

太阳射电日像仪的进步与发展

耿 立 红

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

摘 要

叙述了在太阳射电天文和太阳物理上作出过杰出贡献的几个射电日像仪的概况及其进步与发展,并简述了未来射电日像仪可以完成的科学目标以及应具有的特点,以期为在 21 世纪我国实现“一颗空间 X 射线卫星、一座红外太阳塔和一台射电日像仪”的宏伟构想提供研制依据。

关键词 射电天文学 — 仪器:射电日像仪 — 分辨率

分类号: P111.44

1 前 言

几十年来,太阳射电天文学随着观测仪器和技术方法的日臻完善而得到了极为迅速的发展,可以说,重大的观测发现总是在应用一种新仪器或新的观测技术之后得到的^[1,2]。太阳射电观测仪器从最初的军用雷达到射电辐射计、干涉仪、频谱仪、频谱偏振器和射电日像仪,每一种都将人类有关太阳的知识大大地推进了一步,对太阳物理有突破性的贡献。20 世纪 60 年代射电日像仪的问世,使人们看到了射电源的辐射图像、爆发源的结构及其随时间的演化,从而对太阳射电爆发的理解有了飞跃的发展。现在,具有高空间、高时间及高频率分辨率并能作偏振测量的宽带太阳射电日像仪是所有太阳射电物理学家梦寐以求的。

太阳射电日像仪能以足够的角分辨率显示射电太阳亮度分布的细节。20 世纪 60 年代射电日像仪的研究取得了突破,世界上第一台真正意义上的太阳射电日像仪于 1967 年 7 月在法国的 Nançay 投入观测,而在同年 8 月底,澳大利亚 Culgoora 的射电日像仪也开始绘出太阳的完整图像,并且是二维、双圆偏振的^[3,4]。这之后又有了荷兰的 Westbork(1970 年)及美国的 VLA(1979 年)等大型综合孔径望远镜在部分时间内对太阳作高分辨率图像观测。同时,法国 Nançay 射电日像仪也在不断地创新与改进,经过 Mark II、Mark III,已发展到 1988 年的 Mark IV 型射电日像仪。日本的 Nobeyama 射电日像仪代表了当今射电日像仪的最高成就,从 1992 年 6 月底开始,可每天 8h 对全日面作高分辨率射电成像观测^[5]。

国家自然科学基金(9673016)资助项目 云南省应用基础研究基金(96A078M)资助项目

1999-05-10 收到

2 射电日像仪成像原理

2.1 成像方法

要产生一幅天体的亮度分布图形, 必须以某种方式记录和显示相应于所测视场中每个栅点上的信号。从取样定理可知要避免信息损失, 这些取样点的角距离不应超过 $\lambda/2D(\text{rad})$ 或者说大约为阵束宽度的一半。射电日像仪的成像方法可以分为三种^[6,7] :

(1) 波束扫描方法: 将天线阵波束依次指向天空中的取样点, 并且记录接收机的输出。可以利用地球自转来使一维阵的扇束响应扫过视场, 但速度很慢。还可以在阵元间引入递增相移来使波束快速扫过视场(即电扫描), 时间分辨率较高。但是这两种扫描方法都使灵敏度大为降低。而多波束技术可以避免这种损失, 即将阵中 N 个阵元以 N 种不同的相位组合联结起来, 形成 N 个波束, 且每个波束指向视场中 N 个取样点中的一个, 每一个相位组合的输出连接到一个接收机, 连续地测量相应于视场中某一个点的信号。因此每一个接收机的输出就对应于所观测图像上的一个像元。这种连接方式不利于系统的扩展及分辨率的提高。

(2) 声光信号图像处理方法: 这种成像方法利用了声光技术, 一系列 AO 单元的放置的位形与天线阵位形成比例, 而每个 AO 单元由它相对应的天线元来的射频信号调制。所有的 AO 单元放在一个棱镜的孔径面上, 并用激光束照明。每个 AO 单元的第一级衍射波再现加到其调制器上的信号的相位和振幅, 在棱镜的图像面(光二极管阵)上从阵单元来的衍射光波矢量相加产生了所观测的射电亮度分布的光学图像(与阵方向图卷积后), 而输出则给出了视场中各个采样点上的信号强度。如果采用相位开关相关方法, 则通过记录在开关波形的每个半周上的光二极管输出的差而取出输出中所需的调制分量。射电日像仪图像的动态范围和频带受声光信号图像处理器件的限制。在日本 Nobeyama 160MHz 一维射电日像仪系统中使用了这种声光信号处理器, 如图 1 所示。

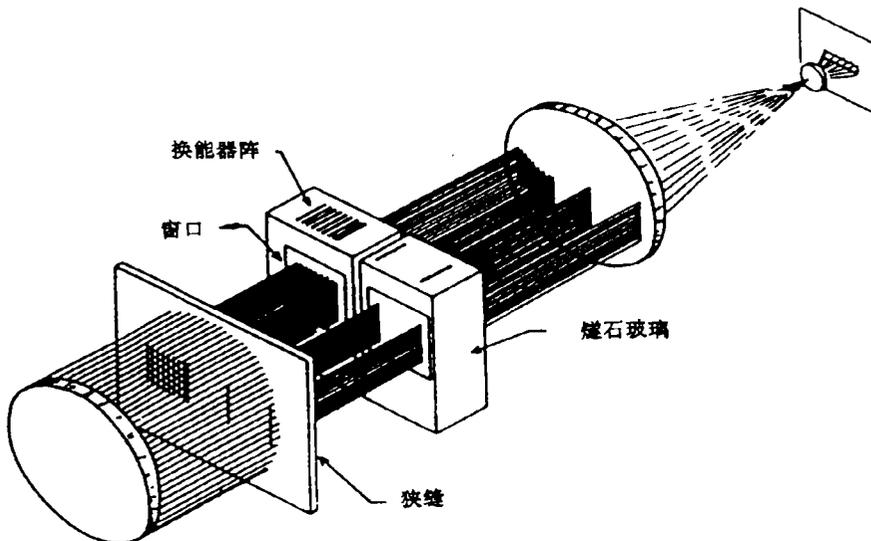


图 1 一个用于混合干涉仪阵的声光图像处理器^[6]

