

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.04.07

298 颗 VLBA 校准源的射电成图和 结构效应分析

何 旋^{1,2}, 舒逢春¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高甚长基线阵列 (very long baseline array, VLBA) 校准射电源位置的精度, 建立新一代的国际天球参考架 (international celestial reference frame, ICRF), VLBA 开展了第二个历元校准源巡天观测 (VLBA calibrator survey II, VCS-II)。BG219I 是其中第 8 组观测, 共有 298 颗射电源在 S 和 X 双波段被成功检测到, 其中 48 颗是首次被检测到的射电源。给出了这 298 颗射电源的成图结果, 并根据它们的亮度分布, 用 δ 函数分量建模, 计算出这些射电源的结构时延和结构指数。研究了致密度跟结构指数的关系, 发现结构指数越小的射电源, 具有越大的致密度。还统计了 21 颗谱指数小于 -0.8 的陡谱射电源, 发现它们在单个波段或者两个波段的结构指数均超过 3.0, 表明这些射电源不够致密, 因而不适合高精度的天体测量。最后, 研究了射电源的位置精度与结构指数的关系, 发现射电源的位置精度随着结构指数的变大而逐渐降低。

关键词: 国际天球参考架; 类星体; 甚长基线阵列; 干涉测量

中图分类号: P161 **文献标识码:** A

1 引 言

从 1994 年到 2007 年, 甚长基线阵列校准源巡天项目 (VLBA calibrator survey, VCS) 开展了 6 轮 S/X 双波段观测, 获得了约 2 900 颗射电源的位置、结构图像和流量密度信息^[1-6]。VCS 的观测结果满足了 VLBA 相位参考观测的需要, 这些校准源也已纳入 2009 年发布的第二代国际天球参考架 (ICRF)。为了进一步提高 VLBA 校准源的位置精度, 建立新一代 ICRF, VLBA 从 2014 年到 2015 年对 2 400 颗射电源进行了第二个历元校准源巡天观测 (VCS-II), 其中绝大多数射电源在早期的 VCS 项目中已观测过, 但其位置精度有待提高。由于采用了新的数据采集系统, 与早期的 VCS 观测相比, X 和 S 波段的灵敏度分别提高了

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-05-18

资助项目: 国家自然科学基金 (U1331205)

通讯作者: 舒逢春, sfc@shao.ac.cn

4.8 倍和 2.8 倍。2 400 颗目标射电源分为 8 组, 每组观测 24 h, 包含 300 颗目标射电源。观测结果表明, 成功检测到的射电源有 2386 颗, 其中 324 颗射电源是首次在 S/X 波段检测到。这些被检测到的射电源至少有 3 个观测量, 对应每个观测量的条纹拟合信噪比均大于 7。2386 颗射电源的平均位置精度从赤经和赤纬方向的 1.14×10^{-3} s 和 $(1.98 \times 10^{-3})''$ 分别提高到 0.24×10^{-3} s 和 $(4.1 \times 10^{-4})''$ 。BG219I 为其中第 8 组的观测代码^[7]。

传统的大地测量/天体测量的甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 观测侧重于提高射电源的位置精度, 较少考虑射电源的成图效果^[8, 9]; 而 VCS-II 观测不仅能获得射电源的高精度位置, 同时也能获得射电源的 VLBI 成图结果。在毫角秒尺度上, 大多数致密射电源在空间中呈现出延展的结构, 而且射电源的结构随时间和频率将发生显著变化。VLBI 带宽综合时延测量中的主要系统误差之一便是射电源的结构效应。Thomas^[10] 在 1980 年发现带宽综合时延和时延率中存在的射电源结构效应, 并推导了理论公式。Charlot^[11] 在 1990 年根据射电源的亮度分布建模, 改正了射电源结构对 VLBI 群时延和相时延率的影响, 第一次实现了射电源结构效应的量化。为了评估射电源的结构效应对 VLBI 时延测量的影响, Fey 和 Charlot^[12] 在 1997 年利用结构时延的中间值定义了结构指数 (*SI*), 他们将射电源简单地分为 4 类, 即 *SI* 从 1 到 4, 并且建议 *SI* 大于 3 的射电源不应该用于高精度的天体测量。2009 年, Ma 等人^[13] 根据结构时延的中间值定义了连续的结构指数 *SI_c*。2017 年, Xu 等人^[14] 利用闭合时延的分析结果定义了连续的闭合结构指数。相对 *SI* 而言, 连续的闭合结构指数并不依赖于射电源的图像。

