

基于实时引导修正的大口径天线对星快速校相方法

侯 锦^{1,2}

(1 中国电子科技集团公司第三十九研究所 西安 710065

2 陕西省天线与控制技术重点实验室 西安 710065)

摘要: 对测控站中快速校准和差通道相位的方法进行了原理分析, 以 18 m 口径天线为例, 论证了在 X 频段下大口径天线的空间波束相对于 S 频段更窄, 利用 X 频段空间目标进行快速校相时需要天线系统提供更高的指向精度来满足校相时的角度偏置处于主瓣内。通过分析抛物面天线的指向误差源和模型, 提出了基于该模型进行目标引导数据误差反向修正的工程应用方法, 可显著提高 X 频段下天线电轴对于空间动态目标的指向精度, 从而保证大口径天线对于 X 频段目标快速校相的成功率, 并以 18 m 测控数传一体化抛物面天线系统作为对象在工程上进行了对星校相验证, 效果优良。

关键词: 测控站; 大口径天线; X 频段; 对星快速校相; 误差参数; 测角修正模型; 引导修正

中图分类号: V556.6 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0091-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210821001

引用格式: 侯锦. 基于实时引导修正的大口径天线对星快速校相方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 91-96.

A method of quickly adjust phase between sum and diff channel in large aperture parabolic antenna by satellite based on real-time guide angle correction

HOU Jin^{1,2}

(1. The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710065, China;

2. Key Laboratory of Antenna and Control Technology of Shaanxi Province, Xi'an 710065, China)

Abstract: This paper analyzed the principle of method which adjusts the phase between sum and diff channel quickly. An antenna with 18 m diameter is discussed as an example, it is proved that the lobe of large aperture antenna is narrower under X band relative to the S band, illustrates a higher pointing accuracy is necessary when using X band space target as the electric signal source to complete quickly phase adjust which can make sure that the target is still in the main beam after offsetting the electric axis. By analyzing the pointing error source and model of the parabolic antenna, a method is put forward based on angle pointing error model and to correct angle using offset which calculated by angle measuring error parameters, can significantly improve the antenna electrical axis pointing accuracy for target, so as to ensure the large aperture antenna for X band target of quickly phase adjust success rate. This method has been verified in engineering effectively.

Key words: TT&C station; Large aperture parabolic antenna; X band; Quick phase adjust by satellite; Error parameter; Angle correction model; Guide data correction

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210821001

Citation: HOU Jin. A method of quickly adjust phase between sum and diff channel in large aperture parabolic antenna by satellite based on real-time guide angle correction[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 91-96.

引 言

随着卫星数传技术的发展和遥感数据接收需求的增加, 越来越多的测控系统除了具有 S 频段测控性能以外, 又通过改造或新研等方式扩展了 X 频段, 由 S 频段实现上行信号的发送与目标下行遥测数据的接收, X 频段和 Ka 频段则用于图像等大数据量数据的接收。通常来说, 大口径天线具有较高的增益, 可

为系统数据接收提供更高的信号质量, 因此一些 10 m 以上的大口径天线系统往往成为了数传接收的主力。随着测控技术的发展, 为满足如 X 频段航天器的跟踪和测角需求, 要求地面测控系统具备对 X 频段空间目标实现精确跟踪和测控能力。

大口径抛物面天线对空间目标的精确跟踪主要通过将跟踪接收机或综合基带输出的误差电压, 折算成目标与天线电轴的空间角度差, 经由天线控制系统的位置调节器进行闭环控制, 完成天线电轴对目标的精准指向。

测控系统正常跟踪需要修正接收机或综合基带的相位和增益系数, 保证系统的方位俯仰误差电压的交叉耦合和定向灵敏度满足跟踪要求, 因此相位正确校准是测控任务中的重要环节^[1-3]。最后, 当测控系统处于跟踪时, 结合测角修正模型对测量系的误差进行修正, 对外提供满足目标空间测量精度^[4,5]要求的角度数据。

