

新一代厘米——分米波射电日像仪系统延时校准方法研究

刘东浩^{1,2,3}, 颜毅华^{1,3}, 赵 岸^{1,2,3}, 王 威^{1,3}

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012)

摘 要: 射电日像仪是采用综合孔径方法成像, 具有高时间、高空间和高频率分辨率的太阳专用射电望远镜. 为了使信号相关值准确, 需要精确测量系统的延时, 在太阳成像相关前扣除, 消除消调函数对可见度函数值的影响. 同时延时的测量精度影响数字补偿精度、图像信噪比等信息, 是其成像质量的关键, 也是超宽频带和高时间分辨率情况下研制和实施的难点. 本文研究了应用于我国在建的厘米——分米波射电日像仪, 以太阳为校准源, 闭合差方法得到系统延时差, 并通过试验验证, 得到优于 1ns 补偿精度.

关键词: 综合孔径; 太阳; 系统延时; 校准; 误差

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013)03-0570-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.025

A Delay Calibration for Chinese Spectral Radioheliograph in the Decimetric to Centimetric Wave Range

LIU Dong-hao^{1,2,3}, YAN Yi-hua^{1,3}, ZHAO An^{1,2,3}, WANG Wei^{1,3}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Solar Activity of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The Chinese Spectral Radioheliograph (CSRH) is a solar-dedicated radio interferometric array that will produce high spatial resolution, high time resolution and high frequency resolution images of the sun simultaneously in cm-dm wave range. The quality of the calibration is the key for imaging especially for the case of ultra-wideband, high time resolution and frequency resolution in design and implementation. In this paper, we choose the sun as calibration source and calculate the delay for different geographical latitude and longitude. As a result, the delay accuracy that we got is better than 1ns.

Key words: synthesis aperture; solar; system delay; calibration; error

1 引言

“新一代厘米——分米波射电日像仪”Chinese Spectral RadioHeliograph (CSRH) 是中国科学院国家天文台研制的国家重大科研装备研制项目, 是采用综合孔径方法成像的太阳专用观测射电望远镜, 实现同时以高空间、高时间和高频率分辨率观测太阳爆发活动的动力学性质, 探测太阳剧烈活动的起源. 填补目前国际上对太阳耀斑能量初始释放区分米波段高分辨射电成像观测的空白, 可望在日冕物理研究中取得重要的原创性研究成果^[1,2]. 为了得到太阳爆发的准确位置和能量特性, 需要精确测量和修正来标定系统, 以获得高质量的太阳图像.

综合孔径思想启迪是将一个大口径天线打碎, 保留部分碎片, 这些保留的碎片即为综合孔径的各个天线, 可以实现与原口径天线相同的空间分辨率. 对于抛物面天线, 电磁波投射到主反射面, 经主反射面反射后, 汇集到位于焦点的馈源上, 达到投射到抛物面的所有电磁波在馈源相位中心叠加的目的. 综合孔径遵循以上原则才能达到一个大口径天线的效果, 即同一波前的电磁波经传输线、电路延时后, 等幅、等时延、等相位的到达相关器. 综合孔径天线阵的各个单元由于分布在不同地理位置, 系统间的链路长度不能保证绝对一致, 带宽信号的相关输出受 sinc 函数调制, 由于系统延时差的存在, 使信号相关输出不能保证最大. 为了使相关值最大, 就需要扣除系统差的影响, 然后在数字接收机中通过数字

延时补偿来修正.本文分析了综合孔径阵一般接收系统的延时组成和系统差测量方法,以射电日像仪低频阵系统四单元为一组,测量系统固定差,测量精度满足数字补偿要求.

2 系统延时组成与分析

综合孔径阵是以两单元干涉仪为基础的射电望远镜,两单元干涉仪^[3]简化如图 1 所示.

