

世界各国日像仪主要性能比较*

姬国枢, 王 威, 何俊波

(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 本文是世界各国日像仪的天线阵性能汇集, 包括日、俄、法、中、美等专用日像仪及美国、印度、巴西等兼作日像仪的天线阵, 列出了几个典型天线阵列排列及接收系统。附录中列出了等口径及不等口径天线阵列的灵敏度及动态范围计算公式, 同时列出了视场、角分辨率等公式。便于读者自行分析, 计算, 比较各天线阵列性能。

关键词: 日像仪; 视场; 时间分辨率; 灵敏度; 空间分辨率; 动态范围

中图分类号: P111.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—7673(2010)02—0095—11

1 射电望远镜全称、简写和中文译名对照

- NoRH: Nobeyama Radioheliograph(野边山日像仪)
- NRH: Nancay Radioheliograph(南茜日像仪)
- SSRT: Siberian Solar Radio Telescope(西伯利亚太阳射电望远镜)
- FASR: Frequency Agile Solar Telescope(频率灵活太阳望远镜)
- CSRH: Chinese Spectral Radioheliograph(中国射电频谱日像仪)
- VLA: Very Large Array(甚大阵)
- EVLA: Expanded Very Large Array(甚大阵扩展)
- GMRT: Giant Meterwave Radio Telescope(巨型米波射电望远镜)
- BDA: Brazilian Decemetric Array(巴西分米波阵)
- WSRT: Westerbork Synthesis Radio Telescope(Westerbork 综合射电望远镜)
- ATA: Allen Telescope Array(艾伦望远镜阵)

表 1 世界各国日像仪的科学目标表

Table 1 Scientific goals of radioheliographs

	建成时间	科学目标
NoRH ^[1]	两年完成,1992年6月开始日常观测	太阳耀斑和日冕
NRH ^[2]	1967年7月初建成,并经过多次改进	日冕结构和太阳风与太阳黑子和太阳磁场活动相关的爆发,太阳活动与地球陆地环境的关系
SSRT ^[3]	1981—1984	日冕磁场测量,CME的动力学研究 and 3D结构,耀斑物理,太阳耀斑的亚秒过程研究
FASR ^[4-5]	计划	日冕磁场,太阳耀斑和粒子加速,空间天气现象

* 基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ 2009—3)资助。

收稿日期: 2009—05—27; 修定日期: 2009—09—05

作者简介: 姬国枢, 男, 研究员, 研究方向: 射电天文技术, Email: jigs@bao. ac. cn

续 表

	建成时间	科学目标
CSRH ^[6-7]	在建	瞬变高能现象、日冕磁场和太阳大气结构,确定耀斑与日冕物质抛射的源区特性
VLA ^[8]	1973-1980	天文学、空间天气、卫星跟踪及其它科学、太阳物理
GMRT ^[9]	1988-1998年建成	星系形成、脉冲星中子星、银河系与河外星系射电源、太阳物理
BDA ^[10]	2003年5面天线原型实验,在建	太阳物理
WSRT ^[11]	1970	
ATA ^[12]	在建	探索地外文明

表 2 日像仪的系统参数表

Table 2 System parameters and performance measures of radioheliographs

日像仪	NoRH	NRH	SSRT	FASR	CSRH-I
观测频率	17GHz, 34GHz	150~450MHz	5.731GHz	中频阵 B: 0.3~2.5GHz	分米波阵 0.4~2GHz
带宽	33.6±0.9MHz	700KHz	112MHz		5MHz
视场	40'(17GHz)	0.5'(450MHz)		3'(1GHz)	~1.1°-5.4°
空间分辨率	10"(17GHz)	18'(450MHz)	21";一维空间分辨率 15"	~20"(1GHz)	~10"-51"
时间分辨率	1s 对于总观测时段; 5ms 对于选择事件	5ms×频率数	14ms 一维 1min 二维	约 10ms (<3GHz)	25ms
图像动态范围	≥20dB 快照; ≥30dB 综合	45dB		≥30dB	≥25dB
观测时间	±4h 子午线两侧		11h/夏 6h/冬		±4h
灵敏度	4.4×10 ⁻³ sfu (1s 快照) 7.3×10 ⁻⁵ sfu (1h 综合)				
极化方式	双圆极化	Stokes I, V	左右旋圆极化	双圆极化	双圆极化

