



论文

BL Lac 天体 OJ 287 射电流量的交叉小波分析

唐洁*

陕西理工学院物理与电信工程学院, 汉中 723001

*联系人, E-mail: tj168@163.com

收稿日期: 2013-09-17; 接受日期: 2014-04-01; 网络出版日期: 2014-07-08

国家自然科学基金(批准号: 11373008)、陕西省自然科学基金(编号: 2013JM1021)和陕西理工学院科研基金(编号: slgky13-50)资助项目

摘要 将 BL Lac 天体 OJ 287 射电 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 波段从 1978–2010 年的有效观测数据进行整理, 获得了其长期光变曲线, 用小波功率谱和交叉小波方法分别分析了其主要振荡周期和彼此之间的相关性及其时延. 小波功率谱分析结果表明, OJ 287 射电 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 流量存在准 6 个月、8–16 个月和 16–32 个月的主振荡周期, 光变周期为 0.54 ± 0.04 , 1.12 ± 0.07 , 2.49 ± 0.08 年, 主振荡周期主要出现在 1980–1994 年和 2000–2007 年时间段. 交叉小波分析发现 OJ 287 射电波段之间正相关振荡的凝聚性很强, 具有强的关联性, 在 8–16 和 16–32 个月共振周期尺度上的相关性高. 射电波段的爆发在 16–32 个月的振荡周期尺度上几乎是同时性的, 在 8–16 个月的振荡周期尺度上存在 20 ± 6 天的时间延迟, 高频波段领先低频波段.

关键词 光变周期, 小波分析, OJ 287, 相关性, 时延

PACS: 98.54.Cm, 95.75.Pq, 98.85.Bh, 95.75.-z

doi: 10.1360/SSPMA2013-00068

BL Lac 天体是性质较为独特的活动星系核, 具有的突出特征是射电平谱、大幅度短时标光变、强而变化的光学偏振、没有或者只有弱的发射线等^[1]. 尽管已被证认的 BL Lac 天体数量还不是太多, 但通过对 BL Lac 天体的深入研究, 能揭示 BL Lac 天体的本质, 加深对活动星系核物理结构和性质的认识. 例如获得 BL Lac 天体短时标光变, 就能限定辐射区域和吸积释能效率, 估计亮温度和黑洞质量上限等^[2,3]. BL Lac 天体的光变有剧烈、大幅、快速的特点, 探讨不同光变的形成机制能够促进活动星系核理论和模型的发展^[4].

BL Lac 天体的光变时标、不同波段光变的关联性和时间延迟能提供其中心结构及物理过程等许多重要的信息^[5], 因此研究 BL Lac 天体的这些物理量显得非常必要. 以传统的傅里叶变换为理论基础的功率谱方法和经典交叉谱方法在研究 BL Lac 天体光变时应用较多, 获得了一些比较理想的结果^[6]. 采用传统的功率谱分析方法如最大熵谱估计方法尽管也能分析出 BL Lac 天体的主要长光变周期^[7], 但 BL Lac 天体射电观测数据一般是非平稳信号, 非平稳信号最重要的性质是时频局部特性, 传统的傅里叶变换恰好处理不了时频局部特性, 由于方法本身的局

引用格式: 唐洁. BL Lac 天体 OJ 287 射电流量的交叉小波分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 865–871

Tang J. Cross-wavelet analysis of the radio flux of BL Lac object OJ 287 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 865–871, doi: 10.1360/SSPMA2013-00068

限性, 只能对同一天体各个波段平均光变周期进行简单分析^[8]. 小波功率谱分析具有较好的时频局部化和多分辨率分析功能, 可以同时和时间域和频率域中都具有表征 BL Lac 天体某一波段光变的局部特征的能力^[9].

小波功率谱一般讨论单个波段的光变特性, 较少涉及同一天体不同波段两者之间的光变关联性, 尤其是不同波段两者在时间域和频率域中相关关系的研究更不多见. 交叉小波变换是一种新的多信号分析技术, 不仅能识别同一天体不同波段间相关振荡的显著周期, 还能够有效地分析不同波段光变间的相关性、时延性和位相结构. 而经典交叉谱分析只能从频域考察两者总体的相关性, 较少涉及两者之间的相关随时间和频率变化的具体细节. 交叉小波凝聚谱可以提取两个不同波段光变之间的相关性随时间和频率变化的特征, 也便于描述耦合周期信号在时域中的局部化特征, 小波位相谱能够展示两者共振位相的时频域差异^[10,11]. 因此, 小波功率谱和交叉小波分析已经在很多领域得到了应用^[12-14].

