

# 13.7m毫米波射电望远镜暑期实习报告 \*

裘丛欣 †‡§

2005.07.15 - 2005.08.19

本次实习历时一个多月，主要涉及有关望远镜接收机的一些工作，虽然我有时候也到其它部门客串一下。前期主要是对一些背景问题（实验室环境及实验涉及基本内容、基本仪器的使用、接收机及射电望远镜的一些基本原理、整个台站各部门工作目的及性质以及其它概略状况）的了解，基本上只是在实验室打下手，而有时则是一个完全的旁观者。这段时间显见的工作是很少的，基本上只是个人化的思考并且私下里读了几本书使得自己对于这个领域有一个大体的了解（在此之前我对于整个“观测天体物理学”以及“射电天文学”都是完全陌生的）。后期我对实验测量数据进行一些分析，并尝试在物理上给予其一定的解释。我主要依靠Mathematica来完成这些工作。

本文试图对实验数据分析的工作做一个综述性的总结<sup>1</sup>。

## 1 背景情况

对望远镜接收机方向图的测量及分析（并由实验结果来调整接收机状况并完成一些定标工作），是我们进行实验测量的完全目的。实验方法是让一个发射源在二维平面上扫描并记录馈源接收信号的强弱，由此反推接收机方向图的形状（即其对于来源于各个方向电磁波的敏感性差别）。扫描顺序及坐标架含义如图 1 所标识。

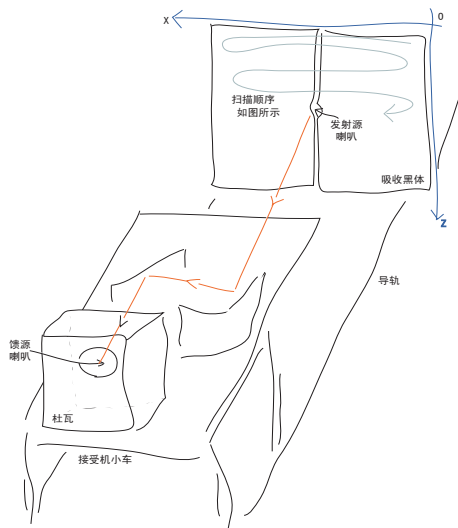


图 1: 实验室示意图

\*中国科学院紫金山天文台青海射电天文观测站 德令哈毫米波观测基地

†北京大学 地球与空间科学学院 地球物理学专业 2002级本科

‡<http://geophy.pku.edu.cn/persons/qiucongxin/>

§实验数据采集的原始文件直接得益于张旭国及其程序，格式亦是对其无选择地接受（此数据文件有诸多不爽之处）。基本的数据处理内容先前已有杜福君（不知道是不是应该叫师兄）的Matlab版本以及不详编写者的Origin版本，我应该只是把他/tā们的程序Mathematica化（只因为我用Mathematica要熟悉的多）。对于馈源方向图（发射源处于正常扫描状态）的背景噪声分析，基本上是杨戟老师的思路。对于实验室状况以及实验环境（设计）的描述，相关文档中能看到长长的一串参与者名单（相信吴洁青、张旭国、左营喜等几位老师对此都是关键的），而我最多只能算个目击证人。

<sup>1</sup>详细的技术问题以及考虑分析的过程（历史）才有意义的那些分析大量被省略了。对于多组相同条件下的测量数据的比较同样被省略了。如有需要，请参阅我两周来的一组报告。

实验数据处理实际上已经基于如下假设：由于发射源喇叭的半功率波束宽度（ $16.9^\circ$ ）远大于馈源喇叭等效于卡焦处的半功率波束宽度（ $9.3^\circ$ ）[1]，我们简单地假设①发射源发射的是各向同性的球面波；由于在通常情况下，发射源于馈源之间距离远大于扫描时发射源的移动范围，②扫描所造成的距离变化被简单地忽略了<sup>2</sup>。

扫描范围区间为 $x \in [0, 500]mm$ 和 $z \in [0, 500]mm$ 。方向图中心的期望值在 $(250, 250)mm$ 处，但是实际情况会与期望值有所差别。原始数据文件格式为 $[x轴坐标/mm][z轴坐标/mm][测量值I/mV]$ 。

## 2 基本数据处理

按照测值位置在平面内标示出测量值大小，对于我们直观地理解测量情况大有好处。通过简单的矩阵运算把测量值与其它数据分离开，然后对其按与测量顺序相关的特定步骤进行切割，便可以得到测量值按位置的矩阵分布。之后用特定函数绘制密度图、进行插值后的等高线图、或者三维分布图都很简单了。图 2给出了两个简单的例子，其中，左图为M21-1m5-0810-0020.dat的密度图，密度图更多地显示原始数据的状况，但是它也许并不利于直观反映图形的对称性及其缺陷；右图为m21-1m5-0810-0230e.dat的等高线图，可以清楚地看出，在测量过程中发射源发生了三次失锁。

