



论 文

OQ 530 射电和光学波段的光变分析

王洪涛^{①*}, 苏彦苹^②

① 廊坊师范学院物理与电子信息学院, 廊坊 065000;

② 河北农业大学林学院, 保定 071000

*联系人, E-mail: htwang@126.com

收稿日期: 2014-07-23; 接受日期: 2014-08-27

国家自然科学基金(批准号: 11273052)和河北省自然基金资助项目(批准号: A2015408006)资助项目

摘要 从历史文献中搜集了 OQ 530 最完备的射电波段(4.8, 8, 14.5, 22 和 37 GHz)和光学 B 波段的光变数据, 利用三种不同的周期分析方法(结构函数法、J-K 方法和功率谱法)对 6 个波段光变曲线的周期性进行了分析。利用离散相关函数法对射电波段之间以及射电与光学波段之间的相关性进行了分析。周期性的分析结果显示 4.8 GHz 可能存在 3.89–3.94 a 的周期, 8 GHz 可能存在 2.48–2.55 a 的周期, 14.5 GHz 可能存在 2.44–2.56 a 的周期, 22 GHz 可能存在 2.34–2.56 a, 4.16–4.30 a 的周期, 37 GHz 可能存在 2.31–2.58 a 的周期, 光学 B 波段可能存在的 0.97–1.15 a 的周期。相关性分析显示 OQ 530 在 5 个射电波段之间存在较强相关, 延迟方面无明显变化规律。光学与射电波段之间的相关性显示光学波段要超前于射电波段, 且随频率的逐渐变小延迟有逐渐增大的变化趋势。

关键词 耀变体, 光变, 周期, 相关性**PACS:** 98.54.Cm, 95.85.Bh, 95.85.Kr, 95.75.Wx**doi:** 10.1360/SSPMA2014-00283

1 引言

Blazars 是活动星系核的一个重要子类, 通常分为平谱射电类星体和 BL Lac 天体两大类^[1]。Blazars 光变曲线的主要特征是在多波段呈现出大幅快速光变且存在高偏振, 通常认为相对论喷流的聚束效应是导致这些极端观测特征出现的原因^[2]。

部分 Blazars 的光变曲线呈现出周期性是其光变的重要特征之一, 根据周期的长短通常可将其分为短时标光变(分钟到小时量级)、中等时标光变(天到月

量级)和长时标光变(月到年量级)^[3]。在射电、光学、X 射线、TeV 呈现出天量级光变周期的 Blazars 有 Mrk 421, Mrk 501, 3C 66A 和 PKS 2155-304^[4-7]。BL Lacertae, ON 231, 3C 273, OJ 287, 3C 345 和 AO 0235+16 光学波段光变曲线呈现出年量级的周期性光变^[8-13]。

Blazars 的多波段相关性研究也是 Blazars 光变研究的一个重要方面, Raiteri 等人^[14]分析 AO 0235+16 射电(8 GHz, 14.5 GHz)和光学波段的相关性发现存在强相关且射电相对于光学存在约 0–50 d 的延迟,

引用格式: 王洪涛, 苏彦苹. OQ 530 射电和光学波段的光变分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 029801
Wang H T, Su Y P. The analysis of radio and optical variability in blazar OQ 530 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 029801, doi: 10.1360/SSPMA2014-00283

射电波段之间存在强相关且射电高频部分领先于低频部分几天. Hanski 等人^[15]分析了 Metsöhovi 检测计划中 20 个源的射电和光学波段的相关性, 其中 7 个显示出明显的相关性, 6 个可能存在相关, 延迟分布从 0 到几百天. Villata 等人^[16]分析发现~BL Lacertae 的光学和射电波段存在强相关且射电落后于光学多于 3 个月的延迟. Fossati 等人^[17]分析发现 Mrk 421 的 2–60 keV 的 X 射线波段与 TeV 波段存在强相关. Ciprini 等人^[18]分析了 BL Lac 天体 GC 0109+224 近 20 年的射电和光学波段的相关性显示弱相关. Dai 等人^[19]分析发现 3C 273 的射电波段之间存在强相关, 且光学和射电波段之间相关性较弱. Wang^[20]分析发现 0235+164 光学 B, V, R, I 波段发现存在强相关且无明显时间延迟. Fuhrmann 等人^[21]分析了 54 个 Fermi Blazars 射电波段和伽马射线波段的相关性, 结果显示射电波段和伽马射线波段存在强相关且射电波段落后于伽马射线波段 7 ± 9 d 至 76 ± 23 d.

1977 年, 在 NARO-Bonn 5 GHz 射电巡天中证认 OQ 530 为一个河外射电源的光学对应体^[22]. 1978 年, Miller 证认它为一个 BL Lac 天体^[23]. 1990 年, Carini 等人^[24]发现 OQ 530 具有大幅快速光变. 1996 年, Fossati 等人^[25]利用全波段的能谱进一步证认了 OQ 530 为一个低峰频的 BL Lac 天体. Ghosh 等人^[26]发现 OQ 530 在光学波段存在几周的光变时标. Liu 等人^[27]发现光学波段可能存在一个约 456 d 的光变周期, 同时发现 OQ 530 光学波段的色指数随着源变亮谱会变蓝. Fan 等人^[28]分析 OQ 530 的光学波段的光变数据但没有发现任何周期性.

Hanski 等人^[29]利用离散相关函数法分析了 20 个源的射电和光学波段的光变曲线, 其中 7 个显示出明显的相关性, 6 个可能存在相关, 延迟分布从 0 到几百天, 但 OQ 530 没有发现明显的相关. Tornikoski 等人^[30]分析了 22 个河外射电源的光学和射电之间的相关性, 其中 10 个源的射电和光学之间显示出明显的相关, 6 个源的光学和射电之间显示出很好的同步性, 但 OQ 530 的光学和射电波段没有发现明显相关, 可能是由于 OQ 530 样本过低的原因, 22 和 37 GHz 的光变曲线显示出较好的同步性且具有较强的相关性, 1987.4–1988.0 a 的 90 GHz 的光变曲线与 22 和 37 GHz 的光变曲线也显示出较好的同步性. Liu 等人^[27]分析了光学和射电波段的相关性, 但没有发现明显的相关. Zhang 等人^[31]发现 OQ 530 的光学 B, V, R, I

波段之间存在强相关, 且没有明显的延迟存在.

本文我们搜集了 OQ 530 最完备的射电波段(4.8, 8, 14.5, 22 和 37 GHz)的光变数据(见图 1), 同时从文献资料中获得数据点最多的光学 B 波段的光变数据, 利用结构函数法、J-K 方法、功率谱法来寻找这些波段中可能存在的周期, 利用离散相关函数法寻找光学和射电波段之间的相关性和可能存在的时间延迟.

2 数据来源

OQ 530 在 4.8, 8 及 14.5 GHz 的数据主要来自于密西根大学射电天文台(UMRAO)的数据库, 相关文献有 Aller 等人^[32,33]. 22 和 37 GHz 的数据主要来自于芬兰 Metsöhovi 射电天文台(MRO)的观测. 相关文献有 Teräsranta 等人^[34–37], Nieppola 等人(2007)^[38]. 光学 B 波段的数据主要来自于 Fan 等人^[39], Tagliaferri 等人^[40], Massaro 等人^[41].