BL Lac 天体 OJ 287 是一个非常典型的 BL Lac 天体, 具有 BL Lac 天体所有独特的特性, OJ 287 是一个强引力辐射源, 利用该天体能极好地探测引力波. 它的观测资料也特别的丰富, 已经积累有 100 多年的观测数据. 尽管关于 OJ 287 长光变周期的研究已经取得了一些成果^[8,15-17], 但由于该天体内部结构复杂, 明确证实该天体光变周期还比较困难. OJ 287 几乎每隔一年多有一次大的爆发, 这些爆发是否具有周期性规律, 以及具有相似性的各个射电波段的光变曲线是否存在关联性是极需要解决的问题. 因此, 本文采用小波功率谱分析 BL Lac 天体 OJ 287 射电 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 波段的光变周期, 用交叉小波方法分析不同波段之间的联合统计特征, 讨论两者在时频域中的多时间尺度相关性, 进一步了解 OJ 287 在不同射电波段之间内在联系.

1 观测数据和分析方法

1.1 数据收集与处理

本文分析的数据来自于密歇根大学射电天文台 (University of Michigan Radio Astronomy Observatory, UMRAO) 射电监测计划, 所用的望远镜是 26 m 的抛物面射电望远镜. 我们获得了从 1978–2010 年 OJ

287 在 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 射电波段近 21 年的观测数据. 如果忽略其他一些次要因素, 将 BL Lac 天体 OJ 287 射电波段光变资料看成一个离散时间序列, 并将数据取 10 天的平均值, 若在这 10 天无观测数据, 则用三次样条插值填补.

1.2 小波分析方法

傅里叶变换是一种全局的变换, 无法实现信号的时频局部性质, 为了分析非平稳信号, 出现了许多新的信号分析方法如小波变换. 小波变换是一种时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法. 小波函数能根据需要自动调整时间与频率分辨率, 在时频域都具有表征信号局部特征的能力^[10].

对于给定的非平稳天文观测信号 $x(t)$, 连续小波变换将待分析的信号 $x(t)$ 分解成一系列小波函数的叠加, 其表达式为

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

其中 a 为与频率相关的伸缩尺度因子, b 为时间平移因子. 由于 BL Lac 天体射电波段光变数据是离散形式的, 取 $x(t)=x(k\Delta t)$, $k=1, 2, \dots, N$, Δt 为时间采样间隔, 则^[10]

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{k=1}^N x(k\Delta t) \psi^*\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right). \quad (2)$$

因此信号 $x(t)$ 的平均小波功率谱为

$$W_x(a) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |W_x(a, b_k)|^2. \quad (3)$$

在计算小波功率谱时, 以红噪声为背景进行显著性检验, 红噪声检验过程用一阶自回归方程, 红噪声背景功率谱为^[10]

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(2\pi k / N)}, \quad (4)$$

其中 α 为一阶自回归方程的相关系数, k 取 0 到 $N/2$, 并运用傅里叶卷积定理来处理红噪声背景功率谱的边界.

交叉小波变换是小波变换与交叉谱分析相结合而发展起来的一种从多时间尺度的角度研究两个时间序列的相互关系的信号处理方法, 包括小波交叉谱和小波相干谱. 它们可以反映两个时间序列在时

频域上互相关许多重要信息, 是表征两个时间序列之间关联程度和时延大小的重要指标^[11].

小波交叉谱能提供两个时间序列的时频空间能量共振信息, 反映出频域凝聚性和强度特征. 设两个天文观测信号为 $x(t)$, $y(t)$, 则它们的小波交叉谱为

$$w_n^{xy}(a) = w_n^x(a)w_n^{y*}(a), \quad (5)$$

式中 $w_x(a)$, $w_y(a)$ 代表 $x(t)$, $y(t)$ 的小波变换, 交叉小波功率 $|w_n^{xy}(a)|$ 值越大说明两时间序列相关性越强.

