

处理相关光变时间延迟的新方法*

袁聿海^{1,2†}

(1 中国科学技术大学天体物理研究中心 合肥 230026)

(2 广州大学天体物理研究中心 广州 510006)

摘要 时间延迟相关函数 (Time Delay Correlation Function, TDCF) 方法是一种可以计算时间序列时间延迟的新方法, 利用该方法计算 blazar 天体 0316+413 (NGC 1275) 3 个射电波段 (4.8 GHz、8 GHz 和 14.5 GHz) 的时间延迟并进行另外 7 个 blazar 源的多波段相关分析. 对 0316+413 的计算结果表明: 4.8 GHz 光变延迟 8 GHz 光变 410 d, 即 $\tau_{4.8-8} = 410$ d; 4.8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 440 d, $\tau_{4.8-14.5} = 440$ d; 8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 30 d, 即 $\tau_{8-14.5} = 30$ d; 通过 7 个 blazar 天体的多波段相关分析, 和离散相关函数 (Discrete Correlation Function, DCF) 方法相比, 利用 TDCF 方法获得时间延迟是更加合理的.

关键词 类星体: 普通, 方法: 数据分析

中图分类号: P 158; **文献标识码:** A

1 引言

blazar 天体主要包含 BL Lac 天体和 FSRQ (flat spectrum radio quasar) 两类. 其主要性质是: 具有从射电到 X 射线的快速光变; 射电噪、致密的、核主导的平谱射电源; 具有比较高的偏振度, 并且幅度和偏振角都有显著变化; 在整个可观测波段上, 都发现了光滑的、宽的、非热连续辐射; VLBI (very long baseline interferometry) 成分的视超光速运动, 表明相对论喷流的存在等主要特征^[1-3].

根据各向异性的喷流模型, 由于等离子体在前进方向的差异, 会在不同波段之间产生时间延迟. 而不同波段间的时间延迟, 对于确定辐射的区域、研究引力透镜的效应以及辐射的模型判定等方面有着非常重要的作用, 例如: Villata 等^[4] 利用光学和射电之间的时间延迟, 分析了辐射的结构和两者辐射区域的差异. 有很多 blazar 源被发现具有光变时间延迟的性质. 0716+714 在 B 波段和 I 波段之间的低于 10 min 的时间延迟被 WEBT (Whole Earth Blazar Telescope) 探测到^[4]. Q0957+561 在 G 波段和 R 波段之间被发现了 4 d 的时间延迟^[5]. 3C 454.3 在 37 GHz 和 22 GHz 之间被发现了 10 d 的时间延迟, 在 37 GHz 和 14.5 GHz 之间被发现了 40 d 的时间延迟^[6]. 在这些讨论过程中, 均采用了 DCF 方法^[7]. 该方法在多波段的相关分析研究方面有着很好的应用, 并且取

2009-08-19 收到原稿, 2010-01-13 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (106330101) 资助项目

† yh_yuan@gzhu.edu.cn

得了许多研究成果^[4-6,8-10]. 可是这种方法在处理数据的过程中有一定的不确定性^[11]. 因而, 寻找一种新的计算时间延迟的方法, 从而能够更好地确定时间延迟是非常有必要的. 下面我们将提出一种新的时间延迟分析方法—TDCF 方法.

2 时间延迟分析方法介绍及其实际应用

2.1 TDCF 方法

为了介绍这种时间延迟分析方法, 我们首先人为构造两组数据列 (a_i 和 b_j), 如图 1. 其时间分布是不均匀的, 变化幅度存在一定的差异, 设存在 400 d 的时间延迟 (见图 1).