3 周期性分析

3.1 分析方法

3.1.1 结构函数法

结构函数法^[42]是 Simonetti 于 1985 年提出来的, 它是研究光变时标和光变周期的一种比较常用的方法. 这种方法不需要插值, 而且需要定义的参数很少, 因此更便于寻找天文数据的时标和周期. 常用的是结构函数在一阶情况下的计算公式. 其定义式为

$$D_f^{(1)}(k) = \frac{1}{N^{(1)}(k)} \sum_{i=1}^N w(i)w(i+k)[f(i+k) - f(i)]^2, \quad (1)$$

其中, $N^{(1)}(k) = \sum w(i)w(i+k)$, $\sigma_f^{(1)} = \frac{8\sigma_{f\delta}^2}{N^{(1)}(k)}$. 上式中 $w(i)$ 为权重因子, 如果第 i 个点有数据, 则权重因子记为 1; 如果没有则权重因子记为 0. $\sigma_f^{(1)}$ 为结构函数的误差, $\sigma_{f\delta}^2$ 代表所有数据点观测误差的变化.

在结构函数分析图中, 我们用 τ_s 和 τ_l 分别表示光变曲线的最短和最长光变时标, 并且观测的时间跨度远大于 τ_l . 若 $\tau > \tau_l$, 则 $D(\tau)$ 为常数, 若 $\tau < \tau_l$, 则 $D(\tau)$ 正比于 τ^2 , 若 $\tau_s < \tau < \tau_l$, 则 $D(\tau)$ 与 τ^x 成正比, 且 $x \leq 2$. 在 $D(\tau)-\tau$ 图中, 若出现极小值, 表示有可能的周期存在. 其周期值为极小值对应的横坐标值与所选取 bin 值的乘积.

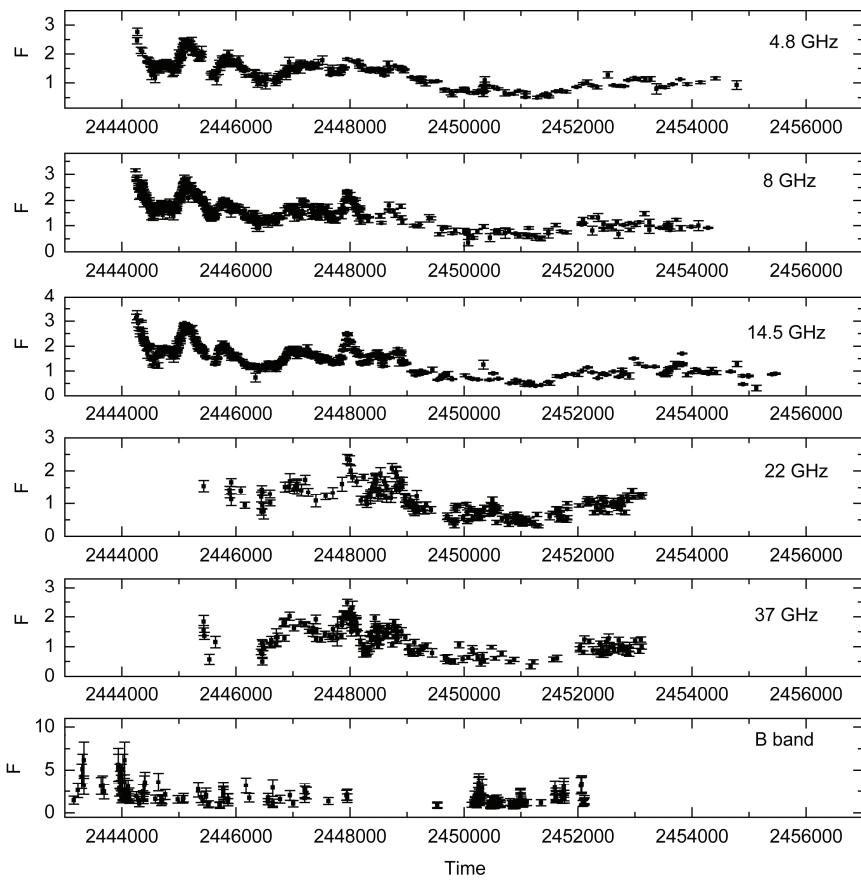


图 1 OQ 530 的射电和光学波段的光变曲线

Figure 1 The light curve of OQ 530 in radio and optical band.

3.1.2 功率谱法

1975 年, Deeming^[43]提出了计算均匀和非均匀数据点光变曲线的功率谱方法; 1976 年, Lomb^[44]对 Deeming 提出的方法进行了修正; 1982 年, Scargle^[45]进一步拓展了这种方法并形成了具有一般意义上功率谱的计算方法, 这种方法也适合于寻找非均匀数据序列的周期。具体计算过程如下: 设一数据列存在 N 个数据点, 对应的辐射流量分别记为 $x(n)$, 记 f 和 τ 分别为频率和光标时标, 数据点的期望和方差分别为 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)$, $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2$ 归一化的功率记为 $P_N(\omega)$, 将它的自变量 f 转化为角频率 $\omega = 2\pi f$, 功率为

$$P_N(\omega) = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{\left[\sum_j (a_j - \bar{a}) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)}$$

$$+ \frac{1}{2\sigma^2} \frac{\left[\sum_j (a_j - \bar{a}) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)}. \quad (2)$$

其中 $j=1, 2, 3, \dots, N$, τ 定义为 $\tan 2\omega\tau = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j}$, $\omega = 1, 2, \dots, M$. M 依赖于独立频率数 N_0 , $M=N_0 \approx -6.363 + 1.193N + 0.00098N^2$. 在用功率谱方法计算周期的过程中, 利用错误报警概率(FAP)来表示相应频率处周期出现的概率, 若分析图中峰值的概率小于假设概率, 表明峰值有可能被发现的概率为 $p = 1 - (1 - e^{-x})^M$, 在功率谱的分析图中, 小于 0.05 的 p 值的峰通常认为是显著的, 越小则表示峰值越显著。

3.1.3 J-K 方法

1971 年, Jurkevich 等人^[46]提出适用于分析非均匀数据光变周期的 J-K 方法。其具体过程如下: 假设观测样本数据为 N 个, 单次测量值为 X_i , 所有测量值

的平均为 \bar{X} , 测量数据的样本方差为 V^2 , 样本的标准偏差为 S , 则

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, V^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N -m_l(\bar{X})^2, S = \sqrt{V^2 / (N-1)}. \quad (3)$$

如果样本数据划分为 m 组, 对应第 l 组的统计参数应为

$$\bar{X}_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, V_l^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2 - m_l(\bar{X}_l)^2, \quad (4)$$

$$S_l^2 = \sqrt{V_l^2 / (m_l - 1)}. \quad (5)$$

对应 m 组的总方差为 $V_m^2 = \sum_{i=1}^m V_l^2$. 显然, $V_m^2 < V^2$. 上述公式表明, 当自变量相同的 n 个样本计算后则变为一个样本. 若分组的平均值相等, 则最后的期待值方差就等于分组的平均方差. 若分组的平均值不同, 那么最后期待值的方差将超过分组的平均方差.