两个天文观测信号的小波相干谱可以定义为^[11]

$$R_n^2(a) = \frac{|S(s^{-1}w_n^{xy}(a))|^2}{S(s^{-1}|w_n^x(a)|^2) \cdot S(s^{-1}|w_n^y(a)|^2)}. \quad (6)$$

式中 S 操作符起平滑作用, 小波相干谱计算公式和传统相关系数表达式有类似之处.

2 分析结果

在已经被证认的 BL Lac 天体中, OJ 287 凭借其独特的观测特征而特别受人关注, 常被选取作为研究对象. OJ 287 有从射电到 X 射线的各个波段详细的光变资料, 射电波段的资料相对其他波段来说要容易获得. OJ 287 在 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 射电波段的近 21 年的光变曲线如图 1 所示.

由图 1 可知, OJ 287 光变曲线表现十分复杂, 光变活动非常剧烈, 流量变化幅度大, 其在 8.0 GHz 和 14.5 GHz 射电波段, 流量变化分别达到 6.00 Jy 和 8.62 Jy. 3 个波段的光变曲线非常相似, 且存在较小的

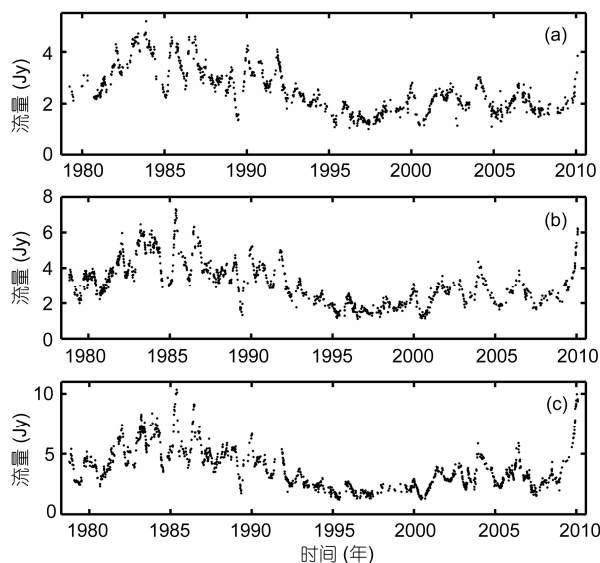


图 1 OJ 287 射电光变曲线

(a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz

Figure 1 The radio light curve of OJ 287. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

时延. 在光变曲线中还可以看出在 1986 年和 2010 年有两次明显的大爆发. 每次大的爆发持续时间大约一年, 部分时间段每隔一年多有次小爆发.

用小波变换将光变观测数据在时频域中展开, 小波功率谱方法获得的 OJ 287 射电波段光变资料多时间尺度结构的精细变化和局部化特征如图 2 所示. 图中粗黑色实线圈闭的范围是通过 95% 置信水平的红噪声的检验, 颜色的深浅代表功率谱的相对强弱, 细黑色实线包络是小波影响锥曲线, 该曲线以外

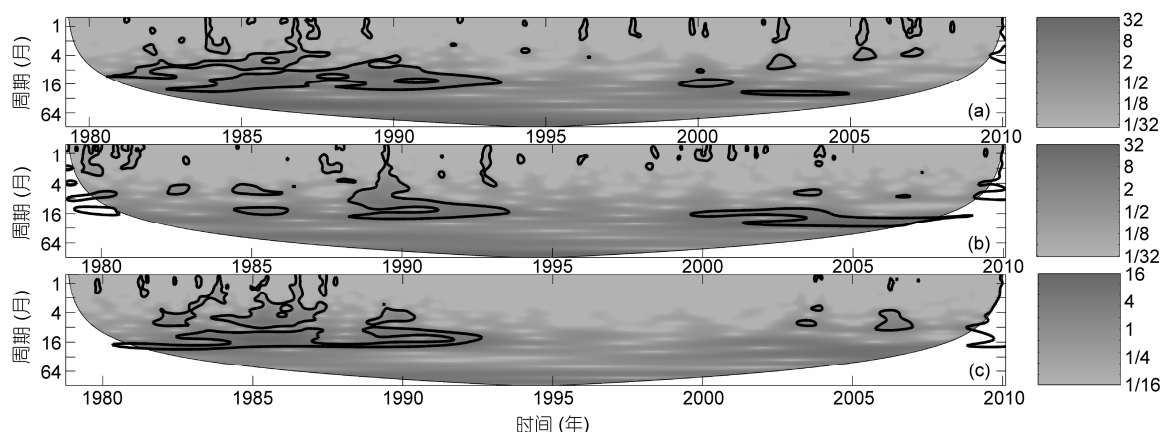


图 2 OJ 287 射电流量的小波功率谱

(a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz

Figure 2 The wavelet power spectrum of the radio flux in BL Lac OJ 287. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

的功率谱由于待分析的时间序列的数据有限,受到数据边界效应的影响而不予考虑.