(3) 相关成像方法: 这种最重要并且使用最为广泛的成像方法的原理是测量天线阵中每对阵元天线信号之间的相关, 然后从这些相关值中推导出图像。如果对天线阵中所有天线对测量出复相关积并在 u - v 平面上成图, 就得到了天线阵对空间亮度分布的响应的空间频谱, 而响应就是这个谱的 Fourier 变换, 因此可以用许多种数字 Fourier 变换中的一种标准方法由计算机或专门的数字电路计算出来。其优点是对 Fourier 分量加权及对振幅和相位作的改正可以在作 Fourier 变换之前就完成, 而且没有分时测量的灵敏度损失。而由对相关器输出作量化所造成的灵敏度损失不大。

相关望远镜的复天线温度 T_a 可写作:

$$T_a = \lambda^{-2} \int_{4\pi} T_B(l, m) A(l, m) d\Omega$$

其中 l, m 分别为相对于 x 轴和 y 轴的方向余弦, $d\Omega = dl dm / (1 - l^2 - m^2)^{1/2}$; $T_B(l, m)$ 为天体亮温度分布; $A(l, m)$ 为相关望远镜复有效面积:

$$A(l, m) = |A(l, m)| \exp j\psi = 2|A_1(l, m)A_2(l, m)|^{1/2} \exp j\psi$$

如果干涉仪的组元天线电中心之间的距离在 x 方向为 u 个波长, 在 y 方向为 v 个波长。则从射电源到两个天线的行程差为:

$$\psi = 2\pi\nu\tau = 2\pi(ul + vm)(\text{rad})$$

由此可以得到在特定的干涉仪间距 (u, v) 上的相关温度为

$$T_a(u, v) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} T_B(l, m) |A(l, m)| \exp[j2\pi(ul + vm)] / [\lambda^2(1 - l^2 - m^2)^{1/2}] dl dm$$

$T_a(u, v)$ 与 $T_B(l, m) |A(l, m)| / [\lambda^2(1 - l^2 - m^2)^{1/2}]$ 互成 Fourier 变换:

$$T_B(l, m) |A(l, m)| / [\lambda^2(1 - l^2 - m^2)^{1/2}] = \int \int_{-\infty}^{+\infty} T_a(u, v) \exp[-j2\pi(ul + vm)] du dv$$

可见, 所测相关温度 T_a 的 Fourier 变换即为加权的天空亮度分布, 并且 (u, v) 覆盖越大和均匀, 所成图像质量越好。

2.2 射电日像仪天线阵

射电日像仪天线阵有多种形式。均匀间距或不等间距、对称或不对称的线性阵、T 形阵、圆形阵、十字交叉阵、成 120° 交角的 Y 型阵以及 Y 型阵的变形 (三条臂交叉的 Y 型阵) 等都在不同的射电日像仪设备上使用过或将要使用。

天线阵位形是影响成像质量的主要方面, 也同样确定了空间分辨率。阵越大, 分辨率越好, 但是对同样的阵元数量, 增加阵的大小会降低图像质量。天线数量与天线位形密切相关。

选择天线阵的大小、阵形和阵元数, 主要从分辨率、视场、相邻波束间距、旁瓣电平、成像质量以及最小冗余度等方面考虑, 经济和地理等方面的因素也会影响到天线阵的选择。而阵元天线的大小本质上影响接收面积 (灵敏度) 和视场, 较大面积的阵元天线灵敏度要比小天线的好, 而小天线的视场优于大天线 [8]。

3 射电日像仪的发展

太阳射电辐射理论是随着观测仪器的进步而发展的,反过来也对观测仪器提出了越来越高的要求,以在成本所允许的范围内最大限度地应用计算机技术、电子技术、通讯技术及其它科学技术和方法的最新成就。在太阳射电日像仪的发展过程中,从前端、控制系统到终端记录、显示、数据处理,无不体现出这种趋势。

3.1 Mark I Nançay 射电日像仪

20世纪50年代末法国 Nançay 就已建成了米波栅形射电干涉仪, Boisshot 小组利用它发现了太阳米波IV爆发,日冕物质以 $2000\sim 3000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度进入行星际空间^[9]。它工作在 169MHz, 32面抛物面天线排列在 1550m 的东西基线上,扇束为 $3.8'$,束间距为 2.01° 。利用地球自转漂移扫描,时间分辨率很低^[4]。

Mark I Nançay 射电日像仪^[4]即是由此 Nançay 东西阵改建而来的,16面口径 5m 的天线东西排开,束宽 30° ,天线间距 100m,总长度为 1.5km,在 169MHz 作太阳瞬时一维图像。在赤经方向分辨率为 $3.8'$,从 1967年7月开始每天观测 2h。到 1968年,该仪器已可以 $1/40\text{s}$ 的速度获取图像。Mark I Nançay 射电日像仪在观测和解释仅有几分之一秒寿命的快速爆发演化方面有贡献,从观测图像上已可确定III型爆发位置的移动及快于 $1/20\text{s}$ 的I型爆发的变型。

当时计算机及数字电路系统还很昂贵,虽然多相关器系统有更多的灵活性,Mark I Nançay 射电日像仪还是采用了不需计算而直接给出太阳瞬时图像的模拟系统即多波束成像系统,并将结果通过一个光电转换板,记录在照相胶片上,还可以在墙上看到太阳的瞬时图像,或者用绘图仪选择 31个输出通道中的任何一个绘制图形。