VLBI 校准源主要是通过射电源的流量密度、致密性和位置精度选取的。以往射电源的致密性只能通过图像来判断, 并没有具体的衡量指标, 因此, 对射电源的结构效应建模量化, 获得其结构时延和结构指数, 对衡量射电源的致密性和校准源的选取有参考意义。1996 年和 1997 年, Fey 等人^[12, 15] 利用 163 颗射电源的 S/X 双频 VLBA 观测图像结果, 计算和分析了它们的平均结构时延和结构指数。2000 年, Fey 和 Charlot^[16] 利用 VLBA 观测的图像结果计算了另外 225 颗射电源的结构时延和结构指数。截止到 2000 年, 已获得 388 颗 ICRF 射电源的结构时延和结构指数。在第二代 ICRF 的 3 414 颗射电源中, 则只有 707 颗射电源的 *SI_c* 计算结果^[13, 17], ICRF-2 的定义源主要选取位置具有稳定性和结构指数小于 3.0 的射电源。Bourda 等人^[18] 在 2011 年利用 VLBI 图像计算了 S/X 双频欧洲 VLBI 网 (European VLBI Network, EVN) 和 VLBA 观测的 105 颗弱射电源的结构时延和结构指数, 这些射电源被选为连接射电参考架和盖亚 (global astrometric interferometer for astrophysics, Gaia) 光学参考架的候选源。人们发现约 50% 的弱射电源不适合高精度的天体测量。

我们利用 VCS-II 第 8 组观测数据, 开展了射电源成图和结构效应分析。第 2 章主要描述了 BG219I 项目的观测和成图处理的细节。第 3 章中, 我们给出了射电源结构效应的量化方法和计算结果。在第 4 章, 我们验证了射电源结构模型的有效性, 对射电源的致密度、谱指数和位置精度与其结构指数的关系进行了统计分析。最后, 进行总结和展望。

2 观测与数据处理

2.1 观测概况

代码为 BG219I 的观测项目是 VCS-II 巡天计划的第 8 组,也是最后一组 S/X 双频 VLBA 观测。观测实验从 2015 年 3 月 17 日 07 点 57 分开始,持续 24 h,观测了 367 颗射电源,其中目标源有 300 颗,时延观测量总数达到 25 801 个。实验采用了 RDBE 数字化后端和 Mark5C 数据记录系统,同时记录 16 个 IF (intermediate frequency) 通道的观测数据,每个 IF 带宽 32 MHz, 2 bit 采样,记录速率 $2 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 。S 波段共有 4 个 IF 通道,它们的天空频率分别为 2 220.0, 2 252.0, 2 284.0 和 2 348.0 MHz。另外 12 个 IF 通道记录 X 波段的观测数据,天空频率分别为 8 460.0, 8 492.0, 8 524.0, 8 556.0, 8 620.0, 8 652.0, 8 716.0, 8 748.0, 8 812.0, 8 844.0, 8 876.0 和 8 908.0 MHz。

图 1 展示了 300 颗目标射电源在天空中的位置分布。这 300 颗射电源被分为 50 组,每组包含 6 颗位置比较接近的射电源,角距离为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 。观测纲要中,对每组射电源观测前,先对一颗强校准源进行约 20~30 s 的短时间观测,以消除对流层误差,之后对 6 颗目标源依次进行观测。然后,天线转向另外一颗强校准源和 6 颗目标源。对一组目标源和校准源共观测约 15 min。每颗目标源均有 2 个观测片段 (scan),观测片段指的是 VLBI 观测台站对同一颗射电源的短时间连续观测,通常不超过 15 min。对目标源的每个 scan 观测约为 60~120 s,两个 scan 之间相隔几小时。VLBA 网利用 DiFX 软件相关处理机对观测数据进行相关处理,最后将输出结果保存为 FITS-IDI 格式的可见度数据^[7]。

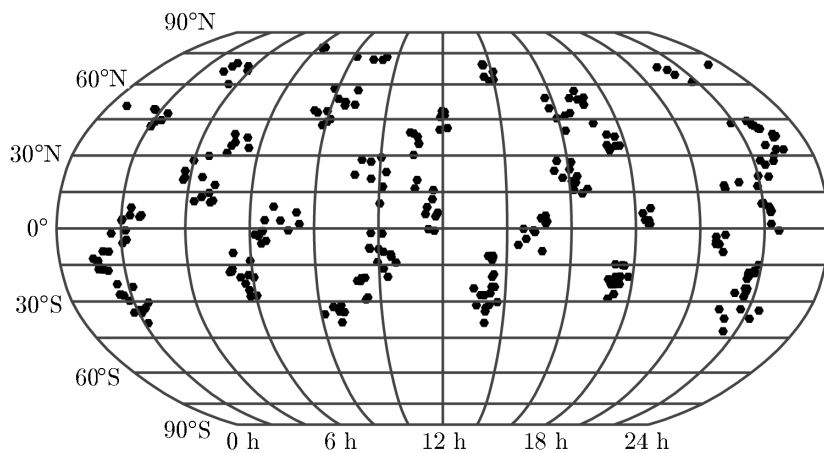


图 1 300 颗射电源的位置分布图

2.2 数据处理

我们从美国国立射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory, NRAO) 数据库下载了本次观测实验的 FITS-IDI 格式数据。根据 PIMA^[19] 软件的标准处理流程,对数据进行了条纹拟合、相位校准、带通校准和幅度校准^[20]。通过时域和频域相干积分,我们将每个射

