C 446的红移为1.4, 该天体射电波段

有非常丰富的长期光变观测数据, 密歇根大学射电天文台数据库提供的射电波段观测数据比较密集, 观测时间跨度也较长, 数据质量较高. 图1是3C 446在4.8、8.0和14.5 GHz射电波段的光变曲线. 从3个波段光变曲线图可以看出3C 446光变活动十分剧烈, 流量变化幅度较大, 每相隔几年就大爆发一次, 表现出一定的周期性, 4个大的爆发非常明显, 分别发生在1984年、1991年、2000年和2009年左右, 3个波段的波形也非常相似.

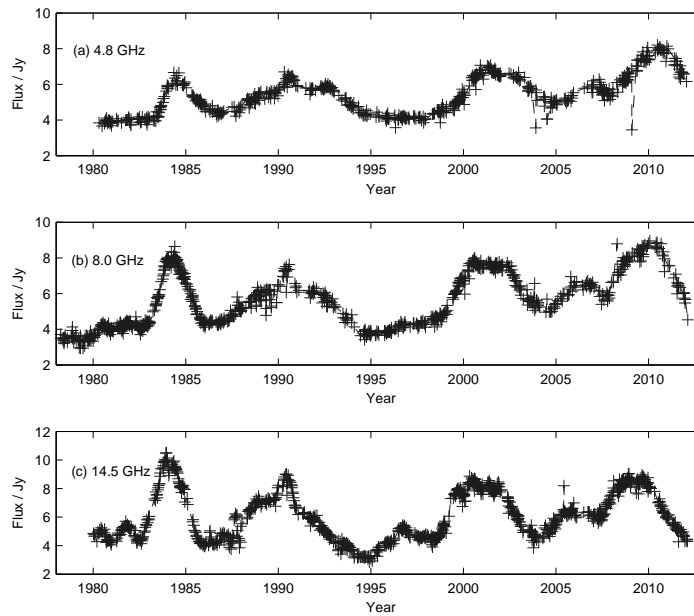


图1 3C 446射电光变曲线. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

Fig. 1 The radio light curve of 3C 446. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

#### 3.1 类星体3C 446射电光变的周期特性分析

EEMD方法可以将3C 446射电光变资料分解为数个按频率依次排列多时间尺度的IMF分量和一个趋势项, 若频率较低的IMF分量的波形呈现一定的规律性, 这些IMF分量为周期项, 频率较高的、波形杂乱无章的IMF分量为混沌项. 通过EEMD分解, 复杂的光变资料就分解成低频的具有准周期性的周期项、高频的具有非线性特性的混沌项和一个趋势项. 图2为3C 446在4.8 GHz射电流量的光

变资料通过EEMD分解后获得的IMF分量和趋势项图, 为节省篇幅, 这里只提供4.8 GHz射电流量的EEMD分解图, 8.0和14.5 GHz的分解图与4.8 GHz的EEMD分解图非常类似.

IMF1分量波形没有什么规律, 为混沌项, IMF2、IMF3和IMF4分量规则性非常明显, 3个IMF分量表现出不同时间尺度的周期性变化, 为周期项, 剩下的一项表示总体演变规律的为趋势项. 从趋势项可以看出, 3C 446射电流量整体呈现

出逐步在缓慢增大的趋势, 在光变曲线里射电流量也是从1980年的近4 Jy倍增到2010年的近8 Jy.

对这些包含不同频率成分的IMF2、IMF3和IMF4分量进行谱分析, 可得到每个IMF分量的边际谱(Marginal Spectrum), 再由边际谱可以获得每个IMF分量相对应的平均周期. 为了考察混沌项和趋势项对周期分析结果是否存在影响, 我们也将原始光变数据直接进行边际谱分析. 图3是类星体3C 446在4.8、8.0和14.5 GHz射电波段光变的归一化边际谱, 实线部分对应原始光变数据, 虚线部分对应只有周期项的数据,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 表示平均周期. 从图3虚线部分可知, 4.8 GHz的IMF2-IMF4分量对应的平均周期分别是 $(2.49 \pm 0.08)$  yr、 $(3.85 \pm 0.19)$  yr、 $(5.26 \pm 0.05)$  yr、 $(6.67 \pm 0.16)$  yr和 $(9.80 \pm 0.62)$  yr, 8.0 GHz的平均周期分别是 $(3.03 \pm 0.05)$  yr、 $(4.17 \pm 0.08)$  yr、 $(5.41 \pm 0.43)$  yr、 $(7.14 \pm 0.32)$  yr和 $(10.41 \pm 0.51)$  yr, 14.5 GHz的平均周期分别是 $(3.03 \pm 0.14)$  yr、