1 对星快速校相方法

1.1 快速校相原理

对星快速校相是以航天器为目标进行的快速校相。快速校相是一种快速校准多模馈源和差通道相位差的方法, 它适用于配备多模馈源的 AE 座架形式的抛物面天线, 整个过程耗时短, 和差通道相位差计算准确率高, 在目前地面测控系统自动化运行流程中对目标的捕获跟踪起着关键作用。其方法是使天线电轴处于目标主瓣内, 利用空间目标与抛物面天线的坐标关系、链路传输等产生的和差相差 σ 、多模馈源输出的方位和俯仰误差电压模型, 再在方位或俯仰空间的主瓣内偏开一定角度, 利用误差电压和偏开的角度, 计算出和差通道的相位差, 如图 1 所示。

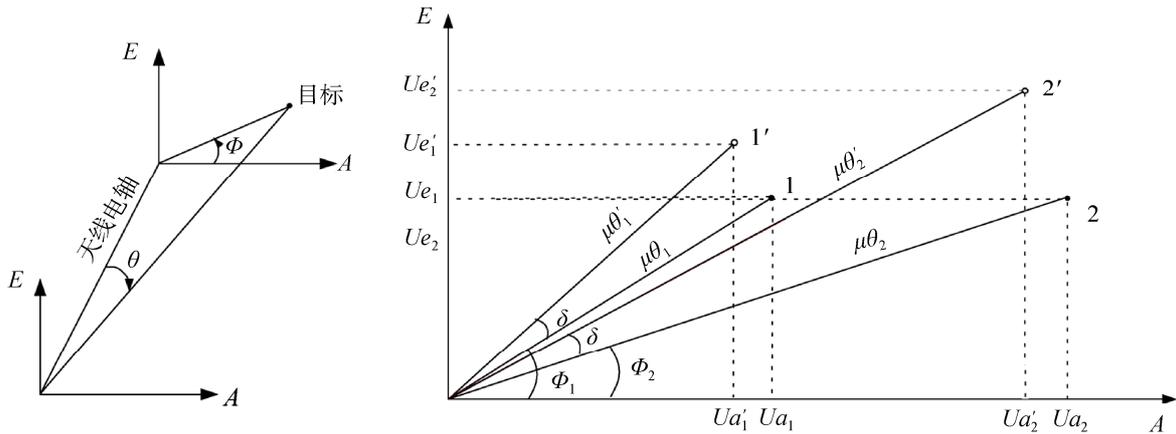


图 1 目标、天线的空间关系以及通道相差、误差电压示意图

Fig.1 The spatial relationship between target and antenna, and the schematic diagram of channel phase difference and error voltage

图 1 中, θ 为目标偏离电轴的偏角, θ_1 、 θ_2 为天线在主波束内两个位置下的目标偏离电轴的偏角; Φ 为目标偏开角度在 A、E 平面的投影分量, Φ_1 、 Φ_2 为天线在主波束内两个位置下的目标偏开角度在 A、E 平面的投影分量, 设和差通道相差为 σ , 则方位俯仰误差分别满足:

$$U'_a = \mu\theta \cos(\Phi + \sigma) = U_a \cos \sigma - U_e \sin \sigma \quad (1)$$

$$U'_e = \mu\theta \sin(\Phi + \sigma) = U_e \cos \sigma + U_a \sin \sigma \quad (2)$$

为消除产生交叉耦合的 σ , 我们利用偏开一个轴向, 在另一个轴上耦合出的误差电压为 0 这一计算条件, 代入上式可计算出 σ , 在方位、俯仰和差支路上进行相位修正, 使系统具有优良的交叉耦合特性。以俯仰为例, 需要使两点偏开的方位误差电压之差为 0, 则有:

$$U'_{a_2} - U'_{a_1} = -(U_{e_2} - U_{e_1}) \sin \sigma \quad (3)$$

$$U'_{e_2} - U'_{e_1} = (U_{e_2} - U_{e_1}) \cos \sigma \tag{4}$$

$$\sigma = \arctg \left(-\frac{U'_{a_2} - U'_{a_1}}{U'_{e_2} - U'_{e_1}} \right) \tag{5}$$

1.2 对星快速校相的实现方法

如图 2 所示，以航天器为目标进行快速校相时，需使用到目标的引导数据，如程引或数引，引导天线使目标处于天线波束主瓣范围内，然后在以时间为序列的引导源上叠加恒定的方位或俯仰的位置偏移 ΔEL 对目标进行空间拉偏，在记录前后两点的的位置和误差信息后，根据式 (5) 可以计算得到 σ 。