3.2 Mark II Nançay 射电日像仪

在 1976年初开始观测的 Mark II Nançay 射电日像仪^[10]已是 169MHz 的多相关器系统了。它主要是以高时间和高空间分辨率作太阳射电爆发的一维图像的观测和研究,获得总强度和圆偏振度两幅图像,用射电源作精确的校准。间距 1600m 的两面 10m 口径天线和基本间距为 100m 的 16面 3m 口径天线排列在总长为 3200m 的东西基线上,在赤经方向的空间分辨率为 $1.5'$,时间分辨率为每秒 100幅图,带偏振测量时为每秒 50幅,每天观测 6h。利用计算机作 Fourier 变换获取图像、修正相位和增益误差、控制接收机和数字化操作、作包括数字压缩在内的实时处理;在一个 TV 上提供可视监视,在胶片和磁带上作数据记录,用计算机控制在每个通道中的衰减器获得 $0\sim 45\text{dB}$ 的动态范围,信号带宽 600kHz。在线计算机上的多任务软件包实时完成采数、接收机控制、数据压缩和记录及观测时修正各种参数的工作。

Mark II Nançay 射电日像仪的分辨能力和对其方向束的精确测定使研究射电源的角亮度分布成为可能。它最早观测到噪暴中存在明显的运动,速度达 $5000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级;观测到窄至 $0.7'$ 的射电爆发,还观测到一般持续时间短于 0.25s 的 spike 活动位于不同于III型爆发源处。在 1979年 Raoult 和 Pick 利用 Mark II Nançay 射电日像仪的观测结果第一次比较系统地研究III型爆发源结构,并提出了“III型爆发源的多重子源结构模型”和无结构源的概念^[11]。

3.3 Mark III Nançay 射电日像仪^[12]

在 1980年3月第 21周峰年到来时开始观测,它是在 Mark II Nançay 射电日像仪上加上南北阵,与原东西阵构成 T 型。南北阵由 11个口径 5m 基本间距为 108m 的天线与原东西阵

的中心 3m 天线组成, 基线总长为 1188m, 原东西阵未变, 因而可在 169MHz 上带宽 700kHz 给出太阳在东西和南北两个方向上的两个一维图像, 空间分辨率东西阵为 $1.15'$, 南北阵为 $3'$, 包括圆偏振的测量。带偏振测量的时间分辨率为每秒 50 幅图, 每天可观测 6h。另作了一个独立的带锁相延迟并具有 45dB 动态范围自动电平控制的多相关接收机以提供南北方向的一维图像, Mark II 作 Fourier 变换的数字系统已经扩展成为一个阵处理器。利用天鹅座 A 对仪器的相位和增益的偏振和非偏振输出作校准, 并且作偏振校准时采用了 Mercier 将东西阵 3m 天线从实际源方向移动时角的方法。一个多任务程序实时提供与 Mark II 相类似的工作, 用一个微处理器控制图形终端、绘图仪和彩色显示器, 一个数据处理软件包, 对数据作脱机计算和处理, 并作缩放、轮廓图及直方图等。

Mark III Nançay 射电日像仪对太阳射电米波 III 型爆发的传播理论作出了重大贡献: 当 III 型爆源的电子束在太阳活动区中被加速到 $\geq 10\text{keV}$ 时, III 型爆发就要发生。电子沿着开放的磁力线向外逃逸, 并且激发起等离子体辐射。在逃逸的每个连续高度上, 一些 Langmuir 波的能量就转换成射电波。它还观测到在 E-W 和 N-S 图像上一个 I 型噪暴中心的复杂结构。1986 年 Pick 等人根据在 21 周峰年极大期 Mark III 的观测资料认为大多数 III 型爆发源都能够被分解开, 并得出 III 型源的两维角径为 $1.4' \sim 5.3'$ ^[13]。

3.4 Mark IV Nançay 射电日像仪^[13]

在 1986 年初开始常规观测。其南北阵已发展成为多频工作模式, 可在 150~450MHz 之间的最多五个频率上同时获取总强度和圆偏振比的一维图形, 时间分辨率 $\leq 0.1\text{s}$ 。东西阵未变只是工作频率从 169MHz 改为 164MHz。这样日冕中源的投影位置、亮度和角径就可作为高度的函数进行研究了。使用东西和南北两阵就可在 164MHz 获得两维信息, 另外通过地球自转综合可以在所有观测频率上给出噪暴源及宁静日冕图形。对这类图像作量化分析对研究作为高度函数的中层日冕中的大尺寸结构是有价值的。

Mark IV Nançay 射电日像仪南北阵天线为 $24 \times 5\text{m}$, 基本间距为 54.3m, 基线总长为 1248m。每天观测 6h, 带宽 700kHz。每秒成图(包括圆偏振)数: EW 阵为 50 幅, SN 阵为 50 幅 / 观测频率点数 (SN 阵为多频工作模式)。空间分辨率对于 EW 阵为 $1.96'$, 对于 SN 阵在 150MHz 时为 $12.0' \sim 4.3'$, 在 450MHz 时为 $4.0' \sim 1.4'$ 。

日像仪用计算机控制选择合适的滤波器、本振和偶极子以作多频观测; 南北阵接收机分时处理所有频率上的信号; 脱机修正温度变化引起的增益和相位变化; 实时作仪器误差修正、条纹中止及孔径照明分布, 并用一个阵处理器实时作 Fourier 变换, 产生 Stokes 参量 I 和 V 的一维图像, 记录在磁带或磁盘上, 实时将未压缩图像显示在屏幕上, 并记录在胶片上; 用已知亮度分布的射电源天鹅座 A 作校准, 但是将南北阵参考天线绕轴旋转以作偏振校准。

Mark IV Nançay 射电日像仪观测到复杂射电事件的源位置, 该事件包括发生在整个观测频率范围内的连续辐射及一发生在 150、164 和 327MHz 后相的反漂爆发。具有较高空间分辨率的东西阵可以分解相距约为 $0.1R_{\odot}$ 的源。III 型爆发是由电子流产生的, 它们沿着开放磁场磁力线运动, 并在等离子体频率及其二次谐波上激励出辐射。多频观测图像跟踪这些电子流的向外运动。观测到这类结构是高度非径向的。位置随着频率的色散表明源位置高, 与通常认为的在分米-米波段的谐波辐射一致。观测到噪暴连续谱的位置随频率的色散较小, 表明其位置低, 与预期的基波等离子体频率上的辐射一样。