$(4.35 \pm 0.21)$  yr、 $(5.26 \pm 0.12)$  yr、 $(6.25 \pm 0.04)$  yr和 $(8.33 \pm 0.25)$  yr, 上述平均周期结果的置信度为95%, 采用半高全宽(Full width at half maxima)作为周期的误差.

3个波段的平均周期有一些区别, 但相差不多, 并非每个IMF分量对应一个平均周期, 当两个周期相差不是太多, EEMD方法也不能将它们分离开, 说明EEMD方法还是存在一定的缺陷. 从图3 (a)和(c)左边第1个峰值, 可以看出原始光变数据有近12 yr左右的峰值, 这来源于趋势项, 被分析的光变数据时间跨度为32 yr, 仅仅2个完整周期, 这是不是真正的爆发周期, 还需要更长的观测时间去证实. 在图3 (b)中没有这个峰值, 可能是由于EEMD方法自身还存在模态叠加原因, 没有将这个峰值与相近的峰值区分开. 实线部分和虚线部分只是边际谱幅值大小有差别, 所对应的平均周期峰值基本上是一致的, 这说明混沌项和趋势项对周期分析结果没有影响.

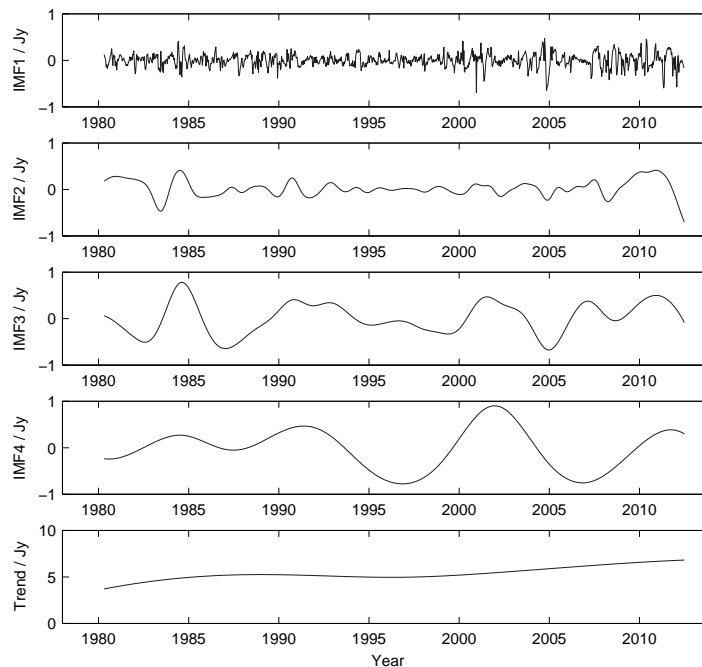


图 2 4.8 GHz射电流量的IMF分量和趋势项

Fig. 2 The decomposed IMF's and a trend of the radio flux in 4.8 GHz

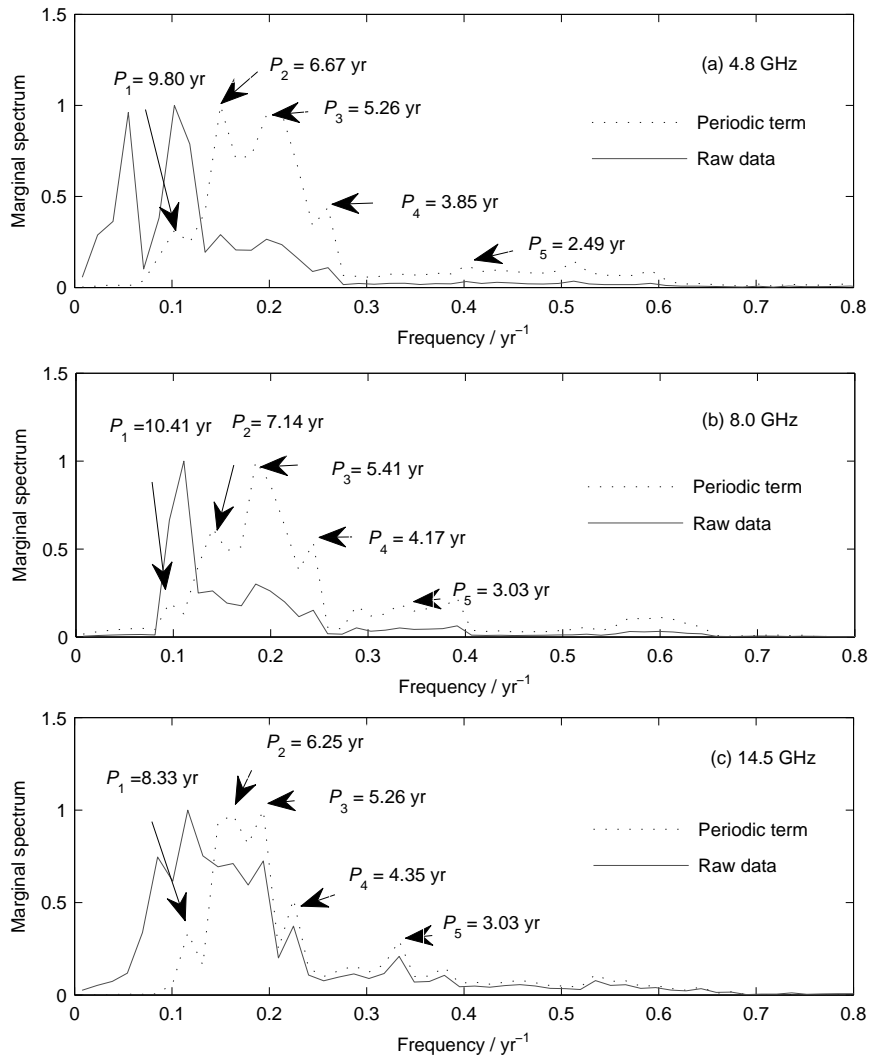


图 3 3C 446 射电波段的归一化边际谱. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

