

基于集合经验模态分解的类星体光变周期 及其混沌特性分析*

唐洁[†]

(陕西理工学院物理与电信工程学院, 汉中 723001)

(2013年9月7日收到; 2013年10月25日收到修改稿)

基于密歇根大学射电天文台数据库中从1965年到2012年收集的类星体3C 345, 3C 273和3C 279在射电8.0 GHz的光变数据, 利用集合经验模态分解方法将这些类星体的光变资料分解为周期项、趋势项和高频项, 并对分解后的高频项计算其饱和关联维数、最大Lyapunov指数和Kolmogorov熵, 判断是否具有混沌性. 结果表明, 这些类星体的光变不仅具有周期性, 也具有明显的混沌特性, 表明类星体光变应为产生周期性运动的物理机制和产生混沌现象的非线性机制的综合结果.

关键词: 类星体, 光变周期, 集合经验模态分解, 混沌

PACS: 97.30.Jm, 98.54.Cm, 95.75.Pq, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.63.049701

1 引言

自从1963年类似恒星状的类星体被发现以来, 具有小尺度、大红移、高光度等特殊物理性质的类星体越来越受到人们的重视. 研究表明, 一些类星体的光变具有周期性^[1-6], 并认为类星体光变资料由多种周期成分和随机成分叠加而成. 以往的研究通常将多年的光变资料先假设其满足平稳性、随机性和线性条件, 以傅里叶变换理论作为观测资料处理的基础, 使用一些传统的周期分析方法, 如周期图谱分析方法、最大熵谱分析方法、高阶谱分析方法等提取资料中隐含的周期成分^[5,7]. 如果将光变资料视为一个时间序列, 并认为时间序列由趋势项、周期项和随机项简单地叠加而成, 那么传统的周期分析方法在周期分析前把随机项当作噪声过滤掉, 仅分析光变资料中的周期项的性质, 忽略了趋势项和随机项的特性. 类星体的光变资料不仅具有确定性, 也具有随机性, 也许还具有别的特性, 如混沌性. 采用单一的确定性方法难以揭示光变现象

的本质, 利用近年发展起来的混沌理论可以揭示貌似随机的现象背后可能隐藏的简单规律, 从而探讨类星体中可能存在的非线性机制导致的光变现象.

针对传统的时频分析方法在处理非线性非平稳信号的分析能力不足, Huang等^[8]在1998年提出了一种崭新的经验模态分解方法(empirical mode decomposition, EMD). 但EMD方法在处理实际问题过程中依然存在模态混叠现象. 在EMD方法的基础上进行了改进的集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法能避免这种现象^[9]. EEMD方法能将复杂信号分解成有限个从高频到低频的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)和一个趋势项, 对于低频的IMF'分量的瞬时频率波动幅度变化较小, 总体上基本保持稳定, 具有较固定的周期, 将这些IMF'分量视为周期项, 高频的IMF'分量振荡较剧烈, 可能为随机噪声或具有确定性的混沌信号.

对于典型类星体3C 345, 3C 279和3C 273, 已有的研究发现无论是光学波段还是射电波段都存

* 国家自然科学基金(批准号: 11373008)、陕西省自然科学基金(批准号: 2013JM1021)和陕西理工学院科研基金(批准号: slgky13-50)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: tj168@163.com

在准周期光变现象^[2]. 本文基于密歇根大学射电天文台数据库 (UMRAO) 从 1965 年到 2012 年所收集的 3C 345, 3C 279 和 3C 273 在射电波段 8.0 GHz 长达 47 年的长期观测数据, 运用 EEMD 方法将它们的光变资料分解成周期项、趋势项和高频的 IMF 分量. 再将高频的 IMF 分量视为新的信号, 分析它们的饱和关联维数、最大 Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵等混沌特性^[10]. 对光变是否以周期项、趋势项还是混沌项为主进行讨论. 以期提供类星体的光变中可能存在非线性机制的证据.

2 EEMD 方法和混沌特性识别方法

2.1 EEMD 方法

为了对一个复杂信号进行平稳化处理, Huang 等^[8] 提出了 EMD 方法并成功地将 EMD 方法与 Hilbert 谱分析相结合成 Hilbert-Huang 变换 (Hilbert-Huang transform, HHT). EMD 方法通过反复筛选将信号分解成一系列波动和一个趋势项, 这些具有不同频率的波动赋予了一个新概念: 固有模态函数. 每个 IMF 分量对应的瞬时频率要求有真实的物理意义, 最重要的是瞬时频率能够清楚地定义波间与波内频率调制, 不像小波分析只能将波间频率调制模糊地分辨出来, 再将所有 IMF 分量进行 Hilbert 变换获得相应的 Hilbert 谱和边际谱. 由于 EMD 方法在分析信号时具有自适应性, 在许多领域已经获得广泛应用. 但在应用过程中发现, 信号有时会出现模态混叠现象, 严重影响了方法的分析效果. 为了解决模态混叠问题, Zhao 和 Huang 提出了 EEMD 方法^[9]. 改进的 EEMD 方法在原信号中人为地加入不存在相关性的高斯白噪声, 可以消除模态混叠现象.