Mark IV Nançay 射电日像仪在分米-米波段五个频率上的常规观测, 开创了成像观测射

电谱的一个新领域。可以自由选择的五个工作频率(受干扰限制)既能作窄带谱特征的细节研究也可作太阳射电辐射宽带谱演化的研究。这填补了 VLA 的厘米和分米波观测及 Culgoora、Clark Lake 射电日像仪获得的米波和十米波图像以及 Mark III Nançay 射电日像仪之间的空白。

3.5 澳大利亚 Culgoora 射电日像仪^[6,14]

澳大利亚 Culgoora 由于有众多的太阳射电观测仪器,曾一度成为太阳米波射电研究的世界中心。这些仪器是工作在 43、80、160 和 327MHz 的射电辐射计,8~8000MHz 的扫频频谱仪,25~667MHz 的频谱偏振计,30~335MHz 的声光频谱仪,干涉仪和射电日像仪。其中,天线及接收系统的部分在某些情况下由 2~3 台仪器共用。

Culgoora 射电日像仪是世界上最早建成的日像仪之一。在 1967~1984 年 17yr 的运行中,获得了一大批观测信息,特别是有关日冕中射电爆发源的大小、位置及运动的清楚而又详细的知识。该日像仪可以观测到日冕高层的许多精细结构,特别是日冕等离子体粒团,有时以长长的环形从太阳表面伸出,有时则被抛射到行星际空间;还观测到了冕环的向外扩张和运动,宁静太阳的冕洞等^[15]。它工作在四个频率上:43MHz、80MHz、160MHz 和 327MHz。用射电辐射计作它的增益控制。以高角分辨率记录太阳的两维图像。每一幅通常在 4 个观测频率上以 4s 为一个循环轮流作记录。除 43MHz 外,在其它工作频率上都是每秒产生一对左、右旋圆偏振图像,采样率 0.25s。图 2 可以清楚地说明 Culgoora 射电日像仪的构成。

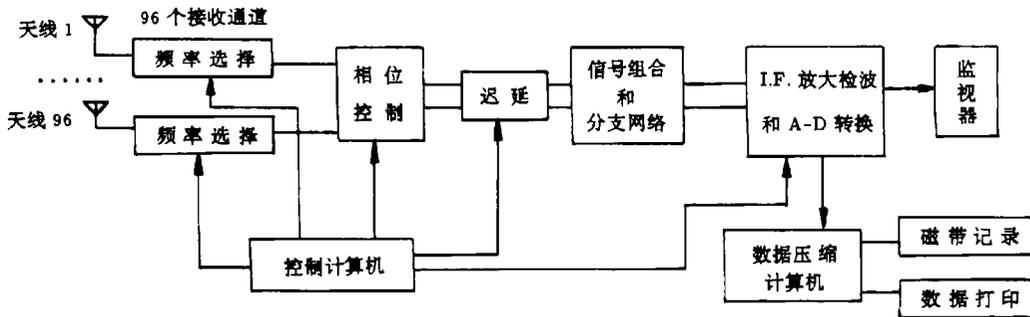


图 2 Culgoora 射电日像仪框图^[14]

Culgoora 射电日像仪天线阵为两个同心圆环,主阵工作在 80/160/327MHz,由 96 面可控 13m 口径抛物面天线组成,每面天线上安装了一对垂直交叉对数周期偶极子天线作馈源,经 90° 相位开关以测量偏振,阵直径为 3000m,另外一个阵工作在 43.25MHz,由 48 面简单的角反射面天线组成,阵直径为 2775m。它在四个工作频率上的视场、像元数、束宽等见表 1。

表 1 在四个工作频率上的视场、像元数及束宽

频率 /MHz	束宽 /(')	视场 /(')	像点	间隔 /(')
43.25	7.5	2 × 1.6	30 × 24	4.2
80	3.8	2 × 1.6	60 × 48	2.1
160	1.9	1 × 0.8	60 × 48	1.0
327.4	0.93	0.5 × 0.4	60 × 48	0.5

3.6 美国 Clark Lake TPT 射电望远镜

Clark Lake TPT 射电望远镜建于美国 California 的 Clark Lake 射电天文台, 在 1981 年 6 月首次作大规模观测。该望远镜工作在 $15 \sim 125\text{MHz}$ 之间且频率可调, 在 $25 \sim 75\text{MHz}$ 内灵敏度最好。它是一个全可动的十米波天线阵, 由 720 个角锥螺旋天线组成 $3.0\text{ km} \times 1.8\text{ km}$ 的“T”型阵。

1024 个通道的数字相关器, 可在阵不同部分的 512 个干涉基线上, 从大约一个波长的最小间距到系统的最大孔径同时测量复可见度函数, 经 Fourier 变换, 产生所观测天区的 32×32 个波束宽度 (64×64 像元) 的图像, 角分辨率为 $20' \sim 2.7'$, 灵敏度约为 1Jy 。

Clark Lake TPT 射电望远镜 720 个天线单元每连续 15 个组成一组, 每组输出都有一个接收机通道, 经可编程第一混频、放大、第二混频放大、A/D 取样至可编程数字延迟 (带宽可选择)。采用孔径综合系统, 每个 E-W 组输出与每个 N-S 组输出作数字相关, 相关输出在 10ms 到 10s 时段上作预积分, 然后将数据写在磁带上作脱机处理, 并将信号在长达 5min 的时段上积分, 再作 Fourier 变换以产生所观测天区的图像, 对这些图像又可作平均以便将信号在时的时段上作积分, 用 CLEAN 算法修改图形。而且由于 TPT 工作在一个地面干扰十分严重的频率范围上, 它频繁地对数据作 Fourier 变换, 并对选出的图像作平均。该仪器还采用了一些方法修正由于取样而引起的在相关系数和真实的相关功率之间的非线性关系、减小交叉耦合效应及在观测室引入到传输线系统的虚假信号。它的定标技术已使在整个孔径上对振幅和相位分布控制达百分之几的精度。