电源的 S 和 X 波段可见度数据和权重分别写入单个 FITS 格式文件; 然后, 利用 PIMA 软件的自动成图命令调用 DIFMAP^[21] 软件, 并完成可见度数据的自校准、逆傅里叶变换和洁化^[22]; 最后, 人工检查射电源成图结果, 对成图质量较差的射电源重新进行可见度数据的自校准、逆傅里叶变换和洁化。通过上述过程, 在提高成图工作效率的同时, 确保所有射电源的成图质量。

本次观测中, 我们发现约 40% 的射电源需要通过人工方式重新成图, 因为有些射电源的旁瓣很亮, 程序误认为它们是真实的成分。另外, 有些射电源的结构非常延展, 超出程序设定的固定显示窗口, 因此, 部分真实成分没有被洁化。最后, 一些有问题的基线或者台站数据需要人工判断剔除。BG219I 实验中所有射电源的自然加权下的成图结果已经公示在 http://astrogeo.org/vlbi_images/ 上。

在 300 颗目标源中, J1547+4937 和 J0134-093B 这两颗射电源并未在双频观测中被检测到, 我们只分别统计了其余 298 颗射电源在 S 波段和 X 波段的成图结果。S 波段最大的动态范围约为 3 132:1, 平均动态范围约为 426:1, 每波束平均噪声约为 0.49 mJy; X 波段最大的动态范围约为 2 618:1, 平均动态范围约为 405:1, 每波束平均噪声约为 0.57 mJy。图 2 显示了 298 颗目标源在 S 和 X 波段 VLBI 图像的峰值和均方根噪声。从图中可以看出, 射电源的峰值流量密度的强弱不会对其 VLBI 图像的均方根噪声造成显著影响。我们利用 EVN Calculator^[23] 计算了自然加权下各个波段的理论噪声。我们首先假设一个射电源最少有 180 s 的积分时间, S 波段的数据记录速率是 $512 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$, 每波束理论噪声为 0.34 mJy; X 波段的数据记录速率是 $1\,536 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$, 每波束理论噪声为 0.19 mJy。在 S 波段, VLBI 图像均方根噪声小于理论均方根噪声的射电源一共有 116 颗, 小于 3 倍理论均方根噪声的射电源有 286 颗; 在 X 波段, VLBI 图像均方根噪声小于理论均方根噪声的射电源有 1 颗, 小于 3 倍理论均方根噪声的射电源有 224 颗。

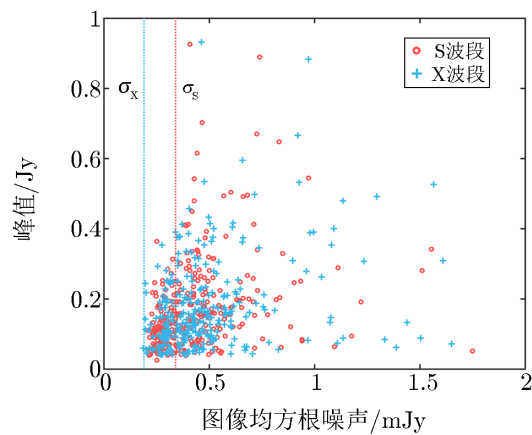


图 2 298 颗射电源 VLBI 图像的峰值和均方根噪声

3 模型和结果

为了定量描述射电源的结构效应, 利用射电源的结构引起的附加相位对频率和时间作偏导, 从而得到射电源的结构时延。射电源的形态引起的结构效应与参考点 P_0 的选取有关。参考点理论上射电源天体测量的绝对位置, 但现实情况是, 没有明确的方法确定这个参考点的位置。1997 年, Fey 和 Charlot^[12] 使用最小二乘法选取参考点, 发现 P_0 在射电源亮温度

分布的峰值附近或峰值处。我们选取的参考点是在那些流量密度大于 1/6 峰值流量密度的所有分量的质心。因为流量密度更大的分量，其信噪比更高，结果就更可信。

为了得到射电源的结构时延，需要建立一个精确的模型来量化它的结构效应。射电源的亮度分布可以用若干个 δ 函数分量表示。每个 δ 函数分量可以用 3 个参数描述，极坐标和流量密度。亮度分布 $I(P)$ 可用 δ 函数表示^[11] 为：

$$I(P) = \sum_{k=1}^n S_k \delta(\mathbf{OP} - \mathbf{OP}_k) \quad . \quad (1)$$

