

# 基于聚合经验模态分解方法的 OJ 287 射电流量变化周期分析\*

唐洁†

(陕西理工学院物理与电信工程学院, 汉中 723001)

(2012年11月26日收到; 2013年2月27日收到修改稿)

BL Lac 天体 OJ 287 是一个重要的 Blazar 天体, 光变具有准周期特点. 本文从密歇根大学射电天文台数据库收集了 OJ 287 射电波段 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 超过 30 年时间的观测数据. 由于天文观测资料的复杂性, 一些传统寻找周期的方法不是太理想. 近几年迅速发展起来的聚合经验模态分解 (EEMD) 特别适合于具有非线性和非平稳动态变化特性的 Blazar 天体光变规律的研究. 运用 EEMD 方法对 OJ 287 的 3 个射电波段流量分别进行多时间尺度分解, 各获得 6 个代表不同时间尺度局部特征信息的本征模态函数分量和一个趋势项. 研究结果表明: 4.8 GHz 射电流量变化的主要周期是 18.9, 11.9, 5.7 和 2.4 年; 8.0 GHz 的主要周期是 12.2, 5.2 和 2.4 年; 14.5 GHz 的主要周期是 21.8, 12.0, 4.3 和 2.4 年. 尽管 3 个波段流量变化主要周期大小有一定的差别, 但是存在着近似相同的变化周期 12.0 和 2.4 年, 说明这 3 个波段可能来源于相同的辐射机制, 也证实了 OJ 287 射电波段和光学波段具有相同的长光变周期 12.0 年. 这些结论表明: EEMD 作为一种全新的非线性、非平稳信号处理方法, 可以更精确地提取 Blazar 天体中不同光变周期的分量.

**关键词:** OJ 287, 光变周期, 聚合经验模态分解

**PACS:** 97.30.Jm, 98.54.Cm, 95.75.Pq, 02.50.Fz

**DOI:** 10.7498/aps.62.129701

## 1 引言

Blazar 天体包括 BL Lac 天体和平谱射电类星体<sup>[1,2]</sup>, 它们在各个波段都存在快速、剧烈的光变现象. 有的 Blazar 天体爆发时的最高流量比它处于宁静状态时的流量要增强几十倍, 而且光变时标的跨度也比较大, 长的可达几十年. 对 Blazar 天体长期观测资料分析表明, Blazar 天体的光变具有周期性. 尽管超大质量双黑洞物理模型可以解释 Blazar 天体的很多观测现象, 但 Blazar 天体产生周期性光变的原因是否是由双黑洞造成的, 仍然还需要更进一步的深入研究<sup>[3]</sup>.

已经被证认为 Blazar 天体的数量还不是太多, 但已经积累了丰富的 Blazar 天体各个波段的光变资料, 特别是射电波段的资料. 影响 Blazar 天体爆

发的因素多种多样, 光变曲线十分复杂, 没有规律的随机成分经常混杂在周期成分和趋势成分中. 因此可以将 Blazar 天体的光变资料视为一种非线性、非平稳随机信号. 周期成分与趋势成分同属隐含分量, 如果 Blazar 光变资料中存在有周期成分和趋势成分, 那么所获得的信息就会更多, 周期信号有助于我们了解 Blazar 天体复杂的内部和外部物理特性<sup>[4]</sup>.

目前, 对 Blazar 天体光变资料进行周期分析中较为成熟的方法是功率谱估计方法和小波分析方法<sup>[5]</sup>. 建立在傅里叶变换基础之上的功率谱估计方法比较适合于呈正弦曲线变化的周期信号, 对于大多数线性和平稳性信号才具有较好的分析效果, 同时具有分辨率低和方差性能不好等缺陷使得在周期分析中受到了很大的限制. 小波分析方法具有良好的时频局部化功能和多分辨分析能力, 但小波

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号:11033001) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB815405) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tj168@163.com

变换本质上仍是一种窗口可以调节的傅里叶变换, 仍然要求被分析的信号是平稳的<sup>[6]</sup>. 运用功率谱估计方法和小波分析方法来分析具有复杂的非平稳、非线性特征的 Blazar 天体光变资料的周期性, 虽然能大体判断出光变的主要周期, 但不能很好地揭示出 Blazar 天体流量变化的多尺度和多层次结构, 特别是不涉及光变中极其重要的流量变化趋势, 达不到理想的分析效果. 1998 年, Huang 等<sup>[6]</sup>提出了既能分析线性稳态数据, 又能对非线性非稳态数据进行分析的经验模态分解方法 (empirical mode decomposition, EMD). 该方法克服了传统的时频变换依赖于基函数的选取, 选取的基函数与分析的信号相适应则结果较理想, 由于分析的信号自身的复杂性, 固定的基函数不可能与所有类型的信号相适应, 而 EMD 方法选用通过信号自身产生自适应基函数, 这使得它具有高分解效率. EMD 方法提出后, 已经在许多领域得到成功应用, 但在应用过程中发现 EMD 分解中存在模态混叠现象. 近几年, 发展起来的聚合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 方法将白噪声加入信号来补充一些缺失的尺度, 从而有效地解决了 EMD 中的模态混叠问题<sup>[7]</sup>.

