

# VLBI综合成图法的发展

蒋栋荣 万同山

(中国科学院上海天文台)

## 提 要

本文评述 VLBI 综合成图法的发展。我们首先回顾 VLBI 技术的历史并给出 VLBI 综合成图中常用的技术参数。接着列举了一些存在的问题,包括 $(u,v)$ 覆盖,可见度数据改正,图像质量的讨论,综合条纹拟合法(global fringe fitting)、视场等。有关新发展,我们提及 $(u,v)$ 覆盖,角分辨率提高, Mk III 综合条纹拟合,相位基准法(phase referencing),宽视场成图法,差分成图法(difference mapping),空间 VLBI 成图研究,图像拼接法,以及非线性解卷积法等。

## 一、简单的历史回顾

所有干涉仪的基本目标都是测量电磁场的相干特性,因此 VLBI 和传统的干涉法在基本原理上是相同的。VLBI 的不同技术方法首先是各站采用独立的时间频率标准,因而产生了定时误差,所以 VLBI 实验的数据处理必须首先从延迟和延迟率的两维条纹搜索开始,利用条纹搜索和条纹拟合技术,才导出可见度幅度,而可见度的相位淹没在传递延迟和仪器延迟的起伏之中。此外,在目前的灵敏度水平上,VLBI 可用的相位基准(phase reference)太少,其灵敏度受限于相干时间,这和传统的干涉法差别很大。换句话说,VLBI 是相位不稳定的,而 VLA, WSRT 等传统干涉仪是相位稳定的,后者有足够多的校准源(calibrator)可以经常观测,以修正干涉仪系统的相位漂移。

VLBI 的成图技术正是在这样的背景下发展的,而它的发展又总是和高分辨率天体物理研究成果相联系。70 年代中期的 VLBI 成图,以基线条纹拟合为基础,利用模型拟合法得到射电源的模型,其方法主要是用若干高斯分量的模型拟合各条基线的条纹幅度(不利用相位信息),用这些高斯分量的等值线成图。著名的视超光速运动现象便是用模型拟合法成图发现的。1974 年 Rogers 重新发现闭合相位可用于干涉成图,从而使 VLBI 综合成图得到了发展。Readhead 和 Wilkinson(1978)<sup>[1]</sup>发展了闭合相位约束和 CLEAN 循环的闭合相位成图法。Cotton(1980)<sup>[2]</sup>发展了类似而更通用的方法,但很快被自校准技术所取代。Schwab(1980)<sup>[3]</sup>利用望远镜的复增益(幅度、相位)作为自由参数在成图循环中一起求解,并用来改正数据,和 CLEAN 图一起导出。这无疑是一个认识上的突破。因为以前的处理都是以基线为基础的,(baseline-based)而望远镜的复增益则是以望远镜为基础的(telescope-based)。Schwab 的自校准方法已编入 AIPS 软件中的 ASCAL(VSCAL)。Cornwell 和 Wilkinson

1991年11月5日收到。

1992年4月22日收到修改稿。

(1981)<sup>[4]</sup>对上述方程中的误差矢量的幅度和相位线性化, 并已编入到 CALTECH VLBI 软件的 AMPHI 程序中。

同样, 由于认识到 VLBI 基线条纹中的相位斜率也可分解为望远镜的相位斜率, Schwab, Cotton(1983)<sup>[5]</sup>发展了综合条纹拟合法(global fringe fitting)。GFF 并不要求在每条基线上都检测到条纹, 但要求每个天线至少在一条基线上有条纹。例如, 在空间 VLBI 研究中, 必须至少在一条空间—地面天线基线上找到条纹, 这意味着空间 VLBI 能观测到的源限制在那些空间天线—波恩 100 米天线或空间天线—VLA 相控阵所能检测到条纹的那些源。GFF 克服了由于基线条纹拟合可能引入的非闭合延迟误差以及由此引起的非闭合相位误差。

非线性解卷积算法用来内插未采样的  $(u, v)$  平面, 抑制主解中的旁瓣。Högbom 的 CLEAN 算法相应于在  $(u, v)$  平面中作谐波分析, 或在天空平面中数值解卷积。Clark(1980)<sup>[6]</sup>, Cotton-Schwab(1984)<sup>[7]</sup>在原始 CLEAN 方法基础上对算法作了一些改进。Cotton-Schwab 方法允许多视场同时做 CLEAN 成图, 已编入 AIPS 的 MX 程序中。MEM 亦正在应用于 VLBI 成图中。

VLBI 综合成图法得到广泛的应用已有 10 年之久。现在已很少发表观测数据和模型的拟合曲线, 这说明 VLBI 成图方法已被作为天体物理研究的一种工具。图像的动态范围已从几十达到几千, 提高了约 100 倍之多。新的技术仍在发展中, 本文将简要评述存在的问题和一些新发展。

## 二、VLBI 综合成图中的一些技术参数

我们在评述存在问题和发展之前, 先给出 VLBI 成图讨论中常常用到的一些技术参数。

### 1. 阵分辨率

即综合束, 其定义是  $\text{FWHM} \sim 0.5 \frac{\lambda}{D_{\max}}$  (1)