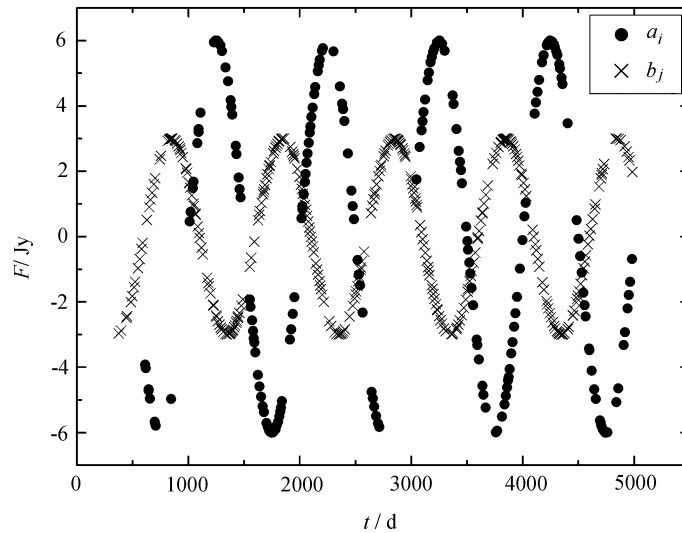


图 1 人为构造的两组数据列

Fig. 1 Two artificial data streams with different amplitudes and uneven distribution

对两组离散数据列的所有观测数据, a_i 和 b_j , 计算它们的流量差值, $\Delta F_{ij} = a_i - b_j$; 并且计算对应的时间差, $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$. 通过对非分段函数 ΔF_{ij} 以适当的时间长度 Δt_{ij} 进行分段, $\tau - \Delta\tau/2 \leq \Delta t_{ij} \leq \tau + \Delta\tau/2$, 然后计算每段的标准偏差, 从而可以得到每个时延 τ 的时间延迟 $\varphi(\tau)$

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{M} \left\{ \sum [\Delta F_{ij} - \overline{\Delta F_{ij}}]^2 \right\}^{0.5},$$

M 是各段数据对的总数, $\overline{\Delta F_{ij}}$ 是分段后的平均值. 针对图 1 所示的原始数据, 利用 TDCF 方法, 得到图 2 所示的结果, 然后利用高斯拟合得到其时间延迟为 $\tau_\varphi = 400$ d.

2.2 DCF 方法

DCF 方法用来分析两组数据之间的相关性, 在 Edelson 等^[7] 和 Fan 等^[12] 中都有对该方法的描述. 因为该方法能够表征两个具有时延的时间序列的相关性, 所以文献中

涉及时间延迟的工作大部分是采用该方法计算的.

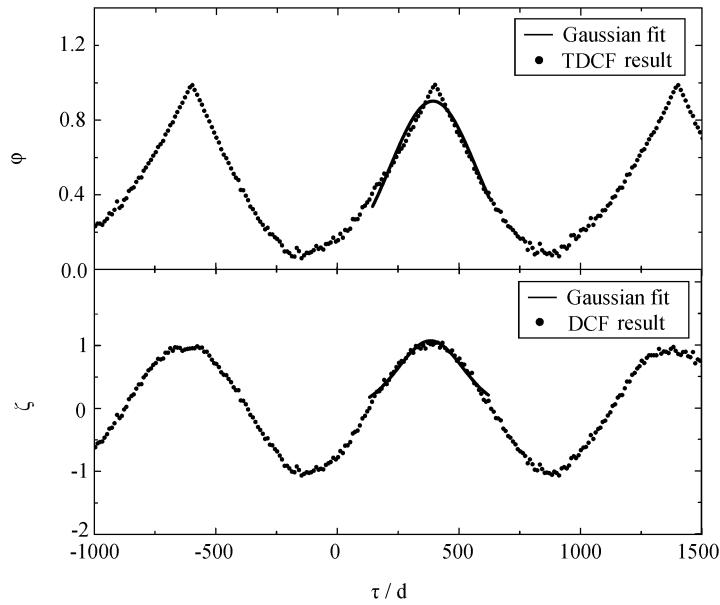


图 2 TDCF 和 DCF 方法对人为设定数据处理结果. 上图和下图实心圆点分别代表 TDCF 方法和 DCF 方法得到的结果. 两图曲线代表高斯拟合的结果

Fig. 2 Two calculated results come from TDCF method and DCF method, respectively. The filled circles in the upper panel and the lower panel represent the results from TDCF and DCF method, respectively.