对于抛物面测控天线，其口径、波长（频率）和半波束宽度的关系可以近似为：

$$\theta = 70\lambda/D = 70c/fD \tag{6}$$

其中， λ 为波长， f 为工作频率， c 为光速， D 为天线口径。可以看出，天线口径越大、频率越高，天线主波束越窄。以常用的 S 频段 2.0 GHz~4.0 GHz、X 频段 8 GHz~12 GHz 为例，对同一口径天线而言，X 频段主波束宽度约为 S 频段的三分之一到四分之一。表 1 中列出了 3 种典型大口径天线在 S 频段与 X 频段下的半波束宽度。

依据抛物面天线辐射特性和误差电压和差关系，结合快速校相原理，为使相位计算结果正确可用，校相过程应保证天线电轴指向处于主波束内，使综合基带输出的电压满足跟踪极性和增益等要求。当误差电压极性错误、增益斜率不对或相位计算错误，将出现跟踪不稳或天线飞车，不能满足跟踪精度的要求甚至丢失目标。因此，在进行对星校相时要在以下两个方面进行保证，一是天线电轴尽量准确地指向目标，引导源精度越高越好，同时应采取措施减小天线指向误差，使目标处于天线主瓣内；二是合理设置拉偏角度，保证拉偏后电轴仍处于主波束内。拉偏角度可以依据波束宽度进行计算和选取，引导源的精度一般通过轨道计算软件保证，而减小指向误差、提高天线对于目标指向精度则可以通过指向误差参数标定和修正实现。

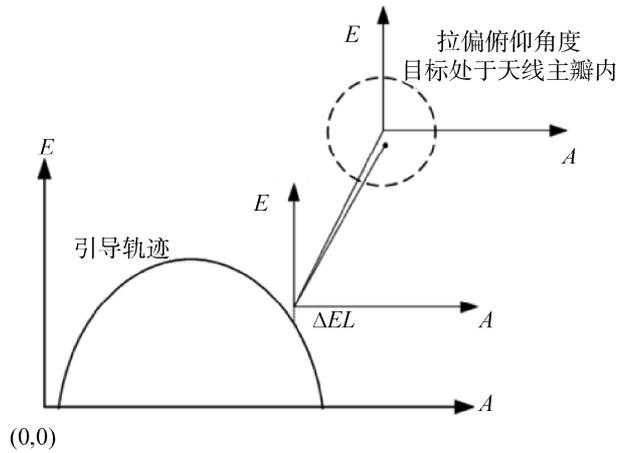


图 2 对星快速校相角度拉偏示意
Fig. 2 Pull deviation diagram for phase correction by satellite

表 1 天线半波束宽度与口径及频段的关系
Table 1 The relationship between antenna half beam width and aperture and frequency

天线口径	S 频段半波束宽度	X 频段半波束宽度
10 m	0.7°~0.35°	0.175°~0.117°
15 m	0.47°~0.23°	0.117°~0.078°
18 m	0.39°~0.194°	0.097°~0.065°

2 天线指向误差参数分析

指向误差可分为系统误差和随机误差。系统误差是有规律的误差，可根据产生系统误差的原理确定出误差模型并建立适当的误差模型公式，通过标定各个误差系数值，来减小或消除系统误差^[6-8]。随机误差是纯粹的随机量，无法进行标定，在指向精度上主要考虑系统误差的影响。

采用方位-俯仰转台座架的测控天线，具有机械轴和电轴，机械轴结合编码设备产生角度测量数据，电轴是对准空间目标的指向。在有大地标定条件的天线系统中一般引入光轴，通过望远镜和编码器角度标定，使光轴代替机械轴获得较为准确的机械轴角度测量数据，代表目标指向；电轴为对准目标时对应电轴的位置，是实际跟踪产生的测量数据，实际角度测量系统中需要消除机械轴和电轴的误差来获取精确的测量数据，通过标校塔信标的跟踪和望远镜光标可获得光电轴之差。因此，根据方位俯仰轴空间指向、机械安装和电轴跟踪原理，分析误差来源，其系统误差参量主要包括：

①方位零值误差 A_0 : 为方位机械轴编码角度零值与正北大地测量零值的误差。

②俯仰零值误差 E_0 : 为俯仰机械轴编码器角度零值与大地水平测量零值的误差值, 与 A_0 一般通过大地标校获得。

③大盘不水平角 θ_M : 天线的俯仰机构安装于方位转台平面上, 由方位基础平台不平导致的方位转台平面倾斜, 不同方位角度下倾斜角度不同, 影响天线的方位和俯仰的指向精度。

