

# 全息法测量天线面表面精度

王锦清 余宏

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

## 提 要

该文讨论了全息法测量天线面表面精度的基本原理和实现方法,这种测量方法对于测量各种大型抛物面天线具有普遍意义。阐述了全息法的基本原理和实现全息法时必须的天线控制方法及原理,简单介绍了全息法中对测量数据的处理方法,并对全息法所得结果作了一定的总结。

主题词: 全息法 — 天线 — 测量 — 扫描 — 傅里叶变换

分类号: TN823<sup>+</sup>.27

## 1 基本原理

全息法检测(Holographic Measurement)是检测抛物面天线面形的重要方法。全息法测量天线面表面精度的基本原理是:通过测量复数平面内天线辐射的振幅和相位来得到天线口径场的振幅和相位分布,从而了解天线表面面形偏离抛物面的情况<sup>[1]</sup>。其所依据的几何事实是:如果天线面是理想抛物面,在焦点上的发射源发出的信号经过抛物面反射,那么在口径平面上的波前相位值应该处处相等(因为从焦点到口径平面的光程距离相等),然而在现实情况下,天线面不会是完全理想的抛物面,所以在口径平面上的相位也必然不相等,其变化情况就包含了天线面与理想抛物面偏离的信息。在信号源波长已知的情况下,通过检测相位差的变化,从理论上就可以确定天线面与理想抛物面之间的微小差别<sup>[1]</sup>。

## 2 测量原理分析

为了方便讨论,按照天线的收、发信号传播原理的互易特性,可把天线看成发射天线。在图1中,天线的口径场函数可以表示为 $F(\xi, \eta) = A(\xi, \eta)e^{-j\omega(\xi, \eta)}$ ,其中: $A(\xi, \eta)$ 为口径场振幅, $\omega(\xi, \eta)$ 为口径场相位, $\xi, \eta$ 为口径平面内坐标变量。该口径场在空间远场上点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处的衍射场强可以表示为:

$$E(\theta, \varphi) = \frac{j}{\lambda r} e^{-jkr} \int_A F(\xi, \eta) e^{-jk \sin\theta(\xi \cos\varphi + \eta \sin\varphi)} d\xi d\eta \quad (1)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$ 。

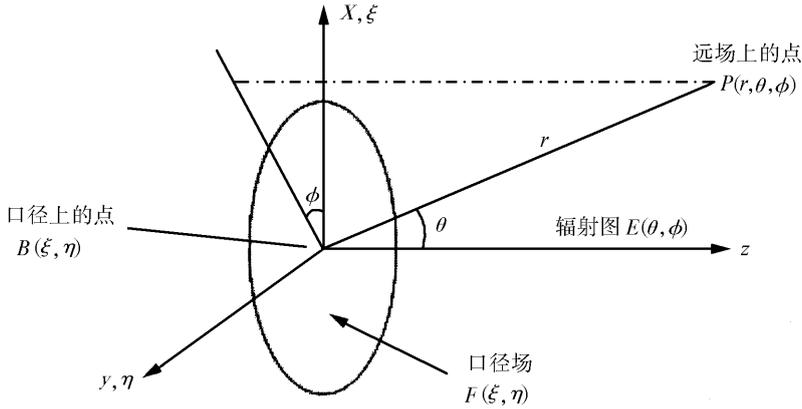


图 1 口径场在空间的衍射

Fig. 1 The diffraction of the aperture fields

在测得  $E(\theta, \varphi)$  的情况下, 可以通过傅立叶二维变换求得  $F(\xi, \eta)$ , 进而求出口径场的振幅和相位。从理论上讲, 测出辐射场的场强函数的振幅和相位, 就可以求出口径场的振幅和相位, 又通过对口径场的振幅和相位的傅立叶变换得到能量分布和面行分布。

在实际的测量过程中我们通常把(1)式表示为极坐标形式, 并通过  $u/v$  平面把坐标量转换为天线的方位和俯仰角。有:

$$V(\hat{\theta}) = \int_A A(\mathbf{r}) e^{j\mathbf{r} \cdot \hat{\theta}} dx dy \quad (2)$$