The two curves stand for the Gaussian fitting results

对于两组离散的数据列 a_i 和 b_j , 首先计算其未分段的相关, 即

$$\omega_{ij} = \frac{(a_i - \bar{a})(b_j - \bar{b})}{\sqrt{\sigma_a^2 \times \sigma_b^2}},$$

其中 a_i 和 b_j 是数据列中的点, \bar{a} 和 \bar{b} 是数据列的平均值, σ_a 和 σ_b 是相应的标准偏差. 然后, 通过对非分段的相关函数 ω_{ij} 以适当的时间长度进行分段, 并对具有相同时延的数据进行平均, 从而可以得到每个时延 τ 的 DCF 值

$$\xi(\tau) = \frac{1}{M} \sum \omega_{ij}(\tau),$$

每段的标准差是

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{M} \left\{ \sum [\omega_{ij} - \xi(\tau)]^2 \right\}^{0.5}.$$

针对图 1 所示的数据, 利用 DCF 方法, 得到了图 2 所示的计算结果. 基于高斯拟合得到其时间延迟为 $\tau_\xi \approx 400$ d. 该结果与利用 TDCF 方法得到的结果是一致的.

3 讨论

当数据量分布比较规则时, 如图 2 所示, 利用 DCF 方法和 TDCF 方法得到的延迟结果是一致的. 但是在实际的天文数据处理中, 当遇到数据量比较多、并且存在非常严重的离散时, 两者之间会存在比较大的差异.

3.1 0316+413 的光变时延

我们在分析美国 Michigan 大学天文数据库 (UMRAO) 时, 发现某些源具有比较特别的单峰结构. 特别是 0316+413, 从该源的光变曲线 (如图 3) 看来, 该源 4.8 GHz、8 GHz 和 14.5 GHz 之间存在着比较明显的光变延迟.

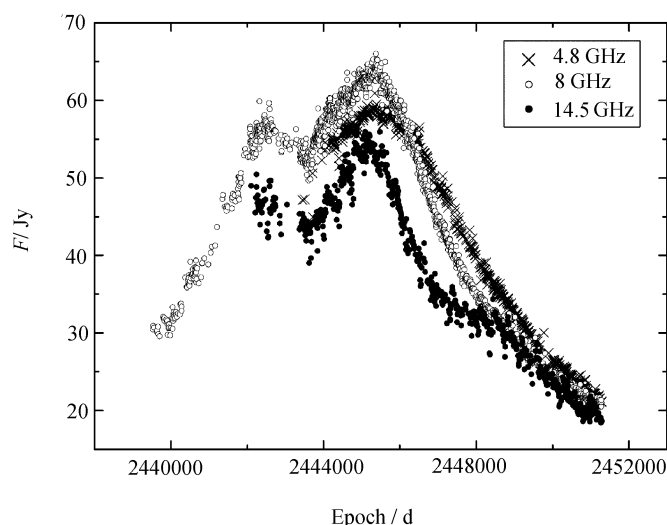


图 3 0316+413 射电波段的光变曲线

Fig. 3 The light curves of 0316+413 at 4.8 GHz, 8 GHz and 14.5 GHz

对于 0316+413 射电波段的观测数据, 利用 2 种方法独立处理的结果如图 4 所示. DCF 方法得到的结果为: 若基于半峰宽的中点, 8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 30 d; 若基于峰值点, 则 8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 80 d. 而 TDCF 方法得到 8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 30 d, 且顶部比较尖, 峰值点与半峰宽的中点比较一致.

对于 4.8 GHz 和 8 GHz, 利用 DCF 方法, 若基于半峰宽的中点, 则 4.8 GHz 光变延迟 8 GHz 光变 420 d; 若基于峰值点, 则 4.8 GHz 光变延迟 8 GHz 光变 200 d. 利用 TDCF 方法得到 4.8 GHz 光变延迟 8 GHz 光变 410 d, 峰值点与半峰宽的中点比较一致.