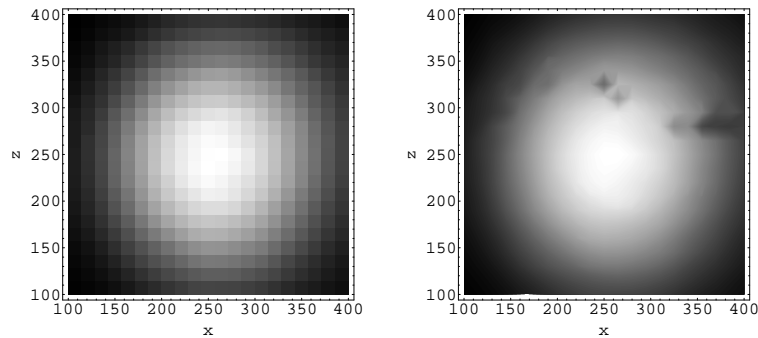


图 2: 密度图和等高线图的简单例子

## 3 寻找波束中心点

### 3.1 高斯函数拟合

寻找波束中心点的常规方法，是用高斯函数对数据进行拟合并寻找拟合数据的中心点，即假设方向图主瓣是呈高斯分布的。考虑到线性回归的若干技术问题，最好的（相对来说可以被确定的变量最多的）拟合方法并不能够把噪声强度<sup>3</sup>作为一个自由变量引入。假设波束方向图具有函数形式 $I = A \exp[\alpha(x - x_0)^2 + \beta(z - z_0)^2]$ 。对方程两边同时取对数，我们有 $\ln I = \ln A + \alpha(x - x_0)^2 + \beta(z - z_0)^2$ 。对测值的对数 $\ln I$ 用函数 $1, x, x^2, z, z^2$ 进行拟合，得到前面的系数，便可以唯一确定自由变量 $A, \alpha, \beta, x_0, z_0$ 的大小。

例如，对于测量数据M21-1m5-0810-0020.dat，如果假设背景噪声为0.1，可以得到拟合函数

$$I = 7.80246 \exp[-0.0000841909(x - 266.789)^2 - 0.0000713947(z - 245.558)^2] + 0.1$$

从以上拟合数据中，可以清楚地看出中心点位于 $(266.789, 245.558)mm$ 处。高斯拟合结果和原始数据的比较如图 3。

<sup>2</sup>我曾经尝试对此进行修正，但是计算结果表明这种修正是没有太大意义的。

<sup>3</sup>我们假设噪声是一个与位置（波束方向）无关的常量，因而它应该是与拟合的函数相加的一项。

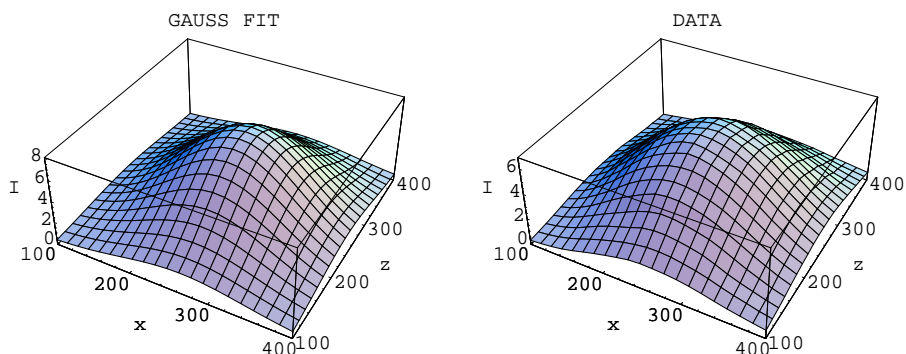


图 3: 高斯拟合结果与原始数据的比较

### 3.2 权重平均

但是笔者考虑，接收机是一个复杂的机械系统，它方向图是诸多因素综合的结果，简单地假设方向图是高斯型（或者假设其主瓣具有高斯型）是不正确的。实际上我们要指明的事情是，方向图具有中心最大值的构型。用更数学化的语言说，我们仅仅需要其方向图①足够光滑并且②具有足够好的对称性。

由于拟合出的高斯函数对于所有测量点是平权的，而实际上我们只关心波束中心部分（照明到望远镜副镜上的）那部分点的测值，我考虑对位置以测量值作为权重平均的方法更加合理。具体计算公式为

$$x_{center} = \frac{\sum_i I_i \times x_i}{\sum_i I_i}, \quad z_{center} = \frac{\sum_i I_i \times z_i}{\sum_i I_i} \quad (1)$$