研究发现很多 Blazar 天体的光变存在周期性<sup>[8-13]</sup>, OJ 287 是一个著名的具有周期光变的 Blazar 天体, 这个源 100 多年的光学光变资料显示出每隔 11.65 年发生周期性爆发<sup>[14]</sup>. 为了充分利用多波段的观测数据, 本文从密歇根大学射电天文台 (UMRAO) 数据库收集 OJ 287 射电波段 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 超过 30 年的可靠观测数据, 运用 EEMD 方法把具体的周期信号和流量长期发展趋势从原始的光变资料中提取出来, 获得的光变周期和趋势能更深刻地认识 OJ 287 光变的内在规律和特征, 对进一步研究 OJ 287 的物理特性很有帮助.

## 2 EEMD 基本理论和方法

1998 年, Huang 等<sup>[6]</sup>提出了分析非线性、非平稳信号的 EMD 方法, EMD 和 Hilbert 谱分析相结合被称为 Hilbert-Huang 变换 (Hilbert-Huang transform, HHT), 在 HHT 中 EMD 方法是至关重要的一部分.

EMD 方法将复杂的信号分解成从高频到低频的有限个本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF), 通过信号特征尺度分解出来的任何一个 IMF

分量要经过反复筛选, 以致在 IMF 分量中每一个波动周期对应惟一种波动模式, 这样信号的瞬时频率才具有实际的物理意义. 然后对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换就可以得到 Hilbert 谱和边际谱 (marginal spectrum), 这些谱能准确反映出真实物理过程中能量在各种特征尺度上的分布规律. 然而当信号存在间歇性成分或脉冲干扰等异常事件时, 异常事件的局部包络和信号固有模态全局包络的混叠出现在分解出的 IMF 分量中, 这种模态混叠现象影响了 EMD 方法的时频分析能力<sup>[7]</sup>.

针对 EMD 方法存在的模态混叠问题, Wu 和 Huang 提出了 EEMD 方法<sup>[7]</sup>. 该方法根据高斯白噪声具有频率均匀分布的统计特性, 在原信号中加入具有均匀尺度特性、幅值标准差为常数的高斯白噪声, 不同频率尺度的信号投影到高斯白噪声建立的均匀时频空间的相应频率尺度上, 加了白噪声的信号在不同尺度上有了足够的极值点, 因此可以有效地避免模态混叠. 同时对分解出来的各 IMF 做总体平均, 由于不相关的随机序列统计均值为零, 每次加入的高斯白噪声不同, 噪声之间不存在相关性. 对所有 IMF 求总体平均后, 人为添加的白噪声的影响得到消除, 总体平均后的 IMF 物理意义更明确, 可以作为 EEMD 分解的 IMF.

EEMD 方法将均值为零, 幅值标准差为常数的高斯白噪声  $\xi_i(t)$  多次加在原始信号  $x(t)$  上, 即<sup>[7]</sup>

$$x_i(t) = x(t) + \xi_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

$x_i(t)$  为第  $i$  次加入高斯白噪声后的信号, 对高斯白噪声的要求是对原信号中的高频成分极值点间隔的分布不产生影响, 又能让原信号中低频成分的极值点间隔的分布特性得到改变.

将信号  $x_i(t)$  根据极大值和极小值数目与跨零点数目相等或最多相差一个, 以及局部极大值构成的上包络和局部极小值构成的下包络的平均值为 0 的条件分解成有限个 IMF 的和:

$$X_{ij}(t) = C_{ij} + r_i(t) \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

$C_{ij}(t)$  表示第  $i$  次新加入的高斯白噪声后分解所得到的第  $j$  个 IMF. 对获得的 IMF 进行总体平均运算, 当  $n$  足够大时, 多次加入的高斯白噪声对 IMF 的影响得到消除, 最终得到原信号的第  $j$  个固有模态函数  $C_j(t)$  为

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

EEMD 方法将信号分解成有限个固有模态分量和一个代表信号的平均趋势或一个常量的趋势项. 对 EEMD 分解后最终得到的每一个 IMF 分量用 Hilbert 变换进行谱分析, 从而获取 Hilbert 谱, 进一步用 Hilbert 谱可以得到边际谱 [7].