对于 4.8 GHz 和 14.5 GHz, 利用 DCF 方法, 若基于半峰宽的中点, 则 4.8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 450 d; 若基于峰值点, 则 4.8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 70 d. 利

用 TDCF 方法得到 4.8 GHz 光变延迟 14.5 GHz 光变 440 d, 峰值点与半峰宽的中点比较一致.

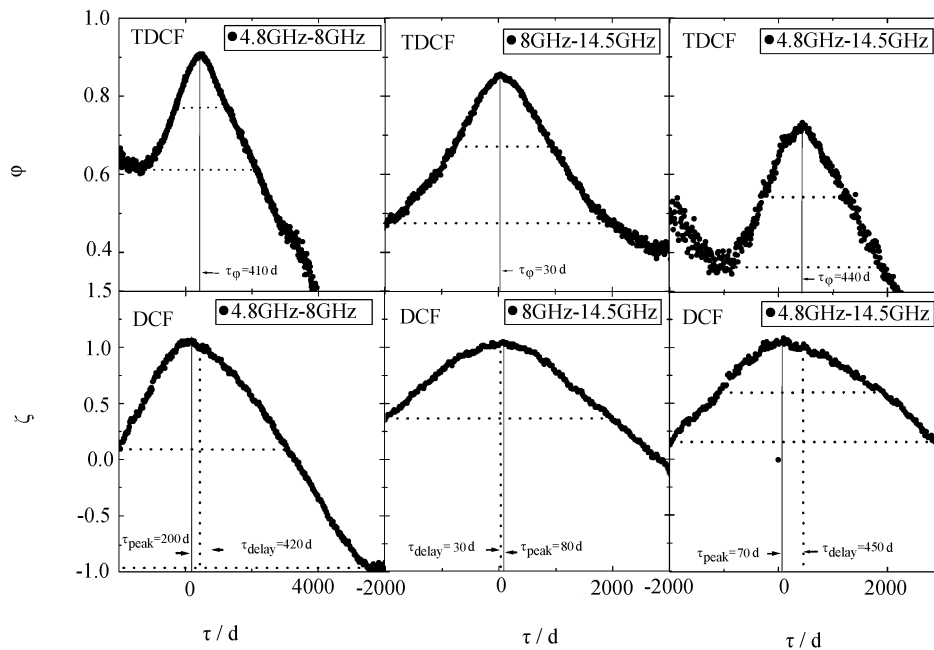


图 4 分别利用 TDCF 和 DCF 方法对 0316+413 射电波段时间延迟分析结果

Fig. 4 The results of the time delays of 0316+413 based on TDCF method (upper) and DCF method (lower), respectively

对于 0316+413 3 个波段之间的时间延迟, 利用 TDCF 方法得到的结果是自洽的, 即 $\tau_{4.8-8} + \tau_{8-14.5} = \tau_{4.8-14.5}$; 而对于 DCF 方法得到的结果, 如果考虑半峰宽的中点, 则是自洽的. 这说明 TDCF 方法相对 DCF 方法, 在计算时间延迟的问题上是更加精确的.

对于 0316+413 发生时间延迟的原因可能来自非均匀的喷流. 该喷流可以在传播的过程中促使光线的流量得以进一步的增大. 假如喷流的方向随着视向变化而发生变化, 那么不同的波段便可能发生一定的时间延迟^[13].

3.2 不同波段间的相关分析

由于 blazar 的射电谱是非热的幂率谱, 而多波段的光变时延会促使幂率特性降低, 使得多波段之间的线性相关变弱, 因而我们可以选取一些可能有延迟特性的具有多波段观测数据的射电源, 分别利用 DCF 方法和 TDCF 方法来获取延迟时间 (τ_{ξ} , τ_{φ}), 然后利用线性插值的方法平移相应的延迟时间 (τ_{ξ} , τ_{φ}). 如果延迟时间合适的话, 那么利用插值得到的结果应该比没有平移时的相关性更强.