### 3.3 两种方法的比较分析

对于多组数据的分析显示，在相同测量条件的情况下，用特定方法计算的中心值差别是很小的（即测量数据的可重复性是相当强的），但是两种方法的计算结果之间存在绝大的系统误差。例如对于对于8月10日早晨的8组数据，图 4显示明显的聚类特征和不能忽略的系统误差。其中绿点为高斯拟合的结果，红点为权重平均的结果<sup>4</sup>。

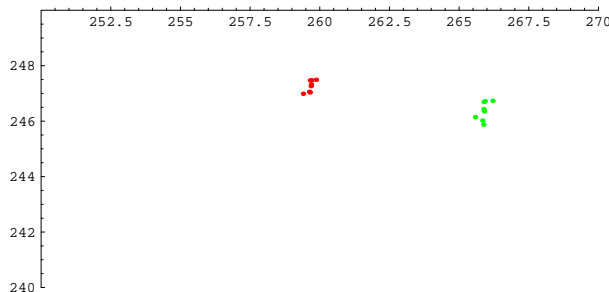


图 4: 两种方法寻找波束中心的比较

我曾经尝试通过对两种方法测的中心点的稳定性进行分析，来确定两种方法的对错或者优劣，但是一些相继的努力全部失败了。随后我意识到了问题的所在。测量数据只是实际上方向图的一小部分，没有测量的位置测值并非为零，并且它们远没有到可以被忽略的程度。因而，我改变了数据处理的方式。我不再对所取得的所有数据进行高斯拟合或者权重平均，而是设置一个阈值，仅对这个阈值以上的数据进行以上分析<sup>5</sup>。

<sup>4</sup>两种方法均未计及背景噪声的零点修正

<sup>5</sup>我实际的操作是把所有测值按照大小排序，然后相继扔掉测量值最小的若干个点。杜福君有一个严格设定阈值的计算。我和他的计算结果仅仅在横坐标选取上不一致，这两种方法的横坐标之间存在非线性的映射关系。

图 5 是对于测量 M21-1m5-0810-0020.dat 进行处理的结果。横坐标是剩余点数。由于测量数据为  $21 \times 21$  个点，共有 441 个点。纵坐标为得到的中心点位置，其中红线和紫线分别为高斯拟合和权重平均得到的  $x$  轴中心点位置，而绿线和蓝线分别为这两种方法所得到  $y$  轴中心点位置。可以看到，在取点数较少时，权重平均值非常不稳定而高斯拟合相对稳定，但是它们相对来说是重合的。在取点较多时，两种方法有很大的分歧<sup>6</sup>，并且权重平均开始偏向  $(250, 250)mm$  的地方。这一点是容易理解的，因为随着取点数的增加，测量数据是以  $(250, 250)mm$  为中心的方形区域这一点越来越影响权重平均的计算结果，而高斯拟合对其敏感性不大。

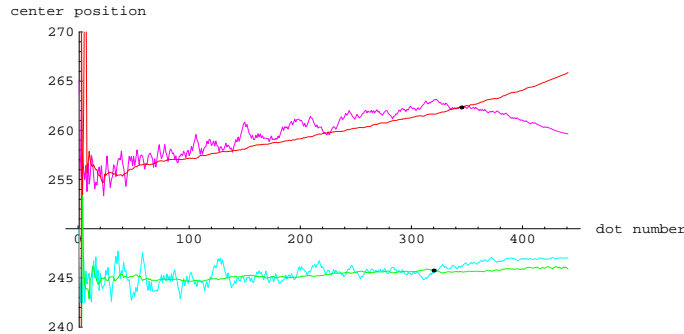


图 5: 经阈值选择后的中心值数据处理比较

由于两种方法对于不同的点数都能给出不同的计算结果，并且随点数增加结果并不显示出某种渐近行为，我们缺乏一个合理的判据来判断中心位置究竟是何处。因而，随后我们对于更大的范围（仪器所能达到的最大测量范围， $x$  坐标和  $z$  坐标分别在  $[0, 500]mm$  之间变化）进行了扫描并取了更密集的测点。图 6 显示了对数据文件 M41-75cm-0812-1648a.dat ( $41 \times 41$  点) 进行同样处理的结果，颜色、符号等的含义均与图 5 相同。可以看出，在点数较小时，高斯拟合和权重平均的结果基本重合，但是权重平均相对不稳定的多。而点数较多时，权重平均显示出某种渐近行为，而高斯拟合的结果则波动非常大。这一点同样是可以理解的，因为当选择大范围时，实际上测量数据已经并不是高斯函数。事实上，如果把测量数据全部减去其最小值（作为对背景噪声修正的模拟），权重平均的结果在点数较多时趋于直线。笔者认为，这是权重平均的渐近行为作为波束中点的分析值是合理的。