### 3 基于 EEMD 方法的 OJ 287 周期分析

Blazar 天体 OJ 287 在光学波段和射电波段都有十分丰富的观测资料, 相对光学波段, 获得射电

波段的资料要容易得多, 有的射电波段积累有长达几十年的观测数据. 通过观测发现 OJ 287 每隔几年就有一次大的爆发, 这些爆发呈现一定的周期性变化 [8]. 本文从 UMRAO 射电监测计划中收集了 OJ 287 在 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 射电波段的观测数据, 数据时间跨度均超过 30 年, 它们的光变曲线如图 1 所示. 从图 1 可以看出, OJ 287 三个射电波段流量变化幅度较大, 光变现象非常剧烈, 在 1986 和 2010 年分别出现了一次大爆发, 且各波段之间的光变曲线存在相似性.

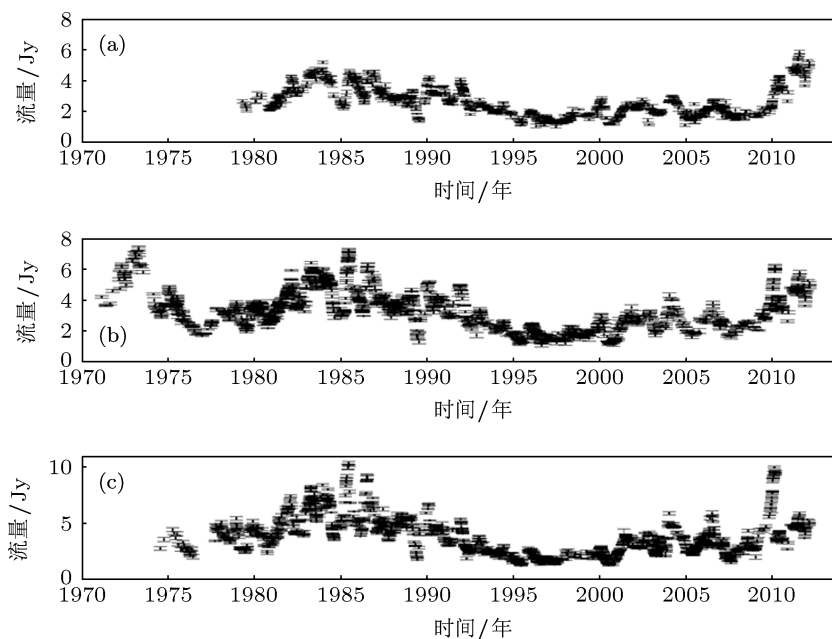


图 1 OJ 287 的射电流量光变曲线 (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz

运用 EEMD 方法对 OJ 287 在 4.8 GHz 波段的观测数据进行多时间尺度分解, 在分解过程中, 每次加入的高斯白噪声的振幅为合成序列标准偏差的 0.25, 总体平均次数为 200 次, 分解后得到 6 个 IMF 分量和一个趋势项如图 2 所示, 说明 OJ 287 在 4.8 GHz 射电波段流量变化过程是非线性和非平稳的, 是由多种波动成分共同作用的结果, 具有复杂的多时间尺度性. 各 IMF 分量代表了不同尺度的变化行为, 其中 IMF1 和 IMF2 分量频率较高, 对应的波动周期较小, IMF3—IMF6 分量波动周期性较明显.

对用 EEMD 方法得到的每个 IMF 进行 Hilbert 变换得到瞬时频率 [7], 结合图 3 流量变化的瞬时频率可知, IMF 是按频率由高到低依次分解而成, 每个 IMF 的频率围绕一个中心频率做小幅度的变

化, 各 IMF 不同时刻的振幅也不同. IMF1 和 IMF2 分量的瞬时频率变化较大, 振荡较剧烈, 波动周期不明显; IMF3 分量的中心频率在 0.4 左右, 存在有 2—3 年的波动周期; IMF4 分量的中心频率在 0.2 左右, 存在有 5—6 年的波动周期; IMF5 分量中心频率在 0.1 左右, 具有准 10 年的波动周期, 其波动幅度从 20 世纪 80 年代开始急剧增加, 到 1988 年达最大值, 然后再减小; IMF6 分量中心频率在 0.05 左右, 具有准 20 年的波动周期, 其波动幅度变化较小, 总体上基本保持稳定. 趋势项表示射电流量整体变化趋势, 自 20 世纪 90 年代初到 21 世纪初, OJ 287 在 4.8 GHz 射电波段流量表现出逐步缓慢增加的趋势. 总体看来大尺度的长光变周期波动比较缓慢, 而短尺度的周期波动振荡得很剧烈.