式中  $\lambda$  是波长,  $D_{\max}$  是阵中最长基线长度。

### 2. $(u, v)$ 覆盖

由于地球自转, 基线矢量  $D$  在和射电源方向正交的平面上的投影, 即  $(u, v)$  平面上, 扫出一个椭圆, 阵中的天线位置和数目决定了  $(u, v)$  覆盖。

### 3. 基线灵敏度<sup>[8]</sup>

$$\Delta S_{ij} = \frac{\eta_b}{\sqrt{2B\tau_T}} \sqrt{\frac{T_{s_i} T_{s_j}}{G_i G_j}} \quad (2)$$

式中  $\eta$  = 相关器 SNR 损失因子,

$B$  = 记录带宽

$\tau_T$  = 相干积分时间

$T_s$  = 系统温度

$G$  = 天线增益 ( $G = \eta A/2k$ ,  $\eta$  是天线效率,  $A$  是天线面积,  $k$  是波尔茨曼常数),

#### 4. 阵灵敏度<sup>[8]</sup>

$$\Delta I = \frac{2kT_s\eta_b}{\sqrt{B\tau_r\eta}} \frac{1}{\sqrt{(\sum_i A_i)^2 - \sum_i A_i^2}} \quad (3)$$

这里, 在一个积分周期内, 取自然权, 各天线的  $T_s$ ,  $\eta$  相同, SNR 权重  $\propto \frac{1}{\Delta S^2}$ .

图中的热噪声

$$\Delta I_{\text{map}} = \Delta I / \sqrt{N} = \frac{2kT_s\eta_b}{\sqrt{B\tau_r\eta}} \frac{1}{\sqrt{(\sum_i A_i)^2 - \sum_i A_i^2}} \quad (4)$$

式中  $N = \frac{\tau_t}{\tau_r}$ ,  $\tau_t$  是有效总观测时间.

在自校准条件下

$$\begin{aligned} \Delta I(S) &\sim \sqrt{\frac{n_a - 1}{n_a - 3}} \Delta I \\ \Delta I(S)_{\text{map}} &\sim \sqrt{\frac{n_a - 1}{n_a - 3}} \Delta I_{\text{map}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $n_a$  是天线数.

#### 5. 最小可检测亮温度<sup>[9]</sup>

$$T_b \geq 1.38 \times 10^9 \frac{\Delta I_{\text{map}}}{(\theta_b \nu)^2} \quad (6)$$

式中  $\Delta I_{\text{map}}$  的单位是 mJy/beam,  $\theta_b$  (综合束宽) 的单位是 mas,  $\nu$  以 GHz 为单位.

#### 6. 峰值亮温度<sup>[9]</sup>

$$T_B = 0.36SD^2 \quad (7)$$

式中  $S$  是以 mJy 为单位的射电源的总流量,  $D$  是以 km 为单位的 longest 基线长度.

#### 7. 视场限制<sup>[9]</sup>

$$\text{天线排列非共面: } \theta \sim \frac{1}{3} \sqrt{\frac{D_{\text{max}}}{\lambda}} \left( \frac{\lambda}{D_{\text{max}}} \right) \quad (8)$$

视场边缘相位误差  $\leq 0.1$  弧度.

$$\text{带宽涂污效应 (smearing): } \theta \sim \beta \frac{\nu}{\Delta \nu} \left( \frac{\lambda}{D_{\text{max}}} \right) \quad (9)$$

取  $\beta = 0.8$ , 幅度减少 10%.

$$\text{时间平均涂污效应: } \theta \sim \frac{150}{\tau_r(\text{分})} \left( \frac{\lambda}{D_{\text{max}}} \right) \quad (10)$$

幅度减少 10%.

#### 8. 动态范围和保真度 (fidelity)

动态范围 (有两个定义): 图像中峰值亮度/离源 (off-source)  $\sigma_{\text{rms}}$ , 图像中峰值亮度/最弱可信特征.

保真度: 图像中峰值亮度/差分图像 (difference map) 中的源上 (on-source)  $\sigma_{\text{rms}}$ .

### 三、一些存在的问题

#### 1. $(u, v)$ 覆盖

由于台站数有限和分布的限制, 地面 VLBI 阵的  $(u, v)$  覆盖中有很大的空洞。Fanti<sup>[9]</sup> 计算了一些综合阵和 VLBI 的  $(u, v)$  覆盖的百分比, 见表 1。计算假定一个 12 小时观测。虽然这种计算并不是对  $(u, v)$  覆盖好坏的全面分析, 但对 VLBI 实验的  $(u, v)$  平面上采样值的稀疏程度却有一个定量的概念。同时, 不像 VLA, WSRT, VLBI 阵一般是非冗余的 (non-redundant), 这对自校准不利。而在用 CLEAN 等非线性解卷积法对未测量的可见度 (即图像平面中的不可见分布) 内插时, 难于控制。 $(u, v)$  覆盖不好是对 VLBI 综合成图影响的根本因素, 但其依赖关系复杂, 而且和源的结构有关。