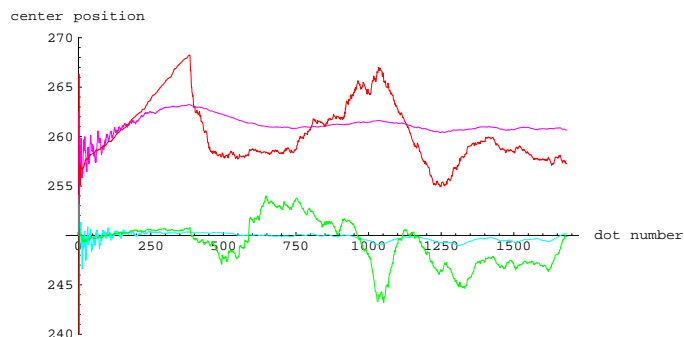


图 6: 对较大区域内进行的操作

## 4 方向图的对称性分析

一个具有对称性的接收机方向图是我们所希望的。具有  $O(2)$  对称性的方向图是最好的情形，我们起

<sup>6</sup>主要体现在  $x$  坐标上，这一点我不能理解原因。

码希望在一定的精度内它是这样的。但是实际上这是很难达到的，因为仪器安排以及周围环境并不是各向同性的，并且仪器的加工总是有缺陷的。即使不是这样，我们也希望方向图对于特定的轴具有镜像对称性，或者起码这种对称性比 $O(2)$ 对称性达到的好些。

#### 4.1 用高斯拟合结果来分析数据的对称性

为了更好的对方向图的对称性进行分析，我们最好可以先把测量数据与对称性无关的信息（比如那些反应方向图径向分布的信息）除去。一种最简单的方法是用原始数据减去高斯拟合的结果（高斯拟合相对于其中心对于 $x$ 和 $z$ 轴分别镜像对称）。对于数据M21-1m5-0810-0020.dat，高斯拟合和原始数据的比较如图 3，把两项结果相减，我们得到的结果如图 7。可以看出，拟合结果对于 $x$ 轴基本上是对称的（上下对称），但是对于 $z$ 轴并不对称（左右不对称）。我不能确定以上结果是否能够说明原始数据的对称性，但是左右不对称可以用射电波路径的左右不对称（因为射电波的路径经过一个凹面镜和一个平面镜的反射）来解释。

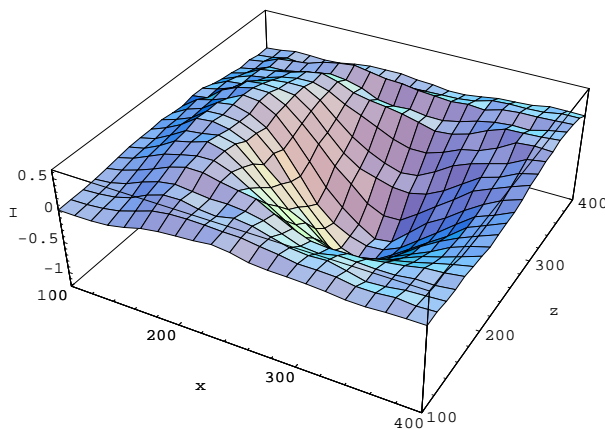


图 7: 原始数据与高斯拟合的差值比较

此外的，图 7可以用来检验高斯拟合结果的好坏。

#### 4.2 用具有 $O(2)$ 对称性的修正函数进行修正

把图 5中黑点所标记的点作为中心点（即点(262.327, 245.752)；这其实并不是很有道理，但是作为仅有如此多测值的情况下最好的结果），把与中心点的距离作为横坐标，以测值作为纵坐标，用一定的函数（我用的是五次多项式，拟合的效果不错；如果用高斯曲线其实也可以很好地拟合）对其拟合作为被减去的修正函数，然后观察修正后的测值随角度的变化规律，如图 8所示的结果，其中右图是左图在极坐标下的表示，只是为了清晰把所有的值加了0.5的增益。

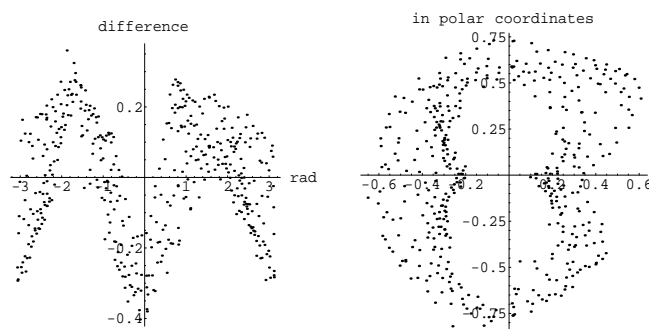


图 8: 对称性分析

由图所示，笔者认为能够得出结论，方向图对与 $x$ 和 $z$ 轴各具有对称性，但是并没有 $O(2)$ 对称性。并且，对于 $x$ 轴的对称性比对于 $z$ 轴的对称性要强一些。此外想要说明的是，以上图形对于中心点的选择是不敏感的（需要特别说明点聚的离散性可能很大程度上是由模型的误差造成的）。