UMRAO 的数据库包含了 70 多个 blazar. 对每个 blazar, 每隔一周获得相应的平均流量密度和平均时间, 然后选取两个波段 (4.8 GHz 与 8 GHz) 均存在的数据点, 并对可能存在时间延迟的源分别利用 DCF 和 TDCF 方法得到各自的结果, 然后利用高斯拟合

的方法获得相应的延迟时间. 接着利用延迟时间, 通过线性插值的方法针对相应的频段平移对应的延迟时间, 所得结果如表 1 所示, 其中, 第 1 列, 源的名称; 第 2 列, 计算时间延迟所采用的方法, 0 代表没有考虑时间延迟的相关分析结果; 第 3 列, 时间延迟 (4.8 GHz 和 8 GHz 之间); 第 4 列, 4.8 GHz 和 8 GHz 流量密度之间的线性相关系数.

表 1 不同波段之间的相关分析

Table 1 Correlation analysis of multi-band data

IAU name	Method	τ (d)	r
0235+164	0		0.95
0235+164	DCF	139	0.56
0235+164	TDCF	16	0.97
0607-157	0		0.87
0607-157	TDCF	157	0.94
0420-014	0		0.88
0420-014	TDCF	127	0.92
0430+052	0		0.87
0430+052	TDCF	80	0.95
1641+399	0		0.88
1641+399	DCF	1129	0.47
1641+399	TDCF	421	0.94
2200+420	0		0.96
2200+420	DCF	101	0.82
2200+420	TDCF	-7	0.96
2251+158	0		0.79
2251+158	DCF	544	0.47
2251+158	TDCF	195	0.94

由表 1, 0235+164、1641+399、2200+420 和 2251+158 在分别利用 DCF 方法和 TDCF 方法分析时, 均获得了时间延迟, 但是获得了不同的延迟时间, 并且用 TDCF 方法获得的延迟时间计算的相关性是最强的, 而利用 DCF 方法的延迟时间得到的相关性是最弱的, 如图 5 (以 2251+158 为例, 图中 F_8 和 $F_{4.8}$ 分别表示 8 GHz 和 4.8 GHz 的流量密度). 0607-157、0420-014 和 0430+052 3 个源在利用 DCF 方法分析时, 没有发现延迟特性; 在利用 TDCF 方法分析时, 发现了时间延迟特性, 并且利用该延迟时间得到的相关性要强于未考虑时间延迟时的相关性. 由此可见, 利用 TDCF 方法可以得到更加合理的结果.

4 结论

本文首先讲述了在 blazar 天体中时间延迟的重要意义, 接着指出了传统的处理时间延迟的方法—DCF 方法, 在处理数据中存在一定不确定性, 然后引入了一种新的处理时间延迟的方法—TDCF 方法. 讨论部分中分别采用两种方法: 首先分析了 blazar 天体 0316+413 3 个射电波段之间的时间延迟; 接着利用 UMRAO 数据库, 通过 7 d 平均的方法, 得到相应的平均流量密度和平均时间, 对可能存在时间延迟的 7 个数据源, 分别利用

这两种方法得到各自的延迟时间, 然后根据多波段的光变时延会促使射电谱的幂率特性降低的性质, 利用得到的时间延迟分别计算如果没有时间延迟时两射电波段 (4.8 GHz 和 8 GHz) 之间的相关性, 最终得出利用 TDCF 方法计算所得时间延迟更加合理的结论.