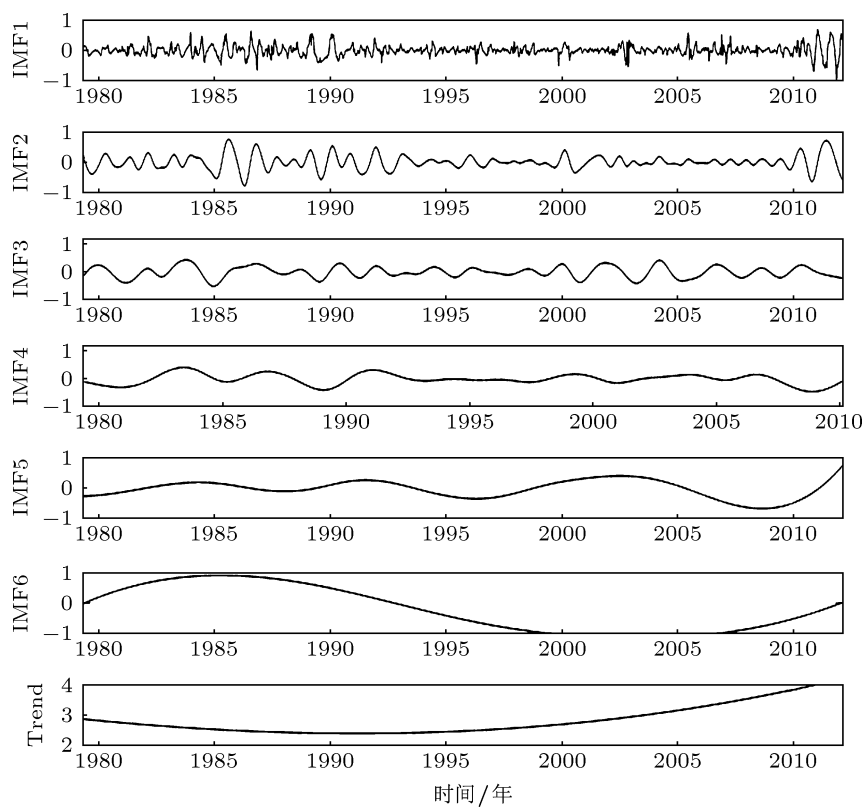


图2 4.8 GHz 射电流量的 IMF 分量和趋势项

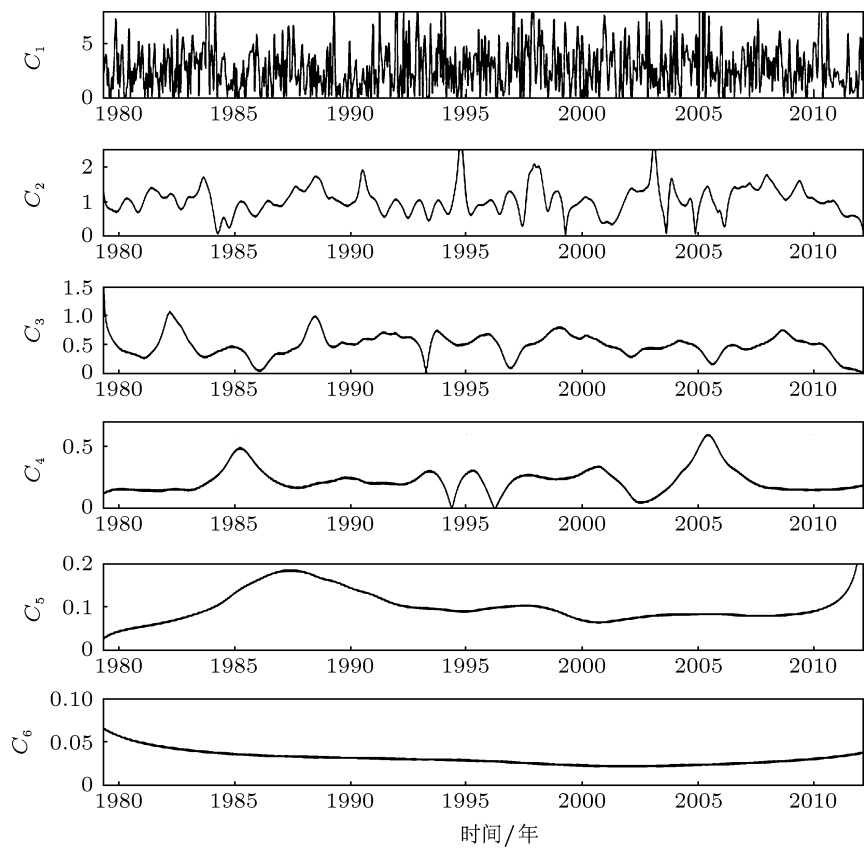


图3 4.8 GHz 射电流量变化的瞬时频率 ( $C$  为瞬时频率, 单位为年<sup>-1</sup>)