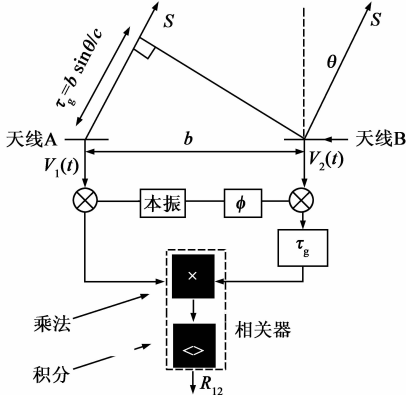


图1 双天线干涉仪系统框图

天线基线距离为 b ,来自方向 S 的单频 f_{RF} 信号进入天线接收系统, S 的方向与基线法线方向成 θ .

$$V_1(t) = V_1 \cos(2\pi f_{RF}(t - \tau_g)) \quad (1)$$

$$V_2(t) = V_2 \cos(2\pi f_{RF} t) \quad (2)$$

$$R_{12}(t) = V_1 V_2 / 2 \cdot \cos(2\pi f_{LO} \tau_g - \phi) \quad (3)$$

R_{12} 为可见度函数相关输出, V_1, V_2 为接收天线 A、B 的信号幅度, f_{LO} 为本振频率. 信号链路间存在延时, 影响相关输出的结果. 信号到达相关器产生延时, 原因有以下两个方面:

(1) 空间段产生的几何延时. 对于东西排列的两天线, 本地时间正中午, 来自太阳的射电信号同时到达 A、B 两天线, 输出信号无延时. 由于地球自转, 当太阳偏西时, A 天线接收到的太阳信号和 B 天线接收到的同一波前的太阳信号有路程差 $b \sin \theta$, 时间就会滞后 τ_g , 这个滞后的时间则为几何延时, 由计算得到.

空间段的几何延时是由于天线位置不同, 随天线观测太阳角度变化产生的, 可根据天文年历的太阳运行轨道参数精确计算出来. 天线的位置位于不同的地理经纬度会影响计算结果, 计算时把当地的大地坐标系转换成地心坐标系, 通过坐标转换使所有的天线坐标归算到一个坐标系下^[4]. 如图 2 所示.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tau = (\cos \delta \cos H \Delta X - \cos \delta \sin H \Delta Y + \sin \delta \Delta Z) / c \quad (5)$$

其中 B, L 为天线阵列的地理经纬度, H, δ 为太阳在此坐标系下的位置, H 为时角, δ 为太阳的赤纬角, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为天线间的位置差.

(2) 设备段产生的系统延时. 系统延时由室外接收系统, 传输线, 室内接收系统几部分产生. 室外到室内接收机采用光缆传输, 长度为 3400m ~ 3500m 范围内, 埋深 2.5m, 光纤的变化率约为 1ppm/°C, 随不均匀的温度变化会影响延时变化. 室内接收机处于 $15 \pm 5^\circ\text{C}$ 环境下, 经测试, 室内接收单元两路信号间的延时小于 2ns. 系统延时差为两通道总的固定延时, 在数字进行统一补偿, 不对分系统单独测量和补偿.

设备的稳定性随时间、温度变化影响会引起延时的变化, 分为短时间抖动和长时间漂移. 短时间抖动引起的误差无法消除, 长时间的漂移引起的误差可通过一段时间内多次测量进行补偿校准. 元器件的老化会引起类似问题, 大气涨落也会引起系统的不稳定, 因此系统固定延时校准, 就是对两支路信号的延时不断测量, 用软硬件进行补偿到一致的工作.

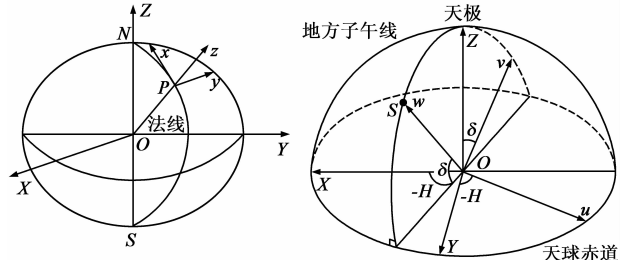


图2 球面坐标系转换球心坐标系及观测时角坐标系

3 CSRH 延时测量精度分析

对于太阳射电波段观测, 太阳图像的结构在短时标尺度上变化, 所以要求系统稳定度高, 因此需要做周期性系统参数校准, 以消除系统误差带来的影响. CSRH-I 指标要求图像的动态范围不小于 25dB. 对相关的幅度和相位提出要求^[5].