实际上，如果忽略中心点选择的一些差别（直接减去高斯函数毫无疑问选择的是高斯函数的中心作为中心点了），如果选择高斯函数作为修正函数，相当于用一个 $\alpha$ 值和 $\beta$ 值相等的高斯函数进行拟合。由于本小节使用的修正比上一节的修正要弱一些，我们所能看到的对称性也多一些。

## 5 背景噪声分析

### 5.1 方向图测量数据的背景分析

大的测量范围带给我们更多有关方向图的信息。对数据文件M41-75cm-0812-1648a.dat（最大范围， $41 \times 41$ 点）绘制等高线图时，如果把高端数据截断，就可以清楚地看到系统的一级旁瓣和二级旁瓣（如图9）。

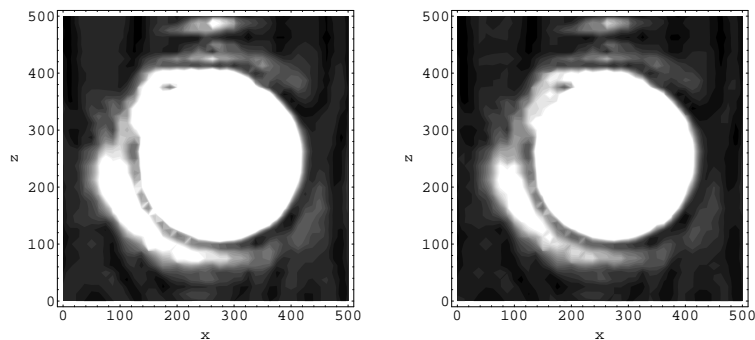


图 9: 旁瓣。左边是原始测量数据，右边是取 $dB$ 之后的值

相对大范围的测量数据为背景噪声的分析提供了线索。考虑旁瓣之间的零点，它们的测值应该是完全有噪声造成的。我们尝试计算了测值最小的若干点（认为当点数足够小时，所有涉及的点都可以被认为仅仅是由背景噪声造成的）的均方根误差，然而发现当点数逐渐减少时，它们并没有收敛的迹象<sup>7</sup>。

随后，我们计算了取 $dB$ 后的测值按与中心距离的分布（如图10）。在这张分布图中，旁瓣可以被清楚地看出。但是同样清楚的是，无论如何分布的点都不能很好地聚集在一条直线上（这是由于方向图的对称性不好和其它一些因素造成的）。

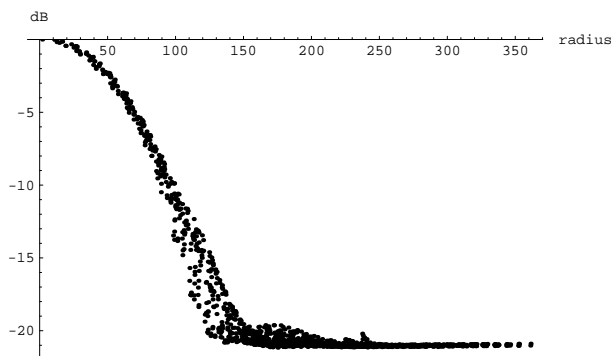


图 10: 二维截面所看到的旁瓣

<sup>7</sup>实际上我们做得还要更多一些。由于这次测量发射源喇叭与馈源喇叭之间的距离很近，发射源的移动范围又很大，我们还用毕达哥拉斯定理对距离进行了修正（修正假定信号强度是二次方反比衰减的）。

当仔细观察图形下端测值较小的区域时，我们惊讶地发现测值具有分层现象。本来我们以为这种分层现象是由于对称性不好所致，因而我们假设如果把各层的点还原到原来的坐标位置，它们会聚集在不同的区域。但是，当我们真的做这件事情的时候，我们奇迹般地发现它们是均匀分布在扫描平面上的。图 11清楚地显示出这一点<sup>8</sup>。