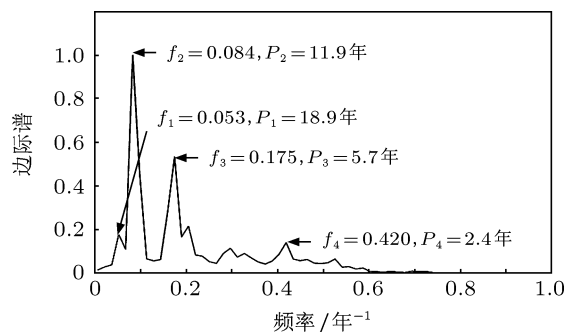


图4 4.8 GHz 射电流量变化的边际谱

利用 Hilbert 谱对时间积分得到的边际谱反映了信号幅值随瞬时频率变化的规律, 通过边际谱可以获得各 IMF 分量的平均周期, 图 4 为 OJ 287 在 4.8 GHz 射电波段流量变化的边际谱. 由于本文分析的目的是获得 OJ 287 的长光变周期, 由分解结果看, 低频分量 IMF3—IMF6 可以较好地还原实际观测资料中的低频分量. 从边际谱可知, IMF3—IMF6 各分量中心频率分别为 0.053, 0.084, 0.175, 0.420, 每个 IMF 的中心频率近似等于后一个 IMF 的中心

频率的 2 倍, 平均周期分别为 18.9, 11.9, 5.7 和 2.4 年. 通过边际谱对 OJ 287 射电光变资料中各个瞬时频率总体度量, 能够准确地获得被分析信号中的频率随时间变化的动态特征, 以及隐含的周期成分和整体趋势成分. 图 5 是 OJ 287 在 4.8 GHz 射电流量的各 IMF3—IMF6 加趋势项的合成值和实际观测值, 尽管没有考虑高频成分 IMF1 和 IMF2 分量, 把分解得到的低频成分 IMF3—IMF6 和趋势项相加基本可以还原光变曲线.