$$D = \frac{1}{\delta \sqrt{\frac{N(N-1)}{2}}} \quad (6)$$

CSRH-I 阵列天线数 $N = 40$, 当图像的动态范围 $D \geq 25\text{dB}$ 时, 即在两次系统校准之间(校准周期)系统的误差要小于 δ , 幅度误差 $\Delta A = \delta \leq 0.09$, 相位误差 $\Delta \phi = \delta \leq 5^\circ$. 对于带宽信号, 在有限带宽边缘, 实际延时补偿和理论会有一定的偏差^[6]如图 3. 延时补偿的偏差导致可见度函数的幅度和相位变化. 结果如表 1.

$$\Delta \varphi = \frac{\pi B \Delta \tau}{3\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$\Delta A = 1 - \cos^2 \Delta \phi \quad (8)$$

延时的补偿采用数字补偿的方式进行, 中频最大带宽为 $B = 25\text{MHz}$, 从理论上, 最大未补偿延时差引起

的相位误差设计为 1° , 因此延时补偿的步距我们计算为 $\Delta\tau < 1\text{ns}$, 即可满足幅度和相位误差的要求. 国际上日像仪对相位偏差的要求不同, 延时补偿精度也不一致^[7~9]. 见表 2.

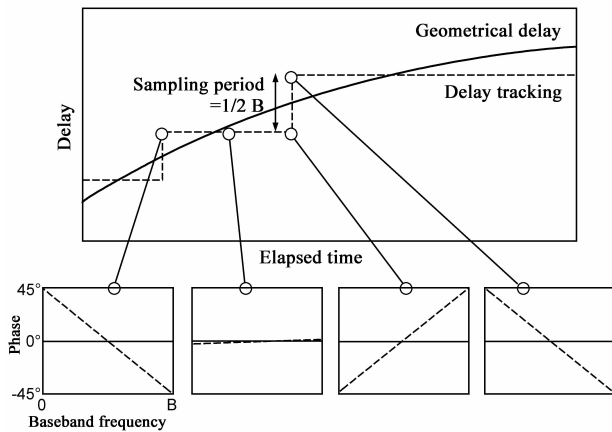


图3 数字延时补偿与实际延迟关系

表 1 不同的带宽和延时补偿量对相位偏差, 灵敏度损失的影响

$B * \Delta\tau$	RMS Phase Error	Loss In Sensitivity
1/64	0.66°	0.01%
1/32	1.32°	0.05%
1/16	2.65°	0.2%
1/8	5.3°	0.8%

表 2 世界日像仪延时补偿精度

	CSRH	NoRH	NRH	MSRT
采样率	1Gsps	40Msps	42.8Msps	8.33Msps
带宽	25MHz	33.6MHz	700kHz	750kHz
延时精度	1ns	1ns	93ns	12ns

注: CSRH 和 NoRH 都采用了零中频相关的技术, 进入 ADC 的带宽为中频带宽的 1/2. NoRH 是日本 Nobeyama 射电日像仪, NRH 是法国 Nancay 射电日像仪, MSRT 是中国密云米波综合孔径系统.

4 CSRH 的测试方案与结果

为了达到 1ns 的固定延时测量精度, 测量可选标校准源法, 射电星法和回路延时测量等方法^[10,11]. 标校准源延时是在天线的远场设置发射天线, 对近距离的天线测试效果较好. CSRH 天线阵列基线最大距离约为 3000m, 由于长基线距离和不同指向的误差, 对长基线阵列测量不理想. 回路延时测量方法, 是通过一条已知长度的传输线与待测系统构建一个回路, 在室内发射一个已知特征信号, 信号通过两段传输线后返回. 测量发射与返回信号的时间间隔和相位差, 计算出待测线路长度, 测试精度较高. 同样对于单个单元的测量比较方便, 但对日像仪则需要构建 3000m 的回路, 测量 100 个天线单元, 实施难度大. 本文采用射电星标校准方法, 射电星为校准源可认为接受到的电磁波为平面波, 且

天线的指向一致, 不同基线接收信号, 只产生几何延时.