为了有效地估计 V_m^2 图中周期的真实性, 1992 年, Kidger 等人^[47]给出了周期真实性的 F 判据, 即: $f = \frac{1 - V_m^2}{V_m^2}$. 在归一化的 $V_m^2 - P$ 图中, 若 $V_m^2 = 1$, 即 $f =$

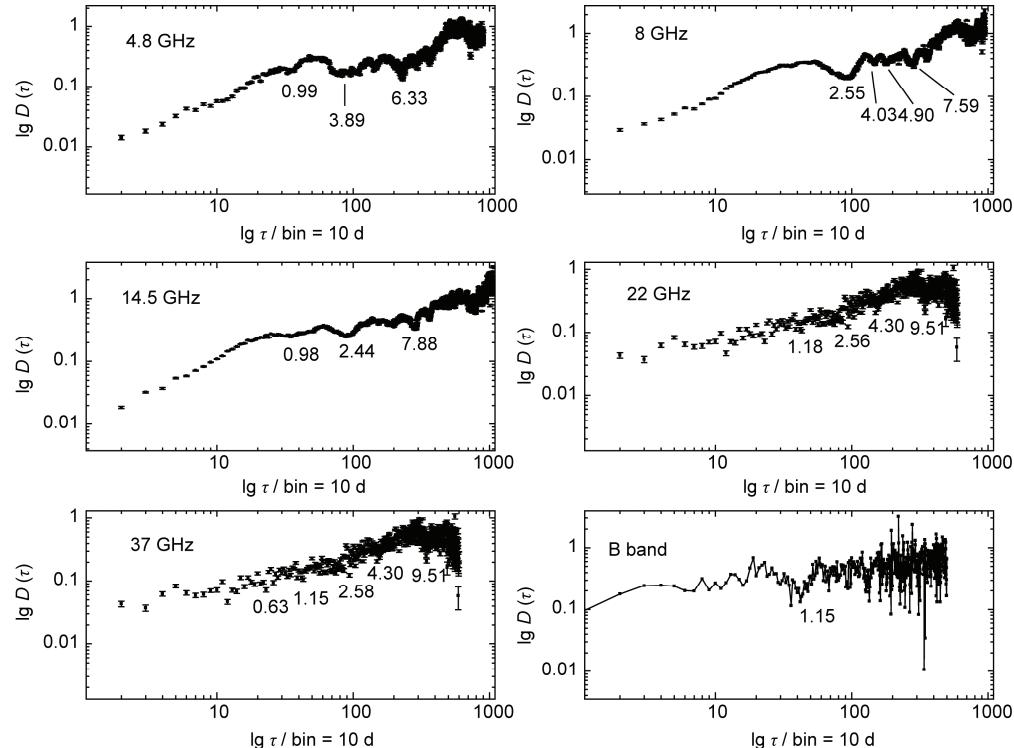


图 2 结构函数法分析 OQ 530 射电和光学波段光变曲线的周期

Figure 2 The period of light curve of OQ 530 in radio and optical band by structure function.

0, 则样本数据没有周期性; 若 $V_m^2 = 0$, 即 $f = 1$, 这时表示样本数据存在最大周期且能够从图中明显识别出来. 一般情况下, 若 $f > 0.5$, 表示样本数据有很强的周期, 若 $f < 0.25$, 则表示样本数据没有周期.

3.2 周期性的分析结果

3.2.1 结构函数法分析周期的结果

我们采用结构函数法对 OQ 530 射电和光学波段数据的周期性进行了分析, 图 2 为周期结果的分析图. 在图 2 中, 我们选取分析图中出现的极小值作为可能的光变周期. 最终结果整理在表 1 中. 分析结果显示在射电波段存在较多的可能周期, 光学 B 波段可能存在 1.15 a 的周期, 为了验证周期的可靠性, 我们又采取了 J-K 方法和功率谱法对周期进行了计算.

3.2.2 功率谱分析周期的结果

我们采用功率谱法对 OQ 530 射电波段和光学 B 波段的周期性进行进一步验证, 图 3 为光变周期的分析图. 图 3 中我们考虑横坐标小于 0.005 的峰值对应的可能周期. 周期值为峰值对应频率的倒数与 365 d 的

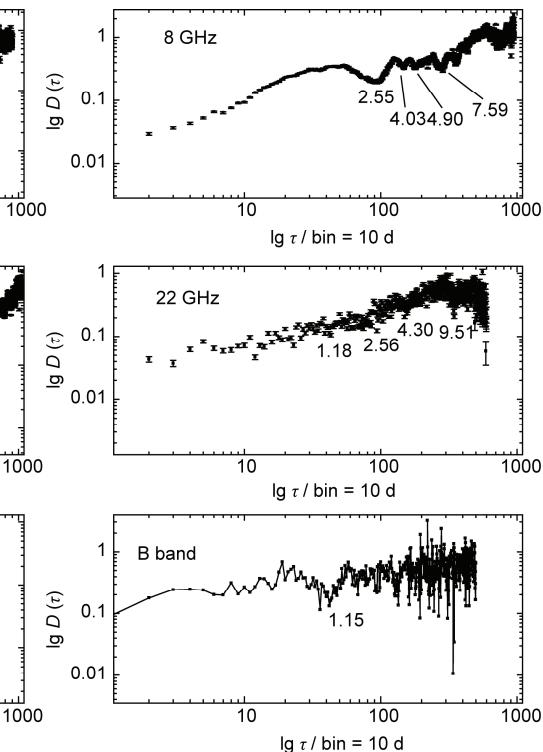


表 1 结构函数法分析周期的结果**Table 1** The results of period by structure function

Band	Period (a)
4.8 GHz	0.99, 3.89, 6.33
8 GHz	2.55, 4.03, 4.90, 7.59
14.5 GHz	0.98, 2.44, 7.88
22 GHz	1.18, 2.56, 4.30, 9.51
37 GHz	0.63, 1.15, 2.58, 4.30, 9.51
B band	1.15

乘积, 分析结果显示在射电波段和光学 B 波段的光变曲线存在较多可能的周期, 最终结果整理在表 2 中.

3.2.3 J-K 方法分析周期的结果

我们采用 J-K 方法对 OQ 530 射电波段及光学 B 波段光变曲线的周期性进行了分析, 图 4 为光变周期的分析图. 分析图中我们认为 V_m^2 值接近或小于 0.8 的极小值作为可能的周期. 最终结果整理在表 3 中. 分析结果显示在射电波段和光学 B 波段存在较多的可能周期.