Wilkinson(1982)<sup>[10]</sup> 给出了非冗余的随机分布的 VLBI 阵的天线数与最大可成图的射电源大小的经验关系, 见表 2。理论上, 非冗余的 VLBI 阵可得到的独立的可见度测量数是  $(\tau_t/\tau_T) \times n_a(n_a - 1)$ ,  $\tau_t$  是有效观测时间,  $\tau_T$  是相干积分时间; 在自校准成图中是同时导出台站增益误差和源模型的, 而台站增益误差数共有  $(\tau_t/\tau_T) \times (2n_a - 1)$  个, 所以可以解算的模型的分量数  $\leq (\tau_t/\tau_T) \times [n_a(n_a - 3) + 1]$ 。当代表源结构的模型分量数超过此值时, 重建图像将有困难。通常, 源上的重建误差 (主要由 CLEAN 方法引起) 要比热噪声大得多, 所以  $(u, v)$  覆盖对图像的影响反映在它的保真度中。

表 1  $(u, v)$  覆盖的百分比<sup>[9]</sup>

| 干涉网    | Dec=80° | Dec=30° |
|--------|---------|---------|
| VLA-D  | 40      | 31      |
| VLA-A  | 36      | 28      |
| WSRT   | 14.5    | 11      |
| MERLIN | 4.0     | 3.0     |
| EVN    | 3.6     | 3.0     |
| US+VLA | 7.2     | 5.5     |
| VLBA   | 9.3     | 6.5     |

假定一个  $256 \times 256$  像素 (pixel) 的  $(u, v)$  区域, 在 12 小时观测期间与  $(u, v)$  轨迹相交的像素认为被覆盖, 与  $(u, v)$  轨迹不相交的像素认为是  $(u, v)$  空洞, 所有的像素取等权。表中给出的  $(u, v)$  覆盖的像素百分比。

在图中呈反对称分布<sup>[11]</sup>。可见度数据中的基于台站 (telescope-based) 误差, 只要台站数量足够多, 信噪比足够好, 便可在自校准中得到改正, 自校准中的误差和非闭合误差在图像中将会产生类旁瓣的误差。

Wilkinson(1982)<sup>[10]</sup> 曾指出, 目前的 VLBI 图像中所达到的动态范围远没有达到热噪声限, 这反映了可见度数据中误差的重要影响, 其中非闭合误差可能占主要地位。

#### 3. 条纹拟合

表 2 利用非冗余和随机分布的 VLBI 阵能够成图的最大源尺度<sup>[10]</sup>

| 天线数 | “窗口” (束数) | 线源 (束数)    | 模拟计算和 MERLIN 的经验 |
|-----|-----------|------------|------------------|
| 4   | $\leq 10$ | $\leq 20$  |                  |
| 6   | $\leq 20$ | $\leq 50$  | 外插               |
| 8   | $\leq 40$ | $\leq 90$  |                  |
| 10  | $\leq 60$ | $\leq 150$ |                  |

#### 2. 可见度数据中误差的改正

理论上, 10% 的幅度误差和 0.1 弧度 ( $5^\circ.7$ ) 的相位误差对一个图像的动态范围有着近似相同的影响, 常数幅度误差在图中相对于图像中心呈对称分布, 而常数相位误差

综合条纹拟合 GFF 已广泛用于 Mk II 数据的处理中,提高了条纹检测的灵敏度。这由 AIPS 中以 CALIB 为主的一系列软件完成。

Mk III 数据中有若干个 IF 通道,而每个 IF 通道中又有若干个频率通道。在单个 IF 通道中的不同频率通道之间存在着相位斜率(称单带延迟),而在各个 IF 通道之间也存在着相位斜率(称多带延迟)。在 Mk III 数据处理的标准方法中,FRNGE 用基线条纹拟合的方法求解单带延迟和多带延迟。然后再在 AIPS 中用 GFF 方法改善多带延迟的拟合,前提是在 FRNGE 中解出单带延迟必须是正确的。所以在 Mk III 数据处理中还没有充分利用 GFF 的优越性<sup>[12]</sup>。

#### 4. 视场

利用(8)–(10)式,可给出 VLBI 观测的视场限制。对于  $\nu \leq 10\text{GHz}$ , Mk III 观测主要由带宽涂污效应限制。Mk III 观测主要由较长的积分时间所限制。

#### 5. 图像的质量问题

在综合成图中,我们希望能够把一个射电源中低亮度展源区和高亮度的致密区在一张图中重建成功,源中结构的细节越多越好,其数量的表征就是图像的动态范围。

设想图像中的噪声(或假特征)处处相同,则动态范围表明了图上最低的可置信的等值线水平,但是目前 VLBI 图像还没有达到热噪声限,而且,在 CLEAN 图上的致密区、展源和离源区的噪声(误差)是不相同的,因此动态范围不完全是图像可靠性的理想的指标。有时也有人用动态范围的另一个定义,即图上峰值亮度和最弱可信的特征之比,但这个动态范围