Fig. 3 The normalized marginal spectrums of 3C 446 in the radio bands. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

### 3.2 类星体 3C 446 射电光变的混沌特性分析

在对类星体 3C 446 射电光变进行非线性特性分析前, 先应该确定光变是混沌时间序列而不是随机噪声. 混沌时间序列识别有定性也有定量方法, 我们采用饱和关联维数和 Kolmogorov 熵 2 种定量方法从不同角度判断光变是否是混沌时间序列, 具有混沌和分形特性.

本文选用 Grassberger 和 Procaccia 提出的 G-P 方法计算光变的饱和关联维数<sup>[23]</sup>. 图 4 为  $\ln C(r) -$

$\ln r$  关系曲线图, 对其线性部分用直线拟合, 斜率就是相空间的关联维数. 从图 4 可以看出, 随着嵌入维数  $m$  从 0 增加到某个数值后, 线性部分基本上相互平行, 关联维数趋向于一个恒定的数值, 这个恒定的数值就是饱和关联维数. 嵌入维数  $m$  和关联维数  $D$  曲线图也能非常直观地提供饱和关联维数, 图 5 是 3C 446 射电流量变化的关联维数图, “\*” 对应原始光变数据, “+” 对应只有混沌项 IMF1 的数据, 图中关联维数  $D$  随嵌入维数  $m$  的增加而增大, 达到饱和关联维数后基本维持不变.