小波功率谱图可以确定任意时间的主要振荡周期,由图 2 可知,不同时间尺度的振荡周期信号在时域中存在着明显的局部变化特征. OJ 287 所有射电波段存在准 6 个月、8–16 个月和 16–32 个月时间尺度的显著振荡周期. 在 1980–1994 年存在准 6 个月和 8–16 个月两个振荡周期,在 14.5 GHz 波段上 16–32 个月振荡周期的能量较弱. 在 1980–1994 年以 8–16 个月振荡周期为主要成分,在 1994–2000 年由于射电流量没有什么改变,振荡能量减弱,为振荡周期调整期,2000 年以后振荡能量显著增强,振荡周期增为 16–32 个月. 在 2010 年有次大的爆发,由于数据边界效应的影响,没有在影响锥曲线内. 小波方差图 3 表明, OJ 287 射电 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 三个波段平均光变周期相同,均为 0.54 ± 0.04 , 1.12 ± 0.07 , 2.49 ± 0.08 年,也存在一些差异,4.8 GHz 的 0.54 ± 0.04 年没有其他两个光变周期明显,而 14.5 GHz 在 0.54 ± 0.04 年存在一个明显的峰值,其他两个周期峰值不是太明显.

从图 2 可以发现 OJ 287 射电 8.0 GHz 和 14.5 GHz 波段流量的小波功率谱图的振荡周期分布具有明显对应关系,相似性极高,说明它们的辐射很可能来自于同一辐射区域,且辐射机制相同. 也说明 OJ 287 不同射电波段的流量之间存在着不同程度的关联性. 交叉小波变换中的小波交叉谱和小波相干谱可以从多时间尺度分析两个时间序列在时频域中的相关性和时延特性. OJ 287 射电 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 波段流量的小波交叉谱和小波相干谱如图 4–6 所示. 图中箭

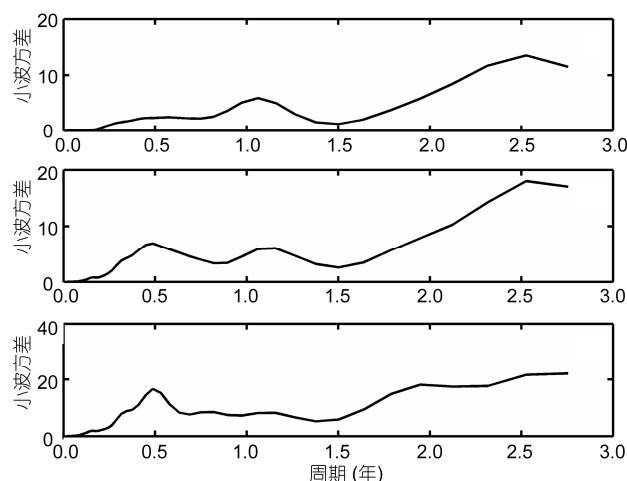


图 3 OJ 287 射电流量的小波方差图

(a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz

Figure 3 The wavelet variance of the radio flux in OJ 287. (a) 4.8 GHz; (b) 8.0 GHz; (c) 14.5 GHz.

头方向反映了两者的位相关系,“→”表示两个波段流量同位相变化,两者为正相关,“←”表示两个波段流量反位相变化,两者为反相关,“↑”表示高频波段流量变化比低频波段流量变化位相提前 90° ,“↓”表示高频波段流量变化比低频波段流量变化位相落后 90° .