2.2 混沌特性识别方法

在对时间序列运用混沌理论分析前, 应先确定该时间序列是混沌的还是随机的. 混沌特性识别既可以用定性方法, 也可以用定量方法. 由于定性方法受人为因素的影响较多, 以致干扰结果的正确判断^[11]: 每一种定量方法也只是从某一个方面判别时间序列是否具有混沌性, 只能作为判别混沌序列的必要条件. 因此本文采取定量方法中的饱和关联维数法、最大 Lyapunov 指数法和 Kolmogorov 熵, 从多个角度来分析时间序列所蕴含的混沌特性.

为了分析系统的动力学特性, 需要通过重构相空间恢复出混沌吸引子, 关联维数可以描述混沌吸引子的分形特征, 估计系统复杂度. 如果关联维数为一个分数, 则可以判断系统里含有混沌成分. 如果动力系统的维数 d , 嵌入维数 m 满足 $m \geq 2d + 1$ 时, 可以实现将时间序列嵌入到 m 维相空间中^[12]. 关联维数的定义为 $d = \frac{\ln C(r)}{\ln r}$, $C(r)$ 表示关联积分. 若时间序列是噪声序列, 当嵌入维数 m 增大时, 关联维数也不断增大, 若是混沌序列, 则关联维数 d 会随嵌入维的增大而趋向一个稳定的值, 呈现饱和现象. 因此通过关联维数可以确定时间序列是否是混沌时间序列^[11].

Lyapunov 指数描述了混沌行为对初始条件的高度敏感性, 是指相空间中相邻初始出发的两条轨道随着时间的推移, 它们之间的距离随时间按指数分离或吸引的平均变化速率. 若有某一维动力系统 $x_{n+1} = f(x_n)$, 则其 Lyapunov 指数为^[11]

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i}. \quad (1)$$

对于混沌时间序列至少有一个 Lyapunov 指数是正的, 这表示在系统相空间中, 两条轨线的间距随着时间的推移最后无法预测, 出现混沌现象. 因此, Lyapunov 指数也可以判断系统是否处于混沌状态. 在具体计算 Lyapunov 指数时, 如果要算出所有的 Lyapunov 指数, 计算量特别大, 实际主要计算最大 Lyapunov 指数.

Kolmogorov 熵是描述动力学系统随时间演化信息的产生率, 表征非线性运动的混沌程度的特征量. q 阶广义熵为^[11]

$$K_q = - \frac{1}{q-1} \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\tau} \times \log_2 \sum_{i_1 \cdots i_d} P(i_1, i_2, \cdots, i_d)^q, \quad (2)$$

k_0, k_1, k_2 分别表示拓扑熵, Kolmogorov 熵, 二阶 Renyi 熵, 且 $k_2 \leq k_1 \leq k_0$, 因此一般用 k_2 的计算结果代替 Kolmogorov 熵.

利用 Kolmogorov 熵可以很方便地区分规则运动、随机运动和混沌运动. 若 Kolmogorov 熵为 0, 说明系统是规则运动的, 若趋于无穷大表明系统做随机运动, 若为一有限的正数, 则表示系统做混沌运动^[12]. Kolmogorov 熵越大, 信息的损失率也就越大, 意味着系统的混沌程度越大, 系统也就越复杂. Kolmogorov 熵与 Lyapunov 指数存在着联系, Kolmogorov 熵为所有正的 Lyapunov 指数的和.