4.1 射电源的选取

射电源的选取要选择流量稳定的源, 由于日像仪是观测太阳的专用设备, 通常采用小口径天线, 和室温低噪声放大器, 如果观测一些相对于太阳流量较弱射电源 (cas A, cyg A) 等, 需要分钟量级的积分时间. 如果不及及时进行几何延时补偿, 随地球的自转, 长时间积分会产生计算误差^[5].

$$\frac{d\tau_g}{dt} = \frac{-\cos\delta_0\cos H_0 \cdot L_x}{c} \cdot \frac{dH_0}{dt} \quad (9)$$

地球的自转速度 $\frac{dH_0}{dt} = 7.29115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, 最大基线长度 $L_s = 3\text{km}$, $\delta_0 \in (-23.5^\circ, 23.5^\circ)$, 时角 $H = 0^\circ$ 情况, 延时每秒变化 0.73ns. 因此试验选用宁静太阳做校准源进行系统性验证. 太阳在宁静时流量变化较小, 强度比其他最强的射电源大 1 万倍, 短时间可认为太阳是稳定的源, 相位中心在太阳中心, 验证中选择观测模式为快照模式, 积分时间选取 3ms 进行观测.

4.2 天线选择及观测频率

系统的固定延时测量采用 4 个天线一组^[12], 四个天线处于同一水平面, 距离较近, U-V 覆盖具有较好相关性. 如图 4 所示, 测量持续一天, 选取太阳无剧烈活动时, 观测频段选用 400MHz ~ 800MHz. 根据当地无线电干扰监测, 频点选在干扰小的 475MHz 和 600MHz 附近进行实验, 带宽 25MHz.

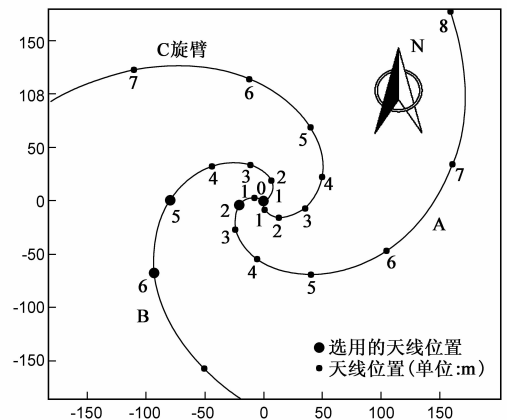


图4 四单元天线位置示意图

5 数据处理方法与结果分析

天线接收到的信号两两相关, 四个天线共有 6 个相关值, 随着观测时间变化, 可以得到统计规律下的链路间延时差. 通过计算数据的相关峰可得到两天线间的延时, 此延时值包含不同地理位置产生的几何延时和设备段的固定延时. 对实测延时值扣除几何延时, 为不随时间变化的设备段延时. 也就是由于系统不一致引

起的系统差,需要测量和修正的值.延时补偿的流程如图 5 所示.

$$\tau = \tau_g + \tau_s \quad (10)$$

其中 τ 为测得的总延时, τ_g 为几何延时, τ_s 为固定延时.互相关延时是利用一定带宽的信号做互相关运算,同相信号相关输出值最大.假定天线 i 和天线 j 的信号分别为 $S_i(t)$, $S_j(t)$, 则相关输出可表示^[4]为:

$$R_{ij}(\tau_g) = \langle S_i(t + \tau_g) S_j(t) \rangle = A_0 |V| \Delta\nu \frac{\sin\pi\Delta\nu\Delta\tau}{\pi\Delta\nu\Delta\tau} \cos(2\pi\nu_0\tau_g - \phi_V) \quad (11)$$

其中 τ_g 为天线 i 和天线 j 两路信号的延时, $\Delta\tau$ 为零中频延时补偿偏差, $R_{ij}(\tau_g)$ 为相关输出, A_0 为增益, $|V|$ 为可见度函数幅度, $\Delta\nu$ 为相关带宽, ϕ_V 为可见度函数相位.相关输出 $R_{ij}(\tau_g)$ 相当于受 sinc 函数调制,在实际测量中,逐渐调节两路信号的延时量,使得 $R_{ij}(\tau_g)$ 为最大时,也就是使 sinc 函数最大值时的延时量.相关得到的理论延时,实测延时和固定延时分析如图 6 所示.