其中:  $A(\mathbf{r}) = \frac{j}{\lambda r} e^{-jkr} F(\mathbf{r})$ ;  $\mathbf{r} \cdot \hat{\theta}$  可以表示为  $\mathbf{r} \cdot \hat{\theta} = ux + vy$ ;

$$u = -\cos(E) \sin(A - A_a); \quad (3)$$

$$v = -\cos(E) \sin(E_a) \cos(A - A_a) + \sin(E) \cos(E_a); \quad (4)$$

其中:  $A_a, E_a$  为指向信号源时天线的方位和俯仰角,  $A, E$  为实际信号方向(也就是信号源的实际方位和俯仰角), 这样  $u, v$  实际上就反映了天线光轴和信号源实际方向在空间的角度差<sup>[2]</sup>。

全息测量的过程就是在有规则的  $u, v$  网格点上检测  $V(\hat{\theta})$ ; 实际上(2)式是对  $A(\mathbf{r})$  的两维傅立叶变换, 所以在由检测得知  $V(\hat{\theta})$  的情况下, 对(2)式做反傅立叶变换就可以得到口径场的复数分布  $A(\mathbf{r})$ 。有规则的  $u, v$  网格点是由天线围绕信号源(比如卫星)做有规则的扫描(当前采用蝶形扫描)产生的。

上海天文台佘山 25m 射电望远镜使用全息法测量了天线的表面精度, 测量过程中使用到的主要设备有: 被测天线(25m), 参考天线, 两部卫星接收机, 两通道相关机, 一台通用计算机。各个部分在测量过程中的作用及连接见图 2。

由图 2 可以看出参考天线和主天线(被测天线)的接收信号经过两次混频后分别得到 0~40MHz 的中频信号, 并且同时进入了相关机进行相关处理。相关机主要实现功能如图 3 所示。