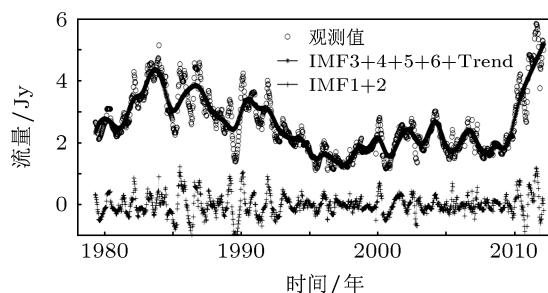


图5 4.8 GHz 射电流量的观测值和部分 IMF 加趋势项的合成值

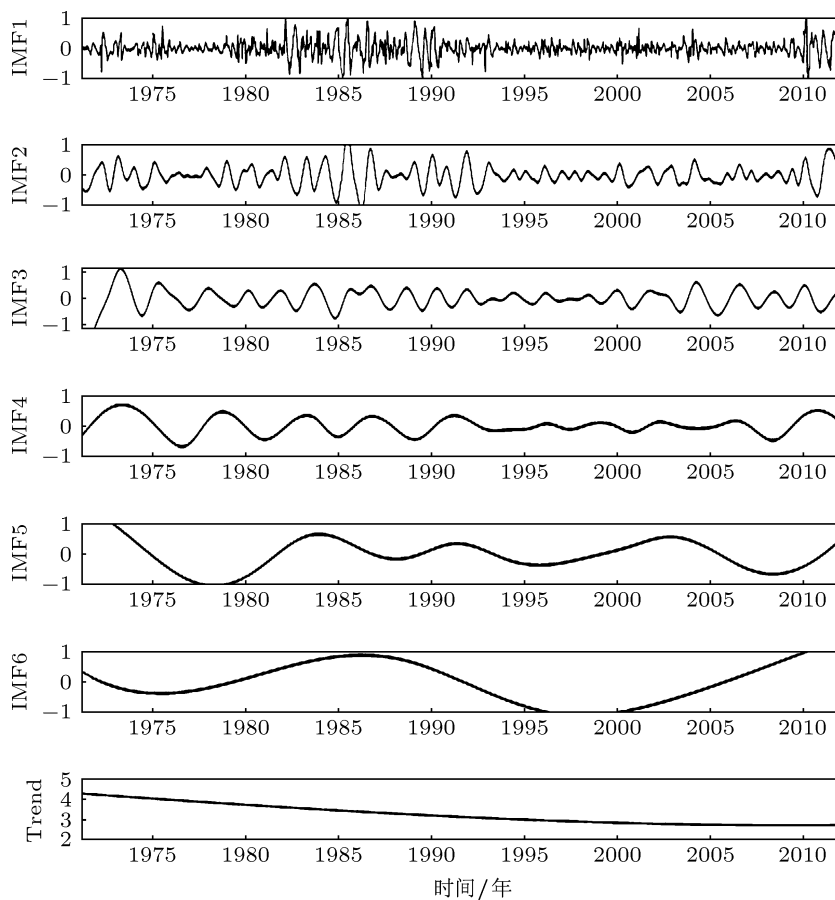


图6 8.0 GHz 射电流量的 IMF 分量和趋势项

为了进一步检验 EEMD 方法在分析天文观测资料中的长光变周期的可行性, 再选取 OJ 287 在 8.0 和 14.5 GHz 射电波段流量进行分析. 图 6—9 分别是 8.0 和 14.5 GHz 射电波段流量的 IMF 分量和边际谱. 从边际谱图可以看出, 8.0 GHz 的 IMF3—IMF5 分量的平均周期为 12.2, 5.2 和 2.4 年, IMF6 分量的边际谱幅值太小, 谱峰不是太明显, 是否隐藏着更长周期成分, 由于观测资料长度限制, 还难以确定. 14.5 GHz 的 IMF3—IMF6 分量的平均周期为 21.8, 12.0, 4.3 和 2.4 年. 8.0 和 14.5 GHz 射电波

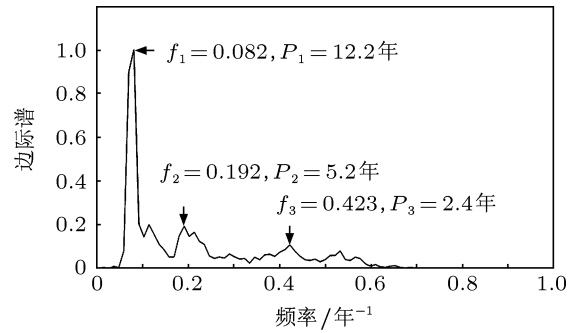


图 7 8.0 GHz 射电流量变化的边际谱

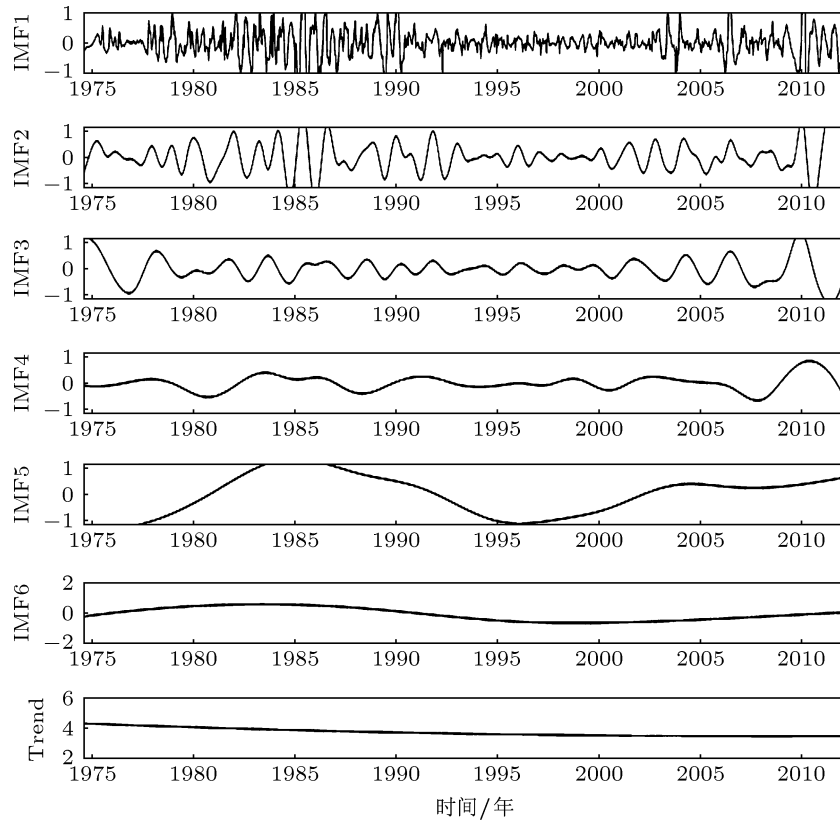


图 8 14.5 GHz 射电流量的 IMF 分量和趋势项

段流量的趋势项表明, 在最近 30 年来总体上是一个射电流量呈减少的趋势, 不同于 4.8 GHz 的趋势项, 这可能隐含着它们的光变爆发的幅度不是完全相同. 三个射电波段的流量经过 EEMD 方法分解后, 得到的 IMF 分量和各自的平均周期大小上有一定的差别, 但是都有着相差不多的波动周期, 都存在 12.0, 5.0, 2.4 年左右的平均周期. 由此可见, 尽管影响 OJ 287 射电爆发的因素是多方面的, 对不同射电波段爆发起决定性作用的因素应该是一样的, OJ 287 射电光变可能来源于同一物理过程.