表 3 RADIOASTRON 的成图能力模拟计算,比较了动态范围和保真度<sup>[13]</sup>

| 天 线  | 遥测站       | 带宽和系统温度                               | 动态范围  | 保真度   |
|--|-----------|---------------------------------------|-------|-------|
| Radioastron<br>(VLBA+NOB)                                      | 3DSN      | $B=128\text{MHz}$<br>$T_s=60\text{K}$ | 120:1 | 46:1  |
| Radioastron+VSOP<br>(VLBA+NOB)                                 | 3DSN      | $B=128\text{MHz}$<br>$T_s=60\text{K}$ | 150:1 | 148:1 |
| Radioastron<br>(Samarkand, Ussuriisk,<br>India(70m))           | EVPATORIA | $B=16\text{MHz}$<br>$T_s=200\text{K}$ | 185:1 | 21:1  |
| Radioastron<br>(Samarkand, Ussuriisk,<br>India(70m))           | EVPATORIA | $B=64\text{MHz}$<br>$T_s=100\text{K}$ | 283:1 | 21:1  |
| Radioastron<br>(Samarkand, Ussuriisk, GOLDSTONE<br>India(70m)) | EVPATORIA | $B=16\text{MHz}$<br>$T_s=200\text{K}$ | 169:1 | 34:1  |
| Radioastron<br>(Samarkand, Ussuriisk, GOLDSTONE<br>India(70m)) | EVPATORIA | $B=64\text{MHz}$<br>$T_s=100\text{K}$ | 308:1 | 34:1  |

就和图中那个区域有关了。另一方面, 动态范围还和图的峰值亮度有关, 如果一个源的峰值亮度很低, 则动态范围本身不会很高, 因此它也不是图像重建水平的真实反映。

保真度定义中采用的是差分图像中的源上噪声, 更确切地反映图的可信度, 即唯一性程度。但是保真度要求知道原来的源模型, 而实际观测中源的真亮度分布是不知道的, 因此保真度只用于 VLBI 综合成图的模拟实验中, 例如空间 VLBI 的成图能力研究。Murphy (1989)<sup>[13]</sup>曾给出了空间 VLBI 动态范围和保真度的估算, 见表 3。

用已获得的 VLBI 图像作天体物理解释时应取慎重的态度, 在不少情况下, 要对得到的图像研究一番, 根据经验, 从图的外貌来说, VLBI 图像往往比较简单(也有复杂的), 无对称结构, 无深的负等值线, 无与旁瓣间隔相同的特征等等。要尽可能地利用先验知识, 可以和不同仪器、不同频率以及不同历元所得的图像做比较。用不同的 VLBI 软件 Caltech, OLAF 和 AIPS 做同一张图是另一种验证方法, 但最重要的是对成图方法本身有清楚的理解。

用实验方法以验证图的可靠性也是行之有效的, 例如, 用不同的初始模型, 看看是否收敛到相同的结果, 如有必要, 可以把原始数据随机地分成若干个子组分别成图, 以检验其中的差别。当然, 在所有的方中, 模型和观测可见度数据的良好拟合是必要条件。许多 VLBI 图像未必是唯一解, 但必然是最佳拟合解才行。

## 四、新的发展

### 1. 改善 $(u, v)$ 覆盖

地面 VLBI 阵的 $(u, v)$ 覆盖随着一些新的天线建成是有帮助改善的, 但很有限。近年来 MERLIN 和 EVN 已开放联测, 这有助于改善短间距的 $(u, v)$ 覆盖。多频率综合法(Multi-frequency synthesis)已经用于增加 $(u, v)$ 覆盖, 从而改善图像的质量, 并在 VLA 改进了 CasA 的图像, 但是忽略了在每个频道中源结构会不同。后来这个技术得到进一步的发展, 如果每个像素上的强度服从幂律就把谱变化考虑进去。由多频率数据导出的“脏图”(DM)是两个分布的叠加。其中一个是指定“基准频率” $\nu_0$ 的真分布, 它是假定在源面上微分谱指数变化并不能用通常方法由 $(u, v)$ 数据而得到, 但卷积用了“复合脏束”。第二个分布则包含了这些变化的效应。真分布(在每个像素上按微分谱指数取权)用了“谱脏束”做卷积, 是孔径覆盖的富氏变换, 不过每个 $(u, v)$ 点取了 $(\Delta\nu/\nu_0)$ 权, 而这些权的符号取决于 $\Delta\nu$ 的符号。把这两个分布分离开来的方案被取名做“double deconvolution”。测试表明, 结果是令人满意的。文献[14]给出了实验图像。

VLBA 是专门设计的 VLBI 网, 有较好的 $(u, v)$ 覆盖, 采用了“中央密集”方案。其最短基线小于 200km, 并和 VLA 联网, 而 VLA 提供小于 35km 的基线, 中央密集方案比均匀分布提供更多的最小间距, 对观测更大尺度的结构有利。空间 VLBI 的 $(u, v)$ 覆盖, 由于卫星的快速运动而加密, 同时利用轨道有进动,  $(u, v)$ 覆盖将随着天空方向改变而改变, 这又提供了一种克服空洞的方法, 以提高成图质量。不过, 1995 年发射的 RADIOASTRON 和 VSOP 都不会有很好的 $(u, v)$ 覆盖。IVS(International VLBI Satellite)才有令人满意的 $(u, v)$ 覆盖。它有三个轨道, 在用最低轨道和地面 20 个天线联测可得到和 VLA 同质量的图