表 3 综合阵的系统参数

Table 3 System parameters and performance measures of synthesis arrays

天线阵	VLA	GMRT	BDA	WSRT	ATA
观测频率	1.4, 0.5, 14.4, 23GHz	150, 235, 325.6 10, 1400~1450, 1665, 50MHz	1.2~1.7Hz 2.7GHz, 5.6GHz	610MHz, 1415MHz, 5GHz	0.5~11.2GHz
带宽	50MHz	32MHz	2.5MHz	10/2.5MHz	104MHz
视场				0.17'(5GHz)	2.5'(1.4GHz)

续 表

天线阵	VLA	GMRT	BDA	WSRT	ATA
空间分辨率	50.6''	2''(1.4GHz) 20''(150MHz)	1.5arc/min	3.7''(5GHz) /2.8km	
时间分辨率			100ms		
图像动态范围				>20dB	
观测时间	±4h				
灵敏度	10 ⁻⁴ Jy		3.5Jy/beam (1分钟积分)		3mJy/beam
极化方式	双线,双圆	L波段 双线极化; 其他波段 双圆极化	双线极化	4个 stokes 参量	4个 stokes 参量

表 4 日像仪的天线阵参数

Table 4 Specifications of antenna arrays in radioheliographs

天线阵	NoRH	NRH	SSRT	FASR	CSRH-I
阵地点	日本, Nobeyama	法国, Nancay	俄罗斯 Irkutsk	美国	内蒙古正镶白旗
阵形状	T字形	T字形	十字形	螺旋形	螺旋形
基线长度	488.960m 东西 220.060m 南北	3200m 东西 1250m 南北	622.3m 东西 622.3m 南北	2.9km 东西 3.8km 南北	三臂螺旋 东西、南北各 3km
天线数目	84	19(EW) 24(SN)	256	阵 A:45,阵 B:15,阵 C:15	40
天线形式口径	抛物面天线 80cm	抛物面天线 2m(东西)5m(南北) 7m,10m(增加天线)	抛物面天线 2.5m	抛物面天线 6m(0.3~2.5GHz) 2m(2~21GHz) LPDA:50~350MHz	抛物面天线 4.5m(0.4~2GHz) 2m(2~15GHz)

表 5 综合孔径的天线阵参数

Table 5 Specifications of synthesis arrays

天线阵	VLA	GMRT	BDA	WSRT	ATA
天线阵地点	Socorro, NM, 美国	Khodad, Pune 印度	Cachoeira Paulista, SP, 巴西	Westerbork 荷兰	美国
天线阵形状	Y形	12个在1平方公里内; 其它18个分在3个Y臂上	T型	东西	按算法 计算得到
基线长度	21km(可变)	25km; 最短105m	2.27km, 东西 1.17km, 南北	2772m(最长)	约1km
天线数目	27	30	38	14, 其中10个固定, 4个可动	350
天线形式口径	抛物面天线 25m	抛物面天线 45m	抛物面天线 4m	抛物面天线 25m	抛物面天线 6.1m

FASR 和 CSRH 相对现存各国单频(或几个点频)日像仪,他们是宽频带的新一代日像仪。CSRH 具有高时间、高空间、高频率分辨率能实时获取多通道太阳射电图像。建成后 will 填补在太阳爆发能量初始释放区高分辨射电成像观测的国际空白,对太阳剧烈活动的起源和发生规律研究有望取得原创性成果。CSRH 在世界上首次尝试螺旋阵列分布,技术上采用了低剖面宽带双极化馈源,宽带模拟光传输、高速数据采集等多项当前先进技术。

2 典型的接收系统结构

天线和机房间的数据传输,早期使用电缆^[2,13], 矩型波导^[3]、椭圆波导等^[8], 这种传输线带宽窄或色散大,限制了日像仪的接收带宽,90年代后光传输技术逐步成熟^[1], 取代了电缆,波导。光传输具有损耗小,频带宽,无色散等优点。

由于电缆高频损耗大,因此接收到的电信号,先在天线前端变频成中频再经过电缆传至机房后端处理,以减少传输损耗,这种方式是传统方式。

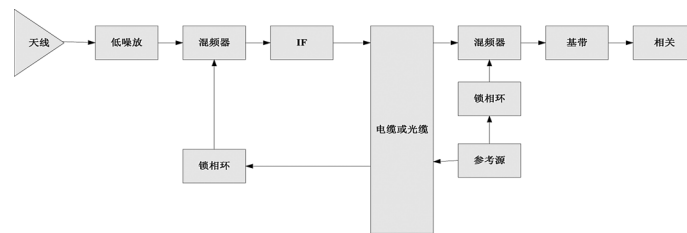


图1 日像仪方案 I 前端变频,中频电缆(光缆)传输

Fig. 1 Scheme I for a radioheliograph, where the mixer is at the front end, and the IF signal transmissions is through a cable(or analog optical fiber)