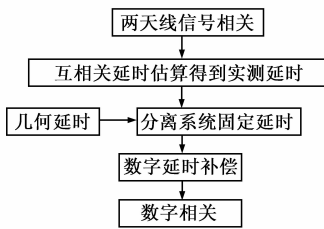


图5 系统的延时补偿流程

闭合延时的方法对 4 个独立信号链路得到 4 个独立闭合差,求解系统固定延时.试验进行两个频率的延时求解.四通道通过延时闭合得到系统以 IA0(设置为 100ns)为基准的系统固定延时差.见表 3 表 4.

表 3 系统固定延时

	IA0	IA5	IA6	IB2
600MHz (ns)	100	106.89	25.18	63.13
475MHz (ns)	100	107.22	24.78	62.97

表 4 系统的闭合差

	IA0-IA5 -IA6	IA0-IA5 -IB2	IA0-IA6 -IB2	IA5-IA6 -IB2
600MHz (ns)	-0.012	0.239	0.118	-0.133
475MHz (ns)	0.213	0.384	0.482	-0.377

实际观测得到延时曲线和计算的几何延时曲线趋势一致,扣除几何延时后为系统固定延时.系统固定延时 RMS 小于 1ns,系统稳定.查阅测试当天太阳流量和活动区记录,流量稳定,太阳表面没有大的活动区,可以认为源的流量来自太阳中心.元器件的抖动、光缆长度随温度不均匀变化和毫米级位置误差精度引起系统差变化小于 0.1ns.

