

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.006

引用格式:魏明山,葛铁志,杜潇,等.大口径天线多模馈源跟踪系统校相参数的计算[J].电讯技术,2015,55(7):741-745.[WEI Mingshan, GE Tiezhi, DU Xiao, et al. Calculation of Phase Calibration Parameters for Large-caliber Antenna Multi-feed Tracking System[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7): 741-745.]

大口径天线多模馈源跟踪系统校相参数的计算*

魏明山,葛铁志,杜潇**,何晓毛

(解放军 63623 部队,甘肃 酒泉 732750)

摘要:基于测控系统常用的大口径天线多模馈源跟踪系统校相需求,介绍了当前常用的校相方法,针对太阳校相单次校相结果误差大、需取均值使用导致校相周期长等缺点,通过分析多模馈源跟踪系统工作原理,提出了一种基于固定波程差的校相参数计算方法。该方法利用不同频点的精确校相值标定跟踪系统和、差通道之间波程差,进而计算出整个频段中各频点校相值。最后结合靶场遥测设备进行计算验证,应用表明该方法计算快捷,计算结果稳定可用,符合实际数据的变化趋势,能够满足各项实际工程应用需求。

关键词:测控天线;太阳校相;多模馈源跟踪系统;校相参数;波程差

中图分类号:TN850 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0741-05

Calculation of Phase Calibration Parameters for Large-caliber Antenna Multi-feed Tracking System

WEI Mingshan, GE Tiezhi, DU Xiao, HE Xiaomao
(Unit 63623 of PLA, Jiuquan 732750, China)

Abstract: According to the phase calibration requirement for large-caliber antenna multi-feed tracking system in tracking, telemetry and control (TT&C) system, this paper introduces the commonly-used phase calibration methods, and provides a phase calibration calculation method based on fixed wave path difference to overcome the shortcomings of solar phase calibration such as large error, requiring average value, and long calibration time through analyzing the principle of multi-feed tracking system. This method uses the precise value of phase calibrate in different frequency to calibrate the wave path difference between sunm and difference channels in tracking system, then calculates the value of phase in all frequencies. Finally, the range equipment is adopted to perform calibration and validation. The application shows that the method computes fast, the calculation results are stable and available which conform to the change trend of actual data, and it meet the requirements of actual project application.

Key words: TT&C antenna; solar phase calibration; multi-feed tracking system; phase calibration parameter; wave path difference

1 引言

随着航天技术的发展,无线电测控设备为应对深空和高轨的测量需求,逐渐向大口径天线多模馈源跟踪系统发展。测控设备要完成跟踪测量的前提

是对设备进行跟踪系统相位校准^[1](简称“校相”)。目前,常用的校相方法主要有标校塔法、卫星法和射电星法三种^[2-6]。

标校塔法是一种传统的校相方法,即将信标机

* 收稿日期:2014-12-10;修回日期:2015-04-20 Received date:2014-12-10;Revised date:2015-04-20

** 通讯作者:duxiao1989@126.com Corresponding author:duxiao1989@126.com

置于标校塔上,天线电轴对准信标天线,使跟踪接收机和、差通道有信号输出,测量出它们的相位差,并调节某一路的相位,使该相位差为零。标校塔法适用于多频段近场标校,且校相结果精确,但不同口径天线的远场条件不同,对标校塔的高度及距离均有一定的要求,一般难以满足大口径天线的校相要求。

卫星法则利用卫星全向辐射功率的特性,使用卫星发射的信号作为信标信号进行校相。其校相结果比较精确,但卫星的发射频点固定、旋向单一,且已知资源较少,如某同步卫星只具有固定点频的单右旋信号,不能满足设备不同工作频率的需求。

射电星法就是用空中的射电星代替标校塔上的信标源来实现校相。射电星具有全天候、分布广、资源丰富、星历精确已知的特点,且射电星噪声是白噪声,可以覆盖多个频段。太阳作为空间最强的射电源,具有频带宽、强度大、位置可预测等优点,已逐步应用到各无线电设备校相工作中。但是,由于太阳角径较大,与大口径天线的波束宽度相比,不能被看作是一个点源,其视在角度误差将对校相结果产生较大影响,单次校相结果误差大。