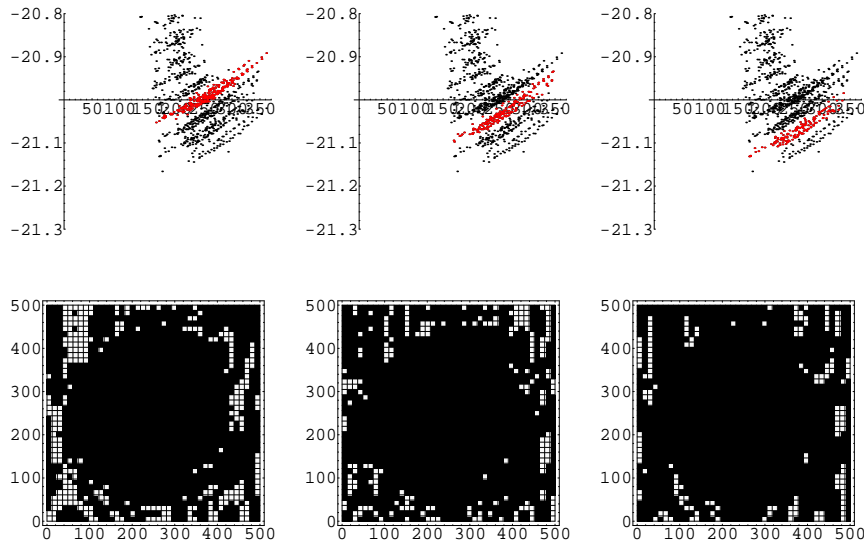


图 11: 分层的数据点还原之后的分布

然而，当接下来我们把曾经作过的有关距离的修正去除之后，我们惊讶地发现这些点的分布变成了平的。于是当时我们猜测这种分层现象可能是由于数据采点的不连续性造成（测量的量子化的记录之后数据又发生一定的漂移；所以这种分层分布仍有一定的弥散性），但是并不能排除这是由于后期数据处理的计算误差所致。

随后，我们分析了信号的流程。我们发现，之前的采集数据是首先经过锁定放大器内部的AD把信号变成数字信号，处理之后通过DA转换成模拟信号（DA是12bit的；精度不够），然后再送到数字万用表（数字万用表是六位半的，如果转换成AD的标准应该是22bit，这种测量精度是非常高的）。于是，我们去除了锁定放大器，直接把检波器出来的信号送给数字万用表，并进行了同样的测试。对新的测量数据（根据数据文件M51-75cm-0815-11.dat）用同样的方法进行分析的时候，这种分层现象果然消失了。由此可知，“这种现象是由数据采样不连续性造成的”这样的解释是正确的。但是数据点仍然有两个分层（它们并没有聚集的趋势）<sup>9</sup>。

并且还有一点值得注意，这种分层相比原先由于测量精度造成的分层并非一个小量，而其实比上面分层的距离还要大些（如图 13；考虑可比性，这里标示的并非取dB之后的值，而是绝对测量值；实际上标记方式是不关键的）。如果这两种因素是叠加在一起的（并且在原先的测量中这种分层也存在），那么原先对于数据点位置的还原就不应该是均匀的。这一点我不能够理解原因。

所幸的是，对于另外一组测量数据（M51-75-0815-b.dat）这种两层的分层现象并没有发生。也许这组数据与先前发现采样造成的分层的数据更为类似。

## 5.2 关闭发射源的情形

更进一步的，我们用关闭了发射源并进行了同样的测量。测量结果是一种奇怪的衍射斑纹，如图 14所

<sup>8</sup>扫描顺序大体是沿x轴进行的，然而如果说这些点的分布有什么特点的话，它们似乎沿z轴有成串的现象。这一点我至今不能理解原因。

<sup>9</sup>当时杨戟老师给了一个解释，说这是由于方向图的不对称性造成的（即x轴和z轴方向不一样宽）。但是当我还原两个分层的点的位置之后，发现它们的聚集方式有很特殊的特征（如图 12；上下强烈不对称）。目前杨戟老师提出的新解释说是由于馈源下面有一块金属板而上面是自由空间，电磁波在上下需要满足不同的边界条件。我对于这个解释基本认同，但是疑惑一点问题是前面的讨论一直显示上下的对称性要远比左右的对称性好，而为什么在这里出现反例。

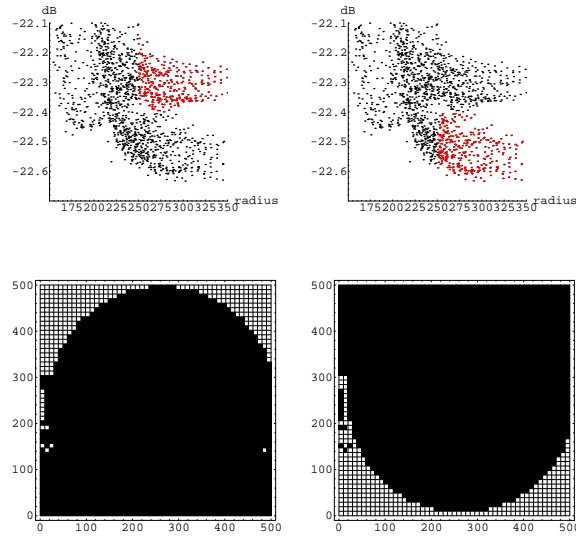


图 12: 增大采样率之后的测试结果

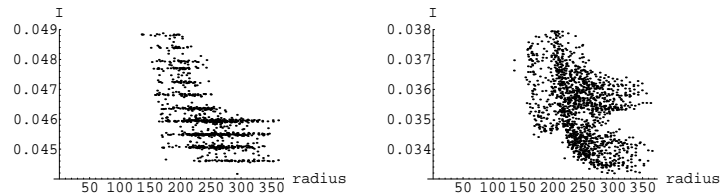


图 13: 分层距离的比较

示。左图为数据文件M51-75cm-0815a-bk.dat的密度图。从图中容易地看出，在测量过程中仪器状态两度发生了改变。右图为数据文件M51-75cm-0815b-bk.dat的等高线图，测量过程中仪器大体来说是稳定的。