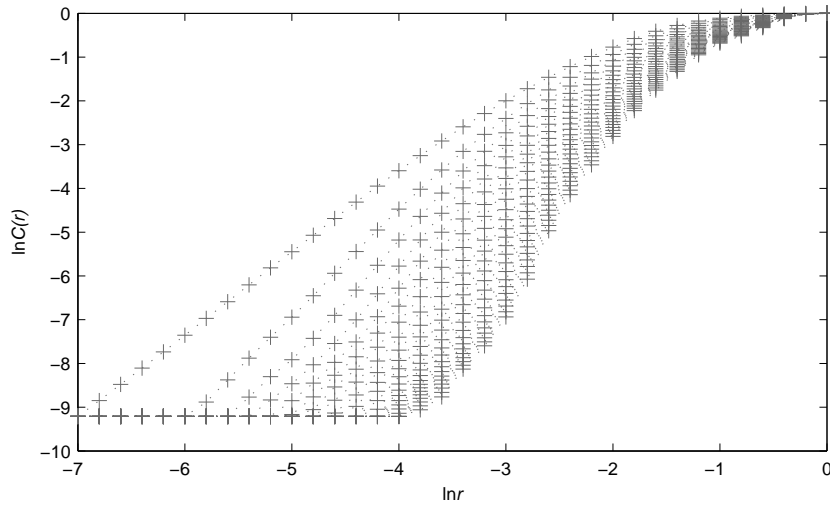


图 4 3C 446射电4.8 GHz波段流量的 $\ln C(r) - \ln r$ 图

Fig. 4  $\ln C(r) - \ln r$  curve of the radio flux of 3C 446 in 4.8 GHz

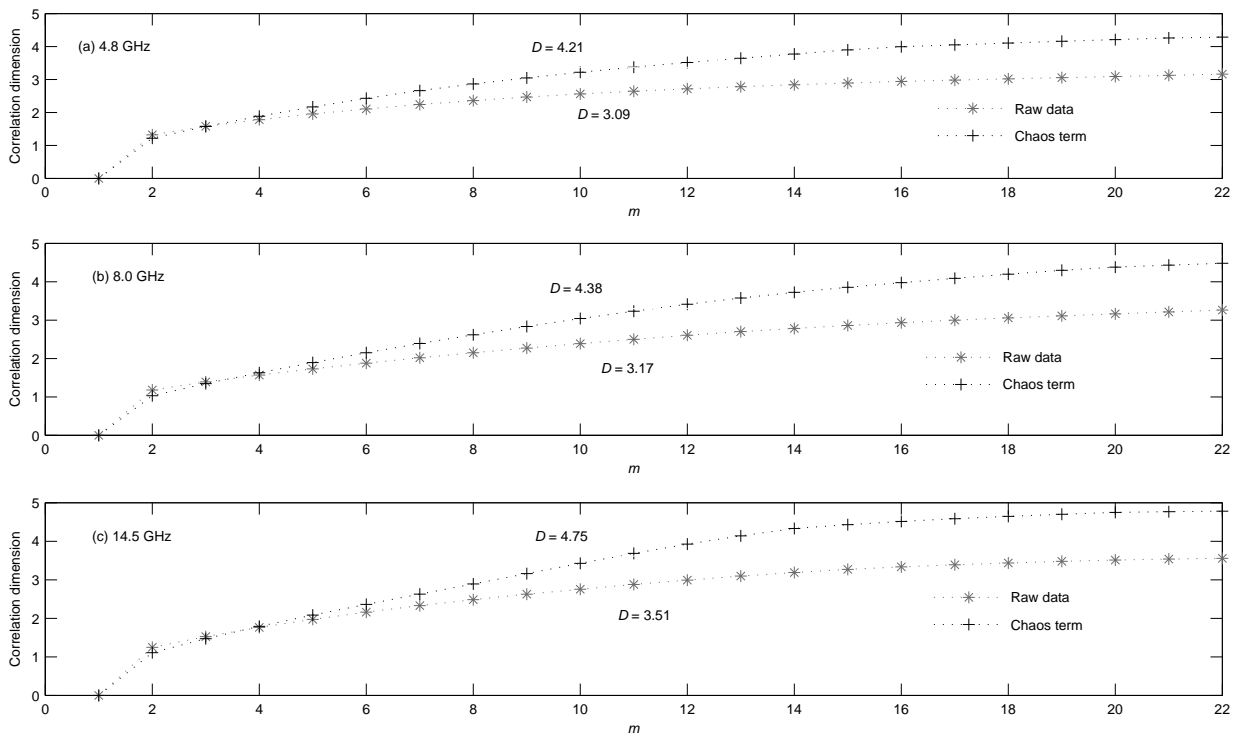


图 5 3C 446射电流量的关联维数. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

Fig. 5 Correlation dimensions of the radio flux of 3C 446. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

由图5可知, 原始光变数据3个射电光变的饱和关联维数分别是3.09 (0.09)、3.17 (0.16)、3.51 (0.09), 只有混沌项的饱和关联维数分别是4.21 (0.08)、4.38 (0.09)、4.75 (0.07), 括号里的数据为误差. 只有混沌项的饱和关联维数比原始光变数据的饱和关联维数都大, 说明前者比后者混沌性强. 无论是3C 446射电波段的原始光变数据还是去除周期项和趋势项的数据的饱和关联维数都不是整数, 根据饱和关联维数若为分数, 则可以判断被分析的时间序列是混沌时间序列, 因此去除周期项和趋势项前后的数据都具有混沌特性.

