

河外低频射电变源研究的新进展

张福俊

(中国科学院上海天文台)

提 要

大多数低频变源的变化是由于星际媒质不均匀性引起的星际闪烁所造成的；少数是由于内部因素引起的。VLBI 观测指出：未曾发现前者有结构变化；后者的结构变化及相关的其他变化似乎需要一个超光速现象或其他相对论性现象来解释。宽频带上变化相关的低频变源绝大部分为视超光速源及其遴选者，这为我们寻找超光速源提供了一条重要的线索。

Sholomitzkii于1965年报道了类星体CTA102在频率920MHz上有射电流量变化^[1]，可是人们并不相信。直到1972年，Hunstead又报道了四个射电源。（其中包括CTA102）在408MHz上的流量变化之后^[2]，射电源的低频变化才引起人们的充分注意，并掀起了一股研究此现象的热潮。国际上有不少研究小组对低频变化现象进行着系统性的监视和研究；提出了解释此现象的许多模型。涉及此内容的评述性的文章很多，早期的工作可参阅文献^[3,4]。本文着重于描述低频变化研究的新结果，它们对这类现象的今后研究课题的选择具有相当的影响。

十多年来，已经对低频变源进行了一系列的系统性观测。一些带有普遍性的结论可概括如下：

- (1) 低频变化比从高频变化所推导的结果大得多；
- (2) 低频变化的时间尺度远远短于从高频变化推断的变化时间尺度；
- (3) 对致密的平坦谱源来讲，低频变化与高频变化一样是种普遍的现象；
- (4) 一些“正规的”陡谱源也出现低频变化，如3C159；
- (5) 在部分源中，诸如BL Lac，它们的高频变化和低频变化事件之间表现出有某种衔接的关系；其他的源似乎缺乏这种特殊关系。

低频上大而迅速的变化给同步辐射云模型带来一个严重的问题，即高的亮度温度，达 10^{14} — 10^{16} K。如果把变化的时间尺度取作为光沿源传播的时间和红移作为距离的指示，由此而得到的最大角径远远小于由同步辐射的最大允许亮温度为 $\sim 10^{12}$ K所推导出的最小角径^[7]。但是，如果假定同步辐射云以相对论速度膨胀^[8]或假定发射来自相对论性喷流^[9]，那么，上面的困难就可以被克服。

快速低频变化的另一种解释是 Shapirovskaya 所提出的星际媒质的慢闪烁所引起^[10]。星际“聚焦”效应可以说明无高频变化相伴随的低频变化。这类源占低频变源的相当大的比例。基于此原因，人们对低频变源的兴趣已经不如以前那么高了^[11]。

一、低频变源的统计分类

Cotton^[12], Condon等^[13], Spangler和Cotton^[14]以及Fanti等^[15,16]在低频上做了许多搜索低频变源的工作。在此基础上, Padrielli等对51个源进行多频率观测, 频率范围从0.4GHz到14.5GHz^[17]。这批源选自Bologna监视纲要, 它们全是低频变源和可能的低频变源。Padrielli等定义了一个统计变化幅度 DS :

$$DS = 4(\text{r.m.s.}^2 - \sigma_e^2)^{1/2}$$

其中r.m.s.是整个观测时期中测量到的流量密度 S 相对于 $\langle S \rangle$ 的标准偏差; σ_e 是由于仪器而引起的误差。 DS 可解释为从峰值到峰值的流量变化幅度。对样品做分类时, 他们选择 $DS(0.4\text{GHz}) > 0.4\text{Jy}$ 的源, 这种源的数目仅有33个。根据每个源在不同频率上的光变曲线(流量随时间变化的曲线)和各频率上幅度变化的相互关系, 可将源分成如下几个类型(我们保留他们所用的符号):

L: 这类源的 $DS(0.4\text{GHz}) > DS(2.3\text{GHz})$ 和 $DS(8.0\text{GHz})$ 。变化仅出现在米波段, 即高频变化远远小于低频变化或高频变化甚至不出现。这类源的光学对应体为QSO, 星系和空场。DA406(1611 + 343)即属于这一类源, 它在几个频率上的光变曲线在图1(a)中给出。