天线机房间的信号传输的第2种方式是宽带模拟光传输方式,天线 LNA 接收到的宽带射电信号,经宽带无色散的光纤传输至机房,再变频,数字化处理。典型系统信号流图如 FASR^[4-5], ATA^[12], CSRH-I^[4]采用这种方式。

天线机房间信号的第3种传输方式是数字光传输方式^[14], 宽带射电信号在前端射电频率上数字化,再经数字光纤传至机房进行相关处理。典型信号流图如 EVLA 的 L 波段电路结构。

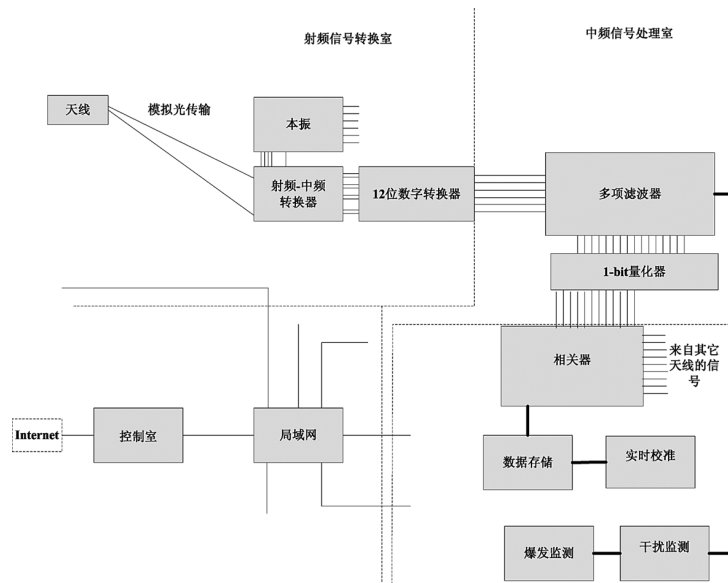


图2 日像仪方案 I—射频模拟光传输

Fig. 2 Scheme II for a radioheliograph, where the analog RF transmission is through optical fibers

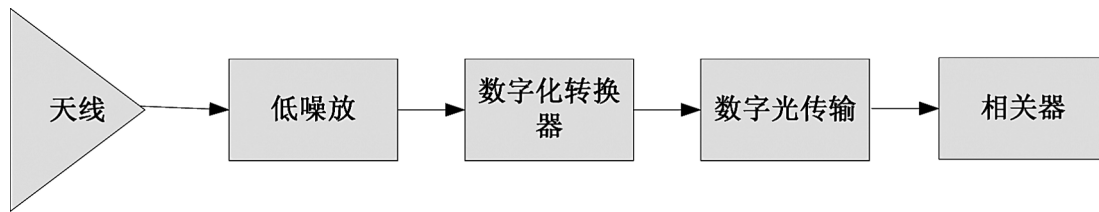


图 3 日像仪方案Ⅲ—前端 RF 采样，数字光传输

Fig. 3 Scheme III for a radioheliograph, where the RF sampling is at the front end and the digital optical fiber transmission is used

3 典型天线阵排列

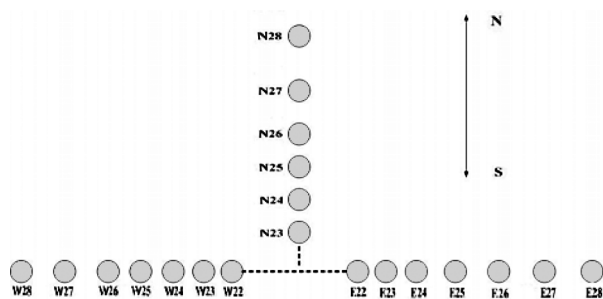


图 4.1 NoRH 天线阵(T 形)

Fig. 4.1 Antenna array of NoRH in Japan(T configuration)

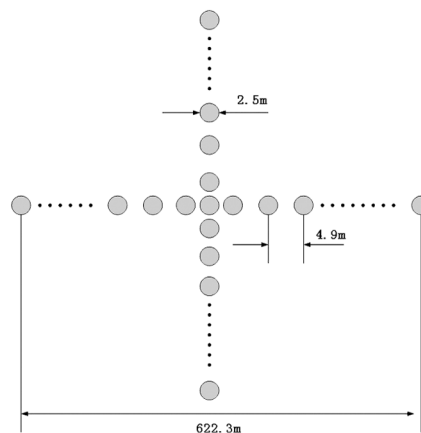


图 4.2 SSRT 天线阵(十字形)