Clark Lake TPT 射电望远镜的计算机系统为双处理器系统: 一个处理器在线作望远镜控制和取数, 另一个完成脱机后的程序开发及数据处理的多用户功能。两个处理器之间由多条总线相联。输入输出终端有彩色监视器、打印机、绘图仪、纸带阅读器和打孔器、磁带、磁盘等。开发了一种列队实时操作系统来控制天线和取相关器数据。

TPT 是一个甚薄阵, 因此在对点源及像太阳这样的明亮展源上工作情况好, 但要使它适合观测活动太阳这样强的快速变化的源还需作一些深入的开发。如 TPT 要用一个阵处理器来将数据处理过程至少加速几个量级, 才能在 $10 \sim 100\text{ms}$ 时间内产生太阳图像。它最初的观测是针对固定或缓慢变化的源。1981 年 6 月每天 7h 观测金牛座 A 被太阳日冕遮掩时的情况, 直接测量两维的太阳风中电子密度活动空间谱^[16]。在 1982 ~ 1987 的太阳宁静年期间, 该仪器每天在 30 和 100MHz 之间的频率上作太阳日冕图形, 提供了太阳日冕大尺度结构的三维信息^[17]。

3.7 日本 Nobeyama 射电日像仪^[5,18]

日本 Nobeyama 射电日像仪是目前最先进的太阳观测设备, 它的建成经过了几十年的努力。在 20 世纪 70 年代初, 它是一架一维的干涉仪, 空间分辨率只有 $2.5'$, 而时间分辨率是 3min。到 70 年代末, 空间和时间分辨率分别提高到 $1'$ 和 1s ^[15]。后来 Tanaka^[5] 提出要建成一个能用于太阳观测的干涉仪, 而 Kai 则补充说要同时在 Solar-A 卫星上装一个硬 X 射线望远镜, 经过日本太阳射电组十多年的讨论, 在 1992 年初, 花了 2yr 的时间后最新的 Nobeyama 射电日像仪建成了, 并从 1992 年 6 月底开始常规观测。它在 17GHz 以 $10''$ 的空间分辨率和 50ms 的时间分辨率对两种圆偏振作出全日面的图形。已观测到许多有趣的现象, 如太阳耀斑、爆发日珥和 S 分量, 并且得出了一些引人注目的结果。在两年多的时间里已记录到了大约 100 个太阳耀斑。

在 17GHz, 耀斑脉冲相的射电辐射主要来自加速到约 100keV 的电子, 并且与硬 X 射线辐射紧密相关。Nobeyama 射电日像仪选择 17GHz($\lambda = 1.7635\text{cm}$) 为最初的工作频率, 带宽约为 34MHz, 并且在建设时就已考虑了将要发展成在 17GHz 和 34GHz 的同步观测。这在 1995 年 10 月已成为现实^[19], 可以提供高空间高时间分辨率的双频太阳射电图像。Nobeyama 射电日像仪有 84 面按对称 T 形阵分布的 80cm 口径地平式、装有馈源喇叭的抛物面天线组成。天线间距从 T 型阵中心开始按 d 、 $2d$ 、 $4d$ 、 $8d$ 和 $16d$ 的递增间距排列, 而 $d = 1.528\text{m}$, 整个阵形的安排适合于快速成像, 大小为 $490\text{m} \times 220\text{m}$ 。天线平均温度为 550K, 标称视场为 $40'$, 标称空间分辨率对二维图像为 $10'' \times 10''$, 对东西一维图像为 $5''$, 时间分辨率对每天 8h 的观测为 1s, 对特定事件为 50ms, 可以检测到 1% 的圆偏振度, 灵敏度在快速成像时为 1300K, 而在 1h 自转综合时则为 22K, 总相位稳定度 $\leq 0.3(\text{rms})$, 总增益稳定度 $\leq 0.2\text{dB}(\text{rms})$ 。每个天线接收到的信号交叉相关从而获得图像的空间 Fourier 分量, 每一秒钟对所有的原始数据作积分并由一个小型计算机记录在光盘上, 而原始数据则由一个高速数字式磁带机暂时记录在磁带上。相关器为 1bit 数字相关器。通过利用冗余天线组合作增益和相位误差实时自校准、用新的图像处理技术压缩旁瓣、采用最新的稳相本振及低损耗相位稳定的光缆传输本地参考信号和中频信号等方法在硬件和软件两方面保证了在快速成像时图像的动态范围优于 20dB, 而在利用地球自转综合时则为 30dB。Nobeyama 射电日像仪上使用了最新研制的全部用计算机操作的控制系统能够保证即使射电日像仪的一部分出现故障照样可以继续观测。

3.8 美国的 STRAWMAN 计划^[8,20,21]

在日本 Nobeyama 射电日像仪建成的激励下, 各国的太阳射电天文学家们跃跃欲试。1994 年, 众多的射电 / 高能物理学家们会聚 Baltimore 讨论太阳射电天文学的现状和未来, 并最终决定成立工作组, 设计一个专用于太阳的在多个频率点上、约 1s 时间分辨率、能形成高质量图像的仪器。1995 年 4 月, 工作组人员在 California 讨论太阳专用射电综合望远镜所能做的科学工作及科学目标对仪器设计的要求。1995 年 9 月 Gray 即提出了新太阳射电望远镜的稻草人计划。他所设想的仪器特点是:

频率覆盖: 1 ~ 26GHz

瞬时带宽: 500MHz

频率切换顺序: 全频带灵活, 无限制

频率分辨率: 30MHz(?)

