

单射电源的 VLBI 的数据处理与成像实习报告

北京师范大学天文系 吕澈秋 2018.8.26

一 引言

天文观测成像中需要看得清楚非常遥远的天体，这就要求望远镜能有很高的角分辨率，单台望远镜的角分辨率正比于入射波长与望远镜口径。而在射电波段进行天文观测，由于波长较长（从毫米波到米波），就要求望远镜拥有极大的口径才能达到与光学望远镜相当的角分辨率。然而，即使达到几百米的口径也远不及光学。这就需要一种甚长基线干涉（VLBI）的方法，用基线长度代替望远镜的口径，从而达到超过光学波段的极高分辨率。

在 VLBI 成像过程中，需要每个干涉望远镜中相关器的作用，相关器中有两个探测器，它们将其接收到的信号相乘并对时间积分，得到可见度。而可见度的结构与源的亮度之间存在着——对应关系。由此可以由可见度信息反推出源亮度的图像，即干涉成图。

二 原理

VLBI 的观测信号首先需要台站的修正，由于每个台站的时间不同且观测不是同时进行的，则在其信号相关之前，需要利用台站坐标、观测的源的坐标与观测频率对数据进行修正。而修正后相关器输出的可见度也不能直接作图。第一，这些数据收到灵敏度和积分时间的限制，噪声不能得到很好的抑制；第二，多个站台相关后的数据量很大，不宜做成图工作；第三，源信号经过放大、检波、数字化、离散化等一系列处理后，其强度发生了很大的变化，需要进行校正。另外，成图前还要剔除观测、相关过程中的产生的坏数据。因此要通过条纹拟合、振幅校正、编辑等方法进行校正与消除。

各个站台参数的不确定性会造成条纹相位随时间和频率的变化，条纹拟合就是要校正可见度的相位。振幅校正利用观测可见度与真可见度的关系式进行一定程度的校正。编辑是剔除掉坏的数据，有些是仪器运转不正常造成，还有的是信噪比太低无法拟合。经过以上三步之后，灵敏度提高并且数据量减少，再做成图处理，便可得到稳定、可靠的图像。

VLBI 成像的基本关系为脏图是真亮度与脏束的卷积。数据经过以上预处理后可以得到 UV 平面上的可见度数据，对它进行离散傅里叶变换就能得到脏图。虽然脏束已知，但由于 UV 覆盖引起的旁瓣效应会使得脏图面目全非，妨碍源的真亮度的估计。为了估计源的真亮度，综合成图需要一种非线性的方法，即 CLEAN 算法和自校正算法。它们结合使用称为混合成图。

CLEAN 算法适用于相对独立、处于小区域的射电源（大部分射电源都符合）。它首先在残图中找到最亮的一点，用一个 δ 函数表示该位置处源的亮度， δ 函数的大小为原来最大值的 g ($0 < g \leq 1$) 倍。然后用该 δ 函数乘以脏束 B 得到 δB ，把 δB 对应的值从残图中减去可以得到一个新的残图。重复这个步骤，直到残图中的最大值已接近噪声水平为止。由此获得的 δ 函数可看作是源真亮度的估计。

自校正算法消除条纹拟合后参与的可见度相位误差项。如果在此前进行 CLEAN，会由于相位的变化导致图像的各种频率的空间分量发生错动，图像会扭曲或者产生大量的负亮度。自校正利用与台站无关的闭合相位、闭合振幅消除基于站台的误差，从而消除可见度相位误差项。

结合运用以上两种算法，称为混合成图方法。先给出源的粗略模型，用这些模型去初步校正可见度，再用校正过的观测可见度或更加精确的模型对观测可见度再次修正……反复进行可得到满足条件的源的图像。