Fig. 4.2 Antenna array of SSRT in Russia(cross configuration)

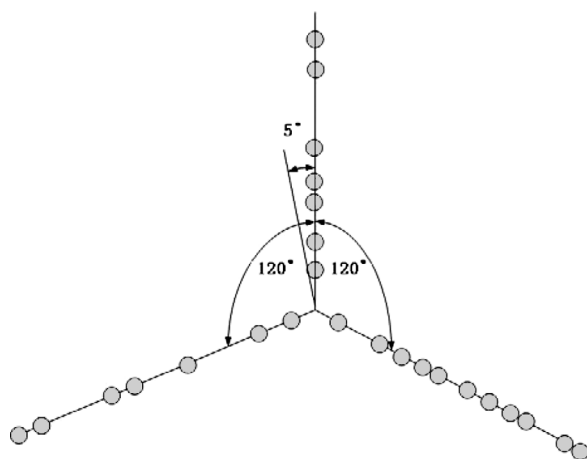


图 4.3 美国 VLA 天线阵(Y 字形)

Fig. 4.3 Antenna array of VLA in U. S. A. (Y configuration)



图 4.4 CSRH 天线阵(螺旋形)

Fig. 4.4 Antenna array of CSRH in Chinese(spiral configuration)

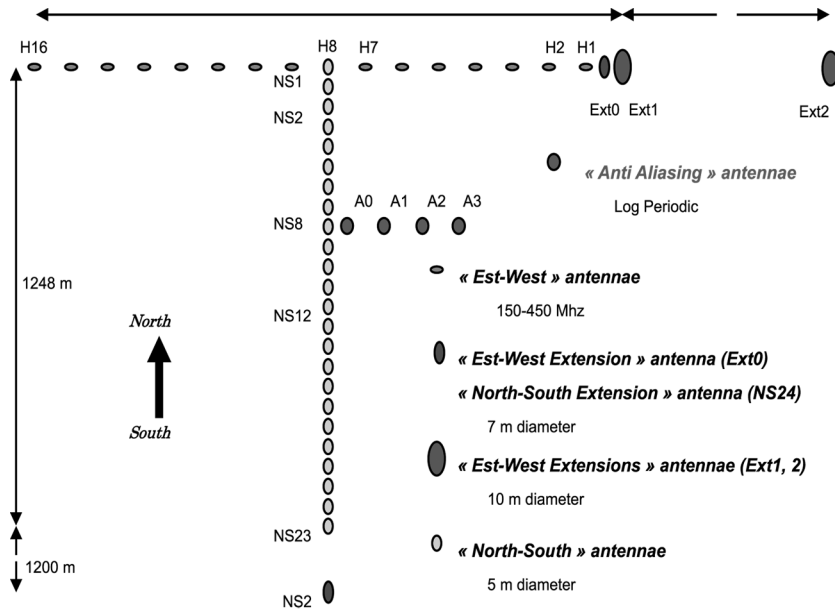


图 5 NRH 天线排列

Fig. 5 Antenna array of NRH

4 典型的接收系统

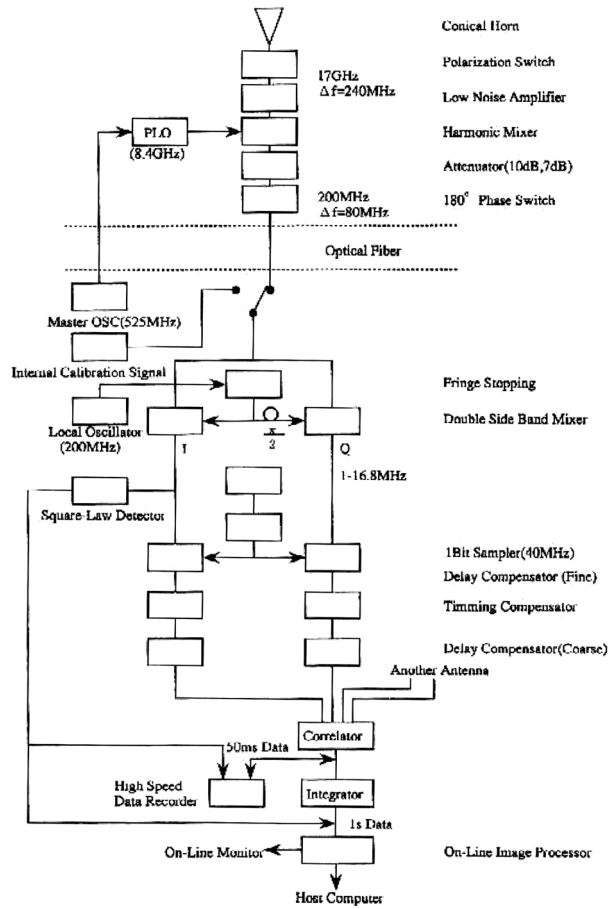


图 6 NoRH 接收系统框图^[1]