其中， P_k 和 S_k 是第 k 个分量的位置和流量密度， O 是天空平面的原点， \mathbf{OP} 是天空平面的原点到射电源亮度分布区域内任意一点的矢量， \mathbf{OP}_k 是天空平面的原点到第 k 个分量的矢量。射电源的结构效应在带宽综合观测中引起的相位 ϕ_s 为^[11]：

$$\phi_s = \frac{\omega}{c} \mathbf{B} \cdot \mathbf{OP}_0 + \arctan\left(-\frac{Z_s}{Z_c}\right) \quad . \quad (2)$$

其中， \mathbf{OP}_0 是天空平面的原点到选取的参考点的矢量， $\omega = 2\pi f$ 是角频率， f 是观测频率， c 是光速， \mathbf{B} 为基线矢量， Z_c 和 Z_s 的表达式为^[11]：

$$Z_c = \sum_{k=1}^n S_k \cos\left(\frac{\omega}{c} \mathbf{B} \cdot \mathbf{OP}_k\right) \quad , \quad (3)$$

$$Z_s = \sum_{k=1}^n S_k \sin\left(\frac{\omega}{c} \mathbf{B} \cdot \mathbf{OP}_k\right) \quad . \quad (4)$$

我们忽略了在同一个带宽中由于频率的变化而引起的射电源的结构和流量密度的变化，将 S 波段的参考频率设置为 2 280 MHz，X 波段的参考频率设置为 8 650 MHz。因为，S 波段的带宽跨度为 160 MHz，X 波段的带宽跨度为 480 MHz，在这狭小的带宽跨度中，参考频率的变化范围在 7% 以内。由于频率的微小变化引起的结果差异很小，所以我们选择一个参考频率（不是每个 IF 的中心频率）参与射电源的结构时延的计算。射电源的结构效应在带宽综合观测中引起的时延 τ_s 为^[11]：

$$\tau_s = \frac{\partial \phi_s}{\partial \omega} \quad . \quad (5)$$

利用式 (2)—(5)，可得到结构时延 τ_s ，其详细表达式为^[11]：

$$\tau_s = \frac{1}{c} \mathbf{B} \cdot \mathbf{OP}_0 + \left(Z_s \frac{\partial Z_c}{\partial \omega} - Z_c \frac{\partial Z_s}{\partial \omega} \right) / (Z_c^2 + Z_s^2) \quad . \quad (6)$$

当射电源的亮度分布模型和参考点确定后，结构时延只跟基线矢量在 (u, v) 平面投影的矢量坐标有关。我们计算了以地球直径为半径的 (u, v) 平面网格上的 512×512 个像素点的结构时延，地球直径相当于理论上 VLBI 观测的最长基线。射电源在 S 波段的结构通常要比它在 X 波段的延展，这就导致射电源在 S 波段的结构时延要比 X 波段的大很多，但在根据 S/X 双波段观测时延消除电离层效应的过程中，S 波段结构时延对时延观测量的影响要小很

多。我们假设射电源在 S 和 X 波段的结构时延分别是 τ_{SX} 和 τ_{SS} , 相应的观测频率 f_S (2 280 MHz) 和 f_X (8 650 MHz), 则消除电离层影响的射电源的结构时延 τ_{is} 的表达式为:

$$\tau_{is} = c1 \cdot \tau_{SX} - c2 \cdot \tau_{SS} \quad . \quad (7)$$

其中, $c1$ 和 $c2$ 分别是 X 和 S 波段的比例因子, 分别表示为:

$$c1 = \frac{f_X^2}{f_X^2 - f_S^2} \approx 1.08 \quad , \quad (8)$$

$$c2 = \frac{f_S^2}{f_X^2 - f_S^2} \approx 0.08 \quad . \quad (9)$$

为了更好地反映带宽综合双频观测下射电源的结构时延的大小, 我们将两个波段的结构时延分别乘以一个比例因子: S 波段的为 0.08, X 波段的为 1.08^[12]。

最后, 我们分别统计了射电源在 S 波段和 X 波段的结构时延的平均值 τ_{mean} 、均方根 τ_{rms} 、最大值 τ_{max} 和中位数 τ_{median} , 大于地球直径的基线矢量的结构时延不参与统计。根据结构时延的中位数定义射电源的结构指数 SIC , 结构指数的定义为^[13, 17]:

$$SIC = 1 + 2 \lg \tau_{median} \quad . \quad (10)$$

当 $\lg \tau_{median} < -0.5$ 时, $SIC = 0$ 。

图 3 中不同的颜色显示了 (u, v) 平面网格上的 512×512 个基线矢量的结构时延大小。计算的每条基线的 τ_s 从小到大表现为从灰色到红色的渐变过程。图 3 中展示了 J2235+3418 和 J0440+1437 两颗射电源的 X 波段的结构时延, 横纵坐标均为相应波长的 10^6 , 黑色的圆圈的半径等于地球直径。另外, 用 DIFMAP 软件处理射电源的可见度数据时没有考虑谱指数对射电源结构的影响。谱指数 α 的表达式 $S_f \propto f^\alpha$, S_f 是总流量密度, f 是相应观测的频率。