U-BBV: 高频变化和低频变化同时出现在这类源中, 但两种变化并不相关。低频上的爆发事件在 $\nu > 2.3\text{GHz}$ 以上并没有响应。变化在2.3GHz附近趋于最小。在此频率附近形成一个间隙。属于这一类变源的有QSO和BL Lac型天体。3C454.3(2251 + 158)是这一类源的例子之一, 它的光变曲线见图1(b)。

C-BBV: 源有宽频带活动性, 在整个射电频谱上的变化显示出相关性。爆发在宽广的频率范围上准同时出现或逐渐由高频漂向低频, 变化幅度也随频率降低而减小。属于这类变化的有QSO和BL Lac型天体。图1(c)给出了BL Lac的光变曲线。

N-BBV: 有9个源未被分类。主要是由于缺乏2.3GHz的数据。

BBV (Broad Band Variables)表示宽频变源。在Padrielli等所选的样品中, L类源占总数的35%, C-BBV占22%, U-BBV占19%。

上述不同类型的光变曲线也许是由不同的现象所形成。用经典的膨胀源模型, 也许伴有相对论整体运动, 可说明 $\nu > 2.3\text{GHz}$ 以上的变化; 这些变化偶然延伸到米波段。L类源的变化因素可能为星际媒质的“聚焦”效应所引起。在2.3GHz处的空隙并不意味着在此频率上没有变化, 而是在 $\sim 2.3\text{GHz}$ 处行将结束的高频变化与决定LFV的另外过程的非相干叠加可能是产生U-BBV的原因^[17]。