Fig. 6 System blocks of the receiver of NoRH

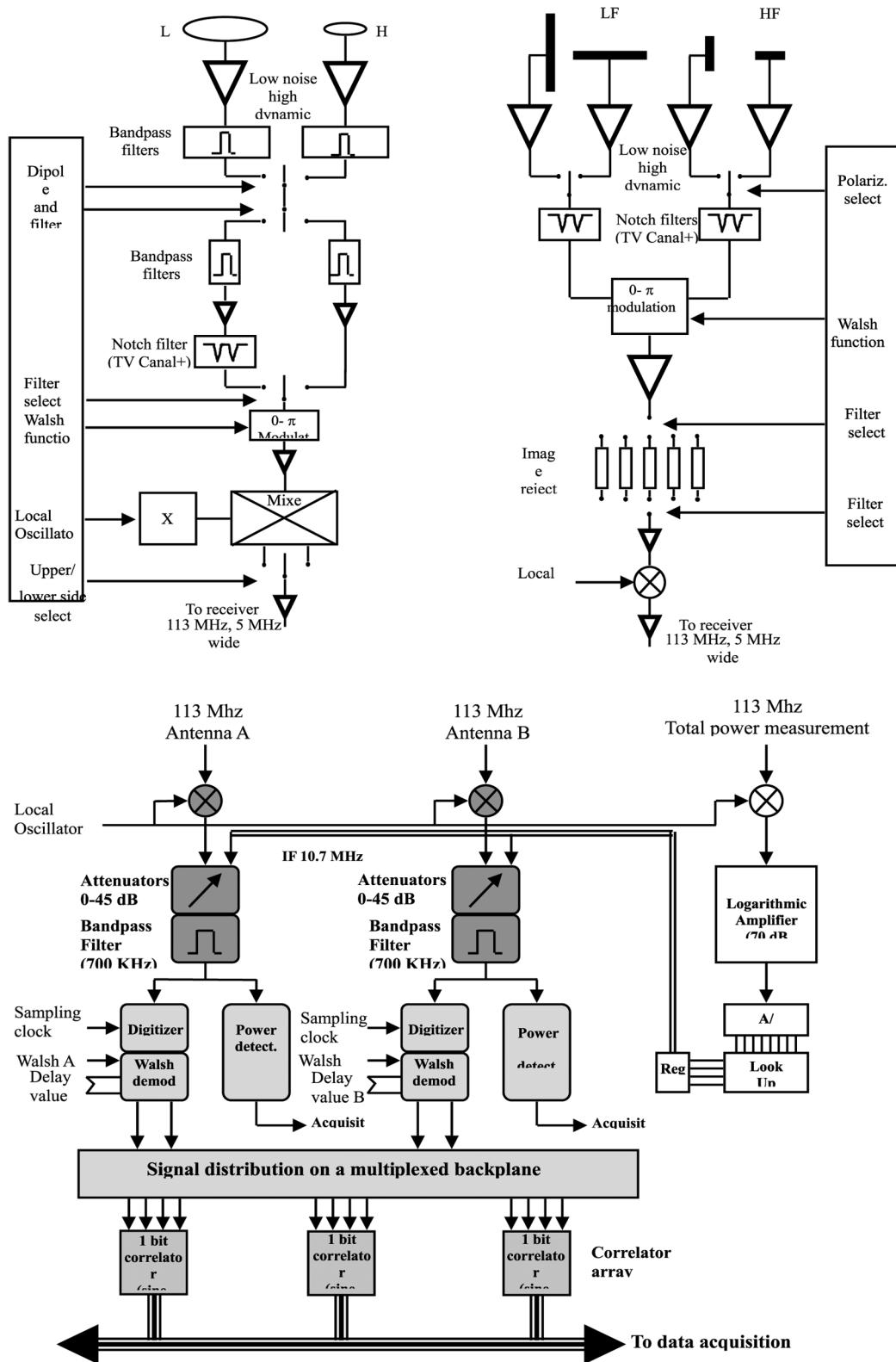


图 7 NRH 接收系统框图^[15]
 Fig. 7 System blocks of the receiver of NRH

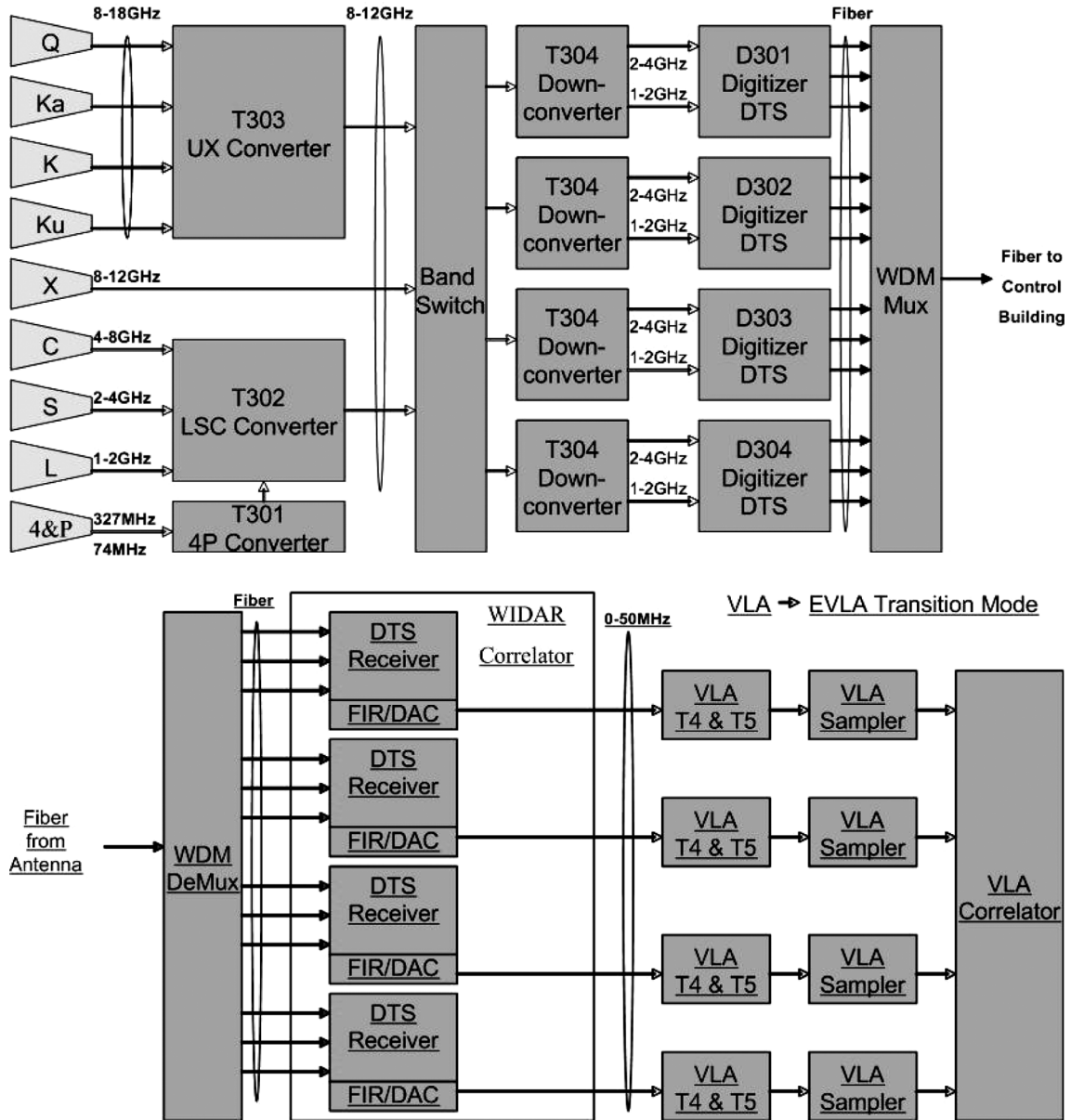
图8 EVLA接收系统框图^[14]

Fig. 8 System blocks of the receiver of EVLA

5 结束语

随着技术进步,原有系统不断进行改造,光缆替代电缆、波导,宽带取代点频,新建系统的性能朝宽频带、高灵敏度、大动态范围方向发展,技术朝光传输、前端数字化、高采样率方向发展。