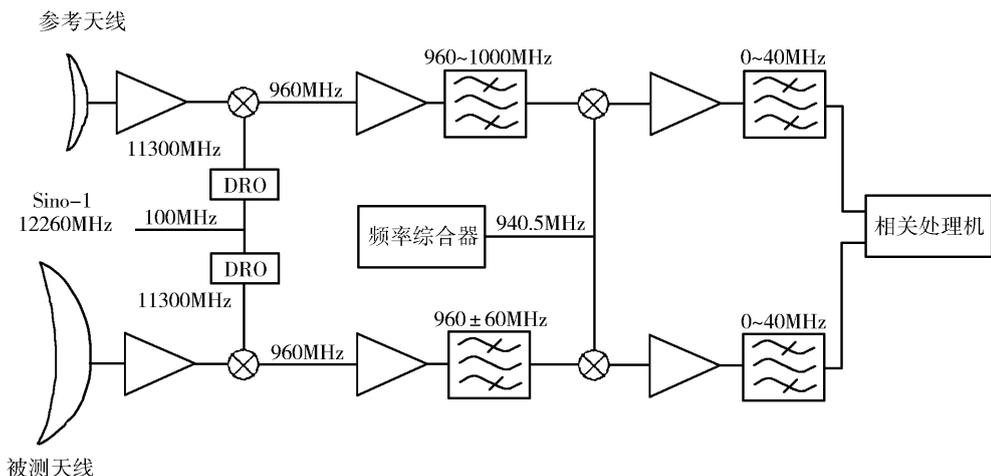


图 2 全息法测量框图

Fig. 2 The schematic of holograph

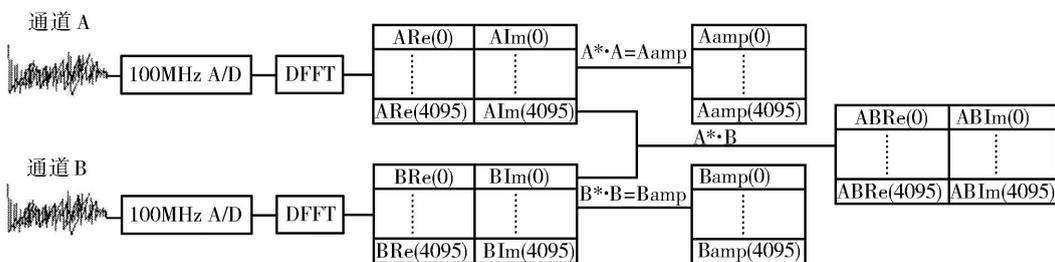


图 3 相关机原理图

Fig. 3 The schematic of the correlator

两个通道的中频信号分别经过 100MHz 抽样量化, 然后进行 4096 个点的离散快速傅立叶变换 (DFFT), 得到各离散点信号的实部和虚部 (Re, Im), 由此获得信号的幅度和相位:

$$Amp = \sqrt{Re^2 + Im^2};$$

$$Phase = \arctan(Im/Re);$$

由于从相关处理输出的数据量很大(包括被测天线的自相关相位和幅度, 参考天线的自相关相位和幅度, 被测天线和参考天线的互相关相位和幅度), 通过网络接口实时地传输到一台通用计算机上进行后处理。

### 3 测量过程

将参考天线对准信号源, 而被测天线则围绕信号源的方向以不同的方式对信号源进行网格扫描。这时随着扫描角度的变化, 被测天线输出的信号相位比固定的参考天线就会产生差异, 在数据处理时要对这一相位差异进行补偿, 然后才能获得真实的相位和振幅。

在通常情况下, 我们根据卫星公司的预报文件可以大体确定卫星的位置, 由于卫星预报的

误差,天线不能十分理想地找到同步卫星。为此,我们专门设计了用于寻找卫星的十字扫描法,为了确认指向卫星的正确性,我们还设计了五点扫描法,最后是用于实际测量的蝶形扫描法。

天线的扫描主要方式及作用如下。

(1) 十字扫描法,可用来找卫星,及检测天线方向图特性。使天线所指方向以卫星为“十”字中心,先在俯仰方向上来回扫描,然后再在方位方向上来回扫描,如图4所示。其产生的幅度谱如图5所示,图中前两个峰为俯仰方向来回扫描产生的方向图,后两个峰为方位方向来回扫描产生的方向图。

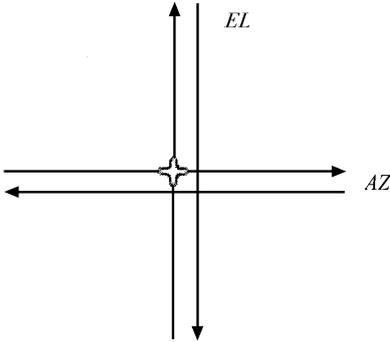


图4 十字扫描

Fig.4 The cross scan

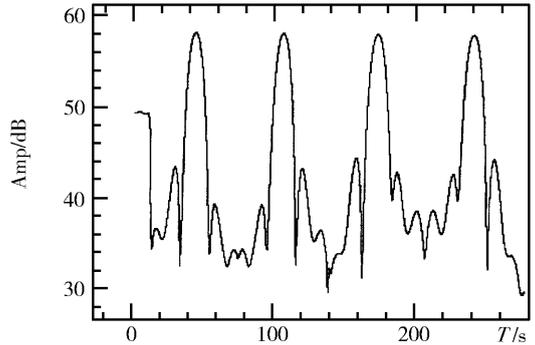


图5 天线方向图

Fig.5 The direction figure

(2) 五点扫描法,用来确定天线指向的偏移量。使天线所指方向以卫星为五点的第一点,然后逆时针如图6确定五点,程序控制天线的指向依次在五点上停留5秒。如果五点比较理想,即第一点确实指出了卫星,将产生如图7的幅度谱。(在做五点前应先用十字扫描确定卫星的大致位置,从而确定天线指向的修正量,否则五点的幅度谱将会乱掉,甚至没有!所以在做全息法扫描时时常要用到五点法,以确认卫星有没有偏离轨道。至于五点间的距离及为何停留5秒,将在第4节“参数确定”中叙述)。