像, 而用第二轨道可得到和地面上最高质量的图像一样好的图像, 而分辨率比地面的高 5—6 倍, 但该建议未获批准。

## 2. 空间分辨率提高

空间分辨率的提高, 一是发展毫米波 VLBI, 二是发展空间 VLBI。1991 年 Baath et al.<sup>[15]</sup> 在 100GHz 上观测已综合成图, 形式上, 动态范围约有 100:1, 角分辨率约有  $50\mu\text{s}$ 。空间 VLBI 站依靠基线  $D_{\text{max}}$  的增加而提高分辨率, 但在目前的技术条件下, 最高工作频率取 22GHz, 所以分辨率略低, 但随着  $D_{\text{max}}$  的增加, 根据(7)式, 可检测的峰值亮温度有可能超过逆康普顿限, 使 AGN 中的一些有逆康普顿模型的测试成可能。上面所说的是第一代空间 VLBI(即 RADIOASTRON 和 VSOP), IVS 则采用了更高的频率, 因此分辨率更高, 可达  $10\mu\text{s}$ 。有关空间 VLBI 的轨道我们已在文献 [16] 中提及, 此处不再重复。

## 3. 把 GFF 应用于 Mk III VLBI 数据

为了提高对弱源的检测能力, 特别是处理毫米波 VLBI 数据和相位基准成图, Baath<sup>[17]</sup> 发展了把 Mk III VLBI 处理机输出数据直接读入 AIPS 的系统, 以后的条纹拟合方法如下: (1) 对所有的 IF 频带(例 13 个, 相邻两个 IF 带的中心频率相差 4MHz 或 8MHz) 以及所有的频率通道(如 8 个延迟通道的相关处理机, 上、下边带观测, 每个 IF 频带有 15 个频率通道)作粗条纹搜索, 对粗的条纹率进行改正; (2) 对每个 IF 频带中所有频率通道的数据平均, 用 GFF 拟合求解 IF 带之间的相位斜率, 即多带延迟, 并改正数据; (3) 对每个频率通道在 IF 带上平均, 用 GFF 拟合求解单带延迟, 并改正数据; (4) 此时数据在整个宽带上是相干的, 如果需要, 可以在整个宽带上平均; (5) 进行成图和自校准, 改正大气等因素引起的短时间上的相位起伏。Baath et al. 等把这种方法用于 100GHz VLBI 实验, 条纹拟合周期长达 7 分钟, 成功地提高了数据的信噪比。

## 4. 相位基准成图法(phase reference mapping)

Wilkinso (1982) 提出相位基准成图可以改正非闭合误差(带通改正), 以提高图的动态范围, 甚至得到热噪声限制的 VLBI 图。Alef<sup>[18]</sup>(1987) 对 0248 + 430 和 0249 + 436(相距  $0^\circ.5$ ) 做了实验, 成功地得到了相位基准法的图像。Alef<sup>[12]</sup>(1989) 讨论了相位基准成图中两个源角距离的限制, 电离层厚度的变化可能是最大的问题, 他猜测对 5—10GHz 单频观测, 角距离应小于  $1^\circ$ , 对双频观测可达  $5^\circ$ 。但 Baath 和 Mantovani<sup>[19]</sup>(1990) 用 EVN 在 18cm 波段对 OQ208/1422 + 202(相距  $9^\circ.6$ ) 的观测, 每三小时观测一次幅度校准源 OQ208(该实验的原来目的是探索宽视场成图技术, 真正的相位基准成图应在短得多的时间上开关观测), 由于技术上的原因, 第 3 节的条纹拟合技术不能直接用于观测源 1422 + 202, 他们把 OQ208 的条纹拟合解应用于 1422 + 202 而不再作任何进一步的条纹拟合, 直接成图, 得到了很好的图像。这个实验表明对 EVN 来说, 大于  $9^\circ$  的相位基准源是可能的, 在夜间, 在 18cm 和 6cm 上相位基准成图法还有潜力。

## 5. 宽视场成图法

目前的干涉仪的综合成图法都是假设源的亮度分布和观测可见度之间成两维傅里叶变换的关系。这对许多 VLBI 图像是合适的, 但对于很宽的视场, 由于诸如涂污等原因不再成立。Okopi 和 Baath(1990)<sup>[20]</sup> 发表了利用 MERLIN 观测 5C12 区的宽视场成图, 该区占  $1800''$

$\times 1800''$ 。用校准源 0202+14R 改正带通效应后, 带宽涂污消去了, 但天空弯曲的效应仍存在, 需要发展三维 CLEAN 算法, 但很费机时。