Kolmogorov熵可以作为评价非线性系统稳定性的依据, Kolmogorov熵值大于0, 时间序列是混

沌时间序列. 图6为3C 446在3个射电波段流量变化的Kolmogorov熵, “\*”对应原始光变数据, “+”对应混沌项IMF1的数据. 原始光变数据3个射电波段的Kolmogorov熵值分别是0.045 (0.003)、0.055 (0.003)和0.053 (0.007), 只有混沌项的Kolmogorov熵值分别是0.013 (0.001)、0.019 (0.002)和0.010 (0.002), 括号里的数据为误差, 只有混沌项的Kolmogorov熵值比原始光变数据的Kolmogorov熵值都小. 无论是3C 446射电波段的原始光变数据还是去除周期项和趋势项的数据的Kolmogorov熵值都大于0, 根据熵值大于0, 则可以判断被分析的时间序列是混沌时间序列, 进一步证实了去除周期项和趋势项前后的数据都具有混沌特性.

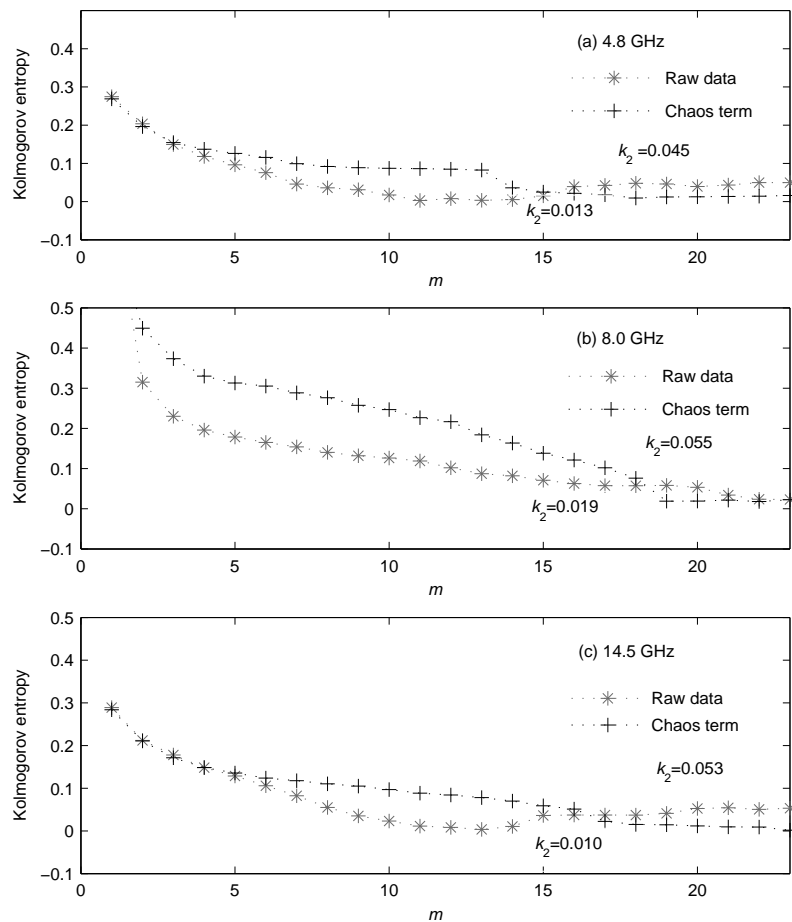


图 6 3C 446射电流量的Kolmogorov熵. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

Fig. 6 Kolmogorov entropies of the radio flux of 3C 446. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.