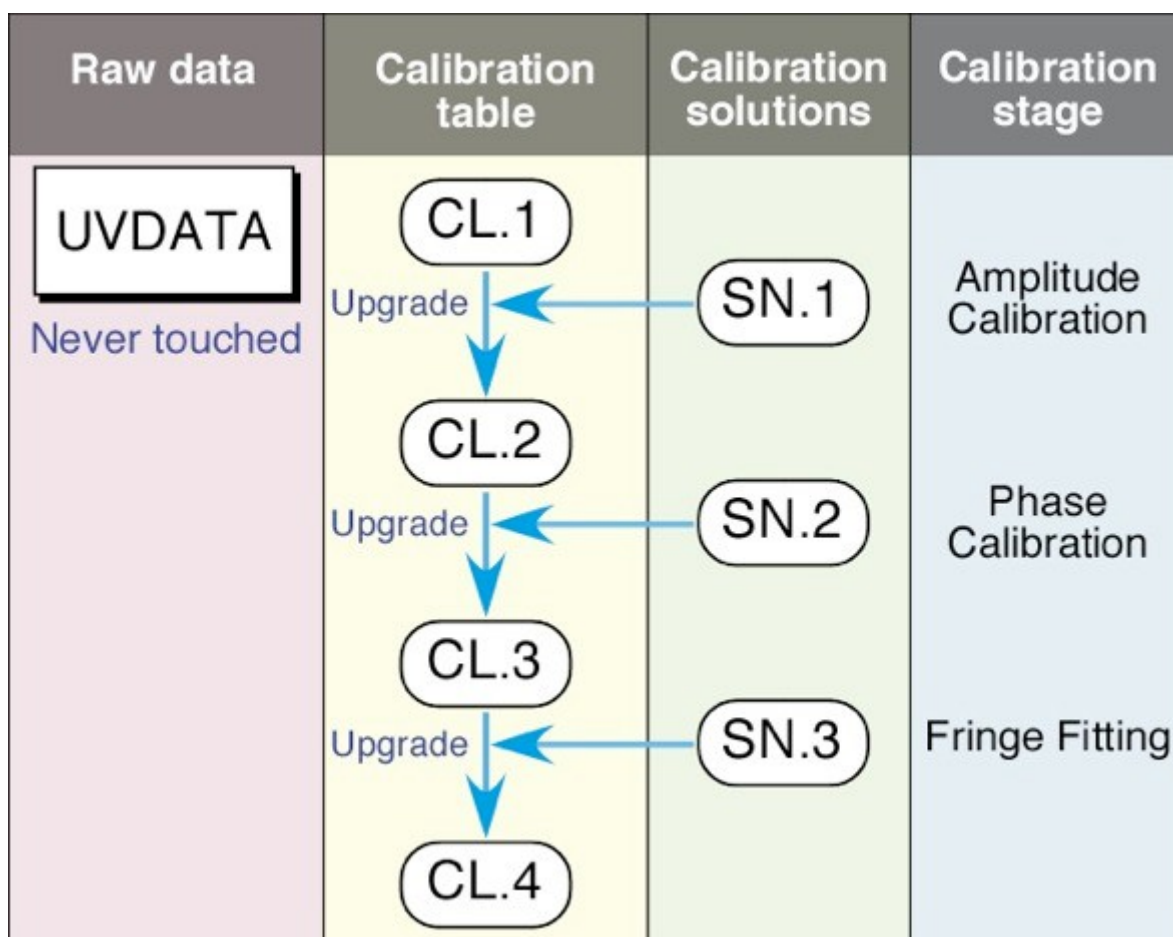
三 软件与数据

数据来源于 VLBA 的十个天线的观测。目标源为位于大熊星座的 J0906+6930 (J2000: RA=09:06:30.7488 DEC=69:30:30.830)，是目前已知最远的耀变体 (Blazer)，红移为 5.47，距离约 122 光年，中心超大质量黑洞约为 20 亿倍太阳质量校准源有 NRAO150, 0836+710, 4C39.25, 3C279。

使用 VLBA 接收机，中心频率 15.11 GHz，波段宽度 64MHz，通道宽度 500kHz, 包括两个中频，128 个通道，对 RR、LL 两种偏振进行观测，观测时间共 8 小时，天线总观测时间 4790 min (10) (2017 年 9 月 11 日 13:49-21:48)。可见度函数数量共有 567329，其中目标源有 513562。

本实习中运用 AIPS 和 DIFMAP 软件分别对数据进行校准与成像。原始数据为 IDFITS 格式，约 2.3GB，校正后生成 UVFITS 格式文件，约 34.1MB，最后成像。

AIPS 软件是天文图像处理系统 (Astronomical Image Processing System)，是一套连续谱和谱线观测的分析系统，广泛用于 VLBI 数据。包括校准与成像的功能。其核心思想是数据是神圣的，即在校准过程中不去触及原始数据，所有的校准信息以表的形式附着在数据文件上。这些表可以被编辑、合并、平滑、内插外插或者删除，通过尝试与错误改进修正解。即原始的 UVdata 与校准表、标记表、带通表结合产生校正后的 UVdata。



AIPS 的流程示意图如上，其中 UVdata 包括目标源和校准源的数据，CL 表，SN 表都是修改表，CL 表中包含校准信息，SN 表中包含校准的解。

软件环境中包括文件（File）与表(Table)，需要导入 FITS 文件，文件名字分为，name class number，其中 name 自定。表有多种，见附录，在处理过程中最重要的是 CL 表与 SN 表。运行时命令行输入包括 Task(可独立运行的花费几分钟到几小时的任务)、Verb（交互式的简单快速运行）、Adverb（提供参数）三个种类的内容。AIPS 开始界面中用三个窗口，TV 显示图像，Message 显示运行任务的信息，TEK 显示绘图。

DIFMAP 是一个专门用来做 VLBI 混合成图的软件包。功能比较单一，前期准备工作（条纹拟合、振幅校正、UV 数据排序）需要其他软件完成（例如 AIPS）。而之后其成图功能快速灵活。其处理的中间数据（校正后的数据、残图和 CLEAN 图、校正数据和输入命令的各种参数等）都保存在内存之中，不像 AIPS 那样使用硬盘缓冲区。DIFMAP 采用指针功能完成数据的存取，使得算法大大简化的同时运行速度显著提高。

DIFMAP 提供基于图像的交互式命令，从而使用户有设置成图参数，从而可以直观得到（UV 可见度的闭合相位、图像某一区域的统计特性、模型与数据的拟合情况等等。）

四 数据处理步骤

4.1 打开 AIPS 与进入处理账户

在 Linux 系统下终端打开 AIPS 后，检查各个窗口是否正常出现，回车后输入处理任务的 ID，开始在此数据处理账户中进行数据处理。

4.2 导入数据

用 FITLD 函数载入要处理的 uvdata 数据。input 查看载入时要改动的各项参数：DATAIN 改为文件所在的路径（PWD:VLBA_BZ068.idifits），OUTNAME 改为要输出的文件名（bz68）（在 AIPS 环境中应用），CLINT 表示于 VLBA 相关器的数据的 CL 条目之间的间隔（1/6min），控制 VLBA 相关器数字校正(1),WTTHRESH 表示基于权重的标记阈值选项，取值 0 到 1 之间（0.7）。参数修改完毕后，键入 go 运行。可以得到导入的数据信息：

```

FITLD1: Image=MULTI      (UV)      Filename=bz68      .UVDATA.    1
FITLD1: Telescope=VLBA      Receiver=VLBA
FITLD1: Observer=BZ068      User #=    68
FITLD1: Observ. date=11-SEP-2017      Map date=07-DEC-2017
FITLD1: # visibilities      567329      Sort order    TB
FITLD1: Rand axes: UU-L-SIN  VV-L-SIN  WW-L-SIN  TIME1  SUBARRAY
FITLD1:      SOURCE  FREQSEL  INTTIM  GATEID  ANTENNA1  ANTENNA2
FITLD1:      CORR-ID
FITLD1: -----
FITLD1: Type      Pixels      Coord value      at Pixel      Coord incr      Rotat
FITLD1: COMPLEX      3      1.0000000E+00      1.00      1.0000000E+00      0.00
FITLD1: STOKES      2      -1.0000000E+00      1.00      -1.0000000E+00      0.00
FITLD1: FREQ      128      1.5112000E+10      1.00      5.0000000E+05      0.00
FITLD1: IF      2      1.0000000E+00      1.00      1.0000000E+00      0.00
FITLD1: RA      1      00 00 00.000      1.00      0.000000      0.00
FITLD1: DEC      1      00 00 00.000      1.00      0.000000      0.00
FITLD1: -----
FITLD1: Coordinate equinox 2000.00
FITLD1: Maximum version number of extension files of type HI is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type AT is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type IM is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type CT is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type MC is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type NX is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type CL is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type GC is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type WX is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type TY is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type PC is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type FQ is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type AN is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type SU is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type CQ is      1
FITLD1: Maximum version number of extension files of type FG is      1
FITLD1: Appears to have ended successfully
FITLD1: localhos 31DEC16 TST: Cpu=      40.9      Real=      143      IO=      4091