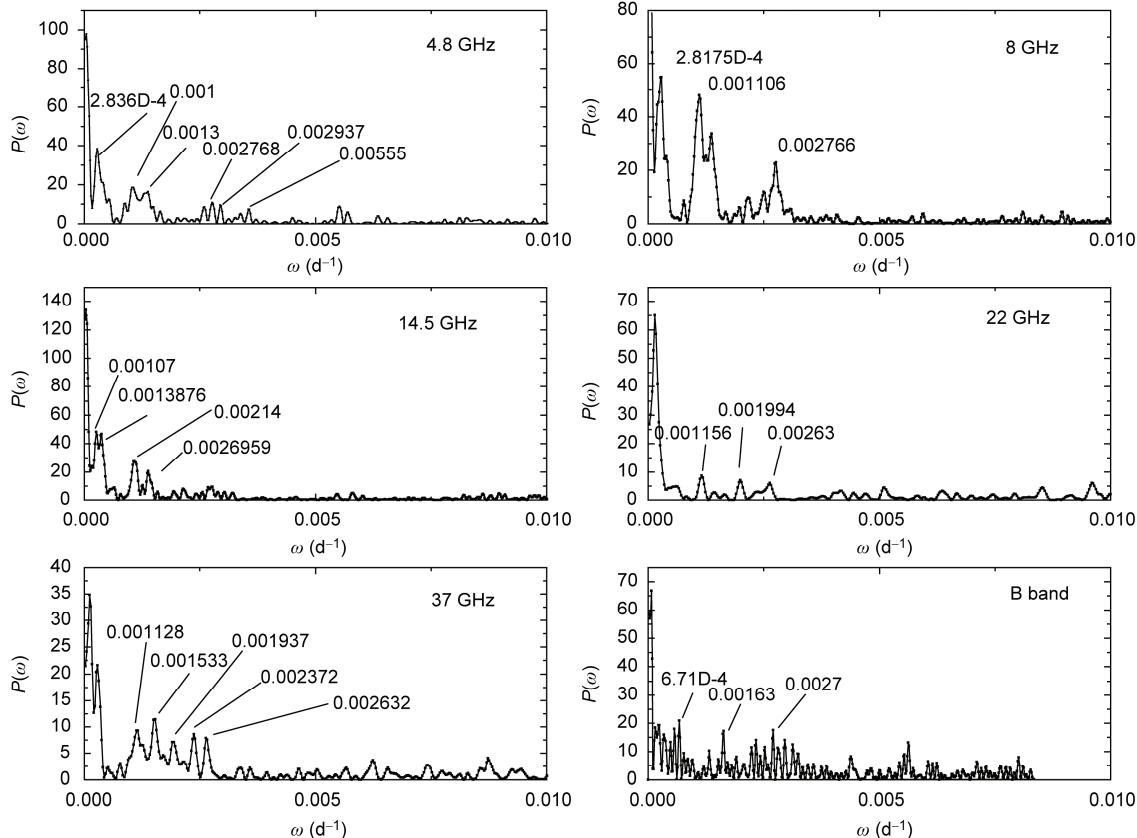
**图 3** 功率谱法分析 OQ 530 射电和光学波段光变曲线的周期

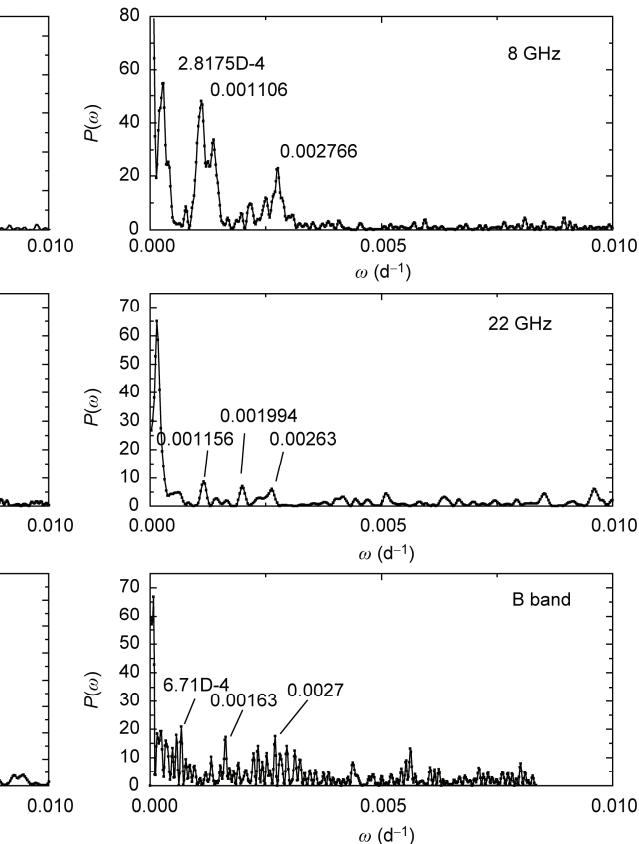
Figure 3 The period of light curve of OQ 530 in radio and optical band by power density spectrum method.

3.2.4 三种方法计算周期结果的比较

基于以上三种不同分析方法获得的周期, 我们把其中存在相同或相近分析结果的周期值记录下来, 并把它作为可能的周期值. 比较发现 4.8 GHz 可能存在 3.89–3.94 a 的周期. 此周期可能对应着功率谱分析 4.8 GHz 得到的 2.11 yr 的二倍周期. 8 GHz 可能存在 2.48–2.55 yr 的周期, 4.90–4.96 a 在三种分析结果中也都存在, 它可能对应 2.48–2.55 a 周期的二倍周期. 14.5 GHz 可能存在 2.44–2.56 a 的周期. 22 GHz 存在 2.34–2.56 a 和 4.16–4.30 a 2 个可能的周期. 37 GHz

表 2 功率谱方法分析周期的结果**Table 2** The results of period by power density spectrum method

Band	Period (a)
4.8 GHz	0.77, 0.93, 0.99, 2.11, 2.74, 9.66
8 GHz	0.99, 2.48, 9.73
14.5 GHz	1.02, 1.28, 1.97, 2.56
22 GHz	1.04, 1.37, 2.37
37 GHz	1.04, 1.16, 1.41, 1.79, 2.43
B band	0.62, 1.01, 1.68, 4.08



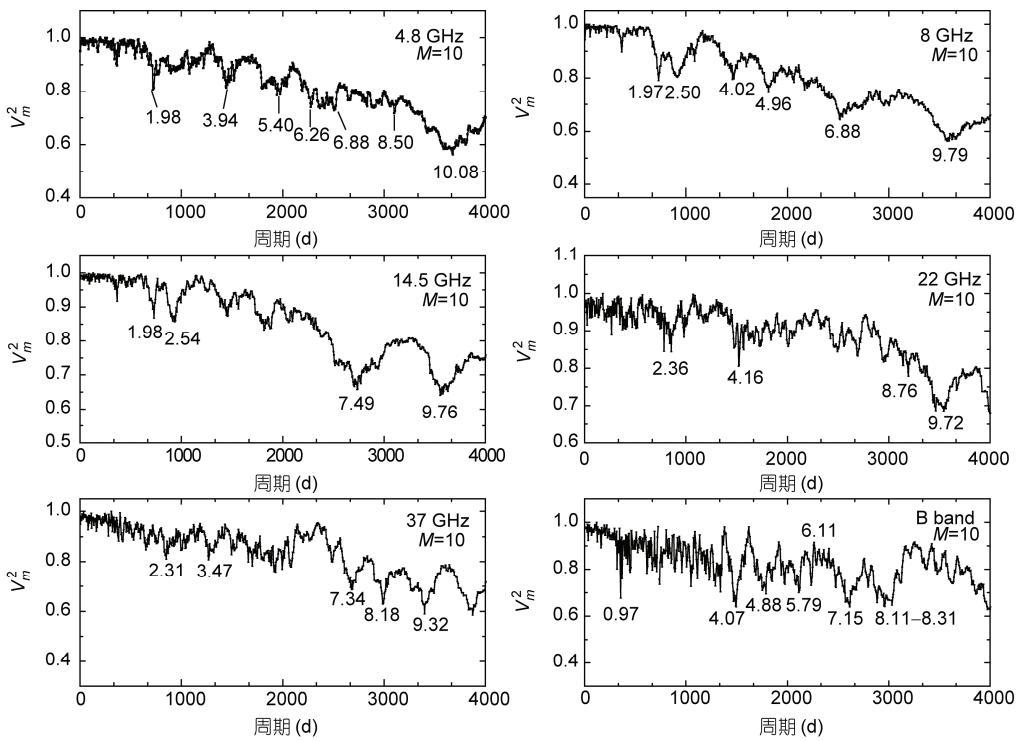


图 4 J-K 方法分析 OQ 530 射电和光学波段光变曲线的周期

Figure 4 The period of light curve of OQ 530 in radio and optical band by J-K method.