这个统计分析为我们提供了重要的信息。根据不同的研究目的, 我们可以选择不同类型的低频变源。

二、低频变源的空间分布

除了内在的因素引起射电源的低频变化外, 目前, 不少射电天文学家认为, 观测到的流

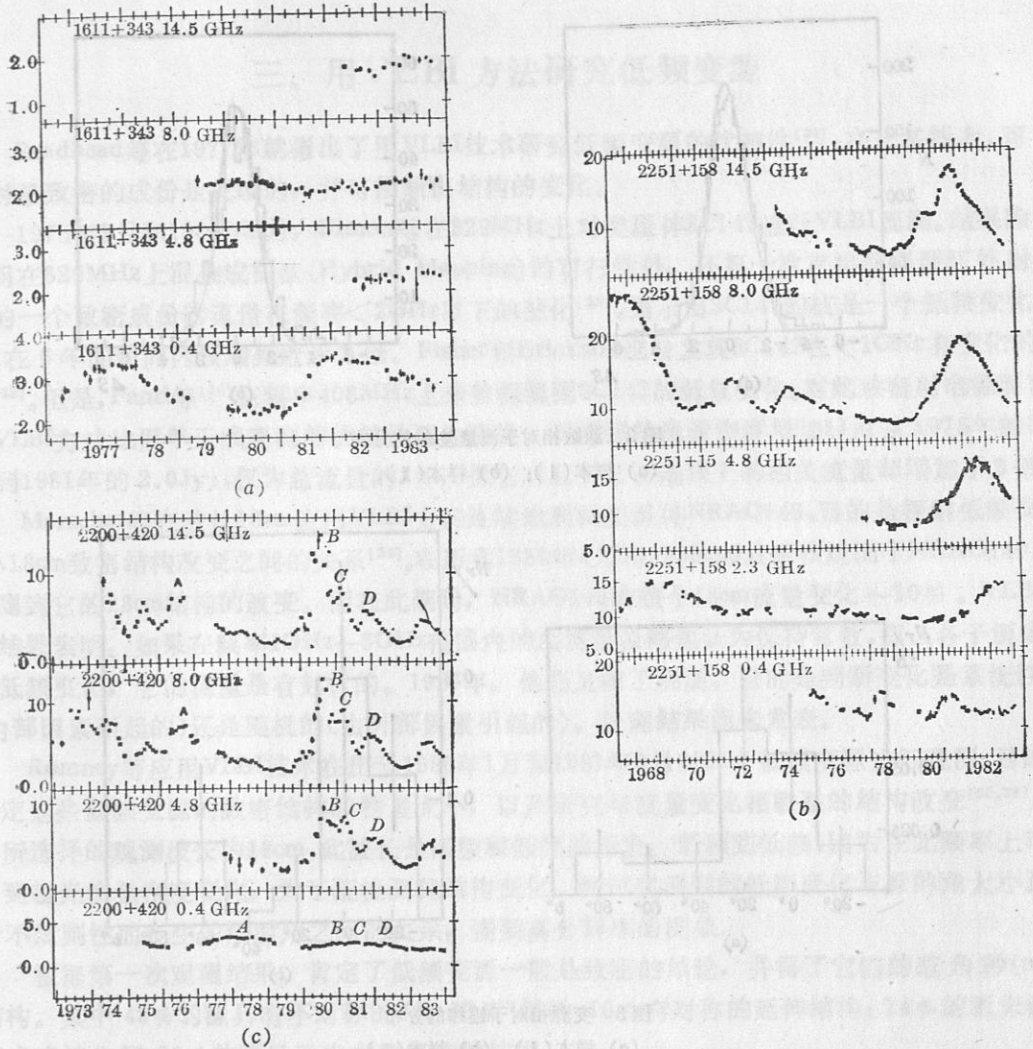
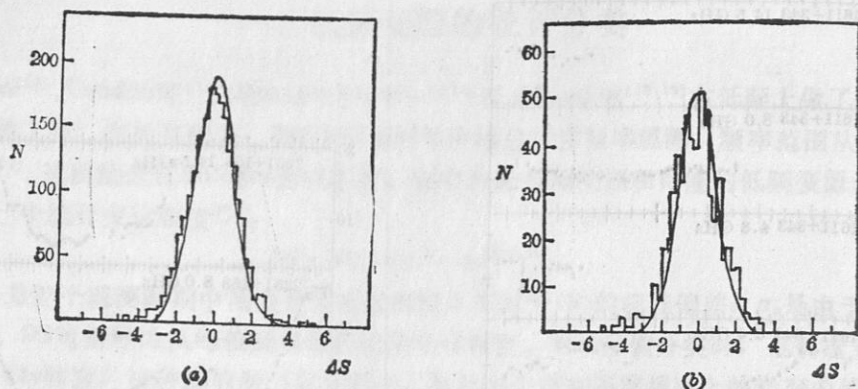


图 1 低频变源光变曲线图

- (a) L: DA406 (1611+343) 的光变曲线;
 (b) U-BBV: 3C454.3 (2251+158) 的光变曲线;
 (c) C-BBV: BL Lac (2200+420) 的光变曲线。

量变化(至少一部分)是由于星际媒质中不规则性的聚焦效应所引起的。在此假定下,河外射电源的流量能被衍射闪烁和折射闪烁所调制。观测到的时间尺度约为10分钟量级($\nu < 1\text{GHz}$)的脉冲星的闪烁,可以由星际电子密度的不规则性所引起的衍射闪烁来说明,但对河外射电天体来讲,从来没有观测到此现象。流量也可由大尺度不规则性(折射闪烁)所调制。最近, Rickett等提出流量变化是由星际媒质的折射聚焦效应引起的^[18]。按照这个解释, Cawthorne和 Rickett指出, Bologna样本^[15,16]中变源的平均银纬小于非变源的平均银纬^[19]。

为了研究低频变源的空间分布对流量变化所产生的影响, Gregorini等研究了 $S(0.408\text{GHz}) \geq 0.4\text{Jy}$ 的两个样本,它们分别被记为样本(I)和样本(II)^[20]。样本(I)由2112个射电