```

包含数据的基本信息与创建了各种新的表。在其他任务执行过程中，可以用 `pcat` 查看数据读写状态，`imheader` 查看数据文件表头和当前各种表的版本类型。

4.3 进入 VLBA pipeline

运行 `RUN VLBAUTIL` 进入 VLBA 工作流程，链接 VLBA 在线网络信息，通过 `VLBAEOPS` 修正地球定位参数，通过 `VLBATECR` 进行地球电离层的改正。

4.4 自相关校正

ACCOR 使用自相关光谱的测量校正由于采样器阈值中的误差引起的互相关谱中的振幅的变化。getname 获取需要修改的 SN 表版本 (1) , 然后直接运行。CLCAL 将来自一组 SN 表的解决方案应用于所选一个 CL 表中的条目, 并将它们写入另一个表 CL 表。操作码选择校正模式 (opcode 'cali') , 插值类型选择自身插值 (interpol 'self') , 选择应用的 SN 表版本号 (snver 1) 、被作用的 CL 版本号 (gainver 3) 与获得的版本号 (gainver 4) , 然后运行。

4.5 振幅修正

APCAL 由 FITLD 加载的系统温度 (TY) 表和增益曲线 GC 表作为输入, 并生成包含振幅增益校准信息的解 (SN) 表。获取作用文件, 应用操作码 (opcode 'grid') 中的拟合方法 (dofit 1) , 并输入系统温度表和增益曲线表、解表的版本号码 (tyver 1;gcver 1; snver 2) , 运行。此时可通过修改操作码中的不同的拟合函数进行拟合 ('grid', 'opac', 'lesq', 'grdr') , 因为数据质量不同, 选择不同函数会有不同拟合结果, 拟合完毕会告知好解与坏解的多少, 由此选择合适的拟合函数。再输入每个天线的接收机温度和天顶处的不透明度, 用于进行振幅修正。

4.6 数据编辑

根据之前的数据优劣标记结果, 剔除不好数据, 再次应用 CLCAL, 将新的 SN 解表应用到新的 CL 表上。并使用 VLBAPANG 对视差角进行修正。

4.7 条纹修正

FRING 确定在给定源模型的情况下应用 uv 数据集的群延迟和相位速率校准。获取文件后, 选择标记表版本 (flagver 1) SN 解表版本等, 选择时间范围与参考天线, 并输入延迟率参数运行。得到新 SN 解表后, 应用 CLCLA 函数将其应用与 CL 表。

4.8 带通修正

用 BPASS 命令, 创建一个 'BP' (带通) 表, 其中包含天线的带通响应函数。该命令可以通过以下两种方式形成函数: a) 将基线函数 (使用最小二乘法) 分解为基于天线的复杂带通函数, 或 b) 通过使用自相关数据作为函数的振幅部分, 并将函数的相位设置为默认情况下。在确定带通之前, 用所谓的 “信道 0” 来划分数据, 这就消除了首先校准数据和通过模型进行任何划分的要求, 从而进行了带通修正。选择带通响应函数的校准源 (calsour '0836+710') , 应用多源数据校准单目标源 (docalib 1) , 再根据实际情况进行其他参数选择 (bpassprm) , 选择观测波段的通道范围 (ichansel) , 选择输出 BP 带通表的范围, 运行。

4.9 分离与导出数据

用 SPLIT 命令将多源 uvdata 拆分出所需要的目标源，用 FITTP 将 AIPS 校准完毕的 uvdata 写入到文件并命名。这样就完成了原始 uvdata 到校准好的 uvdata 的转换。

4.10 导入 DIFMAP 并选择偏振

在终端运行 DIFMAP，用 observe 命令将校准好的数据导入 uvdata.则界面显示数据表头，如图所示，

```
AN table 1: 11909 integrations on 36 of 36 possible baselines.
Apparent sampling: 0.943047 visibilities/baseline/integration-bin.
Found source: J0906+69

There are 2 IFs, and a total of 2 channels:

IF Channel  Frequency Freq offset  Number of  Overall IF
  origin   at origin  per channel  channels   bandwidth
----- (Hz)
01      1 1.51438e+10   6.4e+07      1   6.4e+07
02      2 1.52078e+10   6.4e+07      1   6.4e+07

Polarization(s): RR LL

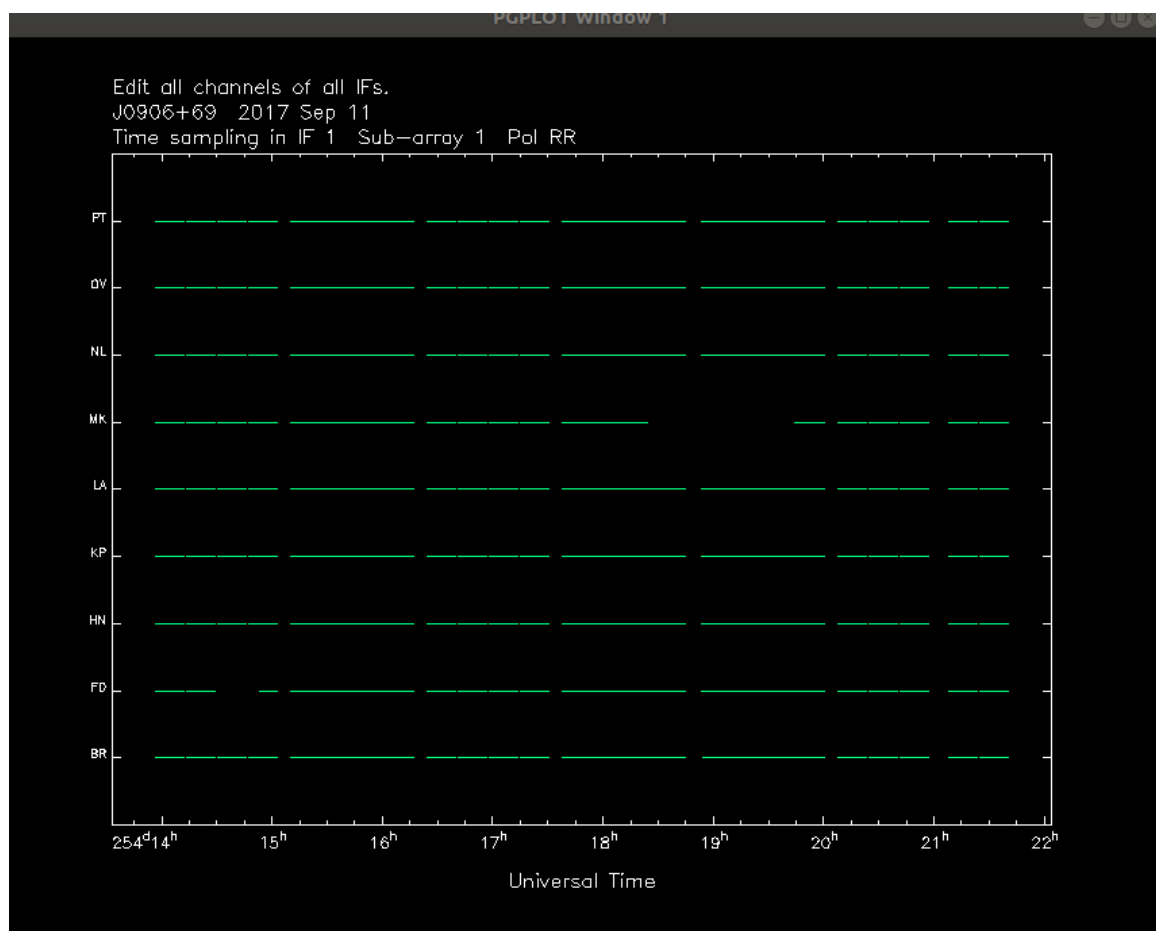
Read 491 lines of history.

Reading 1617228 visibilities.
```