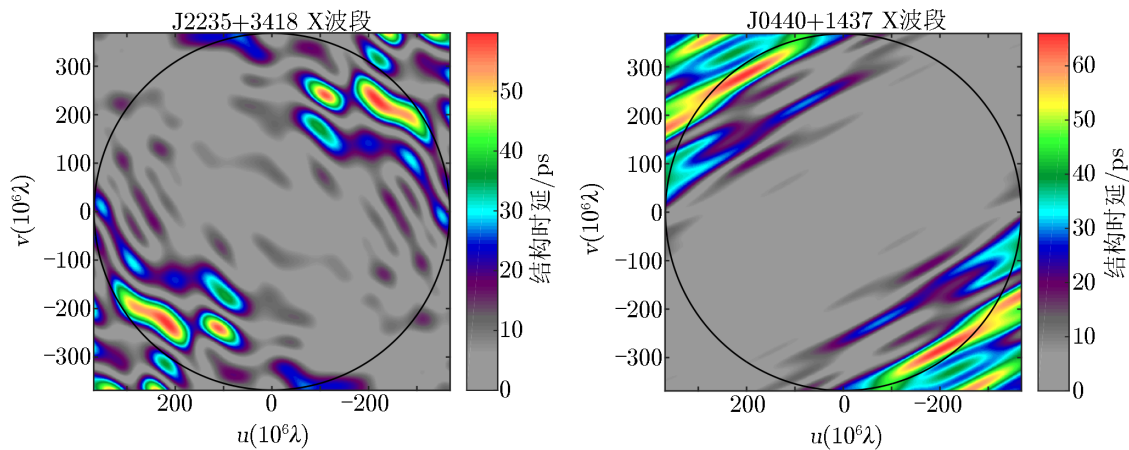


图 3 射电源 J2235+3418 和 J0440+1437 在 X 波段的 (u, v) 平面上所有投影的基线矢量的结构时延

4 分析和讨论

为了验证结构时延模型的可靠性,我们将本文模型算得的结构时延中位数 τ_{s1} 与 Fey 和 Charlot^[12] 在 1997 年算出的 τ_{s2} 进行对比,其中 $\Delta\tau_s = \tau_{s1} - \tau_{s2}$ 。计算所用到的数据来自同一个历元观测的数据,每个射电源的 δ 函数分量是利用美国国家航空航天局河外数据库 (NASA/IPAC Extragalactic Database, NED)^[24] 上下载的 FITS 格式的图像文件进行提取从而得到。从表 1 最后一列可以看出,两者差异基本都在 10% 以内。主要是因为参考点选取不一样,一个 1 000 km 的基线,参考点差 0.001" 时,会产生约 16 ps 的差异。另外,射电源 0539-057 在 2.32 GHz 处呈现小尺度结构,大小在 $\pm 0.01''$ 以内,但是在图像约 $(-0.06 \text{ s}, 0.04'')$ 的位置发现 15 个 δ 函数分量,它们的流量密度为 0.09~1.80 mJy。如果把这些 δ 函数分量考虑进去,我们得到的结构时延是 3.8 ps,这与 Fey 和 Charlot 的结果相差了 1.5 ps。所以,那些离图像中心很远的弱分量也会对射电源的结构时延产生影响。选取的参考频率不一样,则计算结果也会产生微小的差异。

表 1 结构时延模型的验证

射电源	结构指数	频率/GHz	τ_{s1} /ps	τ_{s2} /ps	$\frac{\Delta\tau_s}{\tau_{s1}}$ / (%)
0237-233	3	2.32	12.6	12.7	-0.7
	4	8.55	215.5	238.0	-10.4
0507+179	2	2.32	5.8	5.9	-1.7
	2	8.55	9.8	9.6	2.0
0536+145	1	2.32	0.5	0.5	0
	1	8.55	1.1	1.1	0
0539-057	1	2.32	2.4	2.3	4.2
	2	8.55	6.3	6.5	-3.2
0544+273	1	2.32	1.3	1.4	-7.7
	1	8.55	1.6	1.6	0
0600+177	1	2.32	1.7	1.7	0
	2	8.55	4.4	4.8	-9.0
0609+607	2	2.32	4.8	5.4	-12.5
	3	8.55	18.2	17.4	4.4