由图 4(a), 图 5(a), 图 6(a)给出的 OJ 287 不同射电波段流量之间的小波交叉谱可见,存在准 6 个月、8–16 个月和 16–32 个月时间尺度的共振周期,振荡的凝聚性最强. 在 1982–1994 年具有复杂的时频结构和多周期尺度特征,共振周期以准 6 个月和 8–16 个月振荡周期最为突出,在 8–16 个月共振周期范围内出现一个显著的能量凝聚高值区,2000 年以后共振周期

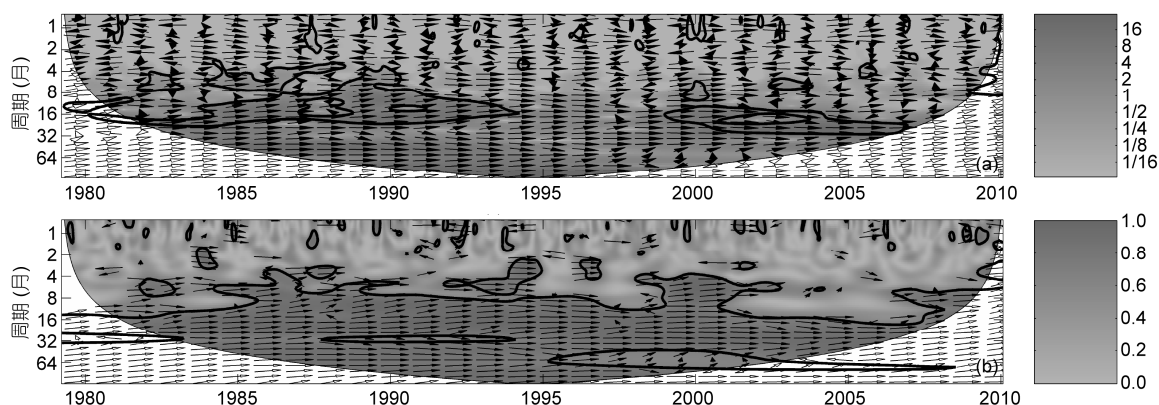


图 4 OJ 287 射电 4.8 GHz 和 8.0 GHz 波段流量的小波交叉谱(a)和相干谱(b)

Figure 4 (a) The cross spectrum and (b) coherent spectrum of the radio flux between 4.8 GHz band and 8.0 GHz band in OJ 287.

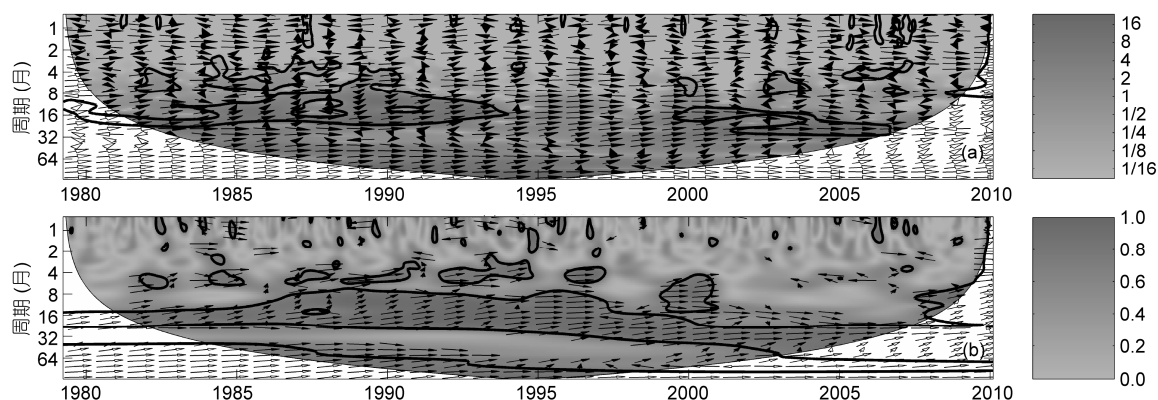


图 5 OJ 287 射电 4.8 GHz 和 14.5 GHz 波段流量的小波交叉谱(a)和相干谱(b)

Figure 5 (a) The cross spectrum and (b) coherent spectrum of the radio flux between 4.8 GHz band and 14.5 GHz band in OJ 287.