得到目标源的信息以及观测波段和可见度的信息等，成图需要使用 Select 选择要作图的偏振（RR 或者 LL）。

4.11 振幅相位绘图

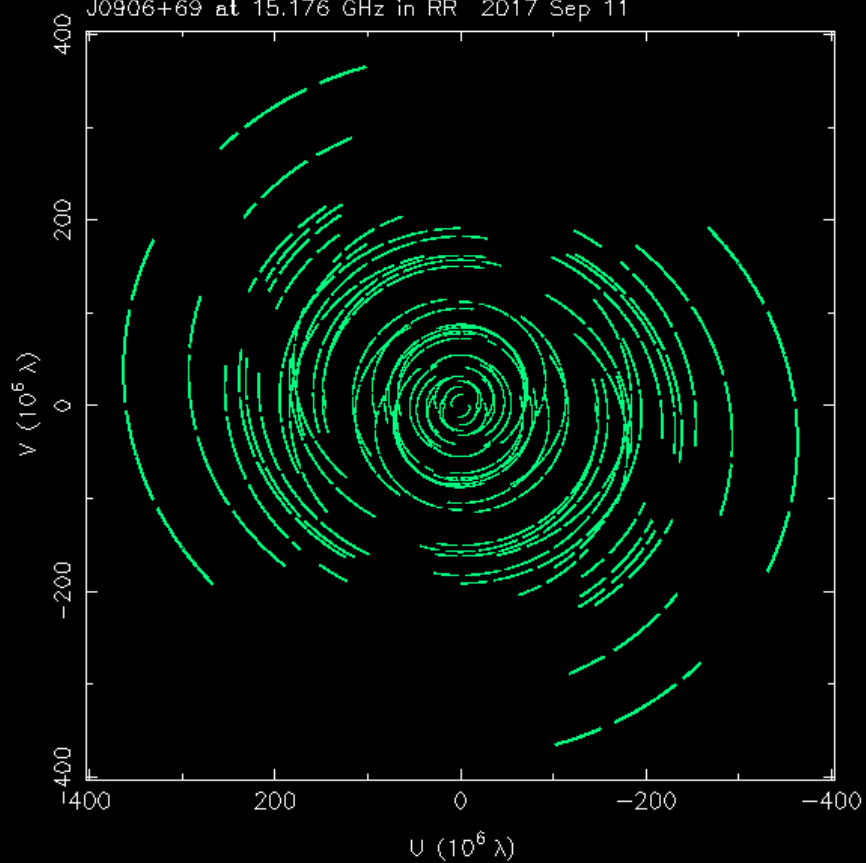
利用 vplot，选择界面显示设备（如 /XWINDOW），根据参数信息（见附录 2）进行交互式操作得到基本信息图。可以查看每个偏振、每个基线和中频的时间-相位图、时间-振幅图等。