衍射斑纹中间有四分之一的条状物似乎是简单的噪声，两边呈某种奇怪的构型并且大体对称分布（及相对 $z$ 轴对称或者说左右对称），但是上下并不具有对称性。更进一步的测量显示，这种花纹是相当稳定的，那么它应该是仪器内秉的构造决定的一个性质。而后重复在接收机小车前端平台上附加若干其它设备后进行同样的测量，测量出的衍射斑纹图案也是相当类似的（相当类似的意思是，我至今无法分辨它们之间的区别，更无法更具区别来反推前方附加设备的性质）。我不能够理解斑纹形状形成的原因。

衍射斑纹的涨落大概是背景噪声量级的 $1/20$ ，如下图表显示的那样。而均方根误差还会更小一些。对于数据M51-75cm-0815b-bk.dat，其中部（即 $x \in [220, 280]mm$ 范围内）点的均方根误差为 $1.170 \times 10^{-4}$ ，和后文中遮掩馈源透镜时的均方根误差已经大体是一个量级（并且那时还修正过系统漂移，这里如果作这样的修正，所得值还能更小一些）。

	最小值	最大值
M51-75cm-0815a-bk.dat	0.03382	0.03577
M51-75cm-0815b-bk.dat	0.03404	0.03547

由此亦可以知道，背景噪声的测值大约和方向图测量时较远端的测值相同。考虑背景噪声和发射源发出的信号在强度上是简单的相加关系（由于这两者并不相干，这样的假设是恰当的），可以认为在远端方向图强度已经削减为零。因而，在那些区域为主的强度是背景噪声造成的。而背景噪声是一个与发射源位置不相关的量，并不需要对发射源与馈源之间的距离进行修正。因而这就解释了为什么此项修正意义并不是很大，而很多时候甚至会起到相反的作用。



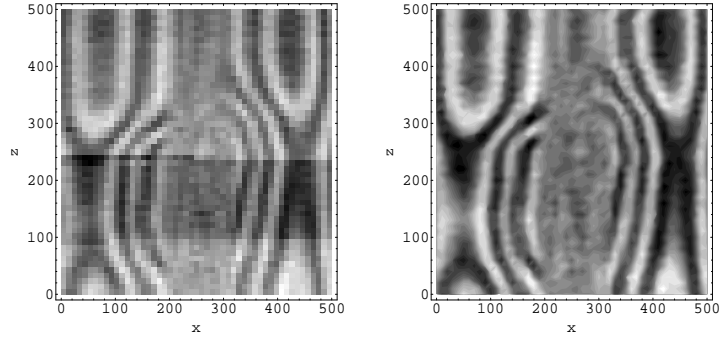


图 14: 关闭发射源的情形测得奇怪的衍射斑纹

### 5.3 馈源透镜被黑体遮挡的情形

随后，我们用黑体遮挡了馈源透镜并进行了完全相同的测量。测量结果如图 15，左图是数据M51-bb-756mm-0816a.dat的测量结果，右图是数据M51-bb-756mm-0816b.dat。

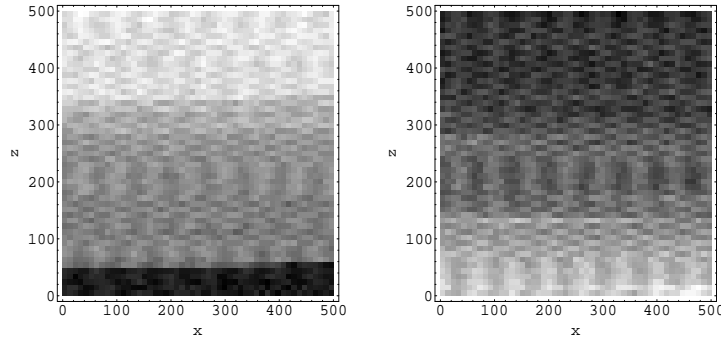


图 15: 馈源透镜被黑体遮挡的情形

测量结果的最大值和最小值如下表所示。

	最小值	最大值
m51-bb-756mm-0816a.dat	0.034296	0.035764
m51-bb-756mm-0816b.dat	0.035429	0.036597

如表所示，两组测量的测值重叠部分是很少的。对数据的分析可以知道，如果忽略少许噪音的影响，系统的主要的变化即为其随时间（即随扫描进程）的漂移。以测量点数作为横坐标，测量值作为纵坐标，可以清楚地看出系统随扫描进程的漂移情况（如图 16所示）。