表 3 J-K 方法分析周期的结果

Table 3 The results of period by J-K method

Band	Period (a)
4.8 GHz	1.98, 3.94, 5.40, 6.26, 6.88, 8.50, 10.08
8 GHz	1.97, 2.50, 4.02, 4.96, 6.88, 9.79
14.5 GHz	1.98, 2.54, 7.49, 9.76
22 GHz	2.36, 4.16, 8.76, 9.72
37 GHz	2.31, 3.47, 7.34, 8.18, 9.32
B band	0.97, 4.07, 4.88, 5.79, 6.11, 7.15, 8.11–8.31

存在 2.31–2.58 a 的周期。从三个分析图可以看出, 与三个低频波段相比, 22 和 37 GHz 的周期性相对较弱, 这可能是由于 22 和 37 GHz 的数据点不够密且时间跨度较小造成的, 还有待于更多观测数据来进一步验证。光学 B 波段可能存在 0.97–1.15 a 的周期。我们将最终可能的周期值整理在表 4 中。

4 相关性分析

4.1 离散相关函数法

1988 年, Edelson 和 Krolik 提出了分析多波段相关性的离散相关函数法^[48], 目前它已成为分析多波段相关性的主流方法之一。这种方法不需要插值且

表 4 三种方法计算周期结果的比较

Table 4 The comparative results of period by three method

Band	Period (a)
4.8 GHz	3.89–3.94
8 GHz	2.48–2.55
14.5 GHz	2.44–2.56
22 GHz	2.34–2.56, 4.16–4.30
37 GHz	2.31–2.58
B band	0.97–1.15

对误差进行了估计, 是目前分析多波段相关性最流行的方法之一。其具体计算过程如下:

首先, 计算两列数据点之间的离散相关函数值, 表达式如下

$$\text{UDCF}_{ij} = \frac{(a_i - \bar{a})(b_j - \bar{b})}{\sqrt{(\sigma_a^2 - e_a^2)(\sigma_b^2 - e_b^2)}}, \quad (6)$$

其中 a_i 和 b_j 分别是两列数据 a 和 b 中的数据点, \bar{a} 和 \bar{b} 分别是两列数据的平均值, σ_a 和 σ_b 分别是两列数据的标准偏差, e_a 和 e_b 分别是两列数据中每个数据点对应的测量误差。UDCF 与每对数据点之间的时间延迟相对应。

其次, 计算处于 $\tau - \Delta\tau/2 < \Delta t_{ij} < \tau + \Delta\tau/2$ 时间段内 M

对数据点的平均值, 表达式如下:

$$\text{DCF}(\tau) = \frac{1}{M} \sum \text{UDCF}_{ij}(\tau), \quad (7)$$

其中 M 表示在 $\Delta\tau$ 时间间隔中数据点的对数. (1) 式中的标准偏差表达式为

$$\sigma_{\text{DCF}} = \frac{1}{M-1} \left\{ \sum \left[\text{UDCF}_{ij} - \text{DCF}(\tau) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

最后, 对重心值的估计. 由于天文观测光变数据一般不均匀, 通常做法是对处于峰值附近大于 $0.8\text{DCF}_{\text{peak}}$ 的数据点求重心, 但对个别数据点分布很好的情况也可取大于 $0.5\text{DCF}_{\text{peak}}$, 甚至 $0.3\text{DCF}_{\text{peak}}$ 的数据点求重心^[40]. 计算表达式为

$$\text{DCF}_{\text{centroid}} = \frac{\sum \tau \text{DCF}(\tau)}{\sum \text{DCF}(\tau)}. \quad (9)$$

在分析图中, DCF 的峰值越大表示两列数据的相关性越强. 若 DCF 的峰值在小于 0 的一侧, 表示数据 a 超前于数据 b , 若 DCF 的峰值在大于 0 的一侧, 则表示数据 a 滞后于数据 b .

4.2 射电-射电相关性分析

利用离散相关函数法, 我们对射电 4.8, 8, 14.5, 22 和 37 GHz 之间的相关性和时间延迟进行了分析. 图 5 是 37 GHz 和 22 GHz 光变曲线相关性的分析图. 其他波段之间我们采取相似的分析方法, 分析结果整理在表 5 中. 表 5 中的第 1 列表示我们研究的两个波段的光变曲线, 第 2 列表示 DCF 分析图中的峰值, 第 3 列表示 DCF 的峰值对应的横坐标值, 第 4 列表示取峰值附近大于 0.8 倍数据点的横坐标对应的重心值, 第 5 列表示重心值对应的时间延迟. 分析结果表明 OQ 530 射电波段的光变曲线之间存在着较强的相关性, 37 GHz 超前于 22 GHz, 8 GHz 分别为 21.58 d, 8.70 d, 落后于 14.5 GHz 12.38 d, 22 GHz 超前于 4.8 GHz 13.66 d, 落后于 14.5 GHz 4.20 d. 14.5 GHz 落后于 4.8 GHz 3.98 d. 其余 -2.70 d, -2.00 d, -0.70 d 和 2.80 d 都接近或小于我们所选取的 bin 值(2 d), 我们认为这些波段之间无明显延迟.

4.3 光学-射电相关性分析

为了讨论光学和射电波段的相关性, 我们将光学星等转化为了辐射流量密度. 公式为 $f_B = 4.26 \times 10^6 \cdot 10^{-0.4B}$ mJy. 其中系数为织女星在 4400 Å 的流量密

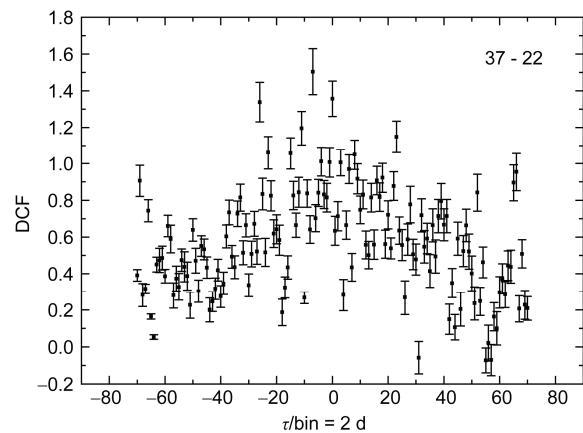


图 5 37 GHz 和 22 GHz 的相关性分析图

Figure 5 The analytical figure of correlation between 37 GHz and 22 GHz.