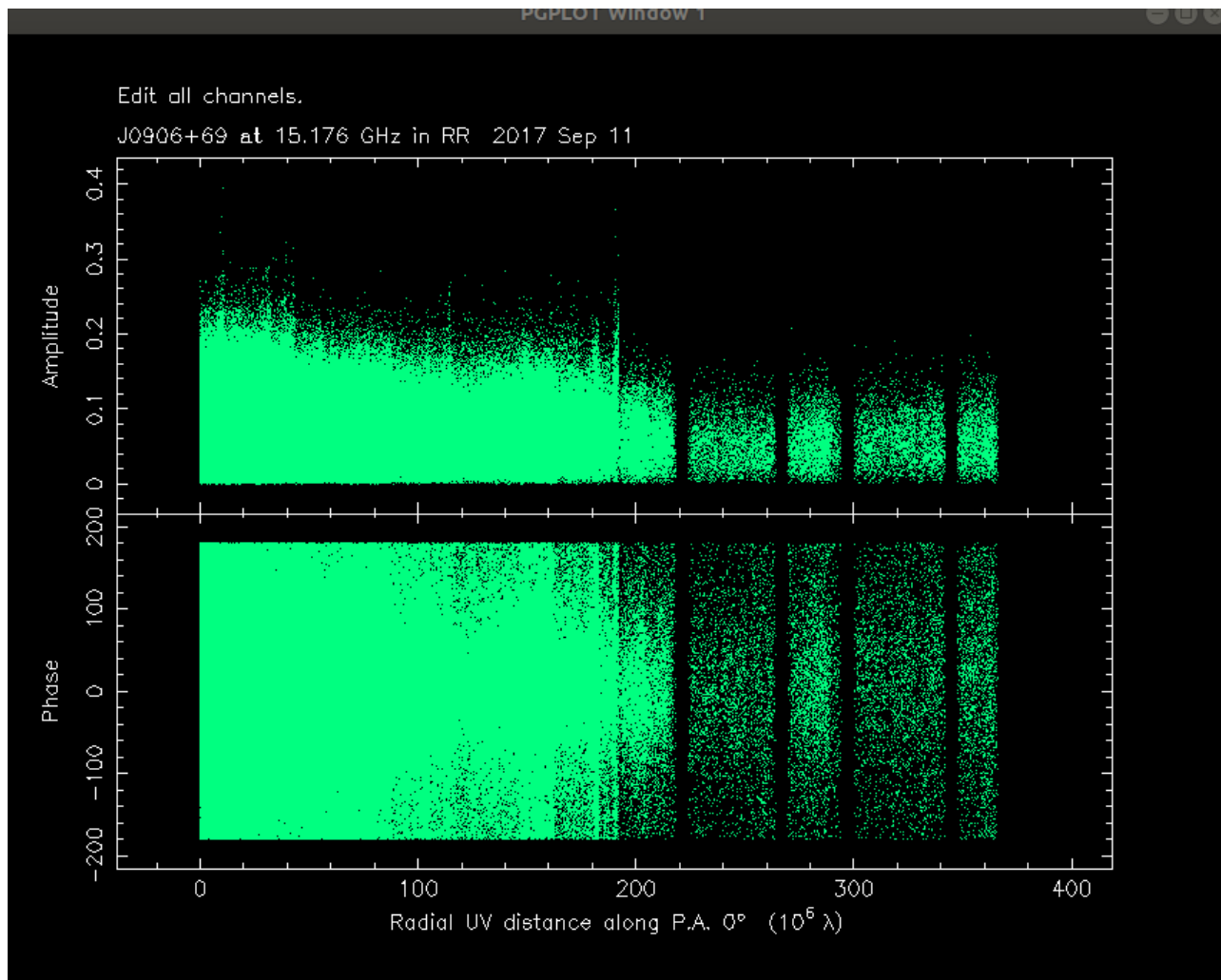
每个基线对于目标源的观测时间（RR，IF 1）。

Edit all channels.

J0906+69 at 15.176 GHz in RR 2017 Sep 11



参与观测的阵列的 UV 覆盖。

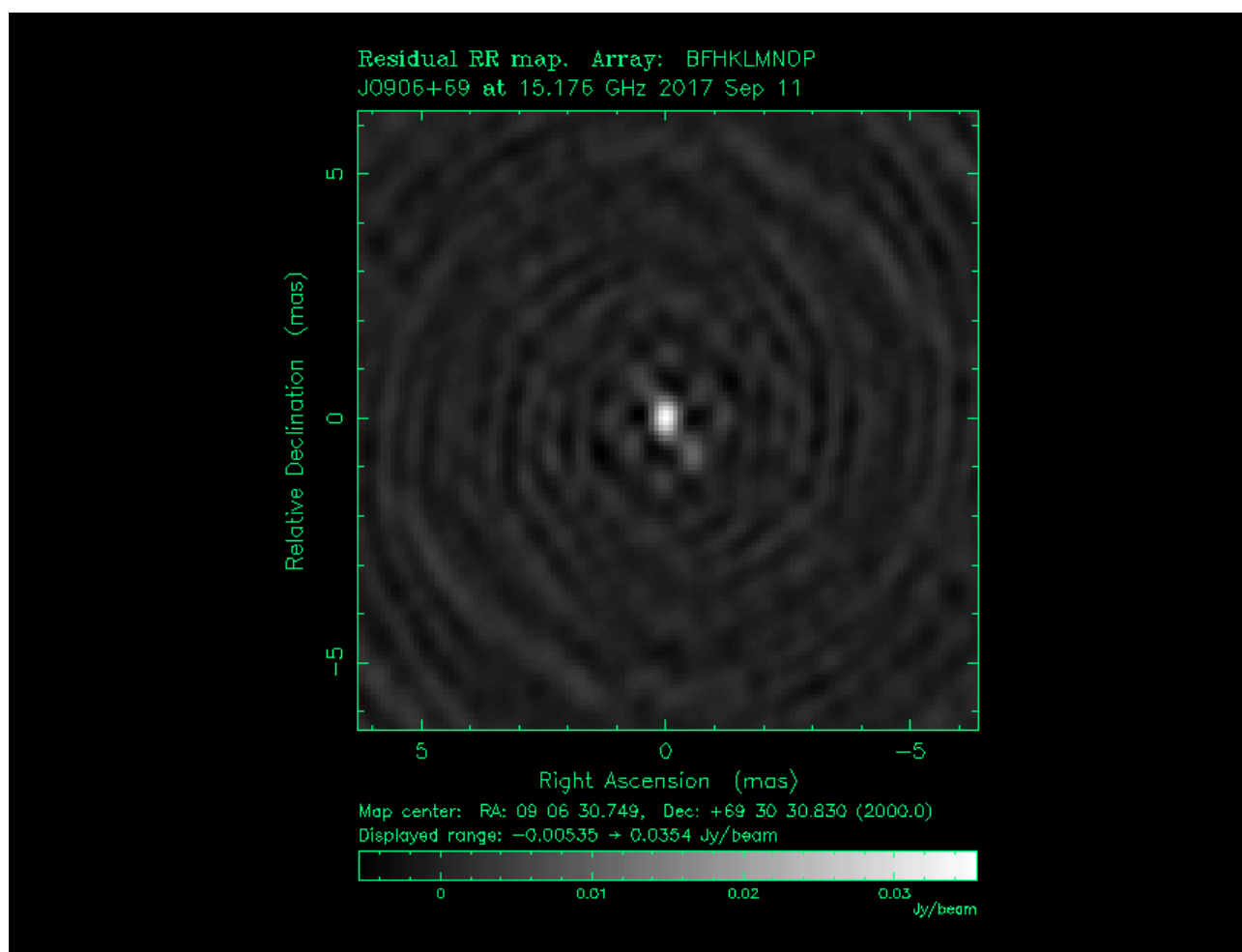


数据的视向 UV 距离与振幅、相位采样。

4.12 对脏图进行 CLEAN

命令 `maplot` 可以展示出脏图，需要预先用 `mapsize` 命令定图像像素多少与每个像素大小，为了保证清晰度与准确性，实习中采用 1024×1024 像素，每个像素大小 0.02 毫角秒。在脏图中预先选中一个中心较亮的区域，通过 `clean->selfcal` 循环进行 CLEAN 算法的实施。`maplot` 随时查看图中成分，有新成分就框住再次循环。或者利用 `peakwin` 选择中心的一个方形区域进行循环。直至噪声小到一定范围，即查看 `peak(flux)/imstat(rms)` 大小，保证在小于 5 范围内。