图 4 展示了 298 颗射电源的结构指数的分布,两条虚线分别表示这些射电源在 S 和 X 波段的结构指数的中位数, S 波段的结构指数的中位数 $SIc_{ms} = 1.76$, X 波段的结构指数的中位数 $SIc_{mx} = 3.16$ 。据统计, S 波段结构指数超过 3.0 的射电源有 41 颗,结构指数超过 4.0 的射电源有 15 颗; X 波段中射电源的结构指数超过 3.0 的射电源有 167 颗,结构指数超过 4.0 的射电源有 58 颗。当只考虑射电源内部结构时,根据 X 波段的统计结果,我们发现结构指数超过 3.0 的射电源 (约有 56% 的射电源),并不适合用于高精度的天体测量。另外,由于射电源的结构指数只是对一个历元的观测数据进行计算而得到,并且每个射电源观测时间比较短,它们的结构时延可能会随时间的推移而发生变化。

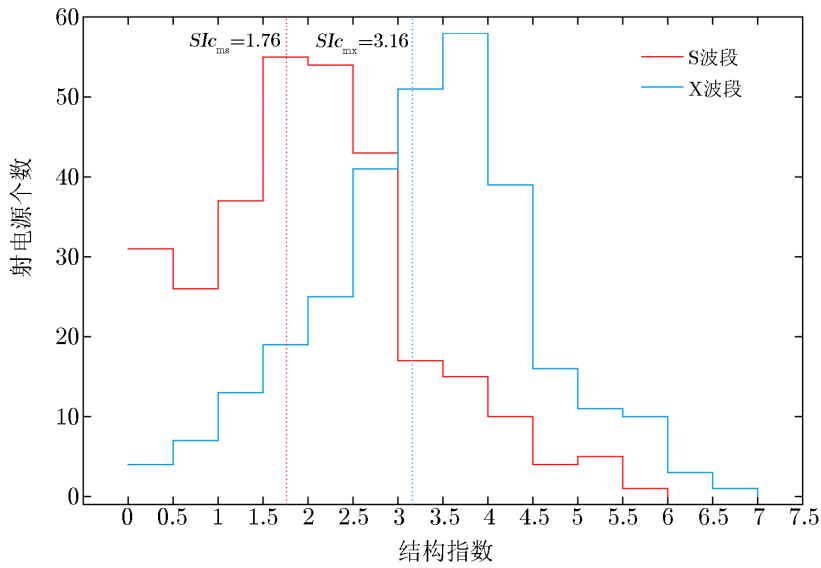


图 4 298 颗射电源的结构指数的分布

我们将峰值的流量密度与总流量密度的比值定义为致密度。致密度的值应该在 0~1.0 范围内, 当致密度为 1.0 时, 意味着射电源就是一个点; 当致密度为 0, 结构指数也为 0 时, 射电源没有被探测到; 当致密度为 0, 结构指数特别大时, 射电源的结构应该是一个很大很亮的饼状; 当致密度不为 0, 结构指数为 0 时, 射电源的结构是致密的, 或者对称的。298 颗射电源的致密度和它们结构指数的分布如图 5 所示。我们用二阶多项式对这 298 个散点进行拟合, 半透明的带是根据拟合的标准偏差设置的置信区间。S 波段和 X 波段的致密度的中位数 m_S 和 m_X 均是 0.58。由图 5 可知, 射电源的结构指数越大, 即射电源结果越延展, 它的致密度就越小。

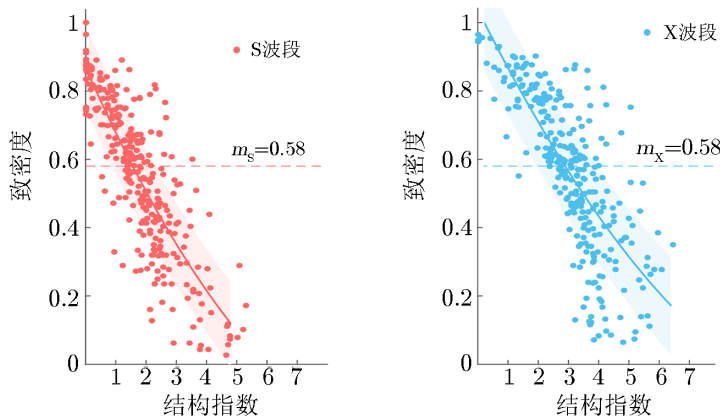


图 5 298 颗射电源的致密度与结构指数

图 6 展示了 298 颗射电源在 S 和 X 波段的总流量密度和它们的谱指数的分布。S 波段的总流量密度范围为 40~2 580 mJy，总流量密度的中位数是 220 mJy；X 波段的总流量密度范围为 40~1 450 mJy，总流量密度的中位数是 170 mJy。谱指数的范围为 $-2.21 \sim 0.74$ ，中位数是 -0.14 。这些射电源中，谱指数小于 -0.8 的陡谱射电源一共有 21 颗。根据 Kellermann 和 Pauliny-Toth 的研究，一个延展的射电源，它的谱指数应该小于 -0.8 ^[25]。这些陡谱射电源及它们在 S 和 X 波段的结构指数列在表 2 中。这 21 颗射电源的结构指数在单个波段或者两个波段都超过了 3.0，说明射电源的谱指数小于 -0.8 时，射电源通常不够致密。