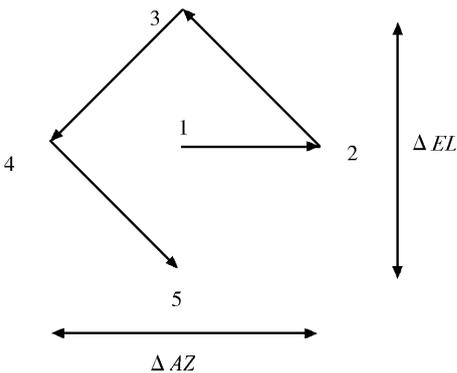


图6 五点法扫描

Fig.6 The five points scan

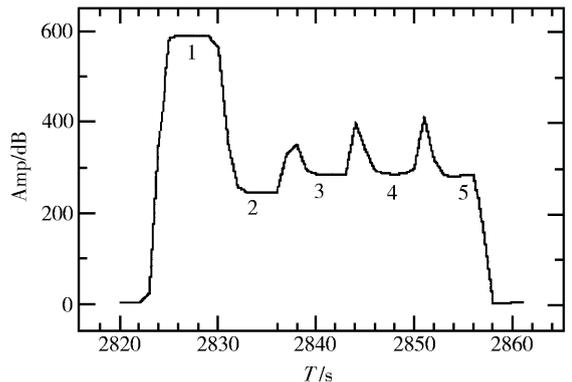


图7 五点的幅度谱

Fig.7 The spectrum of the 5 points

(3) 蝶形扫描法,是用来做全息法观测时用的  $x - y$  方向扫描。中间穿插运用了五点扫描法和十字扫描法。扫描的过程使用程序框图如图 9:开始工作时,先以卫星为中心做一个五点扫描,然后俯仰移到 0 号 scan 的最下(方位保持不变),开始均匀往上扫描(扫过的度数及扫描速度在后文叙述),到达最高处后天线回到原点(即卫星位置)停 5s;然后同时改变天线的方位和俯仰,移动到 1 号 scan 的最下(scan 之间的距离如何确定将在第 4 节“参数确定”中叙述),接着如同 0 号 scan 一样,均匀往上扫,到达最高处后回原点停 5s;下面用同样的方法扫描 - 1 号 scan、2 号 scan、-2 号 scan 等。因为天线的扫描是左右展开的,外形像蝴蝶,可称为蝶形扫描法。在上述扫描过程中还有两点需要说明:(a) 在每完成整十次 scan 及最后一次 scan 完成时,天线回原点做一次五点扫描(在非整 10 次 scan 时只要回原点停 5s);(b) 在整个扫描程序运行过程中每秒记录一次天线的方位、俯仰、状态值(状态值用于指示天线当前所处的状态,详见第 4 节),存入 log 文件,作为在数据处理时的一部分数据源。