大体上可以看出，随着测量的进行，测量值在稳步增大。但是在测量过程中测值发生了几次突跳，它们说明在那些时候系统的状况不尽稳定。但是，即使是稳定的情况，测值增大的速率也不尽相同。我不清楚这种缓慢的变化是否能够由系统环境（比如温度的变化）来完备描述，我亦不知道这种漂移在其它测量时是否发生并且已经叠加进那些情况的测量数据中（感觉中如果漂移这么大应该可以被看出来）。

对测量中所标明的红、绿、蓝三段数据，用某个基值进行修正（以忽略掉系统整体漂移的影响），然后计算其均方根误差，可以得到其分别为 $7.653 \times 10^{-5}$ 、 $7.769 \times 10^{-5}$ 和 $8.501 \times 10^{-5}$ ，其大约为系统噪声绝对值的1/500（该误差与上一节中关闭发射源时的均方根误差在数量级上是相洽的）。该误差可以作为系统噪声涨落的一个下限。

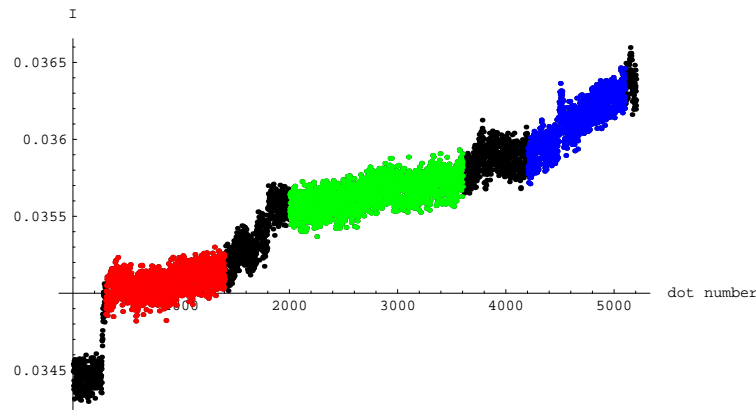


图 16: 系统随扫描进程的漂移情况

## 6 结语

除了在学校的物理实验课程中以外，望远镜接收机系统是我遇到并需要对其进行仔细研究的第一个复杂系统。对于学校课程中的实验内容，现象和分析（方法）在一定程度上是有定论的，然而在接收机实验上遇到的一些问题以及对它们的解释，可能是完全需要我/我们来做的。

我选择接收机作为暑假实习的主题，出于一个大概不会有第二个人会拥有的奇怪理由，那就是如果“逻辑实证主义”不能够告诉我们这个世界是什么样子的，那么我们通过“观察”这个世界是否能够获知某种“真的”东西？望远镜是一个奇妙的光机电一体的综合系统，它接收来自宇宙遥远地方的信号。我们通过它所接收到的信号来推断宇宙的远方是什么样子的，那里有些什么东西，并反过来理解物理、我们的世界以及我们的世界的终极理论应该是什么。我希望考察通过这样的方式来探究世界是不是对的（我避免用诸如“合理的”、“有道理的”或者“合乎逻辑的”这样的词，因为这样已经先验假设逻辑是正确的，然而逻辑的正确性并不一定是对的）。

一个多月的实习并没有给我的疑惑一个合理的（并且完整的）解答，但是它暗示我一些别的东西。一种泛的哲学分析也许永远不是普适的，甚至不能被用于任何一个真实系统的讨论（或者如果我们考虑依靠模型论或者物理和数学来理解这个世界是不是一种对的方法），但是物理和数学的分析（加上我们所信仰的科学方法论）确实可以暗示我们一些东西，预言一些东西，并且帮助我们做出来一些奇妙的东西（它们在一定程度内能够起到我们期望它们起到的效果）。并且，当触及到一个真实系统并且实际上做一些事情之后，世界也能够变得相对真实一些。

## 参考文献

- [1] 《接收机波束测量系统资料手册》左营喜 杨戟 吴洁青 张旭国 赵霖 辛海琴 马奎 杜福君 姚维亭，内部资料，二〇〇四年九月。
- [2] 《准光测试系统资料》左营喜 吴洁青 张旭国 赵霖 辛海琴 马奎 杜福军 姚维亭 马俊梅，内部资料，二〇〇四年九月。
- [3] 《准光系统方向图及光电轴准直测量系统方案》左营喜 吴洁青 张旭国，内部资料，二〇〇三年十二月。
- [4] 《准光学测量信号电平及接收灵敏度计算》吴洁青 左营喜 辛海琴，内部资料，二〇〇四年四月。
- [5] 《13.7米毫米波望远镜2004-2005观测季节状态报告》杨戟，二〇〇四年十一月。