### 6. 差分成图法(difference mapping)

Jodrell Bank 的 OLAF 系统中发展了差分成图法。该程序只对源模型结构(CLEAN 分量的变换)和改正的  $uv$  数据之间的差值进行傅里叶变换, 从而大大节省机时。从该残余图得到新的 CLEAN 分量再加入到模型中, 因此避免了在每个改正循环对所有的 CLEAN 分量都做变换。数据经改正后再用 AIPS 成图以产生一个新的初始模型作为下一个差分成图循环的开始, Muxlow(1987)<sup>[21]</sup>发表了该成图法的原理图。

### 7. 空间 VLBI 成图能力的研究

早期的 QUASAT 成图模拟计算强调轨道不能有空洞, 因而取远地点不能太长的轨道, 以保证成图质量而牺牲了分辨率。但是后来由于技术原因 QUASAT 不能按原来的考虑, 其轨道受限,  $(u, v)$  空洞比较大, 能否有效成图就成了问题。空间 VLBI 的主要科学目标之一是研究类星体核喷流的性质, 而一个很有兴趣的问题是喷流的单边性或双边性。如果在成图过程中“假对称”的问题不能解决, 有可能把本质是单边的喷流变成一个双向喷流。因此, 在空间 VLBI 成图能力的研究中, 克服“假对称”就形成了一个专门的课题。Murphy 和 Wilkinson<sup>[22]</sup>为此进行了一系列的“blind”重建图像实验, 以验证克服“假对称”方法, 取得了成功。从此分辨率和成图质量的矛盾有所合理地解决。

Murphy 和 Wilkinson 用了两种方法, 一是天空平面约束, 用 NRAO AIPS 或 Jodrell Bank OLAF 程序处理模拟的观测数据, 在计算时加入天空平面约束, 也就是取窗口, 把可疑的假特征去掉, 使之在下一轮的自校准中不进入, 这实际上是 VLBI 成图实践所惯常用的方法, 需要由有经验的 VLBI 天文学家去做, 要认出那个是可能的假特征。他们做得很成功, 但花费精力甚大。不过这种方法能否推广到 RADIOASTRON 尚有待研究。另一方法是  $(u, v)$  平面约束, 这种方法把人为的因素减到很小。其概念为在自校准过程中只选出某些基线长度, 用以对模型和数据进行比较, 以找出基于天线的增益误差(antenna-based gain errors)

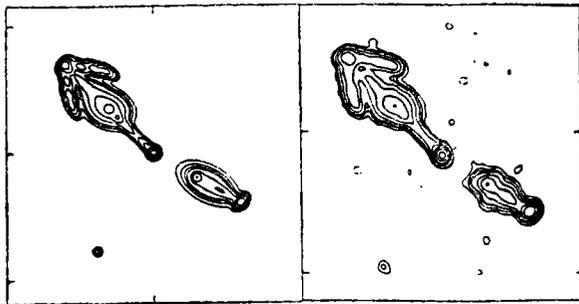


图 1 QUASAT 的  $u, v$  平面约束“blind”模拟成图试验, 左图是假设的源模型, 右图是成图结果, 假设 QUASAT 经过 48 小时观测, 轨道的远地点 357 786.0 km, 近地点 5 000 km, 地面天线 13 个, 源的位置  $\alpha=18h, \delta=40^\circ$ <sup>[23]</sup>

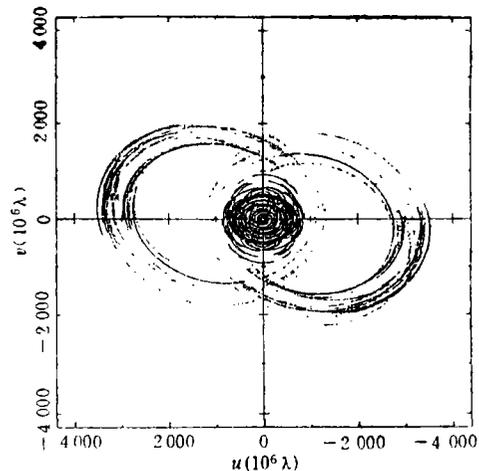


图 2 QUASAT 和地面 17 个天线在赤纬  $45^\circ$  时的  $(u, v)$  覆盖图<sup>[23]</sup>

的最佳估计值。具体做法是每取一种 $(u, v)$ 平面约束,例如最小 $(u, v)$ 平面约束为 $\approx 0.75uv_{\max}$ ,  $uv_{\max}$ 是数据中的最长基线长度,作一个自校准、解卷积循环。整个过程中取约束 $0.75uv_{\max}$ ,  $0.5uv_{\max}$ ,  $0.25uv_{\max}$ 和 $0uv_{\max}$ 等等,这样就逐步地去掉了“假对称”。图1表示利用 $uv$ 平面约束的“blind”试验的结果。图2表示有相当大空洞的 QUASAT 和地面观测时的 $(u, v)$ 覆盖图。从图1来看,幅度误差(约10%)对于展源结构的影响并不大。图的质量比目前地面上最好的 VLBI 图差不多,而分辨率大大地提高了。