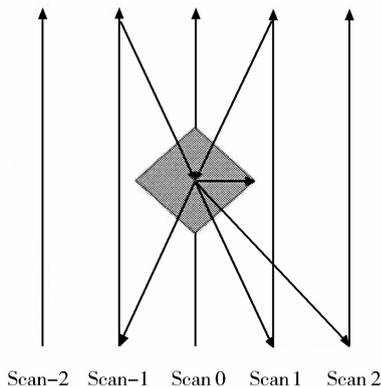


图 8 蝶形扫描法  
Fig. 8 The butterfly scan

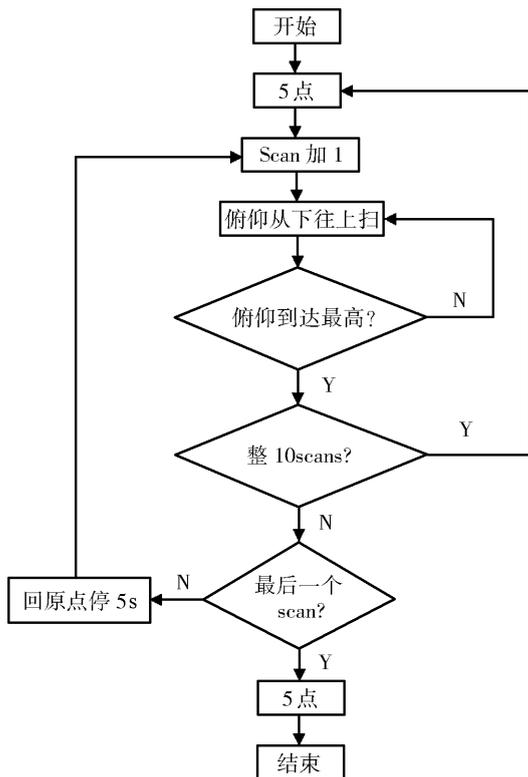


图 9 程序框图

Fig. 9 The schematic of the programme

在程序执行过程中,“每次回原点”及“5 点法”时都要读取轨道预报文件,以获取当前卫星的确切位置,这样就保证了每扫描完一次后回原点的确切位置,避免了整个扫描过程中卫星短时间内的飘移对观测的影响。事实也证明运用了卫星预报文件后,观测的数据质量大大提高了,在天气情况很糟的情况下获取的数据与在天气晴朗的时候获取的数据完全一致。

### 4 参数确定

我们选用鑫诺卫星的 ku 波段信标做实验,该信标的频率  $f = 12.260\text{GHz}$ ,由此可以得出波长  $\lambda = 2.4\text{cm}$  以及天线主瓣宽度;天线主瓣宽度定义为  $\frac{\lambda}{D} = \frac{2.4 \times 10^{-2}}{25} = 0.00096\text{rad} = 3'.36 = 0^\circ.056$ ,这是在最理想口径状态下的波瓣宽度,在实际口径不理想时,波瓣宽度会变大些,当前我们用了  $4'.8$ 。并以此主瓣宽度设定五点及蝶形扫描的参数如下:

五点法(如图 6)参数: $\Delta EL = 4'.8$ ;  $\Delta AZ = \frac{\Delta EL}{\cos EL}$ ;每个点上停留的时间跟实际相关机的采样速率有关,相关机要求 2 秒时间的数据判定天线的停留,由于考虑到天线转动的超调及滞后,当前用了 5 秒。

蝶形扫描参数:scan 间距(scan\_spacing)一定要小于一个波瓣宽度(当前取为  $0^\circ.048$ );扫描速度(scan\_rate)应小于 scan\_spacing/s(当前取为  $0^\circ.017/\text{s}$ );扫描数(scan\_number)与全息的分辨率有关;分辨率:  $\theta = \frac{D}{n_{\text{scan}}}$ ,其中:  $D$  为天线直径,  $n_{\text{scan}}$  为扫描数。因为一般情况下单块天线面板的可调距离在 0.5m 左右,在 25m 直径的情况下,  $n_{\text{scan}}$  将取为 50 左右(实验中取为 45)。log 文件中的状态值列于表 1。

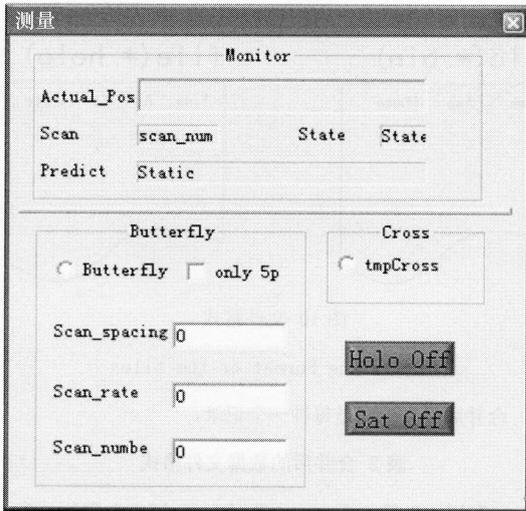


图 10 控制参数设置

Fig. 10 The setting parameters of the controlling

表 1 log 文件状态表

Table 1 The states of in the log file

Log 文件	1	2	3	4	5
天线状态	旋转	扫描	5(1) points	5(2) points	5(3) points
6	7	8	9	10	11
5(4) points	5(5) points	cross up	cross down	cross right	cross left