图2 源数相对于流量差 Δs 的分布

(a) 样本(I); (b) 样本(II)。

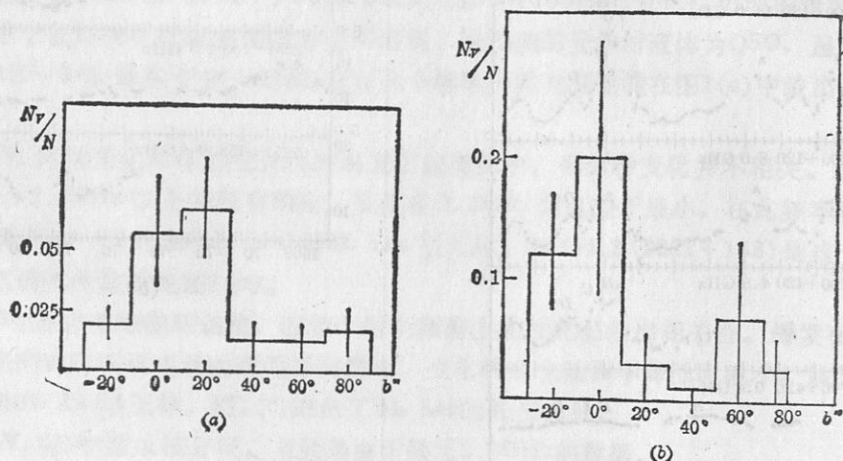


图3 变源相对于银纬的分布

(a) 样本(I); (b) 样本(II)。

源所组成,每个源在 ~ 10 年的间隔上测量了两次流量密度;样本(II)由563个源所组成,每个源在 $\sim 10-12$ 个月的时间间隔上测量了两次流量密度。计算每个源在两次测量值之间的差 Δs (为简化起见,我们略去了误差因子 ϵ_c)。图2给出源数相对于 Δs 的分布图。Gregorini等把流量为常数,概率小于0.5%的源定义为可能的变源;概率 $< 0.1\%$ 的源定义为变源。这样,样本(I)中仅有77个源为变源和可能的变源,占总数的3.6%;样本(II)中有26个是变源和可能的变源,约占总数的4.6%。图3是样本(I)和(II)中的变源和可能的变源相对于银纬的分布状况中。此项结果与Cawthorne和Rickett的结果相一致。与稳定源相比,变源有较低的银纬分布。这个分布支持低频变化的外部因素解释;在大多数情况下,低频变化也许是由于聚焦机制所引起。但是,在Padrielli等变源样本中^[17],大约有22%的源的变化是由内部原因所引起;它们主要是平坦谱源,在高、低频上的变化具有一定的相关性。在Gregorini等的样本中,由内部因素引起变化的源也是少数,最多为10—15个源。

三、用VLBI方法研究低频变源

Readhead等在1977年就指出了用VLBI技术研究低频变源的优越性^[21]:在长基线上,可见度对最致密的成份是灵敏的,并可推断出结构的变化。

1975年3月和1981年2月,Simon等在329MHz上对类星体3C147进行VLBI观测。结果除了证明在329MHz上混杂成图法(Hybrid Mapping)的可行性外,还第一次直接观测到河外射电源的一个致密成份的流量在频率 $< 2\text{GHz}$ 以下的变化^[22],揭示出3C147的核是一个低频变化成份,在6年的时间内核增亮近于2倍。Fisher和Erickson也曾发现3C147在 $< 1\text{GHz}$ 有变化的证据^[23]。但是,Fanti等^[16]在频率408MHz上未曾探测到3C147的低频变化。对此致密射电源而言,用VLBI方法比用单天线观测的优越性更为明显。观测到的流量密度增加1Jy(从1975年的0.9Jy到1981年的2.0Jy),仅为总流量的2%,但它对应于最长基线上的相关流量却增加了3倍。

Marscher等在波长18cm应用VLBI方法连续地观测类星体NRAO140,目的是探索低频变化与 $\lambda 18\text{cm}$ 致密结构改变之间的关系^[24]。在历元1984年4月和1986年9月两次观测了NRAO140,已探测到它的18cm结构的改变。而在此期间,NRAO140的整个18cm流量变化 $\sim 10\%$ 。VLBI观测结果表明:如果在频率1GHz—3GHz范围内的总流量粗略地认为保持常数,那么各子源表现出低频变化,它的流量是有起伏的。1987年,他们又做了观测,目的是判断变化是系统性的(内部因素引起的)还是随机的(由外部因素引起的)。处理结果尚未发表。