### 8. 图像拼接法

当被成图的目标和干涉仪的主束一样大或更大的时候,可以在不同指向上多次观测,以使被测源各部份都有一样的灵敏度。

Scovill 等<sup>[24]</sup>做了 OVRO 毫米波干涉数据的这种拼接。横跨视场仅有7个束,干涉仪单元的束为 $50''$ ,而综合束(即干涉仪的主束)为 $7''$ 。他们在相干时间内进行了多个指向的观测,然后相加:

$$\Sigma \left[ \frac{\text{CLEAN}(i)}{W(i)} \right] W(i)^2$$

$$\frac{\quad}{\Sigma W(i)^2}$$

式中,  $W(i)$  = 第  $i$  个视场为中心的主束。

### 9. 非线性解卷积方法的研究

CLEAN 是射电天文中广泛采用的非线性解卷积方法,它的优点是直观简单并已成功地获得了大量的射电图。它的主要问题是(1)为了抑制在 CLEAN 过程中外推的高空间频率分量,且为了得到合理的天体物理图像,把由 CLEAN 分量组成的源模型(它的傅里叶变换拟合到观测的 $(u, v)$ 数据)与 CLEAN 束卷积再加上 CLEAN 的残余图最终获得 CLEAN 图,这样 CLEAN 图的傅里叶变换不再能满意地符合观测数据;(2)用于 CLEAN 过程中的各种控制参数(如窗口、回路增益、迭代次数等)不能进行数学分析,最终的图在细节上可能不是唯一的;(3)对展源 CLEAN 可能会产生不稳定(振荡),在图中造成一些伪的对称特征。针对第三个缺点,已经发展了一些修改的 CLEAN 方案,其中比较成功的是 Walker 和 Schwartz<sup>[25]</sup>的“多分辨率 CLEAN”(Multi-Resolution CLEAN)方法,其基本思想是首先将脏图和脏束分别与一个归一化函数卷积(即平滑),这个函数的 FWHM 为原始脏束的 FWHM 的  $f$  倍( $f$  值取决于希望 CLEAN 的源大小)。首先对平滑过的脏图在低分辨率上(即用平滑过的脏束)进行标准的卷积,然后把原始脏图减去平滑过的脏图构成差分图,再对差分图在高分辨率上(用在原始脏束上修改过的差分脏束)进行标准 CLEAN,最后对两种分辨率上 CLEAN 得到的分量分别经幅度修正后与相应的 CLEAN 束卷积加上残余得到 CLEAN 图。数学上表示式为:令  $F_s = F * G$ ,  $F_d = F - F_s$ 。

下标  $s$  表示被平滑过的函数,下标  $d$  表示差分的函数。函数  $F$  可以是脏图  $D$ , 脏束  $A$  和 CLEAN 束  $B$ 。被平滑过的脏束和 CLEAN 束,需要重新归一化,其标度因子是分别为  $S$  和  $r$ , 即

$$A_s = SA * G \quad B_s = rB * G$$

同样,差分脏束和 CLEAN 束为

$$A_d = (A - A_s/S) / (1 - \frac{1}{S}), \quad B_d = (B - \frac{B_s}{r}) / (1 - \frac{1}{r})$$

令  $\delta_s, \delta_d$  分别为在低分辨率和高分辨率上的 CLEAN 分量,  $R_s, R_d$  分别是在低分辨率和高分辨率上 CLEAN 的残余, 则脏图为:

$$D = D_s + D_d = \delta_s * A_s + R_s + \delta_d * A_d + R_d \\ = \left\{ S\delta_s * G + \frac{S}{S-1} \delta_d * (1-G) \right\} * A + R_s + R_d$$

而 CLEAN 图为:

$$C = \left\{ S\delta_s * G + \frac{S}{S-1} \delta_d * (1-G) \right\} * B + R_s + R_d \\ = \frac{S}{r} \delta_s * B_s + \frac{S(r-1)}{r(S-1)} \delta_d * B_d + R_s + R_d$$

这种方法对低  $S/N$  数据及展源 ( $\geq 10$  个综合束) 有较好的 CLEAN 效果, 由于这种方法比较复杂, 尚未见应用于 VLBI。

最大熵成图(MEM)是天文学中广泛使用的另一种非线性方法。一个图像  $I(x, y)$  的熵定义作  $E = \iint f[I(x, y)] dx dy$ , 已建议的熵函数  $f(I)$  通常有两种形式  $f(I) = -I \ln I$  和  $f(I) = \ln I$ , 目前更倾向于采用前者。熵函数的形式不允许有负的  $I$  值, 即自动地对图像加上了正值性约束。最大熵成图是寻找最平滑的正值图。在实际使用中是用有  $\chi^2$  约束的非线性 MEM。MEM 方法用于 VLBI 成图有一些问题: 一是像中所包含的总流量是很关键的参数, 二是在像的空白部分中, 每个像素的 rms 噪声估算, 这两个问题需要对程序输入较好的信息来解决。第三个问题是对有一些强源的图像, MEM 将花很多时间来调整少数几个像素上的亮度, 需要将 CLEAN 方法和 MEM 结合使用, 先用 CLEAN 方法从数据中移去这些强点源, 然后再用 MEM。第四, MEM 的图上的分辨率取决于图上的亮度, 这样, 对致密分量会产生过高的分辨率趋势, 为了限制这种效应, 可以对数据进行“预卷积”后再进行 MEM 成图。最大熵的图与数据也存在偏差, 但没有 CLEAN 方法那样大。