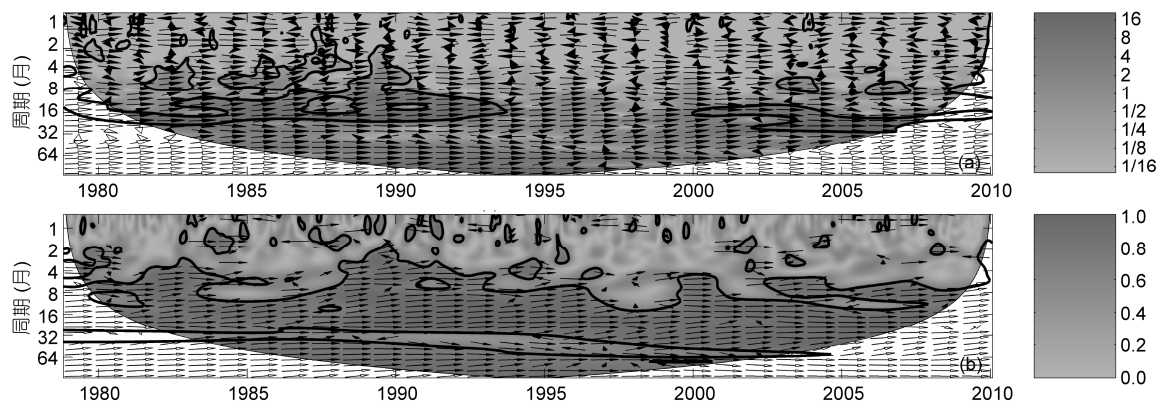


图 6 OJ 287 射电 8.0 GHz 和 14.5 GHz 波段流量的小波交叉谱(a)和相干谱(b)

Figure 6 (a) The cross spectrum and (b) coherent spectrum of the radio flux between 8.0 GHz band and 14.5 GHz band in OJ 287.

变长, 主要以 16–32 个月振荡周期为主. 在 1994–2000 年射电流量之间没有表现出明显的凝聚性.

小波相干谱能分析不同射电波段流量之间共振位相的差异, 可以确定位相角, 反映时间滞后特征^[11], 由于使用了平滑函数, 只标示了满足 $R^2_n(a) \geq 0.5$ 的位相差箭头, 如图 4(b), 5(b) 和 6(b) 给出的 OJ 287 不同射电波段流量之间的小波相干谱. 由相干谱可见, 在准 6 个月、8–16 个月和 16–32 个月主振荡周期区域内有很强的相干性. 在 16–32 个月主振荡周期区域内箭头几乎都是水平指向右, 这意味着在这区域射电波段爆发是同时的, 不存在时间延迟. 在准 6 个月周期振荡区域箭头指向无规律, 位相差并不稳定, 在 8–16 个月振荡周期区域内, 在 1980–1994 年存在爆发时间延迟现象, 位相差约为 $18^\circ \pm 3^\circ$, 爆发时都是高频波段超前低频波段, 超前的时间为 $1/18$ 周期左右, 时延不是太大约为 20 ± 6 天.

3 讨论

从射电到伽玛射线全波段 OJ 287 都观测到光变现象, 对该现象已有许多研究^[8,15–17]. Carrasco 等人^[17]认为 OJ 287 周期性光变是由吸积盘内区的热斑沿着螺旋轨道进入一个大质量的 Kerr 黑洞所导致的. OJ 287 还被 Valtonen 等人^[18,19]作为直接探测引力波的源, 并应用模型进行了解释, 次黑洞绕主黑洞运动, 并撞击主黑洞吸积盘从而引起爆发现象. Sillanpää 等人^[20]认为 OJ 287 不仅有被 OJ 94 计划观测所证实的 11.65 ± 0.2 年的光变周期, 还有一个被后来的观测证实的 1.2 年的光变周期, 这两次爆发分别发生在 1994.8 年和 1996.0 年, 并用双黑洞模型成功解释了这些长周期光变行为. 我们也应用传统的功率谱估计方法分析过 OJ 287 光学波段的资料, 获得的周期是 11.76 年^[7]. Wu 等人认为可能存在有 40 天的光变周期^[21].

本文得到的平均光变周期 1.12 ± 0.07 年跟 Sillanpää 等人获得的 1.2 年光变周期比较一致, 而其他两个平均光变周期 0.54 ± 0.04 , 2.49 ± 0.08 和 1.2 年光变周期也具有近似倍数关系, 2.49 和 1.2 年的光变周期可能是 0.54 年的重复. Valtonen 等人^[22]预测将在 2015 年 12 月有一次大的爆发, 这和 2010 年到 2011 年的爆发相对应, 周期恰好是 2.49 ± 0.08 年的两倍. Dultzin-Hacyan 等人^[23]对 1994 年光学 B, V, R, I 波段爆发进行了研究, 没有发现有时间延迟, 这与我们对射电波段流量分析获得的强相关性以及基本同时爆发或具有极小时延是非常吻合的. OJ 287 光学波段之间和射电波段之间到底有没有时间延迟, 还需要更多的观测数据做进一步研究才能确定.