Romney等应用VLBI技术在历元1980年1月和1981年8月对21个低频变源进行观测,目的是决定这些低频变源的致密结构和物理大小,以及研究与流量变化相联系的结构改变^[25,26]。他们所选择的观测波长为18cm,此波长是高频和低频的折衷:既顾到低频,因为在此频率上可观测到超光流量密度变化;为了能检测到结构变化,测试观测到的低频变化与源的角大小及由于不规则性而产生的散射角之间的关系,需要高分辨率的图象。

根据第一次观测结果,肯定了低频变源一般是致密的结论,并得了它们的毫角秒(mas)结构。其中48%的源具有不对称的“核-喷流”结构;10%有对称的延伸结构;14%的源未被分解或略被分解;28%的源显示出有更复杂的结构。

第二次历元是对上述21个源作重新观测,并与上次的观测结果相比较后,发现有9个源显示出明显的结构改变;4个源的结构可能有变化。多数情况下,变化明显地是由于最致密成份中的流量改变所致。尽管两次观测的样本仅为21个有低频变化的致密源,但两次结果可以与Padielli等的分类建立起某种联系:

样本中,有两个源属于L类。比较这两个源的二次历元的观测结果,均未探测到结构的变化。两源之一,DA406,在两次历元之间408MHz上的流量有明显的增加。如果用相对论束射模型来解释,那么Lorentz因子的下限应有 ~ 12 。相应于此值,源应有0.7mas的扩展,但是未被人们检测到。

样本中,归属于U-BBV的源有5个。它们显示出复杂的结构改变,不能用角扩展来解释。由于高、低频变化之间无相关性,哪些参数能被用来估计18cm的活动性是不明确的。如果有谱信息,那么就可以讨论低频变化和18cm观测到的结构改变之间的关系,也可决定是那个成

份引起低频变化。如根据3C454.3的谱资料,我们可以肯定,408MHz的变化大部份来自有延伸结构的喷流成份。

三个源属于C-BBV,两个源可能属于这一类。后面两个由于分辨率的原因,无法测量到所期望的扩展率。属于C-BBV的三个低频变源,由两历元间在408MHz上的变化和红移之可推断它们的亮度温度(均 $\geq 10^{12}$ K)和Lorentz因子,并由此可导出它们的扩展率。观测结果与理论推断是一致的。如果假定此角扩展率能外推到米波发射区,那么,结果与相对论束射模型一致,能解释观测到的变化。三个源中,BL Lac已被证明为超光速扩展源^[27];其余两个源,变化可由最致密成份的角径的增加来解释,它们的角扩展率在0.15—0.5mas/yr,所以是视超光速扩展源的遴选者。

尽管样品不能算很多,但是低频变化和结构变化之间的关系已略有眉目。在C-BBV类的源中,结构中的视超光速现象已被观测到;相对论模型的解释也许是一个满意的解释。其余的源,包括U-BBV和L类源,结构改变和低频变化之间的关系仍不清楚;这一类源中,如果我们认为低频变化是由内部因素所引起,那么它们应有一个扩展,但未被观测到。所以VLBI的观测结果支持这类源的低频变化是由外部因素所造成。

为了进一步研究源的低频变化和致密结构变化之间的关系,1987年10月,对低频源的样品在18cm上又做了VLBI观测,数据处理尚未完成。为了同样的目的,一年前完成了对低频变源的样品在6cm上的VLBI观测。

四、结 束 语

(1) 自从河外射电源的低频变化被发现以来,在相当长的一段时间里引起了射电天文学家的极大兴趣。显示LFV的源与显示其他“极端”特性的源诸如平坦谱源,高频变化源,超光速扩展源,光学激变源和高偏振类星体等之间有某种结合。此外,在一定的假定下,LFV的平均时间尺度意味着亮度温度可达 10^{14} — 10^{16} K,它给某些解释模型带来严重的困难。许多理论模型,包括苛刻条件下的相干辐射机制,被提出来解释低频变化现象。不幸的是:由于银河系慢闪烁模型的提出,河外射电天文学家对低频变化现象的兴趣似乎有所减弱。大量的研究资料证实闪烁的存在,并明确指出“聚焦效应”是大多数低频变源变化的主要因素,由于内部因素而引起变化的低频变源是少数。