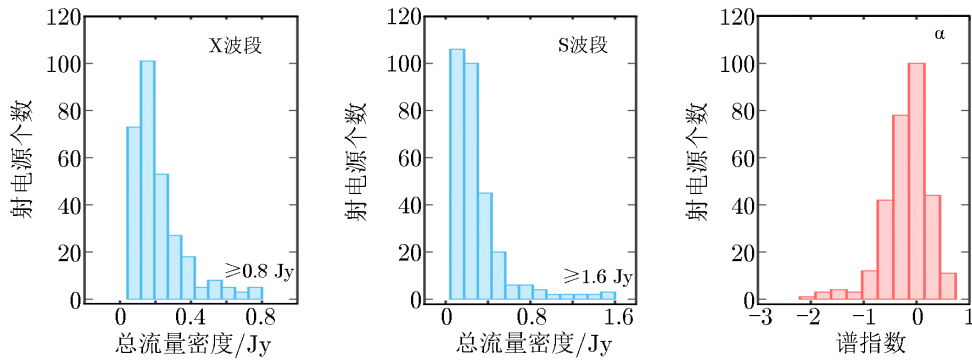


图 6 298 颗射电源的总流量密度和谱指数的分布

表 2 21 颗陡谱射电源及其结构指数

射电源	连续结构指数		射电源	连续结构指数		射电源	连续结构指数	
	S 波段	X 波段		S 波段	X 波段		S 波段	X 波段
J0205-3444	2.46	3.52	J0711+0048	3.82	4.24	J0935-2820	5.32	4.20
J0943-0819	4.78	5.72	J1023-1140	2.18	3.79	J1111+1955	3.86	3.36
J1155+4555	3.76	5.48	J1203+4632	3.56	4.84	J1345-3015	3.55	4.42
J1400+6210	4.64	5.40	J1435-0414	1.86	4.02	J1506-0919	3.11	4.99
J1628+4734	2.48	3.67	J1824+0322	3.26	4.49	J2047-0236	4.68	1.29
J2125+6423	3.77	4.72	J2137-2042	4.72	5.63	J2138-1810	4.06	5.68
J2212+0152	5.04	5.97	J2303+3853	2.85	3.37	J2307+3802	4.71	6.47

所有观测的射电源中，有 48 颗首次在 S 波段和 X 波段检测到。由于这些射电源的位置精度相对较低，所以，我们只统计了其余 250 颗射电源的位置精度在不同的 X 波段结构指数区间内的中位数和平均值。这 250 颗射电源在赤经方向的位置精度约为 1 ms，在赤纬方向的位置精度约 0.001"。根据表 3 统计的结果可以看出，随着结构指数的变大，位置精度的中位数和平均值都在逐渐变大。当结构指数超过 4.0 时，射电源的位置精度明显降低。我们分析了可能的原因，对于结构指数大的射电源，其相关流量密度在较长的基线上会降低，从而导致条纹信噪比和时延测量精度的降低，甚至在某些基线上，检测不到条纹，导致观测数量的减少。

表 3 250 颗射电源的位置精度及其结构指数

连续结构指数	结构时延 中位数/ps	射电源 个数	位置精度			
			中位数		平均值	
			赤经/ms	赤纬/(10^{-3})''	赤经/ms	赤纬/(10^{-3})''
小于 2.00	0~3.16	42	0.14	0.24	0.16	0.31
2.00~3.00	3.16~10.00	64	0.15	0.26	0.18	0.32
3.00~4.00	10.00~31.62	99	0.18	0.30	0.21	0.40
大于 4.00	大于 31.62	65	0.25	0.42	0.36	0.57

5 总结与展望

通过 VCS-II 天体测量巡天观测, 我们不仅提高了 VLBA 校准源测量的位置精度, 还获得了 VLBA 校准源的图像。BG219I 为其中的第 8 组观测, 在 300 颗目标射电源中, 共检测到 298 颗。得益于 VLBA 灵敏度的提高, 有 48 颗射电源是首次检测到。我们通过巡天观测获得的 298 颗射电源的成图结果, 定量分析了射电源的结构效应, 主要得到以下结果:

(1) 利用 DIFMAP 软件对 298 颗射电源进行了成图, 并得到射电源图像的峰值和均方根噪声。

(2) 根据射电源成图得到的亮度分布, 用 δ 函数分量建模, 计算出射电源结构时延和结构指数。所得结果可作为射电源天体测量精度评估的重要依据。

(3) 利用参考文献 [12] 中的相同历元的 7 颗射电源数据, 进行了射电源结构时延模型验证。我们与 Fey 的计算结果误差基本在 10% 以内, 这个精度在可接受范围内。

(4) 利用峰值和总流量密度计算了观测射电源的致密度, 并研究致密度跟结构指数的关系, 发现结构指数越小的射电源, 致密度越接近 1。

(5) 根据射电源的总流量密度计算了谱指数, 其中谱指数小于 -0.8 的射电源共有 21 颗, 它们在单个波段或者两个波段的结构指数均大于 3.0, 这说明这些射电源不够致密, 因而不适合高精度的天体测量。

(6) 研究了射电源的位置精度和结构指数的关系, 发现随着结构指数的变大, 射电源的位置精度逐渐降低。尤其是射电源的结构指数大于 4.0 时, 射电源的位置精度明显降低。

上述工作对于 VLBI 校准源的选取和天体测量精度评估具有参考价值。下一步我们将根据射电源真实的 (u, v) 覆盖计算每条基线的结构时延, 并将结构时延引入 VLBI 数据分析中, 以评估射电源的结构时延对位置解算的影响。

参考文献:

- [1] Beasley A J, Gordon D, Peck A B, et al. ApJS, 2002, 141: 13
- [2] Fomalont E B, Petrov L, MacMillan D S, et al. AJ, 2003, 126: 2562

- [3] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E, et al. AJ, 2005, 129: 1163
- [4] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2006, 131: 1872
- [5] Kovalev Y Y, Petrov L, Fomalont E B, et al. AJ, 2007, 133: 1236
- [6] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2008, 136: 580
- [7] Gordon D, Jacobs C, Beasley A, et al. AJ, 2016, 151: 154
- [8] Le Bail K, Gipson J M, Gordon D, et al. AJ, 2016, 151: 79
- [9] McCallum L, Mayer D, Le Bail K, et al. PASA, 2017, 34: e063
- [10] Thomas J B. NASA STI/Recon Technical Report N. CA: JPL Publication, 1980: 81
- [11] Charlot P. AJ, 1990, 99: 1309
- [12] Fey A L, Charlot P. ApJS, 1997, 111: 95
- [13] Ma C, Bolotin S L, Boboltz D A, et al. Fey A L, Gordon D, Jacobs C S, eds. IERS Technical Note. 35. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2009: 29
- [14] Xu M H, Heinkelmann R, Anderson J M, et al. Journal of Geodesy, 2017, 91: 767
- [15] Fey A L, Clegg A W, Fomalont E B. ApJS, 1996, 105: 299
- [16] Fey A L, Charlot P. ApJS, 2000, 128: 17
- [17] Fey A L, Gordon D, Jacobs C S, et al. AJ, 2015, 150: 58
- [18] Bourda G, Collioud A, Charlot P, et al. A&A, 2011, 526: A102
- [19] <http://astrogeo.org/pima>, 2018-03-08
- [20] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2011, 142: 35
- [21] <http://www.astro.caltech.edu/~tjp/citvlb/index.html>. [2018-03-08]
- [22] Shepherd M C, Pearson T J, Taylor G B. BAAS, 1995, 27: 903
- [23] <http://www.evlbi.org/cgi-bin/EVNcalc>. [2018-03-08]
- [24] <http://ned.ipac.caltech.edu/>. [2018-03-08]
- [25] Kellermann K I, Pauliny-Toth I I K. ARA&A, 1981, 19: 373

Radio Imaging and Structure Effect Analysis of 298 VLBA Calibrator Sources

HE Xuan^{1,2}, SHU Feng-chun¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The second epoch very long baseline array (VLBA) calibrator survey campaign (VCS-II) was aimed at improving positional accuracies of phase reference calibrators and establishing the third realization of the international celestial reference frame (ICRF). BG219I, the eighth session of the VCS-II campaign, detected 298 target radio sources at the S/X dual band, of which 48 sources were newly detected. In this paper, the radio imaging results of the 298 radio sources are presented. According to their brightness distribution, we use delta function components modeling to estimate their structure delays and structure indices, which can be used to judge the astrometric suitability of a radio source. The analysis of “compactness” of 298 radio sources suggested that the radio sources with the smaller structure

indices are more compact. We found 21 steep spectral radio sources with a spectral index less than -0.8 , and found that their structure indices at a single band or the both bands are bigger than 3.0 , which indicate those sources are not so compact and may not be suitable as defining sources of the ICRF. Finally, we counted the positional accuracies of target radio sources. For those sources with smaller structure indices, they have higher positional accuracies.

Key words: ICRF; quasars; VLBA; interferometric