数据成图权重换自然权 (`uvweight 2,-1`)，此时可通过净图查看有无结构 (`maplot cln`)，有则继续进行 CLEAN 循环。最后再通过调整图像最低流量显示 (`cmul=3*imstat(rms)`) 去除掉周围其他噪声。



CLEAN 前的脏图，中心有明显的亮源，周围分布着很强的噪声。

```
0>clean
clean: niter=100 gain=0.05 cutoff=0
Component: 050 - total flux cleaned = 0.00131566 Jy
Component: 100 - total flux cleaned = 0.00222969 Jy
Total flux subtracted in 100 components = 0.00222969 Jy
Clean residual min=-0.009218 max=0.004689 Jy/beam
Clean residual mean=0.000005 rms=0.000408 Jy/beam
Combined flux in latest and established models = 0.0715355 Jy

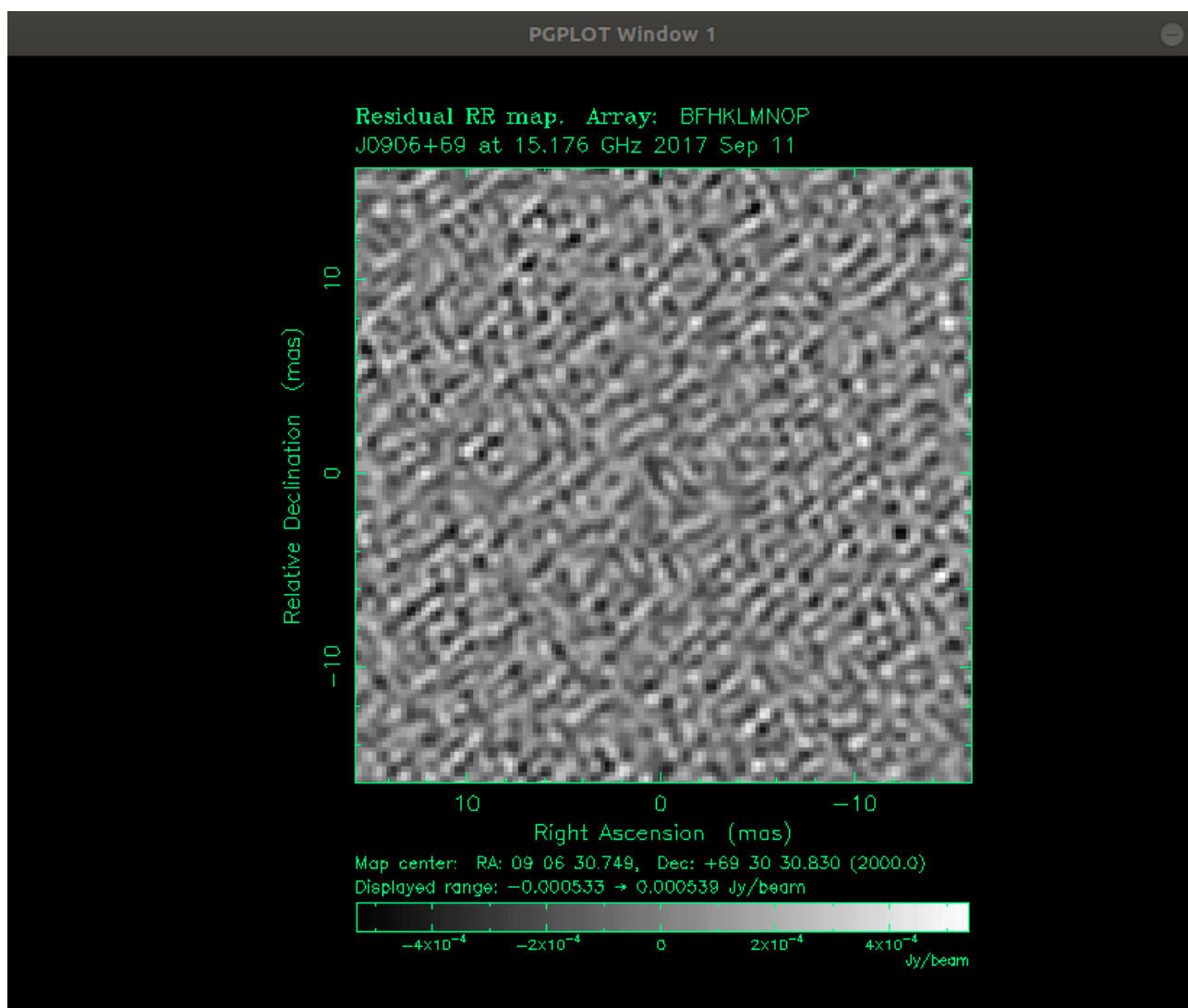
0>selfcal
Performing phase self-cal
Adding 7 model components to the UV plane model.
The established model now contains 8 components and 0.0715355 Jy

Correcting IF 1.

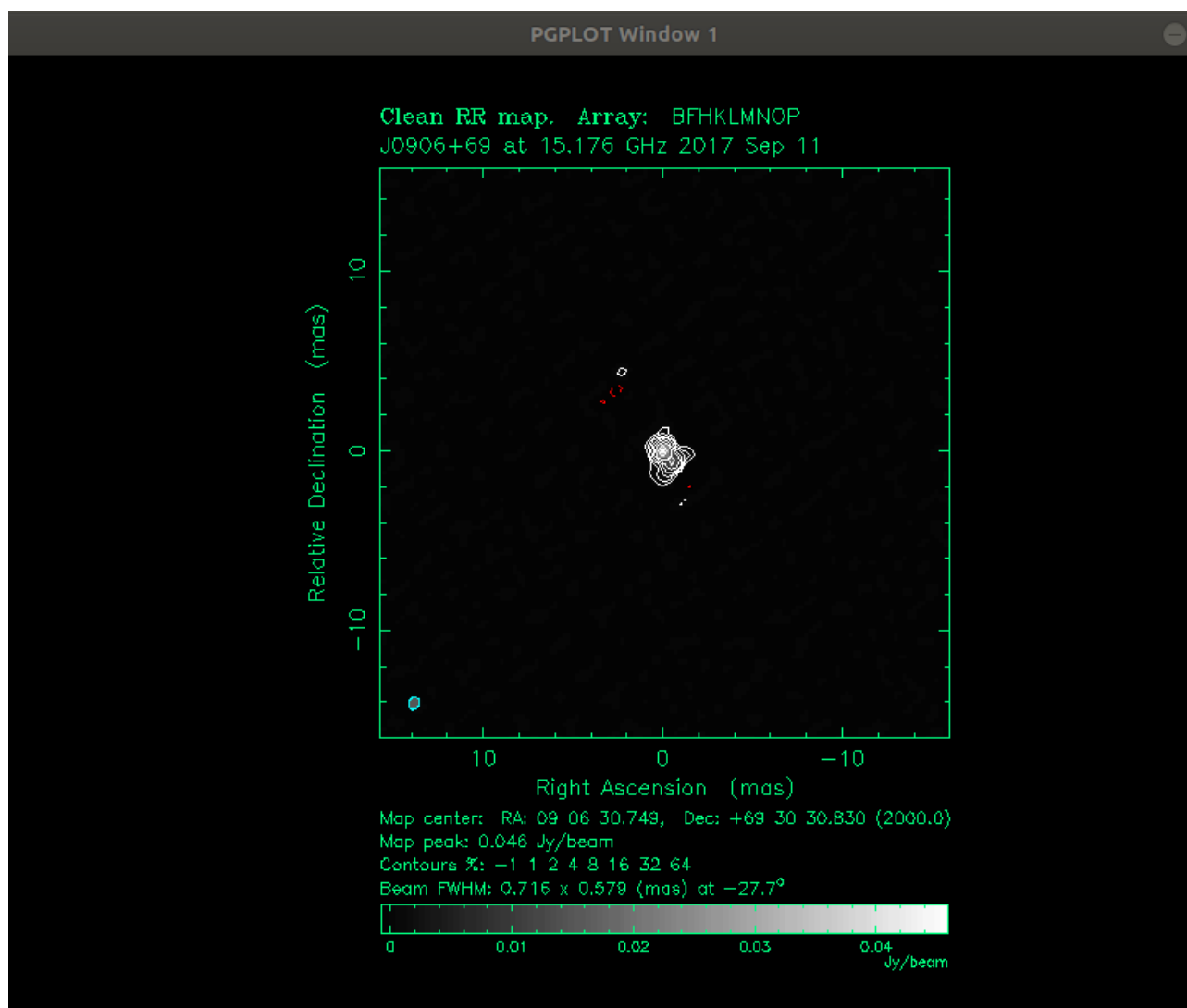
Correcting IF 2.

Fit before self-cal, rms=0.064918Jy sigma=0.000610
Fit after self-cal, rms=0.064847Jy sigma=0.000609
```