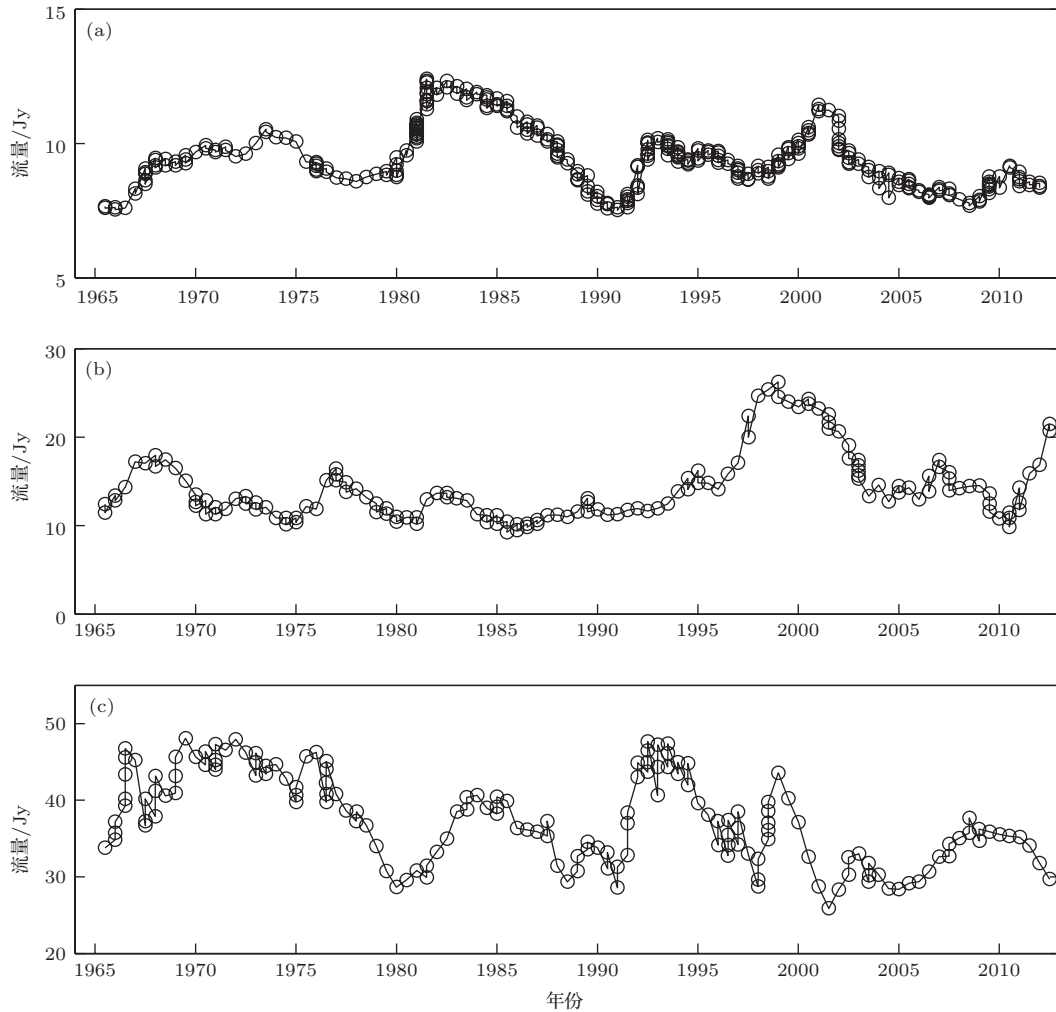


图1 类星体在8.0 GHz射电流量的光变曲线 (a) 3C 345; (b) 3C 273; (c) 3C 279

3 基于EEMD方法的类星体光变周期分析

在过去的几十年里已经积累了类星体的大量的观测数据,对类星体也有了更深层次的认识.在多个波段发现相当多的类星体存在不同程度的光变现象.本文从UMRAO数据库收集了类星体3C 345, 3C 273, 3C 279在8.0 GHz射电波段的观测数据,时间跨度从1965—2012年长达47 a.值得指出的是,此3个源的射电流量很强,观测误差与其流量和光变幅度相比很小,平均约为0.3 Jy,不会对本文结果产生大的影响,因此在本文中未考虑观测误差因素.3个类星体的光变曲线如图1所示.从图1可以看出,类星体3C 345的光变幅较小,3C 273和3C 279光变幅较大.

在对类星体3C 345, 3C 273, 3C 279的光变资料进行EEMD分解时,需要选择加入的白噪声的

标准差与光变资料的标准差之比和集成数量.如果这两个参数选择不恰当,分解的误差将会增大.前一参数选择过小时,会导致信号局部极值点的变化,过大时可能会湮没原信号特征.后一参数值越大将会使分解误差越小,但其增大将使计算耗时成倍增加. Zhao和Huang^[9]建议可以根据多次不同参数设置情况下的信号分解的效果来选择参数,本文加入白噪声的标准差与光变资料的标准差之比分别为0.1, 0.2和0.2,集成数量取为100.图2—4为3个类星体的光变资料通过EEMD分解后获得的多个从高频到低频的IMF分量和一个趋势项.IMF1为高频模态,其看起来像噪声;其余各IMF分量呈现出较为规则的正弦式波动,代表了不同时间尺度的变化.最后一项为趋势项,趋势项反映了类星体射电流量的变化趋势和总体演变规律.从趋势项可以看出,3C 345射电流量总体上开始均匀增加,到1980年左右达最大值后又均匀减少;3C 273射电流量整体呈现减少的状态;3C

279射电流量在1990年以前总体保持不变, 1990年后以2000年为峰值, 起始均匀增加再又均匀减少.

一般来说, 不同的IMF分量所包含光变资料的频率成分也不同. 对每个IMF进行Hilbert变换可得到相对应的瞬时频率^[9]. 由于篇幅问题, 后面的数据处理仅以3C 345为例来说明, 图5为3C 345光变的瞬时频率. 低频IMF的频率以一个中心频率为对称轴仅有小幅度的振荡变化, 具有很强的周期波动性, 高频IMF1的瞬时频率振荡得太剧烈, 表现出随机无序性. 由边际谱可以获得每个IMF分量的平均周期. 图6为3C 345射电光变的边际谱. 从图6可知, 3C 345射电流量变化的平均周期是14.3, 8.3和3.4 a. 用同样方法分析3C 273和3C 279, 得到3C 273的平均周期是16.9, 7.5和2.5 a, 3C 279的平均周期是9.9和4.6 a.

实际信号通过EEMD分解成高频成分、低频成分和趋势成分. 由上述分析可知低频成分具有准周期性, 这些成分在信号中占的比例不同, 可以借助方差贡献率来估计各成分在类星体射电流量变化中所起作用的大小. 3个类星体各成分的方差贡献率见表1. 需要说明的是, 表1中的混沌项在高频成分进行混沌特性分析后不具有混沌性应该指的是高频成分. 对于3C 345, 其光变资料里隐含的高频成分、周期项和趋势项的方差贡献率分别为0.99%, 55.23%和43.78%, 3C 273分别为3.80%, 57.26%和38.94%; 3C 279, 分别为1.85%, 60.68%和37.47%. 3个类星体的周期项和趋势项的方差贡献率远大于高频成分的方差贡献率, 周期项的方差贡献率最大, 说明周期成分在这3个类星体光变中占主导地位, 是影响类星体光变的最主要的因素, 可以代表这3个类星体的主要特征, 所以在很多文献里只分析它们的光变周期.