图 10 是做全息测量时天线自动控制需要的监视项和设置项。图框上部为监视信息框,包括天线的实际方位和俯仰、scan 的编号、状态、从轨道预报文件读来的预测方位和俯仰。图框下部左边为蝶形扫描和五点扫描的设置项,右边为十字扫描选项。设置的内容包括 scan 的间距、扫描速度、扫描数。如果只想做一次五点,只要勾上“only 5p”选项。

## 5 数据处理

数据处理主要由以下几个步骤完成：

(1) 以时间为同步标准,对比相关机输出文件和天线控制部分输出的 log 文件,将其合并成一个文件。因为在相关机输出的互相关 bin 文件中,包含了时间、幅度、相位信息,而在 log 文件中包含了时间、方位、俯仰、状态,两个文件均为每秒一次记录的文件。由于两者都是通过 GPS 同步的,以时间同步很容易(如图 11)。

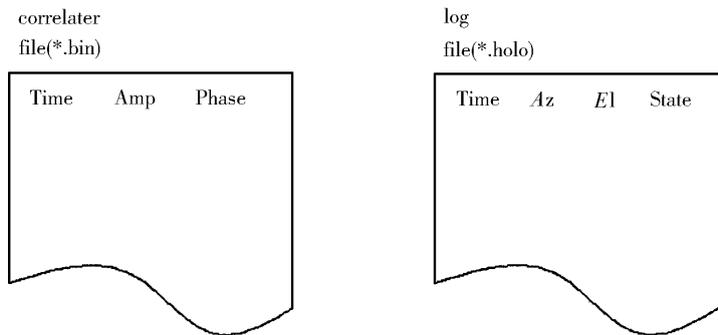


图 11 文件格式

Fig. 11 The Format of the files

合并后的文件格式如表 2 所示,合并后的文件还是每秒一次记录。表 2 中 state 栏中状态 2 表示俯仰从低往上扫的过程,  $Az_1, Az_2 \dots Az_n, El_1, El_2, \dots El_n$  为扫描过程中每秒记录的方位、俯仰值(事实上 Az 在同一个 scan 中都相同);状态 3 表示天线回原点停留 5 秒(所以表 3 中状态 3 应当有 5 条记录,而且对应的方位和俯仰相同,假设为  $Az_0$  和  $El_0$ )。

表 2 合并后的数据文件格式

Table 2 The format of the combined file

Time	Amp	Phase	Az	El	state
⋮					⋮
⋮					1
⋮	$A_1$	$\varphi_1$	$Az_1$	$El_1$	2
	$A_2$	$\varphi_2$	$Az_2$	$El_2$	2
					⋮
	$A_n$	$\varphi_n$	$Az_n$	$El_n$	2
					1
					⋮
					1
	$A_0$	$\varphi_0$	$Az_0$	$El_0$	3
	$A_0$	$\varphi_0$	$Az_0$	$El_0$	⋮
	$A_0$	$\varphi_0$	$Az_0$	$El_0$	3

(2) 从合并文件中提取各次 scan 中状态 2 和 3 对应的方位和俯仰值(上面(1)中列举了一次 scan 的情况),然后做如下运算(还是以表 2 数据为例):

$$\begin{aligned} \Delta A z_1 &= A z_0 - A z_1; \\ \Delta A z_2 &= A z_0 - A z_2; \\ &\vdots \\ \Delta A z_n &= A z_0 - A z_n; \end{aligned}$$