基于以上实际情况,通过研究某遥测设备上的太阳校相数据,利用多模馈源的校相参数与工作频率间的关联,本文提出了基于和、差通道间固定波程差的校相参数计算方法,为快速准确获取设备的校相参数提供了一种途径。

2 设备校相方法

2.1 校相方式选择

对于大口径天线多模馈源伪单脉冲单通道跟踪系统,天线进行远场校相的距离远,同时对标校塔高度要求也较高;卫星法由于同步卫星的点频固定、旋向单一,无法满足系统工作频段的校相需求;在选取射电星作为校相源时,某些射电星(如仙后座 A)对 G/T 值的要求较高,如表 1 所示。部分设备系统 G/T 值指标难以满足相应要求,因此选取太阳作为射电源进行校相能够较好兼顾各方面需求。

表 1 射电源对设备 G/T 的最低测量需求

Table 1 The minimal requirement for the equipment's G/T of the radio source

射电源	$(G/T)/(dB \cdot K^{-1})$
猎户座 A	39.1
仙后座 A	35.4
月亮	20.0
太阳	16.0

2.2 校相流程及结果

太阳校相过程和标校塔校相过程基本一致,需要注意的是:

- (1)校相过程中,天线需要实时跟踪太阳,以保证校相零点与太阳一致;
- (2)需要寻找准确的校相零点,做法是在太阳带内噪声功率最强处,正负各偏置5 mil,功率误差在0.5 dB以内即可;
- (3)太阳仰角过高时,方位差斜率需要进行正割补偿。

为观察太阳校相结果的可靠性,利用某遥测设备进行全天太阳校相,结果如表 2 所示,方位校相值均值为 252.87°,方差为 19.03;俯仰校相值均值为 258.81°,方差为 19.76;而卫星法校相值方位和俯仰分别为 253.25°和 254.08°。

表 2 全天不同时段太阳校相结果

Table 1 The result of solar phase calibration at different times throughout the day

时间	方位校相值/(°)	俯仰校相值/(°)
10:40	280.55	229.06
11:10	281.07	232.23
11:40	280.72	237.85
12:10	275.27	246.11
12:40	263.67	250.86
13:10	248.20	260.70
13:40	240.12	267.21
14:10	232.03	272.79
14:40	228.34	282.83
15:10	225.88	278.59
15:40	225.70	286.70

通过表 2 可以看出,对于同一点频在全天不同时段对太阳校相结果误差较大,对全天太阳校相结果取均值,与卫星法校相结果相差在±5°内,因此无线电测控设备在实际应用中采用的校相数据通常为多次太阳校相结果均值,但这种方式需要通过长时间校相进行数据积累,同时一个校相周期时间约 15 min,且缺少较好的检验方法。

3 校相参数计算方法

3.1 多模馈源跟踪系统工作原理

以某遥测设备为例,说明多模馈源伪跟踪系统的工作原理^[7-8]。在进行目标跟踪时,目标偏离电轴,信号进入馈源,分别激励起和模 TE_{11} 模、差模 TE_{21} 模,提取 TE_{21} 模信号作为角误差信号进行跟踪,

此时,差模相对于和模的相位表示目标偏离电轴的方向。和模与差模分别由波导传输至合成网络输出 4 路左右旋和、差信号,经过滤波、放大、移相之后耦合为两路左右旋信号,通过下变频进入基带,其原理如图 1 示。

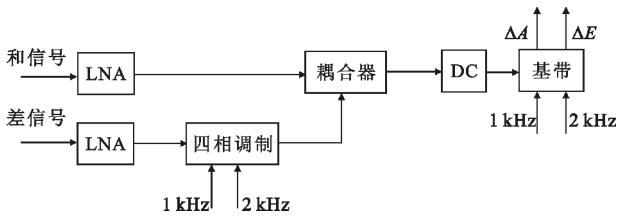


图 1 某遥测设备的多模馈源跟踪系统原理框图
Fig. 1 The schematic block diagram of multi-feed tracking system of a telemetry equipment