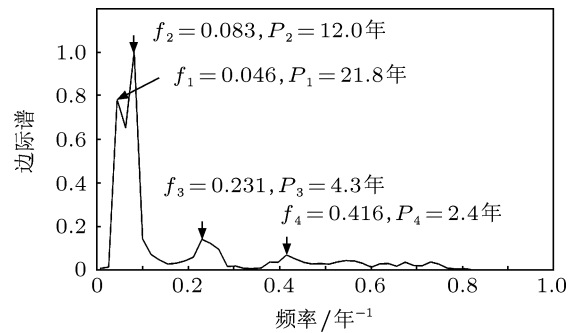


图 9 14.5 GHz 射电流量变化的边际谱

## 4 结 论

本文从 UMRAO 数据库收集了 OJ 287 射电波段 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 超过 30 年时间的观测数据, 利用近几年发展起来的 EEMD 方法对其隐含的光变周期和演变趋势进行分析. 分析发现 OJ 287 在 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 射电波段流量具有多个周期成分, 4.8 GHz 的平均周期为 18.9, 11.9, 5.7, 2.4 年, 8.0 GHz 的平均周期为 12.2, 5.2, 2.4 年, 14.5 GHz 的平均周期为 21.8, 12.0, 4.3, 2.4 年. 三个波段都存在 12.0, 5.0, 2.4 年左右的平均周期, 这些可能的周期相互之间还存在近似倍数关系, 这种倍周期现象的背后可能隐藏着深刻的物理规律等待我们去挖掘. 射电三个波段都具有 12.0 年的长光变周期和 Sillanpää 等<sup>[15]</sup>得到的 OJ 287 光学波段的长光变周期的结果一致, 实际观测也发现每隔 12 年左右 OJ 287 有次大的爆发, 这说明本文应用的 EEMD 方法对计算 Blazar 天体的长光变周期是可靠的, 同时也进一步说明光学和射电波段的光变可能有着共同的物理起源.

OJ 287 产生周期性光变的原因还没有定论, Sillanpää 等<sup>[15]</sup>, Valtonen 等<sup>[16]</sup>成功用双黑洞模型来解释 OJ287 的周期性光变, 在黑洞自转轴和公转轴方向不同时, 会产生自转轴进动的现象. 若两个黑洞相距很近, 自转轴的进动周期可以短至几年的时标, 产生我们观测到的周期性光变. 现有的研究发现, 许多 Blazar 天体的光变具有周期性爆发, 双黑洞模型被多次用来解释这些周期性现象<sup>[17-22]</sup>. OJ 287 在 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 射电波段的光变曲线的共同特征三个频率的爆发几乎是同时发生

的, 时间延迟不明显, 这些爆发可能源于离中央引擎比较远的喷流结构中. 通过 EEMD 分解出来的 OJ 287 不同射电波段的流量变化, 包含了观测资料相同时间特征尺度大小的 IMF 分量, 其间具有相似性, 存在显著的相关性, 而不同时间尺度下的分量之间基本无相关性. 它们的光变曲线也非常相似, 相关性较强. 这些说明 OJ 287 不同射电波段之间的辐射具有相似的物理过程, 为同步自康普顿等模型的检验提供了重要的信息. 8.0 和 14.5 GHz 射电波段流量的趋势项总体上呈减少趋势, 而 4.8 GHz 的趋势项随时间呈增加趋势, 这可能又隐含着它们的光变爆发的幅度不完全相同.

OJ 287 射电波段的光变曲线非常复杂, 周期成分、趋势成分又与随机成分混合在一起, 因此需要应用有效的周期分析方法来提取. 常用的周期分析方法有周期图法、最大熵谱估计、小波变换等, 这些方法在实际应用中受到线性或者平稳性限制. 本文采用的基于 EEMD 周期分析方法不同于传统的基于傅里叶变换的分析方法, EEMD 方法凭借其既具有 EMD 的自适应性、正交性、完备性等优点, 又可避免 EMD 的模式混叠的缺点, 特别适用于具有非线性、非平稳特性的 OJ 287 射电波段的光变资料周期提取, 通过重构过程得到的重构信号与原信号误差很小. EEMD 方法作为一种全新的周期分析方法, 可以更精确地提取 OJ 287 射电波段的光变曲线中蕴含的不同波动周期分量, 在长周期分析中具有广阔的应用前景.

感谢北京大学天文系吴学兵教授对本工作的大力支持和提供的极有意义的建议.