由于种种原因,低频变化的外部因素没有被人们充分注意到,在早先的一些评论性的文章里,此因素不是被忽略便是被淡化了。

(2) 河外射电源的低频变化现在被认为是一个与致密射电源有关联的经典天体物理课题。继续对此课题进行长期研究仍有它的重要性,如果可能的话,应研究属于L和U-BBV的低频变源与属于C-BBV的低频变源之间的差别。根据对已有的资料的分析,我们觉察到超光速扩展源及其遴选者绝大部分是属于C-BBV和N-BBV的低频变源,而C-BBV的低频变源全部是超光速扩展源和这类源的遴选者。这种趋向为我们寻找新的视超光速致密射电源提供了一条重要的线索。

本文是在国家自然科学基金1870613支持下完成的。

参 考 文 献

- [1] Sholomitskii, G. B., *Sov. Astr.*, 9 (1965), 516 (English Translation).
 [2] Hunstead, R. W., *Ap. J.*, 12 (1972), 193.
 [3] 尹其丰, 天文学进展, 1 (1983), 188.
 [4] 尹其丰, 天文学进展, 2 (1984), 41.
 [5] 钱善瑞等, 天文学进展, 3 (1985), 78.
 [6] 钱善瑞等, 天文学进展, 4 (1986), 33.
 [7] Kellermann, K. I. and Pauliny-Toth, I. I. K., *Ap. J.*, 155 (1969), L71.
 [8] Rees, M. J., *M. N. R. A. S.*, 135 (1967), 345.
 [9] Blandford, R. D. and Königl, A., *Ap. J.*, 232 (1979), 34.
 [10] Shapirovskaya, N. Y. A., *Sov. Astr.*, 22 (1978), 544 (English translation).
 [11] Romney, L., (Private communication, 1988).
 [12] Cotton, W. D., *Ap. J.*, 204 (1976), L63.
 [13] Condon, J. J. et al., *Astr. J.*, 84 (1979), 1222.
 [14] Spangler, S. R. and Cotton, W. D., *Astr. J.*, 86 (1981), 5.
 [15] Fanti, C. et al., *Astr. Astrophys. Suppl.*, 35 (1979), 359.
 [16] Fanti, C. et al., *Astr. Astrophys. Suppl.*, 45 (1981), 61.
 [17] Padrielli, L. et al., *Astr. Astrophys. Suppl.*, 67 (1987), 63.
 [18] Rickett, B. J. et al., *Astr. Astrophys.*, 134 (1984), 390.
 [19] Cawthorne, T. V. and Rickett, B. J., *Nature*, 315 (1985), 40.
 [20] Gregorini, L. et al., *Astr. Astrophys.*, 168 (1986), 25.
 [21] Readhead, A. C. S. et al., *Ap. J.*, 215 (1977), L13.
 [22] Simon, R. S. et al., *Nature*, 302 (1983), 487.
 [23] Fisher, J. R. and Erickson, W. C., *Ap. J.*, 242 (1980), 884.
 [24] Marscher, A. et al., *BAAS* 20 (1988), 24.
 [25] Romney, J. et al., *Astr. Astrophys.*, 135 (1984), 289.
 [26] Padrielli, L. et al., *Astr. Astrophys.*, 165 (1986), 53.
 [27] Mutel, R. L. and Phillips, R. B., *IAU Symp. No. 110*, p.117, (1984).

(责任编辑 刘金铭)

The Headway about the Study of Low Frequency Variables

Zhang Fujun

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The focusing mechanism due to irregularities in the interstellar medium may be responsible for LF variations in the majority of cases. Some variations could be intrinsic. The results of VLBI observation show that the former was not found to have any structural variability, and the structural variations as well as the correlated variability of the latter both seem to require a superluminal (or perhaps other relativistic) phenomenon. Most of the LF variables which show broad-band correlated variability are superluminal sources or their candidates. It provides us an important way for searching superluminal sources.