表 5 射电波段之间的相关性和延迟

Table 5 The correlation and time delay among radio bands

Band-Band	DCF _{peak}	τ _{peak}	τ _{center}	Delay (d)
37-22	1.50	-7.00	-10.79	-21.58
37-14.5	1.05	2.00	6.19	12.38
37-8	0.96	-14.00	-4.35	-8.70
37-4.8	0.90	2.00	-1.35	-2.70
22-14.5	0.94	5.00	2.10	4.20
22-8	1.43	-1.00	-1.00	-2.00
22-4.8	1.11	0.00	-6.83	-13.66
14.5-8	1.02	-1.00	-0.35	-0.70
14.5-4.8	0.62	-6.00	1.99	3.98
8-4.8	0.65	0.00	1.40	2.80

度^[50]. 织女星在~B 波段的星等为 0 等. 流量密度的误差为 $\sigma_{f_B} = 0.5 f_B (10^{0.4\sigma_B} - 10^{-0.4\sigma_B})$ mJy.

结合光学 B 波段和射电波段的光变数据, 我们利用离散相关函数法对光学 B 波段和射电波段的相关性及时间延迟进行分析. 分析结果整理在表 6 中. 分析结果显示 B 波段超前于 22, 14.5, 8 及 4.8 GHz 分别为 11.65, 201.75, 199.75 和 204.00 d. B 波段落后于 37 GHz 93.75 d.

5 讨论

Carini 等人^[24]分析 OQ 530 的光学数据没有发周期, 可能是由于样本数据点较少造成的. Fan 等人^[28]重新分析了 OQ 530 光学波段的数据, 同样没有发现周期. Wang 利用结构函数法分析 OQ 530 4.8 GHz 的光变数据发现存在 2.66, 3.93, 6.28 a 的周期, 8 GHz

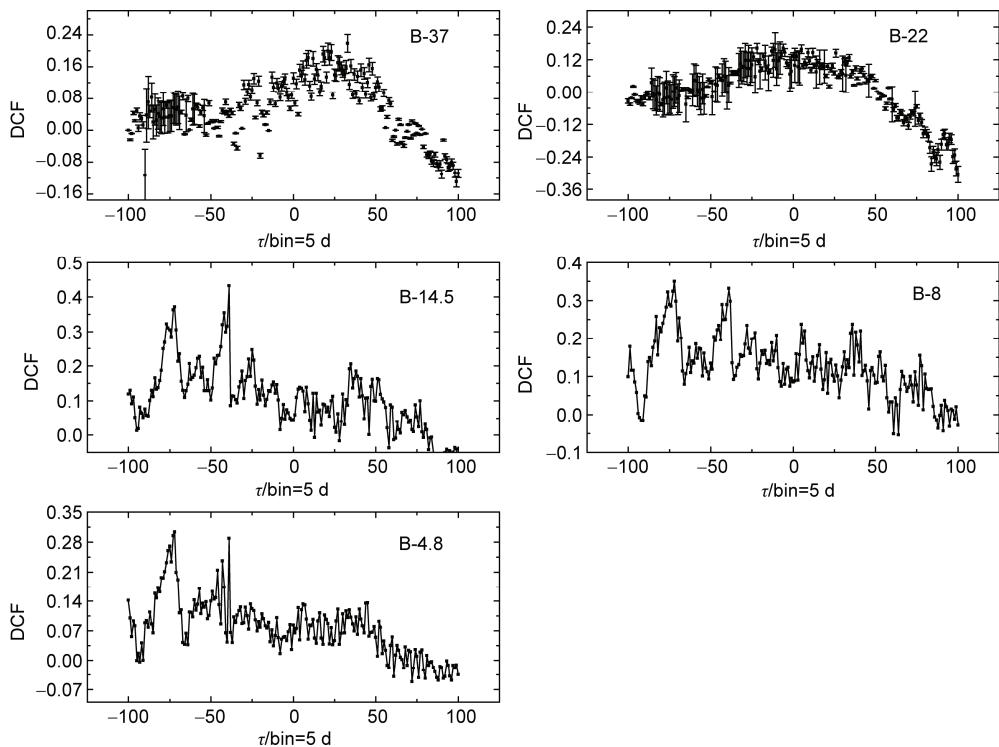


图 6 B 波段与射电波段之间的相关性分析图

Figure 6 The analytical figure of correlation among B band and radio bands.

表 6 射电波段之间的相关性和延迟

Table 6 The correlation and time delay among radio bands

Band-Band	DCF_{peak}	τ_{peak}	τ_{center}	Delay (d)
B-37 GHz	0.22	33.00	18.75	93.75
B-22 GHz	0.16	-22.00	-2.33	-11.65
B-14.5 GHz	0.43	-39.00	-40.35	-201.75
B-8 GHz	0.33	-39.00	-39.95	-199.75
B-4.8 GHz	0.29	-39.00	-40.80	-204.00

存在 2.48 a, 3.99 a 的周期, 14.5 GHz 存在 2.45 a, 5.18 a, 7.85 a 的周期, 22 GHz 存在 1.19 a, 2.61 a, 4.34 a, 5.34 a 的周期, 37 GHz 存在 2.60 a, 4.22 a 的周期^[51]. 本文的周期分析中, 与 Wang^[51]相比, 我们重新整理并补充了部分射电光变数据并加入了光学部分光变曲线的周期来进行对比, 且采用了三种不同的周期分析方法进一步保证了周期分析结果的准确性. 我们分析发现的 4.8 GHz 3.89–3.94 a 的周期与 Wang 4.8 GHz 存在 3.93 a 的结果一致, 8 GHz 存在 2.48–2.55 a 的周期与 Wang 2.48–2.55 a 的周期一致, 14.5 GHz 存在 2.44–2.56 a 的周期与 Wang 2.45 a 的结果一致, 22 GHz 存在 2.34–2.56 a, 4.16–4.30 a 的周期与 Wang 2.61 a 和 4.34 a 的周期一致, 37 GHz 存在 2.31–2.58 a

的周期与 Wang 2.60 a 的周期一致^[51]. 光学 B 波段存在的 0.97–1.15 a 的周期与 Liu 等人^[27]发现的 465 d 的周期基本一致.

针对 Blazars 光变存在的周期性现象, 天文学家提出了各种模型去解释(Fan 2005)^[52]: 双黑洞模型, 螺旋喷流模型, slim 盘模型及吸积率的变化等. 其中双黑洞模型合理解释了部分 Blazars 光变的周期, 如: OJ 287(Fan 等人)^[8]、PKS 1510–089(Wu 等人)^[53]、Mkn 501(Rödig 等人)^[54]、3C 120 (Caproni 等人)^[55]和 3C 345(Caproni 等人)^[56]. 我们认为 OQ 530 的光变可能对应着螺旋喷流模型, 它认为 Blazars 的光变可能是由于双黑洞绕转使得喷流的辐射取向发生了变化, 从而导致束流因子的变化, 而束流因子的变化又导致了全电磁波段辐射流量的变化. 此模型还合理解释了其他部分 Blazars 光变的周期, 如: AO 0235+16 (Raiteri 等人)^[14], ON 231(Sobrito 等人)^[57]等. Cassaro 等人^[58]VLBI 观测发现 OQ 530 的喷流在 pc 和 kpc 尺度上偏离了大约 150°, 这进一步证实了双黑洞模型.