④大盘最大不水平角处的方位角 A_M : 通过大盘不水平测试来计算和标定。

⑤方位轴与俯仰轴不正交度 δ : 俯仰轴与方位轴在机械加工、装配时产生的不正交偏差误差, 通过仪器测量得到。

⑥光轴与俯仰轴不垂直误差 K_b : 由望远镜读数进行标校。

⑦光轴与方位轴、俯仰轴不匹配误差 K_Z 、 K_n : 通过大地测量进行标定的光轴与跟踪方式下电轴角度的误差, 经光电标校测试标定。

⑧重力变形引起的俯仰误差 ΔE_g : 主要为重力作用下反射面几何形状变化引起的误差, 俯仰轴的重力矩是仰角的余弦函数, 通过天线正倒镜测试得到。

⑨大气折射修正值 ΔE_d : 即电波折射误差, 受大气的温度、湿度和气压等参数影响, 与空间高度和水平方向有关, 获得的气象参数代入公式计算得到^[9,10]。大量测试证明垂直方向的大气折射效应影响为水平方向的 10 倍以上, 所以一般只考虑俯仰大气折射修正。

根据各误差项的意义得到基于上述误差参数的误差模型参见式 (7) 和式 (8):

$$A_Z = A_C + A_0 + \theta_M \sin(A_C - A_M) \tan E_C + \delta \tan E_C + (K_Z + K_b) \sec E_C \quad (7)$$

$$E_Z = E_C + E_0 + \theta_M \cos(A_C - A_M) + K_n + \Delta E_g \cos E_C + \Delta E_d \quad (8)$$

其中, A_C 、 E_C 分别为目标经方位、俯仰轴编码器获得测量值, A_Z 、 E_Z 为经误差修正后的目标真值, ΔE_d 按照国际电联 ITU 提出的低仰角精确计算参见下式:

$$\Delta E_d = \frac{77.6}{(t + 273.15)} \times \left[P + \frac{4810 \times P_e}{t + 273.15} \right] \times 10^{-6} \times \frac{1}{\tan E_G} \quad (9)$$

$$P_e = 6.1078 \times 10^{\frac{7.36t}{241.9+t}} \times U \quad (10)$$

式中, t 为地面温度, P 为地面大气压值, P_e 为根据地面水气压和湿度结合温度计算的参量, U 为地面相对湿度。

通过天线角度标校可以获得上述误差参量, 结合测站气象设备获取的气象数据, 利用误差修正模型可以计算方位和俯仰指向的误差, 对测量数据进行修正。对于 S 频段信号的小口径天线其波束较宽, 所受的影响不大, 一般可不考虑电波折射。随着频段的升高, 口径的增大, ΔE_d 在低仰角下带来的影响不能被忽略。

需要说明的是, 大口径天线及超大口径抛物面天线随着口径增大, 如 35 m 及 66 m 等, 一般其 X 频段、Ka 频段无法满足标校塔远场条件不能进行光电标校, 目前广泛采用射电星标校方法^[11-14], 在这种标校模型中直接使用机械轴与电轴的误差参数, 不再引入光轴来对机械轴进行校准, 射电星标校模型参见下式:

$$A_Z = A_C + A_0 + \theta_M \sin(A_C - A_M) \tan E_C + \delta \tan E_C + K_E \sec E_C \quad (11)$$

$$E_Z = E_C + E_0 + \theta_M \cos(A_C - A_M) + E_g \cos E_C + \Delta E_d \quad (12)$$

式中, K_E 为电轴与俯仰轴的不正交误差, 其他参数与式 (7) 和式 (8) 基本一致。

3 修正引导源以减小天线对目标指向的误差

通过前面的分析可知, 由于指向误差的存在, 使目标实际位置和天线电轴指向位置存在误差, 为了使天线电轴能尽量准确地指向目标, 根据前文指向修正模型, 结合误差参数对引导源进行反向修正, 为