偏振: 同步的 RCP、LCP; 1% 精度

时间分辨率: 1s(全频带); 10ms(500MHz)

空间分辨率: $4'$ (在 10GHz); $2''$ (在 20GHz, 需约 1.5km 的最长基线)

图像动态范围: 100 : 1(?), 22(?) 面天线

Bastian 为稻草人计划提出了一种 Y 型天线阵: 3 个交叉臂组成, 间距的选择使基线长度在 $u-v$ 面上线性增加, 对阵形作了各种优化以满足好的亮度灵敏度、角分辨率及频率综合的要求。而天线的馈源计划采用宽带交叉线性对数周期偶极子, 后接 90° 移相混合器, 把两个线偏振信号转变成圆偏振的, 与原 Culgoora 射电日像仪相同。处理两种偏振信号的接收机通道有两种考虑, 一种为双通道, 另一种为加偏振开关的单通道。

在这个计划中, 还考虑了用差分的方法检测 CMEs、低噪声放大器、高速开关和快速锁相的本振系统、IF 系统、光纤传输线、模拟或数字的相关器作检波和相关, 并考虑用三台计

算机分别作控制、采数和数据分析。

后来, 稻草人计划又作了一些修改和补充^[20], 将该仪器设计成一个频率灵活的综合望远镜, 能够在约 1s 的时间上作偏振和频谱的宽带成像。由 3 个约 25m 的大天线元和约 20 个 2m 的小天线元组成, 配备的馈源及接收机工作在 300MHz 和 26GHz 之间。另外, 大天线元可能配一个高时间、高频率分辨率的分米波频谱仪终端。在夜间, 三个大天线元以可与 VLA 相比拟的灵敏度观测宇宙源。该仪器将是继太阳地面观测的又一次革命。它将是能够在宽的能量范围内对高能和非热现象产生高质量图像的唯一仪器。它将加深人们对太阳耀斑、爆发暗条和爆发日珥以及日冕物质抛射等现象的理解, 还能以较高的灵敏度研究宁静太阳, 在太阳活动区中对太阳色球、日冕磁图作高空间分辨率研究, 对暗条和日珥的形成和演化作高时间分辨率研究。

3.9 其它射电日像仪

澳大利亚 Fleurs 21cm- λ 太阳射电望远镜为 $32 \times 5.8\text{m}$ 抛物面天线组成的天线阵, 十字栅式, 臂长 366m^[22]。

美国 Stanford 大学的 10cm- λ 单频日像仪也为十字栅式^[22]。

日本对射电太阳作成像观测的还有丰川的 3cm 及 8cm 两台一维成像射电日像仪。

前苏联西伯利亚太阳射电望远镜。

北京密云米波综合孔径系统, 1984 年观测成功, 作北天区太阳米波高分辨率快速现象的研究。天线阵由 $28 \times 9\text{m}$ 抛物面天线组成, 16 面天线的 A 阵和 12 面天线的 B 阵在东西方向一字排开, B 阵分列于 A 阵两端, 最长基线 1164m, 工作在 232MHz, 带宽 1.5MHz。空间分辨率为 $3.8' \times 3.8' \csc \delta$ (δ 为源赤纬), 视场 $10^\circ \times 10^\circ$, 12h 跟踪观测折合灵敏度为 0.05Jy^[22,23]。

美国国家射电天文台的 VLA 和荷兰莱顿大学的 Westerbork 综合孔径射电望远镜很早就微波段实现了对太阳的高空间分辨率图像观测, 完善了人们对于太阳射电微波爆发的空间结构的观念, 但它们主要是利用地球自转进行综合观测的, 适合观测如宇宙射电源和太阳活动区中的准固定目标^[4]。它们由大口径的单元天线组成以增大接收面积, 但是视场小, 观测时间由太阳和非太阳课题分享。Westerbork 综合孔径望远镜天线阵为 10 台固定的和 2 台可移动的直径为 25m 的抛物面天线, 放在东西线上, 工作波长 6 ~ 50m。VLA 由 $27 \times 25\text{m}$ 抛物面天线组成, 放置在 Y 型三条铁轨上, 有四个工作频段: L(1.35 ~ 1.72GHz)、C(4.5 ~ 5.0GHz)、U(14.4 ~ 15.14GHz) 和 K(22 ~ 24GHz)。其天线系统的总面积相当于一台直径为 130m 的单天线射电望远镜, 而分辨率则相当于跨度为 34km 的望远镜。VLA 是目前世界上威力最大的射电观测设备之一^[22]。

美国 California 的 Owens's Valley 原有一射电日像仪^[22], 工作在 10 ~ 18GHz, 有 86 个频率点, 天线阵为非对称 T 型阵, 天线为 $2 \times 27.5\text{m} + 3 \times 2\text{m}$, 采样率可为 10、20、50 和 100ms, 基线数为 450。此阵与新建的 STRAWMAN 天线阵合在一起, 将是未来最具威力的太阳射电成像设备。

4 太阳物理对太阳射电天文测量仪器的要求

Melrose 等人^[3]在讨论太阳射电爆发理论及其未来前景时说自从 1958 年 Ginzburg 和

Zheleznyakov 构造了非线性等离子体理论的最早模型后, 太阳射电爆发理论的发展主要就是在对等离子体微扰的认识方面。还指出有证据表明太阳日冕在可以分解的最小范围上都是各向异性的, 从行星际介质还获得直接证据表明 Langmuir 扰动以一种非常不均匀的方式分布在等离子体辐射源内。太阳射电辐射理论的深入发展也许就在于对源区中小尺度结构的认识、对于源模型的完善。

耀斑过程与太阳活动区的能量储存、粒子加速以及局部等离子体的质量、动量和能量的传递和转换过程密切相关。而目前一般理论认为, 太阳耀斑能量的储存、触发和粒子的加速过程等, 都发生在日冕的磁环中, 与日冕的磁场分布密切相关, 射电观测长久以来一直被当作是测量日冕磁场的唯一手段, 微波辐射的强度和偏振的两维图像, 对活动区日冕磁场结构相当敏感, 因此是对日面磁场位形的反映。另外从地面上观测和研究日冕是对硬 X 射线和软 X 射线观测的一种有效补充。

星载仪器高质量的观测使人们能够将太阳射电爆发与其它太阳现象联系起来, 同时也将射电辐射观测的低频端从由于地球电离层而截止处向外延伸。而微波爆发与其它一些现象(特别是硬 X 射线)的密切相关, 可以深化人们对太阳耀斑演化的认识^[3]。