本文资料来自于文献、会议资料、internet、国内外互访交流等。本文目的是为了日像仪系统设计,设备研制者提供寻找资料的捷径。限于篇幅未列出射电史上一些知名天线阵^[16-18],也不能刊出各国日像仪详细介绍,有需求者可通过电子邮件免费索取电子版。

附录

1 天线阵列的灵敏度

天线阵列的信噪比 R 为：

$$R = \frac{SAN}{\frac{\sqrt{2}kT\sqrt{N}}{\sqrt{\tau\Delta f}}} = \frac{SA\sqrt{\tau\Delta fN}}{\sqrt{2}kT} \quad (1)$$

灵敏度定义为最小可测流量密度 S_{\min} ，当最小可用信噪比为 R_{\min} 时，

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{2}R_{\min}kT}{Ae\sqrt{\tau\Delta fN}} \quad (2)$$

式中， S 是射电源流量密度； Ae 是天线接收面积， k 是玻尔兹曼常数， T 为天线分支接收系统噪声温度， τ 为积分时间， Δf 为积分带宽， n 为天线个数， N 为相关对数， $N = n(n-1)/2$ 。

这就是一些经典著作及参考资料给出的等天线口径阵列的信噪比公式^[8,19]。推广到不同口径天线阵列，阵列信噪比（观测普通射电源）：

$$R = \frac{S(\sqrt{A_1A_2} + \sqrt{A_1A_3} + \cdots + \sqrt{A_{n-1}A_n})}{\frac{\sqrt{2}kT\sqrt{N}}{\sqrt{\tau\Delta f}}} \quad (3)$$

式中， A_1, A_2, \dots, A_n 为第 1、第 2……第 n 个天线有效口径。

当观测对象为强源时，例如太阳。以天线阵列中有两种口径尺寸为例，小口径天线个数为 n_1 ，口径为 A_1 ，相关对数为 N_1 。大口径天线个数为 n_2 ，口径为 A_2 ，相关对数为 N_2 。大小口径天线相关对数为 $N_3 = N - N_1 - N_2$ ， $n = n_1 + n_2$ ， $N = n(n-1)/2$ 。

小口径天线支路噪声温度为 T_1 ，大口径天线支路噪声温度为 T_2 ，设 $T_2/T_1 = p$ ，则：

$$\frac{1}{2}(T_1 + T_2) = \frac{1}{2}(1 + p)T_1 = qT_1,$$

而 $\frac{1}{2}(T_2 + T_2) = pT_1$ ， p, q 为常数，则不同口径天线阵列信噪比（观测强源——太阳）：

$$\begin{aligned} R &= \frac{S[A_1N_1 + A_2N_2 + \cdots + (N - N_1 - N_2)\sqrt{A_1A_2}]}{\sqrt{2}k(\sqrt{N_1T_1^2} + N_2(pT_2)^2 + (N - N_1 - N_2)(qT_1)^2)} \\ &= \frac{S[A_1N_1 + A_2N_2 + \cdots + (N - N_1 - N_2)\sqrt{A_1A_2}]}{\frac{\sqrt{2}kT_1(\sqrt{N_1} + N_2p^2 + (N - N_1 - N_2)q^2)}{\sqrt{\tau\Delta f}}} \end{aligned} \quad (4)$$

2 天线阵列动态范围

图像动态范围 D 指图像的保真度（图像峰值/图像残差的均方根值）。图像动态范围是^[20-21]：

$$D = \frac{\sqrt{N}}{\delta} \quad (5)$$

式中 N 是天线阵列相干对数； δ 是幅度、相位误差。幅度误差百分比与相位误差弧度等同。

如果天线口径不一，设仅两种口径，小口径天线个数为 n_1 ，相关对数为 N_1 ；大口径天线个数为 n_2 ，相关对数为 N_2 。

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{N_1 + mN_2 + \sqrt{m}(N - N_1 - N_2)}}. \quad (6)$$

式中 m 是大口径与小口径天线有效面积之比。

3 其他

视场 $FOV \sim \frac{\lambda}{d}$, 式中 λ 为工作波长; d 为单天线直径。

表格中未列出天线阵列其他指标, 其计算公式及要求如下。

$$\text{角分辨率 } R_{\text{angular}} \sim \frac{\lambda}{D}$$

式中 D 为天线阵列中, 相距最大两天线距离。天线指向精度要求为天线半功率波束宽度 ($1.2 \frac{\lambda}{d}$) 的 1/15 到 1/20。对双圆极化接收, 一般要求圆极化度为 1%。