天线系统提供更高的目标指向精度。设引导数据与天线测量系命令的方位和俯仰误差分别为 Err_{AZ} 及 Err_{EL} ，对引导源的误差修正根据式 (7)、式 (8) 计算，参数与指向误差修正模型中的定义一致，方位和俯仰当前引导数据上叠加 Err_{AZ} 及 Err_{EL} 即可提高天线对目标的指向精度。

$$Err_{AZ} = A_0 + \theta_M \sin(A_C - A_M) \tan E_G + \delta \tan E_C + (K_Z + K_b) \sec E_C \quad (13)$$

$$Err_{EL} = E_0 + \theta_M \cos(A_C - A_M) + K_n + \Delta E_g \cos E_C + \Delta E_d \quad (14)$$

若使用射电星角度误差修正模型，叠加至引导源的误差修正根据下式计算：

$$Err_{AZ} = A_0 + \theta_M \sin(A_C - A_M) \tan E_C + \delta \tan E_C + K_E \sec E_C \quad (15)$$

$$Err_{EL} = E_0 + \theta_M \cos(A_C - A_M) + \Delta E_g \cos E_C + \Delta E_d \quad (16)$$

4 工程验证及应用情况

实际工程中以某 18m 口径的天线作为验证对象，对 X 频段数传目标进行了对星快速校相测试。在未对引导数据进行修正的情况下，进行了 6 次校相，成功率约为 50%。依据该站的测角误差修正参数，对引导数据进行修正，采用式 (7)、式 (8) 的修正模型，进行了 6 次校相，成功率为 100%。以某圈引导数据为例，修正量参见表 2，其修正误差参见表 3，通过修正前后的数据分析，可以看出对同一目标，修正后目标的 AGC 有所提高，修正对于提高目标指向精度有积极贡献。

表 2 数据实时修正

方位 数引	俯仰 数引	修正值		AGC 平均抬高 (V)
		Err_{AZ}	Err_{EL}	
242.905	32.546	0.005	0.067	0.071 6
242.908	32.543	0.005	0.067	0.071 6
242.912	32.54	0.005	0.067	0.071 6
242.915	32.537	0.005	0.067	0.071 6
242.919	32.535	0.005	0.067	0.071 6
242.922	32.532	0.005	0.067	0.071 6
242.926	32.529	0.005	0.067	0.071 6

表 3 测角误差修正参数

参数	参数值	参数	参数值
A_0	0.044 19	K_b	-0.036 83
E_0	0.163 99	K_n	-0.169 557
θ_M	0.002 34	ΔE_g	-0.012
A_M	275.666 992	T	23
δ	0.001	P	101 116
K_Z	-0.007 175	U	70%

表 4 列出了部分校相结果，对 X 频段某一频点，校相结果一致性好，跟踪满足要求。

5 结束语

目前，二代导航、载人航天、嫦娥工程及设备基本都采用了本文介绍的快速校相技术，在信道正确配置的情况下，S 频段校相成功率接近 100%；X 频段大口径天线在使用了文中对引导源的修正后，校相成功率也接近 100%。交叉耦合可满足 1/5 以上，对于误差电压的正交性给予了极高的保证。由于其快速性的特征，与数引、程引工作方式结合，利用误差修正模型的实时引导修正，形成对星校相方式，可满足对 X 目标的测控数传跟踪要求，本文介绍的方法已应用于某天线口径为 18 m 的测控数传设备上，效果优良。

表 4 俯仰拉偏下对星快速校相测试结果

Table 4 Phase correction results by satellite under EL pull

AZ 相位	EL 相位	增益系数	相位差	相位与均值的差
158.4	338.4	0.42	3.69	-2.79
158.7	339.1	0.42	3.39	-3.49
163.4	334.4	0.43	-1.31	1.21
162	335.8	0.42	0.09	-0.19
163.4	334.4	0.42	-1.31	1.21
161.8	336	0.43	0.29	-0.39
163.8	334	0.42	-1.71	1.61
163.5	334.3	0.42	-1.41	1.31
165.4	332.4	0.43	-3.31	3.21
160.5	337.3	0.42	1.59	-1.69