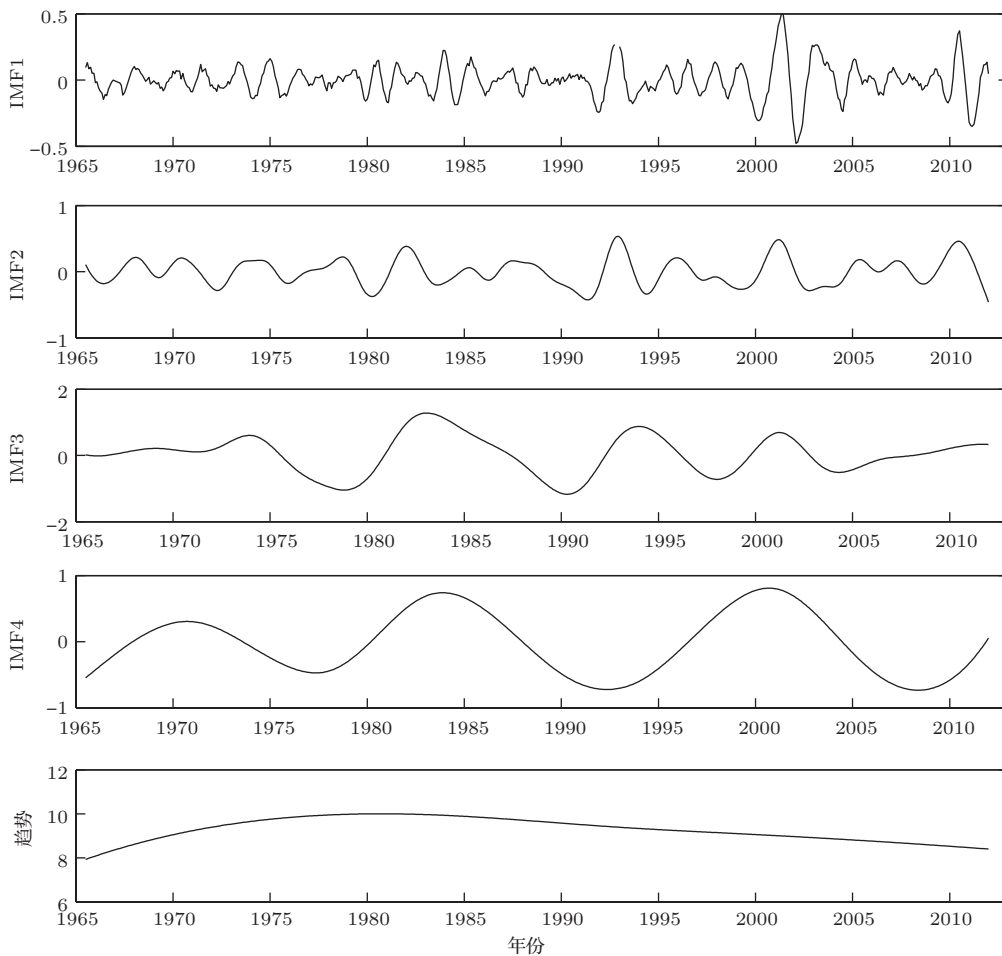


图2 3C 345在8.0 GHz射电流量的IMF分量和趋势项

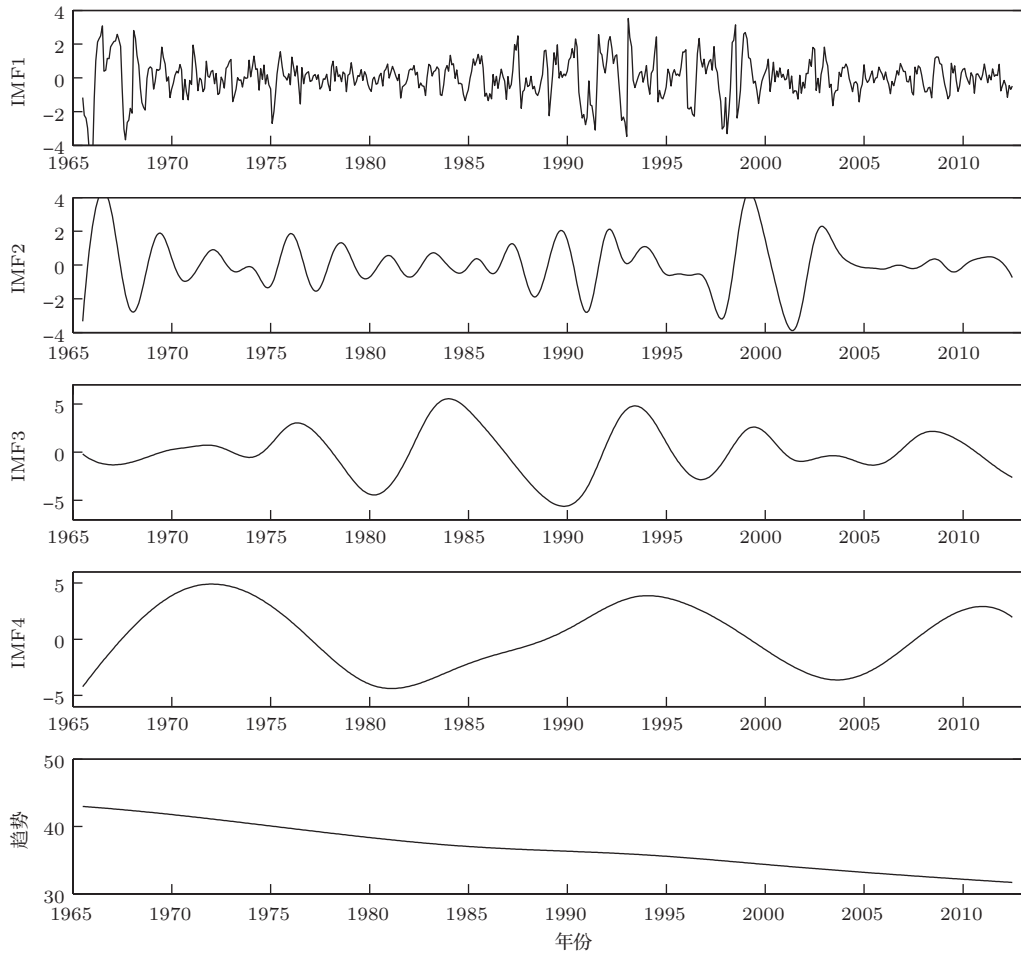


图3 3C 273 在 8.0 GHz 射电流量的 IMF 分量和趋势项

高频成分方差贡献率很小, 传统的信号处理方法通常把它当作随机噪声处理, 但如果该成分存在混沌特性, 就会忽略了混沌信号固有的特性. 混沌信号是确定系统产生的类随机的复杂信号, 是不需要强加任何随机因素就可以表现出来的一种貌似随机的行为. 在解释类星体光变时, 该成分可能是引起类星体光变的动力学因素.

4 类星体光变的混沌特性识别

相空间重构是分析混沌信号动力学因素的基础^[13], 在重构相空间时, 选取恰当的时间延迟 τ 和嵌入维数 m 工作特别重要. 本文选用互信息法计算高频成分的时间延迟^[14], 用 Grassberger-Procaccia (G-P) 法提取关联维数^[15].

根据互信息法计算结果, 类星体 3C 345, 3C 273, 3C 279 的射电流量 EEMD 分解后的高频成分的时间延迟分别为 4 个月, 3 个月和 4 个月, 固定它们的时间延迟, 将嵌入维数 m 从 1 增加到 15, 绘制

$\ln C_m(r) - \ln r$ 关系曲线, 当嵌入维数达到某个值以后, 线性部分逐渐趋于平行, 关联维数趋于一个定值, 该关联维数称为饱和关联维数. 饱和关联维数从嵌入维数和关联维数关系曲线也可以直观地获得. 图 7 是 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量的关联维数图, 可以看出, 当嵌入维数 m 为 10 时, 关联维数趋近于饱和值 4.051. 3C 273 的嵌入维数和饱和关联维数分别为 9 和 3.927, 3C 279 的分别为 9 和 3.713. 3 个类星体的饱和和关联维数都为非整数, 因此它们的光变资料 EEMD 分解后的高频成分可能具有混沌特性.

最大 Lyapunov 指数是衡量混沌吸引子长期演化全局特征的, 若某系统具有混沌性, 则其最大 Lyapunov 指数为正, 并且该指数越大, 系统混沌程度越厉害. 本文选用 Wolf 方法计算 Lyapunov 指数^[16], 在求 Lyapunov 指数时需要知道被分析信号的平均周期, 在这选用传统的傅里叶变换求平均周期. 3 个类星体光变资料中的高频成分平均周期为 19 个月, 13 个月和 18 个月, 最大 Lyapunov 指数分