4 总结

对 BL Lac 天体光变的分析有助于更好的理解 BL Lac 天体的辐射机制和辐射区域内部物理特征, 本文收集了 BL Lac 天体 OJ 287 射电 4.8, 8.0 和 14.5 GHz 波段长达 21 年的观测数据, 综合应用小波功率谱方法, 小波交叉谱, 小波相干谱方法分别分析了各波段的主要振荡周期和不同波段光变间的相关性、时延性和位相结构.

小波功率谱分析证实了 OJ 287 射电波段流量具

有复杂的时频结构和多周期尺度特征, 3 个射电波段都存在准 6 个月、8–16 个月和 16–32 个月时间尺度的振荡周期, 相对应的平均光变周期是 0.54 ± 0.04 , 1.12 ± 0.07 , 2.49 ± 0.08 年, 尤其以从 1981 到 1994 年 8–16 个月振荡周期最为突出. 不同的振荡周期期间存在着简单的倍数关系. 在具有明显振荡周期对应的时段里, 射电波段流量之间凝聚性高, 由相干谱图可知, 在全时间域中, 16–32 个月时间尺度的射电波段流量变化是同步的, 说明 OJ 287 射电波段的辐射可能都是由等离子体喷流内的相对论性电子的同步加速辐射产生. 各射电波段流量在不同时段、不同尺度上也存在差异, 导致在它们之间的交叉谱和相干谱在时间-尺度特征的不同, 在 8–16 个月振荡周期区域内存在 20 ± 6 天的滞后关系. 小波交叉谱和小波相干谱得到了相互印证的结果: 射电波段的爆发几乎是同时性的, 并且光变现象非常相似, 相互间存在较小的时间延迟. 时延产生的原因可以通过活动星系核吸积盘模型来解释^[24], 如果一个波段的连续谱流量是由另一波段经过再处理的连续谱辐射, 这样就会通过辐射或通过等离子体的粘滞过程表现出来. 这些表明它们之间的辐射可能具有类似的物理过程, 为同步自康普顿模型提供了有力证据, 对进一步了解 BL Lac 天体的物理性质和中心结构提供了非常有用的结果^[25].

致谢 感谢北京大学天文学系吴学兵教授对本工作的支持和进行的极有意义的讨论.

参考文献

- 1 Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D. The third EGRET catalog of high-energy Gamma-ray sources. *Astrophys J Suppl*, 1999, 123(1): 79–202
- 2 Valtonen M J, Mikkola S, Merritt D, et al. Measuring the spin of the primary black hole in OJ287. *Astrophys J*, 2010, 709(2): 725–732
- 3 Abramowicz M A, Nobili L. Are there black holes in quasars. *Nature*, 1982, 300(12): 506–507
- 4 Edelson R, Krolik J, Madejski G, et al. Multiwavelength monitoring of the BL Lacertae object PKS 2155-304.4: Multiwavelength analysis. *Astrophys J*, 1995, 438(1): 120–134
- 5 Bai J M, Lee M G. Radio/X-ray offsets of large-scale jets caused by synchrotron time lags. *Astrophys J*, 2003, 585(2): L113–L116
- 6 Tang J, Zhang X. Optical variability periodicity analysis of BL Lac object S5 0716+714 based on bispectrum estimation (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2010, 59(10): 7516–7522 [唐洁, 张雄. 基于双谱估计的 BL Lac 天体 S5 0716+714 光变周期. *物理学报*, 2010, 59(10): 7516–7522]
- 7 Tang J, Zhang X J, Pang Q, et al. Computing the period of light variability in Blazar Objects 3C 279 and OJ 287 by auto-regressive spectral analysis methods. *Chin Astron Astrophys*, 2010, 34(3): 121–131
- 8 Tang J. Analysis on periodic variations of the radio flux of OJ 287 with ensemble empirical mode decomposition (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62(12): 129701 [唐洁. 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. *物理学报*, 2013, 62(12): 129701]
- 9 Zhang H J, Zhao G, Zhang X, et al. The characteristic periodicity analysis of the radio flux variability of quasar PKS 1510-089. *Sci China*