可见, 利用射电日像仪可作的科学研究课题是多方面的: (1) 研究耀斑前后日冕磁场变化、微耀斑爆发位置、日冕磁场与光球磁场关系; (2) 研究耀斑的动力学过程, 如耀斑初始能量释放位置、非热粒子在日冕环中的运动、X 射线源和射电源的初始位置等; (3) 观测活动区精细结构, 研究活动区的生长、衰减和消亡过程以及活动区强弱与耀斑产生之间的关系; (4) 研究高能粒子加速机制和加速过程及其在日冕和行星际空间传播; (5) 研究日冕物质抛射; (6) 研究耀斑中热与非热过程相互作用与转化; (7) 研究 III 型爆发及射电尖峰辐射等。反之, 这些科学研究目标对射电观测仪器也提出了更高的要求, Bastian 和 Gary^[20] 认为未来的太阳观测仪器应能够同时满足: (1) 高动态成像范围; (2) 几角秒的空间分辨率; (3) 在最高频率上的全日面覆盖; (4) 较高的绝对位置精度; (5) 高时间分辨率 ($< 1s$); (6) 中等分辨率在宽频带上准瞬时的频率覆盖; (7) 支持偏振测量。对这些要求还可以作些补充: (1) 要揭示耀斑的基本特性就非常有必要作统计的或系统的观测。要求有宽视场能覆盖全日面的仪器专门对太阳作常规基本观测^[18]; (2) 太阳耀斑一般地在其早相有脉冲式时间变化, 并且在几何结构上也有快速变化。因而要求观测仪器是高时间分辨率的。时间分辨率应远高于 $1s$, 以便跟踪从粒子加速区位置出发的高速电子流, 而要观测时标 $\leq 0.1s$ 的太阳快速过程, 时间分辨率应更高; 同时具有时间和空间的高分辨率是非常必要的, 特别是在研究尖峰辐射时^[7] 更为必要; (3) 要深入研究太阳耀斑物理机制, 必须作多波段联合观测, 而射电波段的辐射测量由于空间分辨率不足, 远落后于其它波段^[15,24,25]; (4) 射电日像仪需有足够的灵敏度, 其成像能力应足以观测 CMEs^[8]。

总之, 要深入研究太阳物理和耀斑物理, 研究非热粒子流的产生和演化, 研究日冕物质抛射以及研究太阳大气等, 都需要高空间分辨率、高时间分辨率、高频率分辨率及高灵敏度的射电日像仪的支持。

5 射电日像仪的未来发展

现有的理论发展及其它波段高分辨率的观测都要求太阳射电仪器有大的发展和完善。太

阳物理学家们带着数不清的“为什么”面对 21 世纪,但是,不管他们如何从有限的仪器数据中艰苦地挖掘,也很难找到答案。Culgoora 射电日像仪在 1984 年关闭虽有它经费方面的原因,还可能是因为这种观测仪器在米波太阳射电天文学研究中已经用到了极点,从而使该基地的科学家们已不再期待只在米波射电观测基础上会有戏剧性的新发现。Culgoora 米波射电日像仪将让位于一个综合望远镜 Australia Telescope,它具有某些专为太阳设计的特性即高空间、高时间、高频率分辨率以及双频同步观测。

可以说,随着理论研究的拓宽和深入的需要,射电日像仪必将进一步提高它的时间分辨率和空间分辨率,而观测的频率,也将不再仅限于短波段或长波段,而将会是在较宽的频带上以较高的频率分辨率对太阳进行射电成像观测。

在太阳活动第 21 周峰年期间,美国发射了 SMM 卫星,投入了 VLA;日本发射了 Hino-tory(火鸟)卫星,使用了 17GHz 和 35GHz 两台一维干涉仪^[15];法国的 Mark III Nançay 射电日像仪开始观测。而在太阳活动第 22 周峰年,OVRO 和 RATIN600 升级,日本又发射了 Solar-A(阳光)卫星,完成了 Nobeyama 射电日像仪;Mark III Nançay 射电日像仪升级为 Mark IV。太阳活动第 23 周峰年,则将有巴西工作在 7GHz、22GHz 和 44GHz 的 13.7m 多馈阵系统^[24];美国的 STRAWMAN 计划;日本在 2000 年 1 月将发射一颗 X 射线卫星;另外还有澳大利亚 Culgoora+Parkes+Mopra 的毫米波日像仪^[24]等。中国也有一个面向 21 世纪的“一天两地”的宏伟计划,即一颗 X 射线卫星、一座红外太阳塔和一台射电日像仪。这些都说明许多国家都非常重视太阳射电日像仪的应用和前景,也很重视多波段联合观测。

我国的太阳活动区物理和磁场研究、太阳光谱研究已步入国际领先地位,太阳活动预报也处于国际先进水平,这就要求太阳射电也相应发展^[24]。但是,目前国内尚无观测太阳的高空间高时间分辨率的射电仪器,这与已达到国际一流水准的怀柔磁场望远镜等光学仪器形成巨大反差,也与已达到毫秒级时间分辨率的频谱分析仪等射电仪器形成巨大反差。各波段仪器的时空分辨率不相匹配,就无法形成多波段的联合观测和研究,阻碍了太阳活动区物理研究的深入^[15]。国内先后曾有多个射电日像仪提案。张和棋等人^[15]提出短厘米波段射电日像仪方案,期望它能以 12" 的空间分辨率、100ms 的时间分辨率,在 12.5GHz 的工作频率上获得全日面的强度和偏振辐射,并作为太阳射电的专用设备,可用于巡视观测、警戒观测或联测。郑乐平^[26,27]认为无论现在或将来,射电日像仪都是太阳射电的主要观测手段,是我国发展太阳射电的大型基础设备,提出建造由 8 个 1.5m 天线组成的小型射电日像仪的方案。认为小型射电日像仪自身是一架完整的天文望远镜,还可作大型射电日像仪的中间试验,对我国当前的太阳射电天文有承上启下的作用。夏志国等人^[25]提出分米波射电日像仪方案,认为射电日像仪的工作频率如与现有射电频谱仪的工作频率相对应,可使两者的观测资料得到比较和对照。傅其骏等人^[28]提出的射电日像仪方案则考虑了充分利用现有的密云太阳综合孔径天线阵。金声震等人^[24]提出厘米波多频射电日像仪方案,射电日像仪的工作频率范围为 1~30GHz,选择多种工作模式:(1)常规模式:48" 分辨率;(2)实时模式:3" 分辨率,25~100ms 取耀斑源区像;(3)综合孔径模式:3" 分辨率,60~240s 取全日面像;(4)相加模式:以单天线总功率方式跟踪活动区,3" 主瓣指向任何源区;(5)偏振模式:50ms 内在左旋和右旋偏振通道内切换;(6)频率切换:50ms 内在 1~26.5GHz 或 2~20GHz 频带内任意切换。国内如此多的射电日像仪方案说明射电日像仪在太阳射电天文以至整个太阳物理研究方面的重要性已引起了天文学家们的重视和关注。但是从目前的经济条件来看,走