由动态范围指标, 按(5)式, 可计算出幅、相误差要求。在两次幅、相校准周期之间。幅、相不稳定度要小于幅、相误差要求。

参考文献:

- [1] Hiroshi Nakajima, et al. The Nobeyama Radioheliograph[J]. Proc IEEE, 1994, 82: 705.
- [2] Nancay Radioheliograph, www.obs-nancay.fr/.
- [3] V V Grechnev, S V Lesovoi, G Ya Smolkov, et al. The Siberian Solar Radio Telescope: The current state of the instrument, observations and Data [J]. Solar physics, 2003, 216(1): 239—272.
- [4] Dale E Gary. The Frequency-Agile Solar Radio Telescope: A Technical Study and Implementation Plan[J]. Journal of the Korean Astronomical Society, 2003, 36: S135—S143.
- [5] T S Bastina. Progress on the Frequency Agile Solar Radiotelescope. www.orsa.njit.edu/fasr.
- [6] 颜毅华, 张坚, 陈志军, 等. 关于太阳厘米—分米波段频谱日像仪研究进展[J]. 天文研究与技术—国家天文台台刊, 2006, 3 (2): 91—98.
YAN Yi-hua, ZHANG Jian, CHEN Zhi-jun, et al. Progress on Chinese Solar Radioheliograph in cm-dm Wavebands [J]. Astronomical Research & Technology, 2006, 3 (2): 91—98.
- [7] 王威, 颜毅华, 张坚, 等. CSRH 阵列设计研究及馈源设计的初步考虑[J]. 天文学研究与技术—国家天文台台刊, 2006, 3(2): 128—134.
WANG Wei, YAN Yi-hua, ZHANG Jian, et al. Array Configurations and Feed Design for CSRH [J]. Astronomical Research & Technology, 2006, 3 (2): 128—134.
- [8] P J Napier, A R Thompson, R D Ekers. The Very Large Array: Design and Performance of a Modern Synthesis Radio Telescope[J]. Proc IEEE, 71(11): 1295—1320.
- [9] The Giant Metrewave Radio Telescope(GMRT). www.gmrt.ncra.tifr.res.in.
- [10] H S Sawant, et al. BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY-BDA: THE FIRST LATIN AMERICAN DECIMETRIC INTERFEROMETER, INPE—14810—RPQ/261.
- [11] Jacob W M, et al. The Synthesis Radio Telescope at Westerbork [J]. Proc IEEE, 61 (9): 1258—1266.
- [12] The Allen Telescope Array, D C-J Bock, URSI 27th General Assembly, 2002.

- [13] 陈宏昇, 郑怡嘉. 密云米波综合孔径射电望远镜总体介绍 [J]. 北京天文台台刊, 1985 年.
- [14] EVLA Project Book, www.nrao.edu/evla
- [15] A Kerdraon. Nancay Radioheliograph. Fasn science definition workshop Greenbank. 2002.
- [16] M Ryle. The 5 Km radio telescope at Cambridge [J]. Nature, 1972, 239: 435—438.
- [17] Fleurs Synthesis Telescope (A Special Issue of Proc. IREEAust.) 1973, 34 (8)
- [18] Kevin V Sheridan, Norman, et al. Three-Frequency Operation of the Culgoora Radioheliograph[J]. Proc IEEE, 1973, 61(9):1312-1317.
- [19] K Rohlfs, T L Wilson 著, 姜碧涛译. 射电天文工具 [M]. 北京师范大学出版社, 2008.
- [20] Hiroshi Nakajima. 在国家天文台报告, 2006.
- [21] R Perley, F Schwab, A Bridle eds. Synthesis Imaging in Radio Astronomy. ASP Conf. 1989.

Comparison of the Key Performance Measures of World's Radioheliographs

JI Guo-shu, WANG Wei, HE Jun-bo

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China, Email: jigs@bao.ac.cn)

Abstract: This paper compiles performance measures of antenna arrays of radioheliographs constructed by Japan, Russia, France, China, and U. S. America specially for observing the sun, and synthesis arrays of U. S. America, India, and Brazil for observing stars and the sun. Several typical antenna arrays and receivers are illustrated. The formulas of sensitivity and dynamic range for antenna arrays with equal or unequal antenna apertures are listed, together with those for sizes of fields of views and spatial resolutions. Readers can use the formulas to calculate, analyze, and compare the specifications of the antenna arrays.

Key words: Radioheliograph; Field of view; Temporal resolution; Sensitivity; Spatial resolution; Dynamic range