- Ser G-Phys Mech Astron, 2009, 52(9): 1442–1448 [张皓晶, 赵刚, 张雄, 等. 类星体 PKS 1510-089 的射电流量变化周期特性研究. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(7): 1029–1035]
- 10 Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteor Soc*, 1998, 79(1): 61–78
 - 11 Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Proce Geophys*, 2004, 11: 561–566
 - 12 冯博 韩延本. 太阳活动对黄帝陵 500 年侧柏年轮变化的可能影响. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(5): 776–784
 - 13 郭金运, 韩延本. 由 SLR 观测的日长和极移季节性和年际变化(1993~2006 年). *科学通报*, 2008, 53(21): 2562–2568
 - 14 章红平, 朱文耀, 彭军还, 等. 利用 GPS 分析电离层波动现象. *科学通报*, 2005, 50(10): 1032–1039
 - 15 Fan J H, Zhang Y W, Qian B C, et al. Photometric Monitoring of OJ 287 from 2002 to 2007. *Astrophys J Suppl Ser*, 2009, 181(2): 466–472
 - 16 Fan J H, Liu Y, Qian B C, et al. Long-term variation time scales in OJ 287. *Res Astron Astrophys*, 2010, 10(11): 1100–1108
 - 17 Carrasco L, Dultzin-hacyan D, Bruz-Gonzalez I. Periodicity in the BL Lac object OJ287. *Nature*, 1985, 314(3): 146–148
 - 18 Valtonen M J, Lehto H J, Nilsson K, et al. A massive binary black-hole system in OJ 287 and a test of general relativity. *Nature*, 2008, 452(4): 850–853
 - 19 Valtonen M J, Nilsson K, Villforth C. Tidally induced outbursts in OJ 287 during 2005–2008. *Astrophys J*, 2009, 698(1): 781–785
 - 20 Sillanpää A, Takalo L O, Pursimo T, et al. Double-peak structure in the cyclic optical outbursts of blazar OJ 287. *Astron Astrophys*, 1996, 305L: 13–16
 - 21 Wu J H, Zhou X, Wu X B. Optical monitoring of BL Lacertae object OJ 287: A 40 day period. *Astron J*, 2006, 132(3): 1256–1266
 - 22 Valtonen M J, Mikkola S, Merritt D. Measuring the spin of the primary black hole in OJ 287. *Astrophys J*, 2010, 709(2): 725–732
 - 23 Dultzin-hacyan D, Takalo L O, Benítez E. Microvariability of OJ 287 during a Flare. *Revista Mexicana Astron Astrofís*, 1997, 33(3): 17–23
 - 24 Fan J H, Liu Y, Yuan Y H, et al. Radio variability properties for radio sources. *Astron Astrophys*, 2007, 462(2): 547–575
 - 25 Dai B Z, Zhang B K, Zhang L. The multi-wavelength correlations and the evolution of spectral index on the quasar 3C 273. *New Astron*, 2006, 11(7): 471–480

Cross-wavelet analysis of the radio flux of BL Lac object OJ 287

TANG Jie^{*}

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

We compile the radio light curve of BL Lac object OJ 287 at frequencies of 4.8, 8.0 and 14.5 GHz from 1978 to 2010. The continuous wavelet transform and the cross wavelet transform method are used to study the periodic oscillations of different significance, correlations, and time delays of OJ 287 in radio bands. The results of the continuous wavelet transform indicate that there are significant periods at scale of 6, 8–16 and 16–32 months (period of light variation, 0.54 ± 0.04 , 1.12 ± 0.07 , 2.49 ± 0.08 year, and the significant wavelet spectrum of the radio flux is observed mainly from 1980 to 1994 and from 2000 to 2007. Based on the method of cross wavelet and wavelet coherence techniques, the coherence of positive correlation oscillations between the radio bands of OJ 287 is the highest, and the correlation degree is particularly strong, especially at oscillating period of 8–16 and 16–32 months. The outbursts of radio wavelengths are almost instantaneous at oscillating period of 16–32 months, and there is a minor time delay of 20 ± 6 day at oscillating period of 8–16 months. High frequency band gets ahead of low frequency when they have a minor time delay.

period, wavelet analysis, OJ 287, correlation, time delay

PACS: 98.54.Cm, 95.75.Pq, 98.85.Bh, 95.75.-z

doi: 10.1360/SSPMA2013-00068