国际合作的道路建造全新的射电日像仪, 似乎更为现实。

建造射电日像仪是个非常诱人的计划, 但是其造价很高, 需要天文界讨论和论证, 根据我国国力, 提出一个最为优化的方案。Gordon^[21]在太阳射电工作组会议上说, “要实现射电观测能力上的一次革命——三维地研究太阳日冕各方面, 包括所有时间和大小范围上、动态和活动的结构。……而射电成像不过是电子和计算机上的问题, 可以很便宜地完成这个设备。……现在是建造一台将向所有人开放的太阳专用设备的时候了, 这台设备将把我们带入未来。”

参 考 文 献

- 1 向德琳. 射电天文观测. 北京: 科学出版社, 1990
- 2 王绶琯, 吴盛殷等. 射电天文方法. 北京: 科学出版社, 1988
- 3 Melrose D B, Mclean D J. In: Mclean D J, Labrum N R eds. *Solar Radiophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985, Ch.18, 469
- 4 Vinokur M. *Ann. d'Astrophys.*, 1968, 31(4): 457
- 5 Enome S, Hirayama T eds. *New Look at the Sun with Emphasis on Advanced Observations of Coronal Dynamics and Flares*, Proc. of KOFU Symposium. Kofu, Japan, 1993, NRO Report No.360,1994, Nobeyama: Nobeyama Radio Observatory, National Astronomical Observatory, Japan, 1994
- 6 Labrum N R. In: Mclean D J, Labrum N R eds., *Solar Radiophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985, Ch.7, 155
- 7 克里斯琴森 W N, 霍格玻姆 J A. 射电望远镜. 陈建生译. 北京: 科学出版社, 1977
- 8 Gary D E. *Strawman Proposal for a Solar Radio Telescope*. private communication, Caltech, US, 18 Sep., 1995
- 9 纪树臣. 云南天文台台刊, 1988, 4: 100
- 10 Radioheliograph Group. *Solar Phys.* 1977, 55: 251
- 11 纪树臣, 张柏荣, 黄占奎等. 天文学进展, 1990, 8: 179
- 12 Radioheliograph Group. *Solar Phys.*, 1983, 88: 383
- 13 Radioheliograph Group. *Solar Phys.*, 1989, 120: 193
- 14 Nelson G J, Sheridan K V, Suzuki S. In: Mclean D J, Labrum N R eds. *Solar Radiophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985, Ch.6, 113
- 15 张和祺, 王家龙, 姚金兴等. 短厘米波段射电日像仪提案. 北京: 中国科学院北京天文台, 1995
- 16 Erickson W C, Mahoney M J, Erb K. A. J. *Suppl. Ser.*, 1982, 50: 403
- 17 Schmahl E J, Gopalswamy N, Kundu M R. *Solar Phys.*, 1994, 150: 325
- 18 Nakajima H, Nishio M *et al.* *Proceedings of the IEEE* 1994, 82: 705
- 19 吴盛殷, 南仁东. 天文学进展, 1998, 16: 169
- 20 Bastian T S, Gary D E *et al.* *Broadband Imaging-Spectroscopy with The Solar Radio Telescope*. unpublicized, NRAO, US, 1995
- 21 Bastian T S, Gary D E, Klimchuk J A *et al.* *Summary of a workshop about Solar Radio Telescope*. unpublicized, San Juan Capistrano, California, 17~20 Apr. 1995
- 22 北京师范大学天文系. 射电天文方法(油印本). 北京: 北京师范大学, 1993
- 23 赵仁扬, 金声震, 傅其骏. 太阳射电微波爆发. 北京: 科学出版社, 1997
- 24 金声震等. 厘米波多频日像仪方案. 北京: 中国科学院北京天文台, 1996
- 25 夏志国, 张柏荣等. 分米波射电日像仪提案. 昆明: 中国科学院云南天文台, 1996
- 26 郑乐平. 见: 林元章, 张洪起编. 太阳活动二十三周展望, 太阳活动二十三周年预研究讨论会, 北京, 1995, 北京: 中国科学院光学天文联合开放实验室, 1995: 192
- 27 郑乐平. 见: CME和第三次日地预报学术讨论会会议论文集(编者缺), 云南大理: 1997
- 28 傅其骏, 姬慧荣等. 射电日像仪提案. 北京: 中国科学院北京天文台, 1996

Progress and Development of the Solar Radioheliograph

Geng Lihong

(Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of sciences, Beijing 100012)

Abstract

This paper describes the general situation, progress and development of some solar radioheliographs from which astronomers have made magnificent contributions to the solar radio astronomy as well as to the solar physics. It also presents the scientific research work and the characteristics of the future radioheliograph. It is for the reference of realization of the great plan "one space X-ray satellite and two terrestrial instruments: one infrared solar tower and one radioheliograph" for the 21st century.

Key words radio astronomy—instrumentation: radioheliograph—resolution