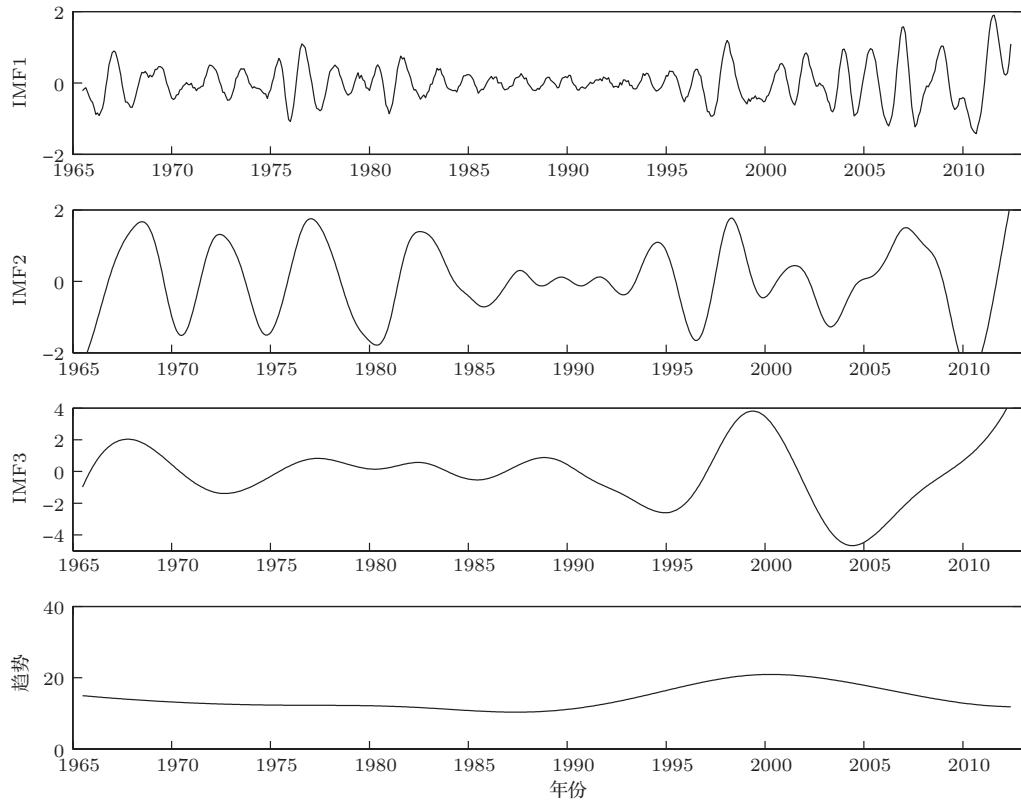


图4 3C 279在8.0 GHz射电流量的IMF分量和趋势项

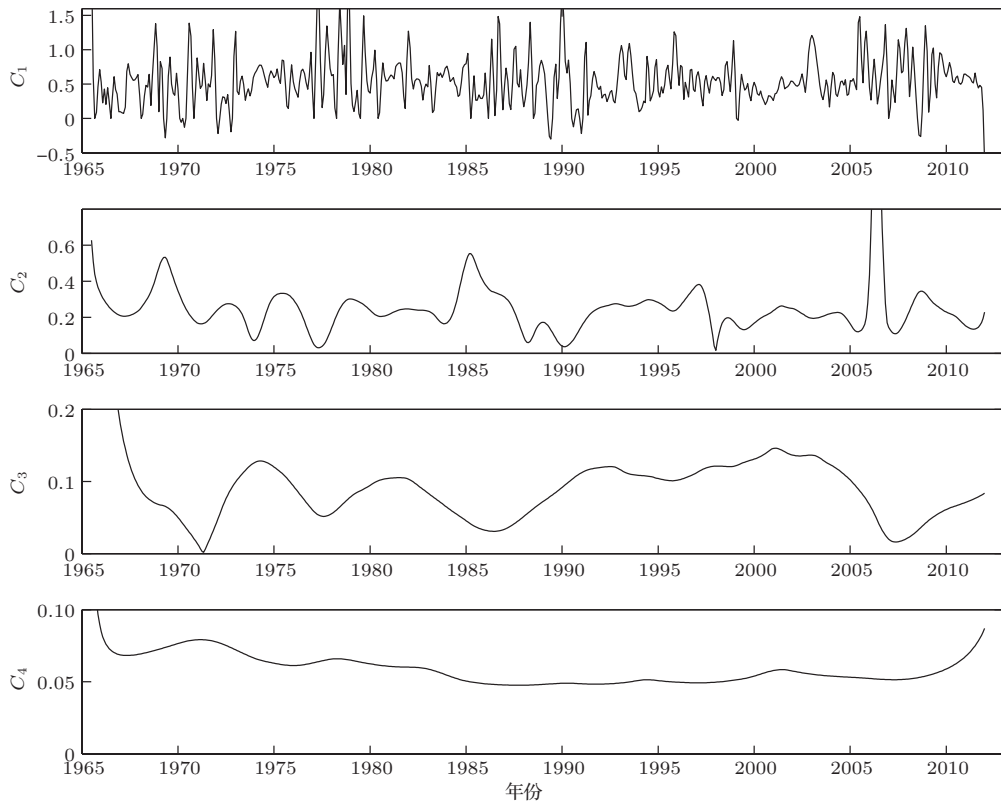


图5 3C 345在8.0 GHz射电量变化的瞬时频率

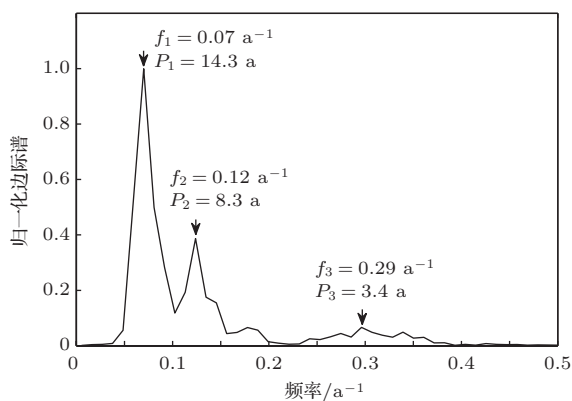


图6 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量变化的边际谱

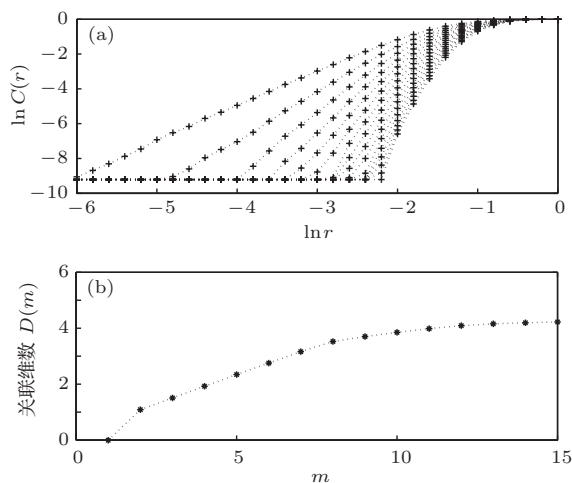


图7 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量的关联维数 (a) $\ln C_m(r) - \ln r$; (b) 饱和关联维数

别为 0.0260, 0.0461 和 0.0115. 图 8 为 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量的最大 Lyapunov 指数, 它们的最大 Lyapunov 指数均大于 0, 进一步证实了类星体的光变资料中的高频成分具有混沌特性.