- 
- [1] Tang J, Wu X B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 119801 (in Chinese) [唐洁, 吴学兵 2011 物理学报 **60** 119801]
  - [2] Tang J, Fu M X, Wu X B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 219501 (in Chinese) [唐洁, 傅明星, 吴学兵 2012 物理学报 **61** 219501]
  - [3] Valtonen M J, Lehto H J, Nilsson K, Heidt J Takalo L O 2008 *Nature* **452** 850
  - [4] Fan J H, Zhang Y W, Qian B C, Tao J, Liu Y, Hua T X 2009 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **181** 466
  - [5] Zhang H J, Zhao G, Zhang X, Bai J M 2010 *Sci. China G* **53** 252
  - [6] Huang N E, Shen Z, Long S R 1998 *Proc. Royal Soc. London A* **454** 903
  - [7] Zhao H W, Huang N E 2004 *Proc. Royal Soc. London A* **460** 1597
  - [8] Fan J H, Liu Y, Qian B C, Tao J, Shen Z Q, Zhang J S, Huang Y, Wang J 2010 *Res. Astron. Astrophys.* **10** 1100
  - [9] Dai B Z, Li X H, Liu Z M, Zhang B K, Na W W, Wu Y F, Hao J M 2009 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **392** 1181
  - [10] Dai B Z, Zhang B K, Zhang L 2006 *New Astron.* **11** 471
  - [11] Tang J, Zhang X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7516 (in Chinese) [唐洁, 张雄 2010 物理学报 **59** 7516]
  - [12] Zhang H J, Zhao G, Zhang X, Dong F T, Xie Z H, Yi T F, Zheng Y G, Bao Y Y 2009 *Sci. China G* **52** 1442
  - [13] Tang J 2012 *Acta Astron. Sin.* **53** 1 (in Chinese) [唐洁 2012 天文学报 **53** 1]
  - [14] Sillanpää A, Haarala S, Valtonen M J, Sundelius B, Byrd G G 1988 *Astrophys. J.* **325** 628
  - [15] Sillanpää A, Takalo L O, Pursimo T, Nilsson K, Heinamaki P, Katajainen S 1996 *Astron. Astrophys.* **305L** 13
  - [16] Valtonen M, Kidger M, Lehto H, Poyner G 2008 *Astron. Astrophys.* **477** 407
  - [17] Xie G Z, Yi T F, Li H Z, Zhou S B, Chen L E 2008 *Astron. J.* **135** 2212

- [18] Zhang X, Zheng Y G, Zhang H J, Liu Y, Wen Y B, Wang W 2008 *Astron. J.* **136** 1846  
 [19] Venturi T, Dallacasa D, Orfei A 2001 *Astron. Astrophys.* **379** 755  
 [20] Boettcher M Fultz K, Aller H D 2009 *Astrophys. J.* **694** 174  
 [21] Raiteri C M Villata M, Larionov V M 2008 *Astron. Astrophys.* **480** 339  
 [22] Bai J M, Lee M G 2003 *Astrophys. J.* **585L** 113

# Analysis on periodic variations of the radio flux of OJ 287 with ensemble empirical mode decomposition\*

Tang Jie<sup>†</sup>

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

( Received 26 November 2012; revised manuscript received 27 February 2013 )

## Abstract

BL Lacertae object OJ 287 is one of the Blazars, which shows convincing evidence of periodic variations. We have collected the 4.8, 8.0 and 14.5 GHz data for OJ 287 from the University of Michigan Radio Observatory database over three decades. Due to the complexity of the variability data, some algorithms for period searching are not ideal yet. An alternative to traditional periodicity analysis is the ensemble empirical mode decomposition (EEMD). This method can analyze the cyclic components of complicated nonlinear and non-stationary processes. Using the EEMD analysis, the light curve of OJ 287 at radio frequency can be resolved into six independent intrinsic mode functions that have different average periods and trends. We find possible periods of 18.9, 11.9, 5.7 and 2.4 years in 4.8 GHz, 12.2, 5.2 and 2.4 years in 8.0 GHz and 21.8, 12.0, 4.3 and 2.4 years in 14.5 GHz. The most common periods are 12.0 years and 2.4 years, which imply that the emissions in these bands may originate from the same radiative process. The results also confirm that a radio variability period of OJ 287 is in agreement with the optical variability period of about 12.0 years. The result shows that the components of different variability periods can be separated properly with the EEMD that is a nonlinear and non-stationary signal processing method.

**Keywords:** OJ 287, variability period, ensemble empirical mode decomposition

**PACS:** 97.30.Jm, 98.54.Cm, 95.75.Pq, 02.50.Fz

**DOI:** 10.7498/aps.62.129701

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11033001) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB815405).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: tj168@163.com