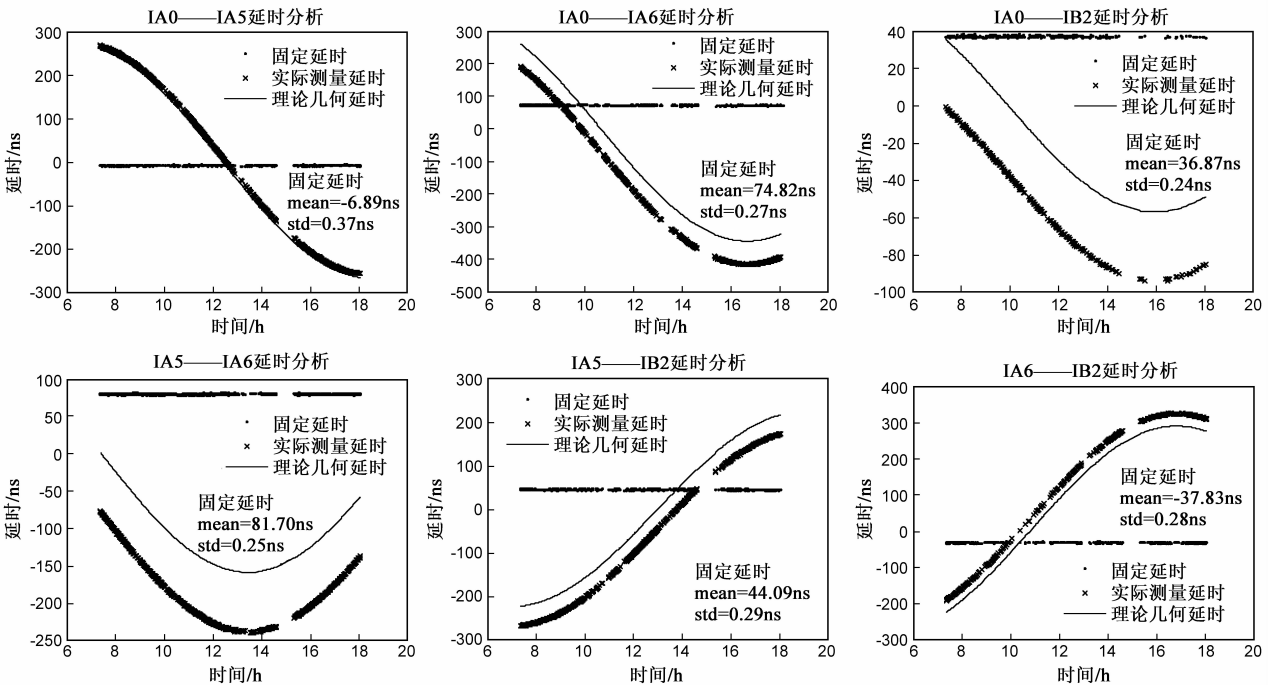


图6 频率为600MHz两天线间系统的延时测量

6 结论

具体分析观测数据表明,本文采用以太阳为校准源测量系统固定延时方法能够达到预期目的.相关结果稳定,系统固定延时的 RMS 值小于 1ns,满足系统数

字延时补偿要求,可以为下一步的相位校准做技术支持,并为后续的 CSRH-II 厘米波段测试提供依据.

参考文献

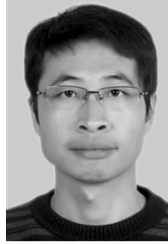
[1] 颜毅华,张坚,黄光力.厘米-分米波高分辨频谱日像仪

- 项目建议书[R].北京:中国科学院国家天文台, 2003.
- [2] Yan Yihua, Jian Zhang, Wei Wang, Fei Liu, Zhijun Chen, Guoshu Ji. The chinese spectral radioheliograph-CSRH[J]. Earth Moon Planet, 2009, 104: 97 - 100.
- [3] 王绶 ■, 吴盛殷, 崔振兴, 等. 射电天文方法[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 82 - 106.
- [4] A R Thompson, J M Moran, G W Swenson Jr. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy[M]. New York: Wiley, 2001. 86 - 90.
- [5] G B Taylor, C L Carilli, R A Perley. Synthesis Imaging in Radio Astronomy-II[M]. California: ASP Conf Ser v 6, 1999.
- [6] Seiji Kamenno. Calibration[R]. Tokyo: Winter School in Tokyo, 2007.
- [7] Nakajima H, Nishio M, Enome S, et al. The nobeyama radioheliograph[J]. Proceedings of IEEE, 1994, 82: 705 - 713.
- [8] The Radioheliograph Group. The Nancay multifrequency radioheliograph: New developments and data acquisition for the solar physics community[J]. Advances in Space Research, 1993, 13 (9): 411 - 414.
- [9] 杨以培, 葆鸿起, 王弘, 等. 综合孔径望远镜的数字相关处理[J]. 北京天文台台刊, 1985, 5(7): 73 - 84.
- [10] 孔俊宝. 用微处理机对数据网群时延的精密测量[J]. 电子学报, 1987, 25(1): 76 - 79.
- [11] 朱祥维, 李垣陵, 雍少为, 庄钊文. 群时延的新概念、测量方法及其应用[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1819 - 1823.

ZHU Xiang-wei, LI Yuan-ling, YONG Shao-wei, ZHUANG Zhao-wen. A new definition, measurement method of group delay and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36 (9): 1819 - 1823. (in Chinese)

- [12] 王威, 颜毅华, 张坚, 姬国枢, 陈志军. 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, 2006, 13(2): 128 - 134.

作者简介



刘东浩 男, 1979 年 1 月出生于辽宁葫芦岛. 2002 年毕业于沈阳建筑工程大学, 其后在交通部公路一局工作, 2007 年进入中国科学院国家天文台太阳射电团组. 现为博士生, 从事太阳射电图像及校准方面的研究.

E-mail: dhliu@nao.cas.cn



颜毅华 男, 1962 年出生于西安. 研究员、博士生导师、中国电子学会理事、射电天文分工会主席. 现任中国科学院太阳活动重点实验室主任、国家天文台太阳物理研究部主任、太阳射电团组首席研究员. 1982 年、1985 年分别毕业于西北工业大学获得学士和硕士学位, 1990 年毕业于大连理工大学获得博士学位. 现主要从事空间天文、太阳物理和太阳射电天文方面的研究工作.

E-mail: yyh@nao.cas.cn