Hanski 等人^[29]利用离散相关函数法分析了 20 个源的射电和光学波段的光变曲线, 其中 7 个显示出明

显的相关性, 6个可能存在相关, 延迟分布从0到几百天, 但OQ 530没有发现明显的相关。Tornikoski等人^[30]分析了22个河外射电源的光学和射电之间的相关性, 其中10个源的射电和光学之间显示出明显的关系, 6个源的光学和射电之间显示出很好的同步性, 但OQ 530的光学和射电波段之间却没有发现明显相关, 可能是由于OQ 530的样本过低的原因, 22和37 GHz的光变曲线显示出较好的同步性且具有较强的相关性, 1987.4–1988.0 a 90 GHz的光变曲线与22 GHz和37 GHz的光变曲线也显示出较好的同步性。Liu等人^[27]分析了光学和射电波段的相关性, 但没有发现明显的相关。Zhang等人^[31]分析发现OQ 530的光学波段存在强相关且无明显延迟。从图1光变曲线可以看出, 248000处的爆发显示OQ 530的五个射电波段具有相似的光变曲线, 表明OQ 530的射电波段存在较强的相关性。我们相关性的进一步分析也显示OQ 530的射电波段之间呈现出较强的相关性, 延迟分析方面, 37–14.5, 22–14.5, 14.5–4.8显示高频波段要落后于低频波段2 d至13 d。37–22, 37–8, 22–4.8显示高频波段要超前于低频波段8 d至21 d, 37–4.8, 22–8, 14.5–8, 8–4.8之间无明显延迟。从延迟结果来看并无明显的高频超前于低频或高频落后于低频的变化规律, 我们推测可能在OQ 530的喷流中存在多个辐射区且沿不同方向运动, 在视线方向看到的光变可能是由于不同区域且不同多普勒因子贡献所产生的, 因此不同波段之间有的推迟, 有的超前。多普勒因子可能只会造成短期光变的前后延迟或提前, 而长期的光变仍然有很好相关。还需更多的观测数据进一步分析。

光学和射电波段的相关性分析显示光学B波段

要超前于22, 14.5, 8和4.8 GHz, 依次为11.65, 201.65, 199.75和204.00 d, B波段落后于37 GHz 93.75 d。由于光学B波段和37 GHz的数据点都较少, 所以B波段落后于37 GHz的结果还需更多数据点来进一步验证。从22到4.8 GHz, 我们发现光学波段超前于射电波段, 而且随着频率的逐渐变小延迟有逐渐增大的变化趋势。这可以用相对论减速喷流模型来解释, 即光学辐射产生于核心部分, 射电较高频部分的辐射可能产生于距中心区域较近部分, 较低频部分的辐射可能产生于距中心区域较远的部分。核心区的光学辐射发射出去先照亮了高频部分然后再往外传播照亮了低频部分, 从而随频率的逐渐变小延迟有逐渐增大的变化趋势。

6 结论

利用结构函数法、J-K方法、功率谱法分别计算了OQ 530在~4.8, 8, 14.5, 22和37 GHz及光学B波段的周期。分析结果认为4.8 GHz可能存在~3.89–3.94 a的周期, 8 GHz存在2.48–2.55 a的周期, 14.5 GHz可能存在2.44–2.56 a的周期, 22 GHz可能存在2.34–2.56 a, 4.16–4.30 a的周期, 37 GHz可能存在2.31–2.58 a的周期, 光学B波段可能存在的0.97–1.15 a的周期。

相关性分析显示~OQ 530在射电波段4.8, 8, 14.5, 22和37 GHz之间存在较强相关, 延迟方面没有明显的变化规律。光学与射电波段之间的相关性显示光学波段要超前于射电波段, 且随频率的逐渐变小延迟有逐渐增大的变化趋势。

致谢 褒心感谢中国科学院云南天文台刘洪涛副研究员和王放博士的有益讨论。也衷心感谢编辑部老师高效的工作和审稿人的良好建议。

参考文献

- Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. *Publ Astron Soc Pac*, 1995, 107: 803–845
- Ulrich M H, Maraschi L, Urry C M. Variability of active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1997, 35: 445–502
- Gupta A C, Banerjee D P K, Ashok N M, et al. Near infrared intraday variability of Mrk 421. *Astron Astrophys*, 2004, 422: 505–508
- Hayashida N, Hirasawa H, Ishikawa F, et al. Observations of TeV Gamma ray flares from Markarian 501 with the telescope array prototype. *Astrophys J*, 1998, 504: L71–L74
- Lainela M, Takalo L O, Sillanpää A, et al. The 65 day period in 3C 66A during bright state. *Astrophys J*, 1999, 521: L561–L564
- Kranich D, de Jager O, Kestel M, et al. HEGRA Collaboration. QPO analysis of the TeV and X-ray lightcurve of Mkn 501 in 1997 final

- results. In: The Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg, 2001
- 7 Osone S, Teshima M. Long periodicity of Blaser with RXTE ASM. In: The Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg, 2001
- 8 Fan J H, Liu Y, Qian B C, et al. Long-term variation time scales in OJ 287. *Res Astron Astrophys*, 2010, 10: 1100–1108
- 9 Wang H T. The optical periodic analysis of BL Lac object AO 0235+164. 2014a. *Astrophys Space Sci*, 351: 281–287
- 10 Wang H T, Pan Y P. Comparison and analysis of light variations of OJ 287, 0716+714 and BL Lacertae (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2012, 53(4): 265–273 [王洪涛, 潘艳平. OJ 287, 0716+714 与 BL Lacertae 的光变分析. *天文学报*, 2012, 53(4): 265–273]
- 11 Manchanda Ravi K. 13.5 a Variability and a Binary Black Hole Model for 3C 273. In: The Proceedings of Quasar Cores and Jets, 25th meeting of the IAU.Sydney, 2003
- 12 Zhang X, Xie G Z, Bai J M, et al. CCD Photometry and Long-Term Optical Variability of 3C 345. *Astrophys Space Sci*, 2000, 271: 1–10
- 13 Bing X Y, Jing Z H, Xiong Z, et al. Period of light variability in BL Lac ON 231. *J Astrophys Astron*, 2011, 32: 227–230
- 14 Raiteri C M, Villata M, Aller H D, et al. Optical and radio variability of the BL Lacertae object AO 0235+16: A possible 5-6 year periodicity. *Astron Astrophys*, 2001, 377: 396–412
- 15 Hanski M T, Takalo L O, Valtaoja E. Correlated radio and optical variations in a sample of AGN. *Astron Astrophys*, 2002, 394: 17–31
- 16 Villata M, Raiteri C M, Aller H D, et al. The WEBT campaigns on BL Lacertae. Time and cross-correlation analysis of optical and radio light curves 1968–2003. *Astron Astrophys*, 2004, 424: 497–507
- 17 Fossati G, Buckley J, Edelson R A, et al. Correlated X-ray and TeV variability in Markarian 421. *New Astron Rev*, 2004, 48: 419–422
- 18 Ciprini S, Tosti G, Teräsranta H, et al. Radio-optical flux behaviour and spectral energy distribution of the intermediate blazar GC 0109+224. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 348: 1379–1387
- 19 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: 471–480
- 20 Wang H T. Analysis of optical variations of BL Lac object AO 0235+164. 2014b. *J Astrophys Astron*, 35: 87–95
- 21 Fuhrmann L, Larsson S, Chiang J, et al. Detection of significant cm to sub-mm band radio and γ -ray correlated variability in Fermi bright Blazars. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 441: 1899–1909
- 22 Kuehr H. Optical identification of extragalactic radio sources from the NRAO - Bonn 5GHz survey. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1977, 29: 139–148
- 23 Miller H R. 1418 + 54-A new, violently variable BL Lacertae object. *Astrophys J*, 1978, 223: L67–L70
- 24 Carini M T, Miller H R, Goodrich B D. The timescales of the optical variability of Blazars. I-OQ 530. *Astron J*, 1990, 100: 347–355
- 25 Fossati G, Maraschi L, Rovetti F, et al. On the relationship between X-ray selected and radio-selected BL Lac objects. In: The International Conference on X-ray Astronomy and Astrophysics: Röntgenstrahlung from the Universe, 1996. 447–448
- 26 Ghosh K K, Ramsey B D, Sadun A C, et al. Optical variability of Blazars. *Astrophys J Suppl Ser*, 2000, 127: 11–26
- 27 Liu Y, Li J, Fan J H. A Possible 456-Day Optical Period of OQ 530. *Chinese J Astron Ast*, 2007, 7: 380–388
- 28 Fan J H, Lin R G, Xie G Z, et al. Optical periodicity analysis for radio selected BL Lacertae objects (RBLs). *Astron Astrophys*, 2002, 381: 1–5
- 29 Hanski M T, Takalo L O, Valtaoja E. Correlated radio and optical variations in a sample of AGN. *Astron Astrophys*, 2002, 394: 17–31
- 30 Tornikoski M, Valtaoja E, Teräsranta H, et al. Correlated radio and optical variations in a sample of active galactic nuclei. *Astron Astrophys*, 1994, 289: 673–710
- 31 Zhang B K, Dai B Z, Zhang L, et al. Multi-band optical variability of BL Lac object OQ 530. *Res Astron Astrophys*, 2010, 10: 653–662
- 32 Aller H D, Aller M F, Latimer G E, et al. Spectra and linear polarizations of extragalactic variable sources at centimeter wavelengths. *Astrophys J Suppl Ser*, 1985, 59: 513–768
- 33 Aller M F, Aller H D, Hughes P A, et al. Centimeter-wavelength total flux and linear polarization properties of radio-loud BL lacertae objects. *Astrophys J*, 1999, 512: 601–622
- 34 Teräsranta H, Tornikoski M, Valtaoja E, Urpo S, et al. Ten years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1992, 94: 121–173
- 35 Teräsranta H, Tornikoski M, Mujunen A, et al. Fifteen years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1998, 132: 305–331
- 36 Teräsranta H, Achren J, Hanski M, Heikkilä J. Twenty years monitoring of extragalactic sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astron Astrophys*, 2004, 427: 769–771
- 37 Teräsranta H, Wieren S, Koivisto P, et al. 24 year monitoring of extragalactic sources at 22 and 37 GHz. *Astron Astrophys*, 2005, 440:

- 409–410
- 38 Nieppola E, Tornikoski M, Lähteenmäki A, et al. 37 GHz observations of a large sample of BL Lacertae objects. *Astron J*, 2007, 133: 1947–1953
- 39 Fan J H, Lin R G. Optical variability and periodicity analysis for Blazars. I. light curves for radio-selected BL Lacertae objects. *Astrophys J*, 2000, 537: 101–122
- 40 Tagliaferri G, Ravasio M, Ghisellini G, et al. The BL Lacertae objects OQ 530 and S5 0716+714. Simultaneous observations in the X-rays, radio, optical and TeV bands. 2003, *Astron Astrophys*, 400, 477–486
- 41 Massaro E, Mantovani F, Fanti R, et al. VLBI imaging and optical variability of the BL Lac object OQ 530 (B1418+546). *Astron Astrophys*, 2004, 423: 935–942
- 42 Simonetti J H, Cordes J M, Heesen D S. Flicker of extragalactic radio sources at two frequencies. *Astrophys J*, 1985, 296: 46–59
- 43 Deeming T J. Fourier analysis with unequally-spaced data. *Astrophys Space Sci*, 1975, 36(1): 137–158
- 44 Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys Space Sci*, 1976, 39: 447–462
- 45 Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys J*, 1982, 263: 835–853
- 46 Jurkevitch I. A Method of Computing Periods of Cyclic Phenomena. *Astrophys Space Sci*, 1971, 13(1): 154–167
- 47 Kidger M, Takalo L, Sillanpaa A. A new analysis of the 11-year period in OJ287 - Confirmation of its existence. *Astron Astrophys*, 1992, 264: 32–36
- 48 Edelson R A, Krolik J H. The discrete correlation function - A new method for analyzing unevenly sampled variability data. *Astrophys J*, 1988, 333: 646–659
- 49 Peterson B M. Advanced lectures on the starburst-AGN connection. In: The Proceedings of a conference held in Tonantzintla. Singapore: World Scientific, 2001. 3
- 50 Mead A R G, Ballard K R, Brand P W J L, et al. Optical and infrared polarimetry and photometry of Blazars. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1990, 83: 183–204
- 51 Wang H T. The analysis of the radio light curves of low-peak frequency blazars (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2014, 55(2): 116–126 [王洪涛. 低峰频 blazars 的射电光变分析. 天文学报, 2014, 55(2): 116–126]
- 52 Fan J H. Optical variability of Blazars. *Chin J Astron Astrophys Suppl*, 2005, 5: 213–223
- 53 Wu J, Zhou X, Peng B, et al. Optical monitoring of PKS 1510-089: A binary black hole system? *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 361: 155–159
- 54 Rödig C, Burkart T, Elbracht O, et al. Multiwavelength periodicity study of Markarian 501. *Astron Astrophys*, 2009, 501: 925–932
- 55 Caproni A, Abraham Z. Can long-term periodic variability and jet helicity in 3C 120 be explained by jet precession? *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 349: 1218–1226
- 56 Caproni A, Abraham Z. Precession in the inner Jet of 3C 345. *Astrophys J*, 2004, 602: 625–634
- 57 Sobrito G, Raiteri C M, Villata M, et al. AGN in the year 2000. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 2001, 72(1): 149–150
- 58 Cassaro P, Stanghellini C, Dallacasa D, et al. Bendings of radio jets in BL Lacertae objects. I. EVN and MERLIN observations. *Astron Astrophys*, 2002, 381: 378–388

The analysis of radio and optical variability in blazar OQ 530

WANG HongTao^{1*} & SU YanPing²

¹ The Faculty of Physics and Electronic Information, Langfang Normal University, Langfang 065000, China;

² The Faculty of Forest, University of Agriculture of Hebei, Baoding 071000, China

From the historical literatures, we collect the most complete data of light curves in radio band (4.8, 8, 14.5, 22 and 37 GHz) and optical B band, and analyze the period of light curve in six different bands by three different methods (structure function method, J-K method and power density spectrum method), and analyze the correlation among radio bands and the correlation between optical B band and radio band by discrete correlation function method. The analytical results of periodicity suggest that 3.89–3.94 a is the possible period in 4.8 GHz, 2.48–2.55 a is the possible period in 8 GHz, 2.44–2.56 a is the possible period in 4.5 GHz, 2.34–2.56 a and 4.16–4.30 a is the possible period in 22 GHz, 2.31–2.58 a is the possible period in 37 GHz, 0.97–1.15 a is the possible period in optical B band. The analysis of correlation indicate that they are strong correlations among the five radio bands and no time delay obviously, optical band lead by the radio band between optical band and radio band. The time delay increase while the frequency reduce gradually.

blazar, variability, period, correlation

PACS: 98.54.Cm, 95.85.Bh, 95.85.Kr, 95.75.Wx

doi: 10.1360/SSPMA2014-00283