### 3.3 类星体3C 446射电光变的分形特性分析

通过 $R/S$ 分析法求得的Hurst值可作为判断类星体光变具有分形特性的依据. 如果时间序列的Hurst值不等于0.5, 则该时间序列具有分形特性: 自相似性和长程相关性. 图7为类星体3C 446射电流量变化的 $R/S$ 分析结果图, “ $\Delta$ ”对应原始光变数据, “+”对应混沌项的数据. 原始光变数据3个射电波段的Hurst值分别是0.54 (0.05)、0.55 (0.02)和0.56 (0.01), 只有混沌项的Hurst值分别是0.52 (0.06)、

0.53 (0.07)和0.54 (0.04), 括号里的数据为误差, 只有混沌项的Hurst值比原始光变数据的Hurst值都小. 无论是3C 446射电波段的原始光变数据还是去除周期项和趋势项的数据的Hurst值都不等于0.5, 这说明去除周期项和趋势项前后的数据都具有分形特性, 也就是都有自相似性和长程相关性, 光变不能简单地当作随机噪声, 表面看起来杂乱无章的光变, 其实隐含着确定性规律, 射电流量随时间的演化类似于分形布朗运动.

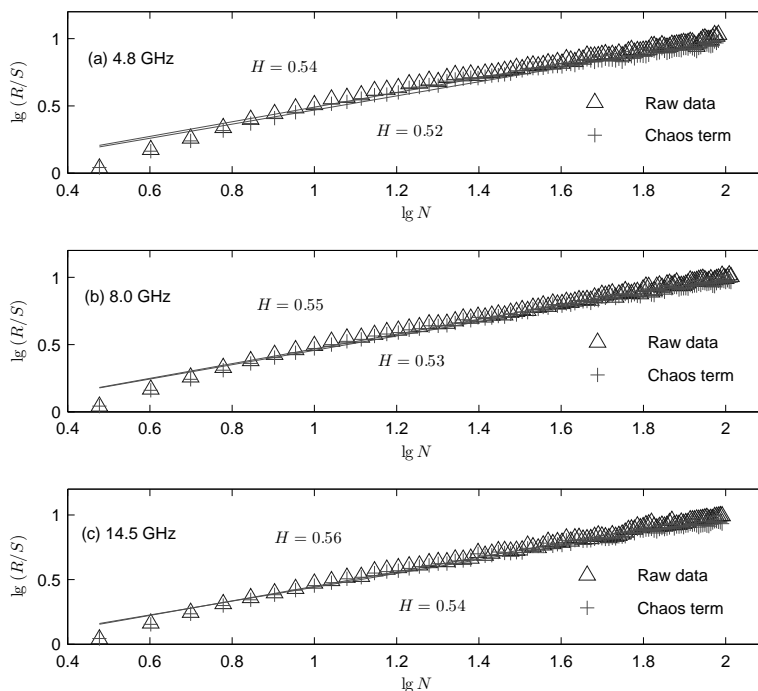


图7 3C 446射电流量的 $R/S$ 分析. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

Fig. 7  $R/S$  analysis results of the radio flux of 3C 446. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

## 4 讨论和结论

类星体光变现象是非常复杂的, 我们将类星体光变视作一个复杂系统, 复杂系统一般存在复杂性、多尺度性和混沌分形特性. 类星体光变可能由周期成分、趋势成分和混沌成分等组成, 各成分之间相互作用, 表现出非线性、非平稳等特性. 从多时间尺度和混沌特性方面来研究类星体光变, 已有一些研究成果, 但是部分研究只是选择多时间尺

度、复杂性、混沌性和分形特性其中某一方面来分析, 这样获得的类星体光变规律是片面的, 同时很多研究直接将类星体光变资料进行分析, 由于周期成分、趋势成分和混沌成分错综复杂叠加在一起, 分析结论的可靠性受到影响.

采用EEMD方法、非线性分析方法相结合, 分析了类星体3C 446在4.8、8.0和14.5 GHz射电光变的周期、混沌和分形特性. 结果表明, 3C 446射电