CLEAN 与自校正循环过程中的提示，对图像流量定标、对 UV 平面模型增加新模型，修正中频数据，展示校正前后流量分别。



CLEAN 之后的图像，图中心看起来似乎有结构。

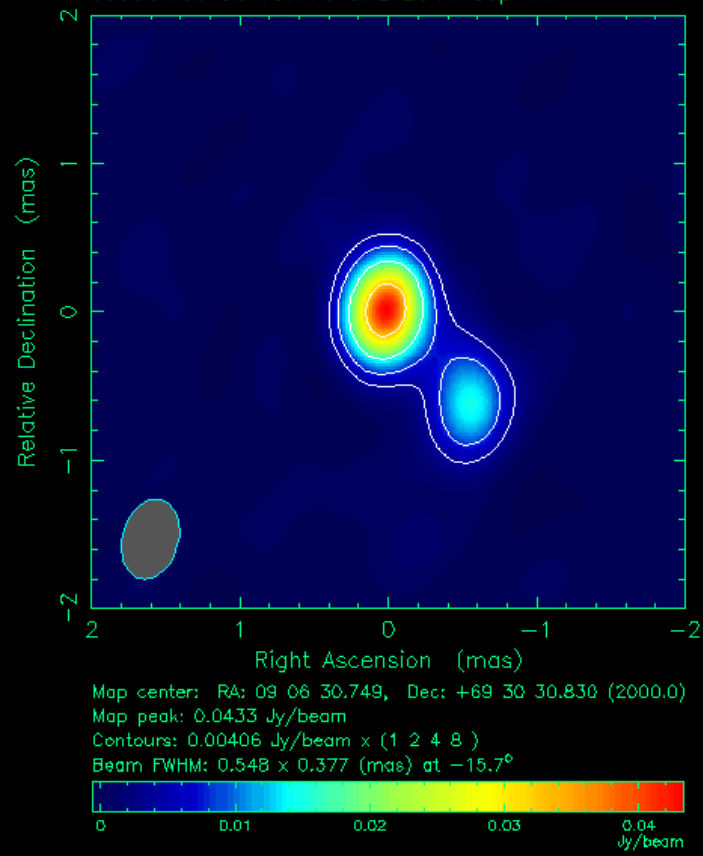


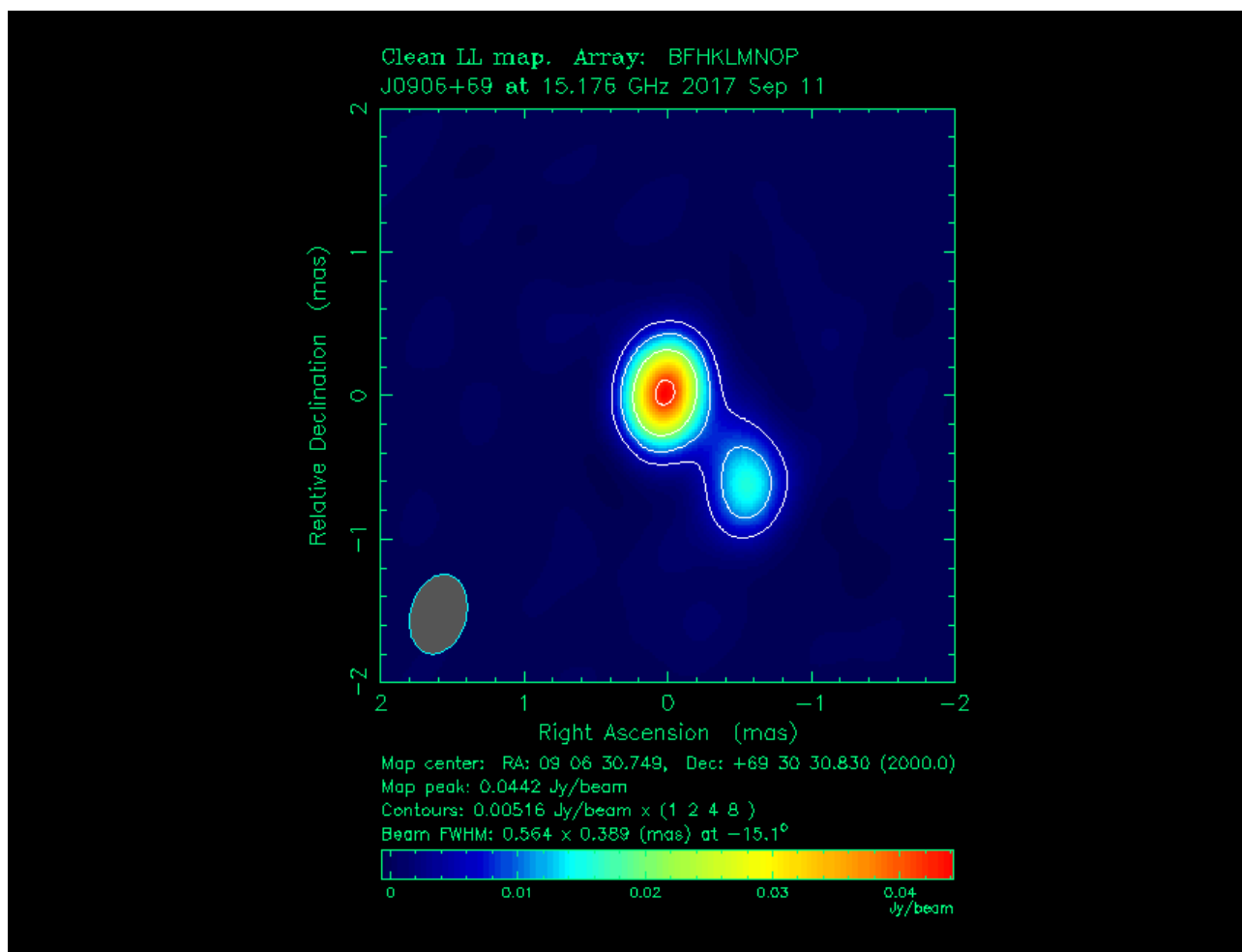
经过与波束的反卷积，显出结构特征。

4.13 图像显示与保存

CLEAN 之后，通过查看净图（`mapplot cln`）看出图中明显的结构与非常低的噪声水平，再看根据偏好设置图像等高线（如 `levs=-1, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128`），选择显示图像的坐标轴尺寸（`xrange xa, xb, ya, yb`）等，选择输出图像设备（如 `device /PS`），并进行保存（`save`）。

Clean RR map. Array: BFHKLMNOP
J0906+69 at 15.176 GHz 2017 Sep 11





通过调整坐标尺寸并转换为彩图，可以清晰地得到射电源 J0906+69 在 15.176GHz 的图像（上图分别为 RR 偏振与 LL 偏振）。图中亮源可能有一个明显的射点瓣，之后便可保存图像并做进一步研究。

五、总结讨论

本实习主要应用了射电干涉阵观测数据校正与成图的原理，利用 AIPS 与 DIFMAP 两个数据处理软件，对 VLBA 的一个目标射电源的亮度二维分布进行了数据处理与成图。这是射电天文学研究的一个基础与必备技能。通过成图，可以清楚的看出射电源的结构与频谱特征，对于研究射电源的分类、能量机制、形成、演化、相互作用等重要科学目标有着非常基础的意义。

六、附录：

1、AIPS 中 Table 的种类与说明