能否产生一种修改的 CLEAN 方法来产生与观测数据符合的图像是 CLEAN 方法发展的方向。此外, CLEAN 与 MEM 结合也可能是较有发展前途的成图方法。

## 五、结 束 语

我们仅评述了 VLBI 的连续谱成图法。VLBI 作为一种天文学的观测手段, 其分辨率、灵敏度都将持续提高。90 年代里毫米波 VLBI 和空间 VLBI 将得到发展。VLBI 图像的动态范围将以  $10^5:1$  为努力目标。利用相位基准法成图, 将会对弱到 mJy 的源成图。多重频率综合法是很有希望的。

VLBA 预计在 1993 年左右将投入运行。由于精心的布阵设计, 地面 VLBI 的  $(u, v)$  覆盖将改观。同时, VLBA 是专用网, 观测、相关处理、数据校准都走向常规化, 这对 VLBI 的综合成图实践来说, 是一个很大进展。它将为高动态范围的成图, 源结构快速变化的监视提供方便。

## 参 考 文 献

- [1] Readhead, A. C. S. and Wilkinson, P. N., *Ap. J.*, 223 (1978), 25.  
 [2] Cotton, W. D., *A. J.*, 84 (1979), 1622.  
 [3] Schwab, F. R., *Proc. Soc. Photo-opt. Instrum. Eng.*, 231 (1980), 18.  
 [4] Cornwell, T. J., VLA Scientific Memorandum No. 135, (1981).  
 [5] Schwab, F. R. and Cotton, W. D., *A. J.*, 88 (1983), 688—694.  
 [6] Clark, B. G., *Astrophys.*, 89 (1980), 377.  
 [7] Schwab, F. R., *A. J.*, 89. (1984), 1076.  
 [8] Walker, R. C., in *Very Long Baseline Interferometry Techniques and Applications*. ed. by M. Felli and K. E. Spencer, p. 163, (1989).  
 [9] Fanti, C., in *Very Long Baseline Interferometry Techniques and Applications*, ed. by M. Felli and R. E. Spencer, p. 363, (1989).  
 [10] Wilkinson, P. N., in *Very Long Baseline Interferometry Techniques*, p. 375, (1982).  
 [11] *Synthesis Imaging*, ed. by R. A. Perley, F. R. Schwab and A. H. Bride, p. 164, August 5—9, 1985.  
 [12] Alef, W., in *Very Long Baseline Interferometry Techniques and Applications*, ed. by M. Felli and R. E. Spencer, p. 97, (1989).  
 [13] Murphy, D. W., in *The Imaging Potential of Radioastron.* (1989).  
 [14] Wilkinson, P. N., in *IAU Symposium No. 129*, p. 509, (1987).  
 [15] Bààth, L. B. et al., *Astron. Astrophys.*, 241 (1991), L1.  
 [16] 万同山, *天文学进展*, 10 (1992), 201.  
 [17] Bààth, L. B., in *IAU Colloquium No. 131*, (1990).  
 [18] Alef, W., in *IAU Symposium No. 129*, p. 523, (1987).  
 [19] Bààth, L. B. and Mantovani, F., in *IAU Colloquium No. 131*, (1990).  
 [20] Okopi, J. E. and Bààth, L. B., in *IAU Colloquium No. 131*, (1990).  
 [21] Muxlow, T. W. B. et al., in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, p. 131, (1987).  
 [22] Murphy, D. W. and Wilkinson, P. N., in *Advances in Space Research*, Vol. 11(1991), No. 2, p. 415.  
 [23] Anderson, B. et al., QUASAT: A Space VLBI Satellite, Report on the phase A study, ESA Publication SCI (88) 4 (1988), p. 56.  
 [24] Private Communication.  
 [25] Walker, B. P. and Schwarz, U. J., *Astron. Astrophys.*, 200 (1988), 312.

(责任编辑 刘金铭)

## Developments of VLBI Synthesis Mapping

Jiang Dongrong      Wan Tongshan

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of sciences)

### Abstract

We review developments of VLBI synthesis mapping. Before our discussion, we give a brief history of VLBI techniques and a summary of some technical parameters frequently used in VLBI synthesis mapping. We, then, mention problems, namely,  $(u, v)$  coverage, correction of errors in visibility data, image quality, GFF (Global Fringe Fitting), field of view, and so on. The new developments which are presented in this paper include the improvements of  $(u, v)$  coverage and angular resolution, Mk III GFF, phase reference mapping, wide field mapping, difference mapping, the potential of space VLBI mapping, mosaicing and non-linear deconvolution.