波段光变资料由周期成分、趋势成分和混沌成分组成, 光变存在周期性、混沌性和分形特性. 去除混沌项和趋势项后只保留周期项的光变数据和原光变数据的周期完全一致, 这个结果可能起因于混沌项和趋势项本身就无周期性. Kudryavtseva等<sup>[19]</sup>用Jurkevich方法获得的周期4–9 yr, Sukharev<sup>[20]</sup>用小波分析方法分析获得的5.8 yr, 与本文求得平均周期非常一致. 去除周期项和趋势项后只保留混沌项的光变数据和原光变数据的混沌性存在较大差异, 在对类星体3C 446光变进行重构相空间时, 原光变数据最少需要3个独立变量, 最多需要6个独立变量, 只有混沌项的光变数据比原光变数据需要的独立变量都要多1个. 原始光变数据的Kolmogorov熵值比只有混沌项的Kolmogorov熵值都大, 根据熵值越大, 光变不确定性越高, 复杂性越高, 原始光变数据是在只有混沌项的基础上又叠加了周期项和趋势项, 使系统变得更复杂. 去除周期项和趋势项前后的Hurst值只有轻微差别, 这是由分形自身的自相似性和标度不变性特性决定的, 分形系统的部分和整体具有相似性, 由于标度不变性, 没有特征时间长度, 仅分析局部区域的光变观测数据也能够体现整体的分形特性.

有较多的理论模型能解释类星体光变, 但到目前为止还没有一个理论模型与观测到的光变活动完全相吻合. Sillanpää等<sup>[25]</sup>提出了能够导致类星体光变发生周期性变化的双黑洞模型, Valtonen等<sup>[26]</sup>又对该理论模型进行了完善和修正. 该模型认为次黑洞围绕主黑洞旋转, 当碰撞到主黑洞吸积盘时, 从而导致爆发, 利用该模型比较成功解释许多类星体光变周期性爆发现象, 特别是解释OJ 287周期性双峰爆发现象, 并预言了下次爆发时间, 与实际观测到的爆发时间非常一致. Villata等<sup>[27]</sup>认为, 假如主次黑洞都存在喷流, 则磁场会将喷流束缚在一起, 光变就会形成周期性和呈现双峰爆发状态. 类星体周期性光变也可能是吸积盘的不稳定性导致的, Honma等<sup>[11]</sup>将类星体光变看作随机吸积事件, 通过数值模拟方法研究了吸积盘的不稳定性, 发现盘的不稳定性的确会导致周期性振荡现象. Harko等<sup>[28]</sup>为了更好地解释吸积盘, 引入广义朗之万型微分方程, 该方程包含有同吸积盘的内

部性质相关的黏滞项和与外部因素有关的随机项. Misra等<sup>[29]</sup>认为类星体光变除了随机型, 还有混沌型和随机叠加混沌型, 广义朗之万型微分方程中的随机项也有可能是混沌项或随机叠加混沌项, 它们可能产生混沌性. 元胞自动机模型能较好地模拟复杂系统的时间空间演化过程, Mineshige等<sup>[30]</sup>用该模型模拟类星体的光变曲线, 各种形状的光变曲线采用不同的扩散与雪崩的质量比来实现, 元胞自动机模型具有自组织临界性, 自组织结构呈现出分形特征.

Witt等<sup>[7]</sup>用阻尼随机游走模型叠加周期成分来模拟类星体光变曲线. Misra等<sup>[29]</sup>将类星体光变分为随机型、混沌型和随机混沌型. Neilsen等<sup>[31]</sup>分析类星体GRS 1915+105的光变资料时, 发现随机无序, 周期性和类似于“心电图”的现象都有可能出现. 这些研究成果从不同方面支持我们的研究结论: 类星体光变是由具有相关性的周期成分、趋势成分和混沌成分中的2种或3种成分叠加组成. 类星体光变在自身能量驱动下, 通过自组织过程演化到临界状态, 不稳定的吸积流促使类星体出现涨落, 以幂律增长方式释放能量, 局部小幅度的扰动可以激发不稳定性从小区域迅速扩散到整个系统, 雪崩流被触发, 光度剧烈变化形成光变现象.