对比前文(3)、(4)两式,  $\Delta A z_1 \cdots \Delta A z_n$  就是这两个公式内的差项 ( $A - A_a$ )。

(3) 由此通过(3)、(4)两式运算可以得到一系列的  $u, v$  值;

(4) 把  $\mathbf{r} \cdot \hat{\theta} = ux + vy$  代入前文(2)式  $V(\hat{\theta}) = \int_A A(\mathbf{r}) e^{jk\mathbf{r} \cdot \hat{\theta}} dx dy$  中,得到:

$$V(\hat{\theta}) = \int_A A(\mathbf{r}) e^{jk(ux+vy)} dx dy \tag{5}$$

在  $V(\hat{\theta})$ ,  $u, v$  和积分区域  $A$  (就是 25m 天线对应的区域) 已知的情况下,可以用数值处理的方法对(5)式做两维反傅立叶变换,得到  $A(\mathbf{r})$  的分布情况。在实际工作中  $V(\hat{\theta})$  取表 2 中  $A_1 \cdots A_n$ , 或  $\varphi_1 \cdots \varphi_n$ , 前者对幅度的反傅立叶变换得出的分布  $A(\mathbf{r})$  是能量分布,后者对相位的反傅立叶变换得出的分布  $A(\mathbf{r})$  是天线面的平整度情况。

(5) 上面(1)~(4)概述了数据处理过程,实际处理中还要分析五点扫描时的数据状况,就是对应状态 3 到 7 时,相位和幅度的相似情况。在理想情况下,所有的五点扫描所产生的幅度谱都应当保持图 7 的状态,说明整个观测过程中,天线回原点时都是准确的位置(因为 5 点能准确地反映卫星的位置情况)。否则观测的数据质量就有问题,处理的结果也不能反映实际情况。

图 12,13 是余山 25m 天线在全息法测量调整前初测的情况(天线能量分布不均匀,面精度 0.94mm)。图 14,15 是测量调整后情况(天线能量分布基本均匀,面精度 0.52mm)。

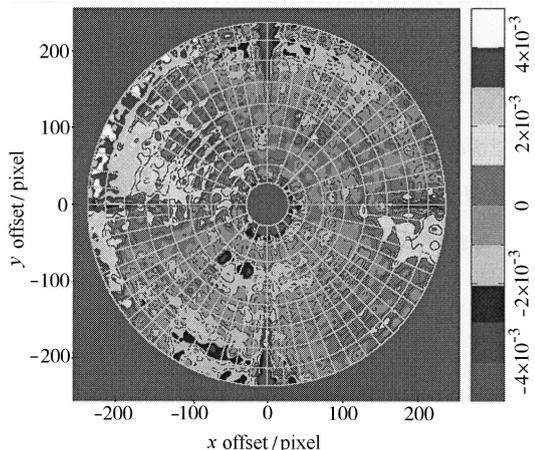
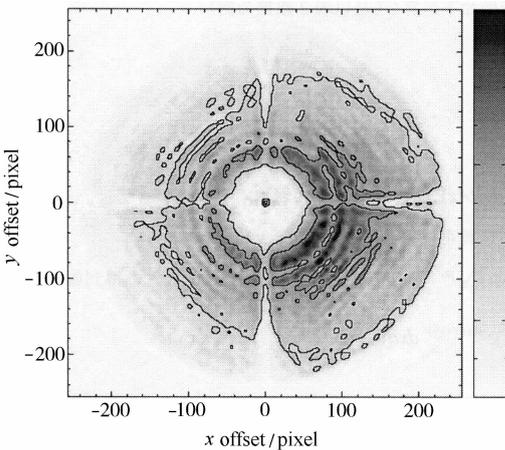


图 12 调整前天线能量分布

图 13 调整前面板平整情况(单位 mm)