AN 天线表，包括阵列的几何信息。

BP 带通表，包括可见度的带通改正函数。

CL 校准表，包括所有现在用户希望应用的校准信息

FQ 频率表，频率装置信息

FG 标记表，数据标记信息

GC 增益表，每个天线的增益信息

HI 历史表，所有对数据文件的操作信息

NX 索引表，每次扫描的不同信息

SN 解表，每次校准的解

TY 系统温度表，每个天线的系统温度和天线温度

2、DIFMAP 中 vplot 交互使用方法

H 列出下列快捷键

X 退出 vplot，或者右键

A 左键标出或取消标记可见度

U 选择新的时间范围，两下是所有范围

Z 选择新的振幅或者相位范围，两下是所有范围

C 标出特定矩形内的所有数据

K 标出所有选中数据的可见度并且扫描

L 重新展示现在的绘图

n 显示下一组基线

p 前一组 N 前一个子数组

P 下一个子数组

]下一个 IF

[上一个 IF

3、DIFMAP 中 maplot 交互使用方法

X 退出

A 选择一个新的干净窗口的两个相对的对角。

D 删除窗口最靠近光标的一个角落。

S 用最靠近光标的一个角来描述窗口的面积。

V 报告光标下的像素值。

f 伪彩色图对比度和亮度。

F 重置色标对比度和亮度为 1，0.5。

L 重新显示绘图。

G 安装默认的灰度级颜色图。

c 安装默认的伪彩色图。

C 安装一个在键盘上命名的彩色图。

T 重新显示具有不同的转移函数。

Z 选择一个要显示的子图像。

K 保留当前的子图像限制，用于后续的 `maplot`

m 切换显示的模型。

M 切换模型的可变部分。

N 启动对一个新的模型组件的描述。

R 删除最接近光标的模型组件。

U 删除最靠近光标的标记。

+ 切换是否使用十字头发光标，如果可用的话。

H 列表键绑定。