**致谢** 感谢审稿专家对文章提出的宝贵意见, 感谢密歇根大学射电天文台提供的类星体3C 446观测数据.

## 参 考 文 献

- [1] 黄克谅. 类星体与活动星系核. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 3-8
- [2] D’Orazio D J, Haiman Z, Schiminovich D. *Nature*, 2015, 525: 351
- [3] Mineev M, Ivanov V D, Trifonov T, et al. *MNRAS*, 2021, 508: 2937
- [4] Fan J H, Kurtanidze S O, Liu Y, et al. *ApJS*, 2021, 253: 10
- [5] Tavani M, Cavaliere A, Munar-Adrover P, et al. *ApJ*, 2018, 854: 11
- [6] 唐洁. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 865
- [7] Witt C A, Charisi M, Taylor S R, et al. *ApJ*, 2022, 936: 89

- [8] Kelly B C, Bechtold J, Siemiginowska A. *ApJ*, 2009, 698: 895
- [9] Guo H X, Wang J X, Cai Z Y, et al. *ApJ*, 2017, 847: 132
- [10] Suberla K L, Ivezić, MacLeod C. *ApJ*, 2021, 907: 96
- [11] Honma F, Matsumoto R, Kato S. *PASJ*, 1991, 43: 147
- [12] Torricelli-Ciamponi G, Foellmi C, Courvoisier T J L, et al. *A&A*, 2000, 358: 57
- [13] 唐洁. *物理学报*, 2014, 63: 049701
- [14] Ciprini S, Fiorucci M, Tosti G. 2003 ASP Conference series: High Energy Blazar Astronomy San Francisco, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 299: 265
- [15] Aschwanden M J. *A&A*, 2012, 539: 15
- [16] 唐洁. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2023, 53: 229512
- [17] Peng C K, Havlin S, Stanley H E, et al. *Chaos*, 1995, 5: 82
- [18] Yang Y H, Fan J H. *Ap&SS*, 2015, 357: 123
- [19] Kudryavtseva N A, Pyatunina T B. *A&R*, 2006, 50: 1
- [20] Sukharev A L. *Ap*, 2015, 58: 5
- [21] Huang N E, Shen Z, Long S R. *RSPSA*, 1998, 454: 903
- [22] Zhao H W, Huang N E. *RSPSA*, 2004, 460: 1597
- [23] Grassberger P, Procaccia I. *PhyD*, 1983, 9: 189
- [24] Hurst H E, Black R P, Simaika Y M. *Long-term Storage: An Experimental Study*, London: Constable Press, 1965: 26-35
- [25] Sillanpää A, Takalo L O, Pursimo T, et al. *A&A*, 1996, 305: 13
- [26] Valtonen M, Kidger M, Lehto H, et al. *A&A*, 2008, 477: 407
- [27] Villata M, Raiteri C M, Sillanpää A. *MNRAS*, 1998, 293: 13
- [28] Harko T, Mocanu G R. *MNRAS*, 2012, 421: 3102
- [29] Misra R, Harikrishnan K P, Ambika G, et al. *ApJ*, 2006, 643: 1114
- [30] Mineshige S, Takeuchi M, Nishimori H. *ApJ*, 1994, 435: L125
- [31] Neilsen J, Remillard R A, Lee J C. *ApJ*, 2011, 737: 69

## Nonlinear Characteristics of Radio Variability in Quasar 3C 446

TANG Jie

(School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000)

**ABSTRACT** Quasars are characterized by violent and large amplitude variability in all the observation wavelengths, and the analysis of optical variability is useful for developing theoretical models. Long-term optical variability data of quasar 3C 446 were collected from the University of Michigan Radio Astronomy Observatory database in the 4.8, 8.0 and 14.5 GHz radio bands from 1976 to 2012. Due to the complexity of the variability data, it's hard to study by the linear time series analysis methods. For learning more about non-linear characteristics of the temporal evolution of quasar variability, the Ensemble Empirical Mode Decomposition and nonlinear analysis are used to analyse chaotic dynamics, fractal properties, and periodicity. This paper focuses on whether there is a significant difference between the periodic and non-linear properties of the quasar variability before and after the removal of the periodic or chaotic components. It turns out that the variability of quasar 3C 446 in the radio bands consists of periodic, trend and chaotic components, and the periodic and trend components are dominant. The periods of the variability after removing the chaotic and trend components are exactly the same as the periods of the original variability data, but the chaotic and fractal characteristics of the two are significantly different. The saturated correlation dimension indicates that the reconstruction of the dynamical system requires more independent parameters than the original optical variables after the removal of the periodic and trend components. The Kolmogorov entropy indicates that the loss of information is greater for the former than the latter, and the system is more chaotic and more complex. The Hurst value indicates that the self-similarity and long-range correlation are slightly stronger for the latter than the former.

**Key words** galaxies: active, quasars: individuals: 3C 446, methods: data analysis