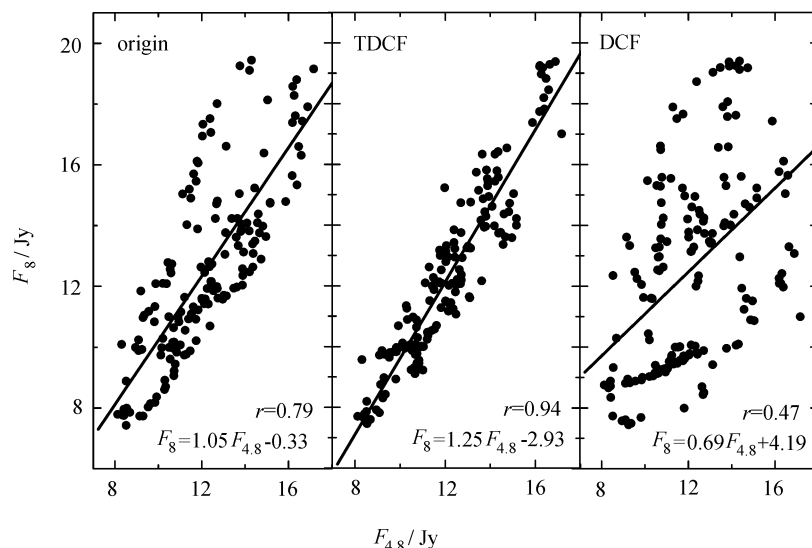


图 5 2251+158 在 4.8 GHz 和 8 GHz 波段之间的线性相关分析. “origin” 代表原始数据, “TDCF” 代表 TDCF 方法时间延迟的结果, “DCF” 代表 DCF 方法时间延迟的结果. F_8 和 $F_{4.8}$ 代表 8 GHz 和 4.8 GHz 的流量密度, r 是 F_8 和 $F_{4.8}$ 之间的相关系数

Fig. 5 The linear correlation analysis of 2251+158 between 4.8 GHz and 8 GHz. “origin”, “TDCF” and “DCF” stand for the original result, the results from TDCF method and DCF method, respectively. F_8 and $F_{4.8}$ represent the flux density at 8 GHz and 4.8 GHz, respectively. r stands for the correlation coefficient between F_8 and $F_{4.8}$

致谢 这个工作的完成得到了樊军辉教授的大力支持和帮助, 他为文章的完成提出了许多宝贵的建议. 文中的射电数据来自美国 Michigan 大学天文数据库 (UMRAO), 该射电数据的获得得到了 Michigan 大学以及美国国家自然科学基金的支持.

参 考 文 献

- [1] Angel J R P, Stockman H S. ARA&A, 1980, 18: 321
- [2] 杨江河, 樊军辉, 刘怡, 等. 天文学报, 2007, 48: 407
- [3] Yang J H, Fan J H, Liu Y, et al. ChA&A, 2008, 32: 129
- [4] Villata M, Mattox J R, Massaro E, et al. A&A, 2000, 363: 108
- [5] Shalyapin V N, Goicoechea L J, Koptelova E, et al. A&A, 2008, 492: 401
- [6] Villata M, Raiteri C M, Aller M F, et al. A&A, 2007, 464: L5
- [7] Edelson R A, Krolik J H. ApJ, 1988, 333: 646
- [8] Chatterjee R, Jorstad S G, Marscher A P, et al. ApJ, 2008, 689: 79
- [9] Serra-Ricart M, Oscoz A, Sanchís T, et al. ApJ, 1999, 526: 40

- [10] Raiteri C M, Villata M, Larionov V M, et al. *A&A*, 2008, 491: 755
- [11] Fan J H, Peng Q S, Tao J, et al. *AJ*, 2009, 138: 1428
- [12] Fan J H, Adam G, Xie G Z, et al. *A&AS*, 1998, 133: 163
- [13] Paraficz D, Hjorth J, Burud I, et al. *A&A*, 2006, 455: L1

A New Method to Calculate the Time Delays in Blazars

YUAN Yu-hai^{1,2}

(1 *Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

(2 *Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006*)

ABSTRACT In this paper, a new method — TDCF (Time Delay Correlation Function) method, is introduced to calculate the time delays of multi-band data in blazars. This method is adopted to analyze the time delays of the radio source 0316+413 and the correlation analysis of the other seven blazars. The results show that the light curve of 0316+413 at 4.8 GHz lags about 410 days behind that at 8 GHz, the light curve at 4.8 GHz lags 440 days behind that at 14.5 GHz and the light curve at 8 GHz lags about 30 days behind that at 14.5 GHz. It is very reasonable to use the TDCF method to carry out the correlation analysis of the time delays of the other seven blazars.

Key words quasars: general, methods: data analysis