Fig. 12 The distribution of the antenna's energy before the adjustment

Fig. 13 The distribution of the antenna's accuracy before the adjustment

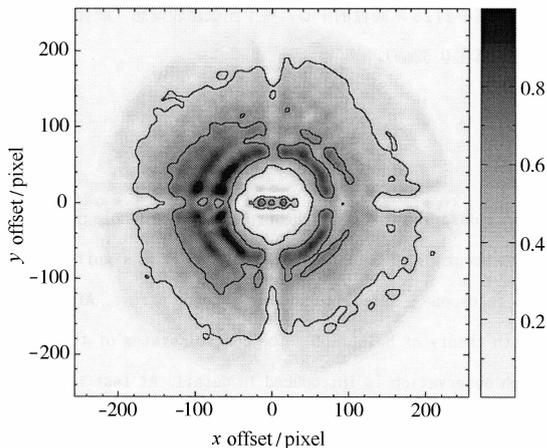


图 14 调整后能量分布图

Fig. 14 The distribution of the antenna's energy after the adjustment

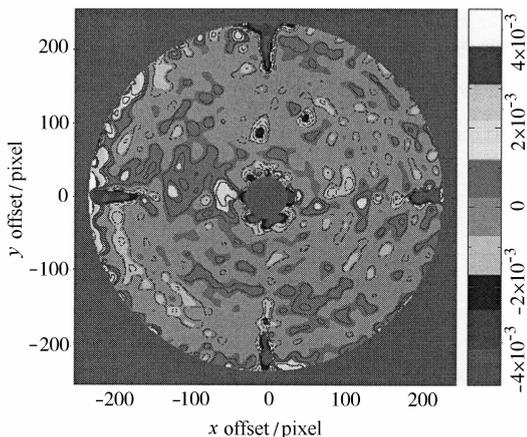


图 15 调整后面板平整情况(单位 mm)

Fig. 15 The distribution of the antenna's accuracy after the adjustment

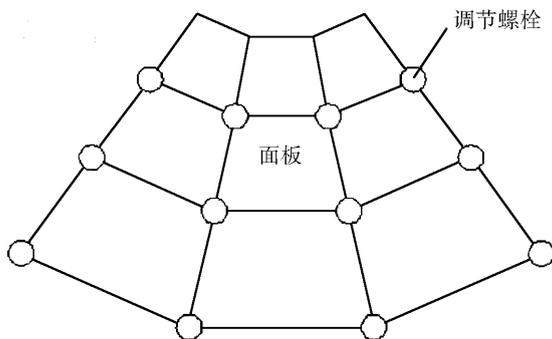


图 16 面板组合图

Fig. 16 The combination of the panels

整个测量从 11 月 9 日步入正轨,到 17 日结束,前后共做了 5 次天线面的反复调整,5 次镜面调整,4 次幅面调整,11 次 45 Scan 的观测处理。从最后的面板平整情况可以看出,能量已经集中到 25m 圆盘的中心,整个面板比较理想(统计后数据显示,偏离理想抛物面的距离在 0.52mm)。由于余山 25m 天线面整体由 352 块梯形板组合,每块梯形板可由位于四个角上的大螺栓调节,如图 16 所示。但由于面板调节螺栓的可调范围有限以及调节螺栓的锈蚀等因素,要更进一步地调节,效果不明显。

### 参 考 文 献

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计, 北京: 中国科学技术出版社, 2003
- [2] Australia Telescope National Facility. CSIRO, PO Box 76, Epping, NSW, 2121 National Radio Astronomy Observatory
- [3] Tools of Radio Astronomy, 3rd Edition, Springer-Verlag Berlin Heideberg 2000

## THE MEASUREMENT OF THE PRECISION OF ANTENNA'S SURFACE WITH HOLOGRAPH

WANG Jin-qing      YU Hong

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

### Abstract

This paper describes the basic theory and method of holography which is used to measure the accuracy of the antenna's surface. It is significant and popular to all radio telescopes, satellite and big antenna arrays. After the review of the basic math theory of holography, the control system of the antenna for the holographic measurement is introduced in detail. At last the method of data processing is also dissertated and the output graphs also be given some conclusion.

**Key words**    holography — antenna — measurement — scan — fourier transform