参考文献

- [1] 司文涛, 王伟超, 袁光福, 等. 基于测角交汇的大气折射修正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 99–103.
SI Wentao, WANG Weichao, YUAN Guangfu, et al. Atmospheric refraction correction method based on angular intersection[J]. Progress in Laser & Optoelectronics, 2020, 57(13): 99–103.
- [2] 张焱, 全录贤, 洪宇, 等. 测控天线射电星角度标校方法分析[J]. 电讯技术, 2017, 57(4): 474–479.
ZHAN Yao, QUAN Luxian, HONG Yu, et al. Analysis of radio source calibration of tracking antenna[J]. Telecommunications technology, 2017, 57(4): 474–479.
- [3] 鲁帆, 郑小松, 田志新, 等. Ka 频段点波束天线指向精度对星地数传链路的影响分析[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 61–68.
LU Fan, ZHENG Xiaosong, TIAN Zhixin, et al. Analysis of influence on satellite-to-earth data transmission link by directing precision of Ka-band spot beam antenna[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 61–68.
- [4] 王敏, 王佳. 测速系统跟踪测量数据预处理分析研究[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 第六届中国卫星导航学术年会论文集—S05 卫星导航增强与完好性监测. 中国卫星导航学术年会组委会, 2015:1–5.
- [5] 贾建援, 柴伟, 于大林, 等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1500–1508.
JIA Jianyuan, CHAI Wei, YU Dalin, et al. Error parameter identification and pointing accuracy analysis of azimuth pitch turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1500–1508.
- [6] 王东升, 张焱, 高菲, 等. 三轴天线系统外测精度修正方法研究[J]. 无线电工程, 2020, 50(7): 606–611.
WANG Dongsheng, ZHANG Yao, GAO Fei, et al. Orbit measurement precision modification method of triaxial antenna[J]. Radio Engineering, 2020, 50(7): 606–611.
- [7] 华林. 地面测控系统校相方法综述[J]. 电子测试, 2020(23): 43–45.
HUA Lin. Overview of phase correction methods of ground measurement and control system [J]. Electronic Testing, 2020(23): 43–45.
- [8] 郑金秀, 王强, 王万玉. 卫星接收系统 Ka 频段对星快速校相方法[J]. 机电技术, 2020(2): 10–12, 23.
ZHENG Jinxiu, WANG Qiang, WANG Wanyu. Fast phase correction method of satellite in Ka band for satellite receiving system [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2020(2): 10–12, 23.
- [9] 谢磊, 李峰, 李兵. 基于 ACU 的跟踪接收机自动校相算法优化[J]. 中国新通信, 2018, 20(9): 41–42.
XIE Lei, LI Feng, LI Bing. Optimization of automatic phase correction algorithm for tracking receiver based on ACU [J]. China New Communication, 2018, 20(9): 41–42.
- [10] 仲伟敬, 王忠辉, 杨彦伟, 等. 车载测控设备角度标校流程及方法研究[J]. 电子世界, 2020(6): 25–26.
ZHONG Weijing, WANG Zhonghui, YANG Yanwei, et al. Research on angle calibration process and method of vehicle measurement and control equipment [J]. Electronics World, 2020(6): 25–26.
- [11] 邢琳, 侯铭泽. 恒星标校技术在两轴观测设备中的应用[J]. 光电技术应用, 2019, 34(2): 65–68.
XING Lin, HOU Mingze. Application of star calibration technology in two-axis observation equipment [J]. Application of Opto-Electronic Technology, 2019, 34(2): 65–68.
- [12] 马可, 张远安, 王仁涛, 等. 主动防护雷达的角度标校[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 30–33, 41.
MA Ke, ZHANG Yuan'an, WANG Rentao, et al. Angle calibration of active protective radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1): 30–33, 41.
- [13] 周朋, 张海勇, 贺寅, 等. 大气波导在海上通信中的应用[J]. 电讯技术, 2014, 54(8): 1134–1139.
ZHOU Peng, ZHANG Haiyong, HE Yin, et al. Application of atmospheric waveguide in maritime communication [J]. Telecommunications Technology, 2014, 54(8): 1134–1139.
- [14] 喻业钊, 韩雷, 周爽, 等. 佳木斯 66 m 射电望远镜指向精度测量及改进[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(4): 408–415.
YU Yezhao, HAN Lei, ZHOU Shuang, et al. A study on the measurements and improvements of pointing accuracy of Jiamusi 66m radio telescope[J]. Astronomical Research & Technology, 2016, 13(4): 408–415.

[作者简介]

侯 锦 1978 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为天线控制系统设计。

(本文编辑: 杨秀丽)