利用已经确定的时间延迟和嵌入维数, 求得 3C 345, 3C 273, 3C 279 的射电流量 EEMD 分解后的高频成分的 Kolmogorov 熵分别为 0.0987, 0.2232 和 0.0596. 图 9 为 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量的 Kolmogorov 熵, 当嵌入维数大于 10 时, Kolmogorov 熵趋于定值 0.0987. 它们的 Kolmogorov 熵都大于零, 更进一步说明了 3 个类星体的光变资料中的高频成分的确具有混沌特性.

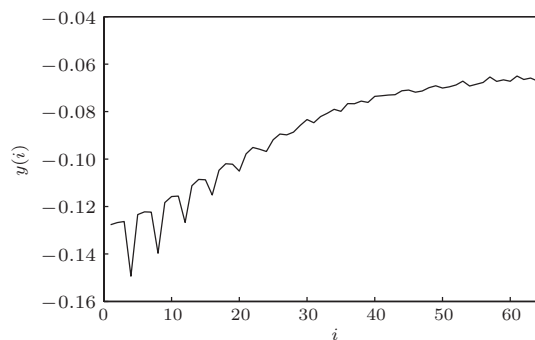


图8 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量的最大 Lyapunov 指数

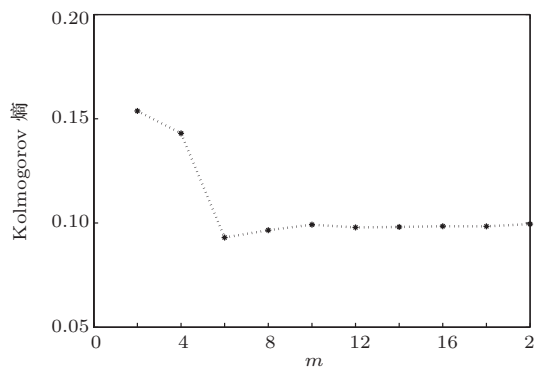


图9 3C 345 在 8.0 GHz 射电流量的 Kolmogorov 熵

表1 类星体光变的周期特性和混沌特性量

类星体	周期/a	方差贡献率/%			延迟时间/月	嵌入维	平均周期/月	关联维数	最大 Lyapunov 指数	Kolmogorov 熵		
		周期	趋势	混沌								
3C 345	14.3	8.3	3.4	55.23	43.78	0.99	4	10	19	4.051	0.0260	0.0987
3C 273	16.9	7.5	2.5	57.26	38.94	3.80	3	9	13	3.927	0.0461	0.2232
3C 279	9.9	4.6	—	60.68	37.47	1.85	4	9	18	3.713	0.0115	0.0596

5 结 论

本文利用能处理非平稳、非线性信号的 EEMD 方法对类星体 3C 345, 3C 273, 3C 279 在射电波段 8.0 GHz 的光变资料进行分解, 借助本征模态函数揭示隐含在复杂光变资料中的内在特征^[17]. 运用

EEMD 分解将光变资料分解成周期成分、趋势成分和 高频成分, 并通过计算饱和关联维数、最大 Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵判断高频成分具有混沌特性.

光变资料中周期成分的方差贡献率最大, 在光变中占主导地位. 类星体 3C 345, 3C 273, 3C 279

是3个典型的可能具有准周期性的类星体. 本文运用EEMD方法获得3C 345的平均周期是14.3, 8.3和3.4 a, Fan等^[2]利用射电波段8.0 GHz得到的光变周期是11.3 a \pm 0.4 a, 和本文获得的14.3 a周期相差不是太大, 存在差别可能是由于分析的光变资料不完全相同的缘故. 3C 273的平均周期是16.9, 7.5, 和2.5 a, 其中7.5 a的周期和Fan等^[2]在同一波段用功率谱方法得到的8.3 a的周期接近, 16.9 a恰好同8.3 a近似成简单的倍周期关系. Fan等^[18]发现3C 273在光学波段存在2.1 a的光变周期, 和本文的2.5 a非常接近. Fan^[19]应用1967—1994年的3C 279近红外K波段观测数据, 获得的光变周期为7.1 a \pm 0.44 a, 本文利用3C 279射电波段的光变资料得到的平均周期是9.9和4.6 a, 这两个周期也存在近似倍数关系, 这种倍周期现象可能是同一周期.

光变资料中的高频成分通过混沌识别具有混沌性, 它们的饱和关联维数在4左右, 嵌入维数是9或者10, 且饱和关联维数 d 和嵌入维数 m 满足 $m \geq 2d + 1$, 如果对类星体光变现象进行动力系统建模, 至少需要4个独立变量, 最多需要9个或10个独立变量. 3C 273的高频分量IMF1明显比3C 345和3C 279的IMF1要混乱一些, 3C 273的最大Lyapunov指数比3C 345和3C 279的都大, 说明3C 273的高频成分混沌程度越厉害. 由于Kolmogorov熵是所有正的Lyapunov指数之和, 3C 273的高频成分的Kolmogorov熵也比其他两个类星体的Kolmogorov熵大. 通过最大Lyapunov指数和Kolmogorov熵可以判断, 3个类星体光变资料的混沌程度依次为: 3C 273, 3C 345, 3C 279.

类星体3C 345, 3C 273, 3C 279的光变资料由周期项、趋势项和混沌项组成. 在以前, 由于类星体光变资料的复杂性, 在分析光变资料时, 习惯将混沌项当作随机成分处理, 这种做法具有一定的不合理性. 混沌理论的出现, 实现了确定性与随机性的统一^[20], 许多学者也尝试用混沌理论来解释一些天体物理领域在混沌理论出现前比较难解释的现象. 如混沌试验离子是解释离子加速的一种非常有效的机制, 还可以解释衰减波^[21]. 类星体产生光变的原因还没有定论, 比较成功的模型有吸积盘模型, 很多观测到的现象支持这种模型^[6,22]. 一般认为类星体的光变与大质量黑洞吸积盘的不稳定性有关, 类星体光变由随机吸积事件构成, 盘的不稳定性会产生随机事件“耀斑”和“块”. 通过本文

分析, 类星体的光变资料还具有混沌特征, 如果用产生随机现象的原理去解释, 不可避免地会出现一些解释不了的现象. 长期以来, 一直把类星体光变当作随机信号进行处理, 忽略了混沌信号独有的特性. 由于光变具有混沌特性, 貌似随机的光变现象可能隐含着没有被发现的简单规律. 类星体光变的产生原因可能还与类星体内部造成混沌现象的非线性机制有关. 因此在建立解释类星体光变的模型时, 若判断光变具有混沌特性后, 适当考虑产生混沌现象的非线性机制, 也许吸积盘模型对类星体光变解释得更好.

感谢北京大学天文学系吴学兵教授对本工作给予的帮助.

参考文献

- [1] Abramowicz M A, Nobili L 1982 *Nature* **300** 506
- [2] Fan J H, Liu Y, Yuan Y H 2007 *Astron. Astrophys.* **462** 547
- [3] Zhang H J, Zhao G, Zhang X, Bai J M 2010 *Sci. China G* **53** 252
- [4] Bai J M, Lee M G 2003 *Astrophys. J.* **585L** 113
- [5] Tang J, Zhang X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7516 (in Chinese)[唐洁, 张雄 2010 物理学报 **59** 7516]
- [6] Valtonen M, Kidger M, Lehto H, Poyner G 2008 *Astron. Astrophys.* **477** 407
- [7] Tang J 2012 *Acta Astron. Sin.* **53** 1 (in Chinese) [唐洁 2012 天文学报 **53** 1]
- [8] Huang N E, Shen Z, Long S R 1998 *Proc. Roy. Soc. London A* **454** 903
- [9] Zhao H W, Huang N E 2004 *Proc. Roy. Soc. London A* **460** 1597
- [10] Liu D Y, Wang Y W, Wang X, He K, Zhang X J, Yang C X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 150506 (in Chinese)[刘丹阳, 王亚伟, 王仙, 何昆, 张兴娟, 杨春信 2012 物理学报 **61** 150506]
- [11] Lü J H, Lu J A, Chen S H 2001 *Analysis and Application of Chaotic Time Series* (Wuhan: Wuhan University Press) p57 (in Chinese) [吕金虎, 陆君安, 陈士华 2001 混沌时间序列分析及其应用 (武汉: 武汉大学出版社) 第57页]
- [12] Takens F 1981 *Dynamical System and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics* (Berlin: Springer) p366
- [13] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, Shaw R S 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 712
- [14] Fraser A M, Swinney H L 1986 *Phys. Rev. A* **33** 1134
- [15] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Physica D* **9** 189
- [16] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, Vastno J A 1985 *Physica D* **16** 285
- [17] Tang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 129701 (in Chinese)[唐洁 2013 物理学报 **62** 129701]

- [18] Fan J H, Romero G E, Lin R G 2001 *Chin. Astron. Astrophys.* **25** 282
- [19] Fan J H 1999 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **308** 1032
- [20] Tang J, Zhang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 169601 (in Chinese)[唐洁, 张雄 2012 物理学报 **61** 169601]
- [21] Varvoglis H, Papadopoulo S K 1983 *Astrophys. J.* **270** L95
- [22] Sillanpää A, Haarala S, Valtonen M J, Sundelius B, Byrd G G 1988 *Astrophys. J.* **325** 628

Variability periodicity and chaotic property of quasars based on ensemble empirical mode decomposition*

Tang Jie[†]

(School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

(Received 7 September 2013; revised manuscript received 25 October 2013)

Abstract

The radio fluxes of the quasars 3C 345, 3C 279 and 3C 273 at a frequency of 8.0 GHz were collected in a time period from 1965 to 2012 based on the database of University of Michigan Radio Astronomy Observatory. The time series of the quasar variability is decomposed into trend components, periodic components and high frequency components by the ensemble empirical mode decomposition. Then chaotic characteristic quantities of the high frequency component is analyzed, that is, saturation correlation dimension, maximum Lyapunov exponent and Kolmogorov entropy. The results show that the variability of quasars has the chaotic characteristic as well as the characteristic of periodicity. The variability of quasars is due to the comprehensive consequence of a physical mechanism of the periodic phenomenon combined with the nonlinear mechanism of the chaos phenomenon.

Keywords: quasar, period, ensemble empirical mode decomposition, chaos

PACS: 97.30.Jm, 98.54.Cm, 95.75.Pq, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.63.049701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11373008), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JM1021), and the Research Foundation of Shaanxi University of Technology, China (Grant No. slgky13-50).

† Corresponding author. E-mail: tj168@163.com