假定地面天线和、差信道在接收频带内辐射特性保持不变,和、差信道来波均为理想圆极化波,利用互易原理求得天线对来波信号每一频谱分量的响应,对这样的响应求和即可得复数和、差信号:

$$\dot{U}_s = Af_s(\theta) \exp [j(\omega t + \varphi(t))], \tag{1}$$

$$\dot{U}_d = Af_d(\theta) \exp \left[j \left(\omega t + \phi + \varphi(t) - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \tag{2}$$

差信号经 1 kHz 与 2 kHz 的四相调制后变为

$$\dot{U}_d = Af_d(\theta) \exp \left[j \left(\omega t + \phi + \varphi(t) - \frac{\pi}{2} + \beta(t) \right) \right]. \tag{3}$$

和、差信号合并后,得到合成信号

$$\begin{aligned} \dot{U}_c = & A\sqrt{1-M}f_s(\theta) \exp [j(\omega t + \varphi(t))] + \\ & A\sqrt{M}f_d(\theta) \exp \left[j \left(\omega t + \phi + \varphi(t) - \frac{\pi}{2} + \beta(t) \right) \right]. \end{aligned} \tag{4}$$

式中, A 为和信号幅度, $\varphi(t)$ 为调角信号的瞬时相位偏移, M 为耦合系数, $f_s(\theta)/f_d(\theta)$ 为以和方向图峰值归一化的和/差方向图, θ, ϕ 为地面天线电轴为 Z 轴的球坐标中目标的角坐标, $\beta(t)$ 为四相调制。差信号经过四相调制之后与和信号耦合,使系统能够在载波不锁定的情况下进行太阳校相,通过四相调制使和、差信号相位一致,这是能够实现射电星校相的必要条件之一。

3.2 校相值计算原理与方法

对于大口径天线多模馈源跟踪系统,和、差信号的相位差是由和、差信号进入馈源后经过的物理路径不同(主要为电缆、波导的长度不一致)所引起^[9-10],正是由于和、差信号经过的物理路径不一致,导致和、差通道之间存在固定的波程差,进而引起和、差信号相位不一致,形成相位差,因此,对任一

点频 f_1 可以得到以下公式:

$$S = \lambda_1 N_1 + K_1. \tag{5}$$

式中, S 为固定波程差; $\lambda_1 = \frac{c}{f_1}$ 为波长; $\lambda_1 N_1$ 为信号经过和差信道差的整数倍波长; $K_1 = \lambda_1 \frac{\theta_1}{360^\circ}$ 为余量, θ_1 为移相值,即校相值。

同理,对点频 f_2 也可以得到以下公式:

$$S = \lambda_2 N_2 + K_2. \tag{6}$$

由于 S 为和、差通道之间的固定波程差,故得到

$$\lambda_1 N_1 + K_1 = \lambda_2 N_2 + K_2, \tag{7}$$

即

$$\frac{c}{f_1} \cdot N_1 + \frac{c}{f_1} \cdot \frac{\theta_1}{360} = \frac{c}{f_2} \cdot N_2 + \frac{c}{f_2} \cdot \frac{\theta_2}{360}. \tag{8}$$

对于多模馈源跟踪系统,两个相近频点 f_1, f_2 所通过的整数倍波长相同,即 $N_1 = N_2$,因此,选取频点 f_1, f_2 精确校相值代入到公式(8)中,能够得到 N 值,进而计算出固定波程差 S 的长度,当波程差 S 确定以后,利用 N 值便能计算出其他各频点校相值。

需要注意的是,当所选取频点 f_1, f_2 相差较大时,即波长 λ_1, λ_2 相差较大,会出现频点 f_1 通过的整数倍波长与频点 f_2 不一致,此时 $N_1 - N_2$ 为大于零的正整数,此时,在计算 N 值时,应该结合跟踪系统和、差通道长度判断 N_1 与 N_2 的差值。

4 计算方法验证与结果分析

为验证计算方法的可行性,选取某遥测设备为试验平台进行计算验证。该设备采用多模伪单脉冲自跟踪系统,天线口径大,在实际工作中均利用太阳进行校相,一直存在在校相时间长、单次太阳校相精度不高的问题。结合该设备馈源及跟踪系统的物理构造,在固定波程差 $S \in (0, 10]$ (单位:m)条件下,对 N 值变化趋势进行分析,结果如图 2 和图 3 所示。

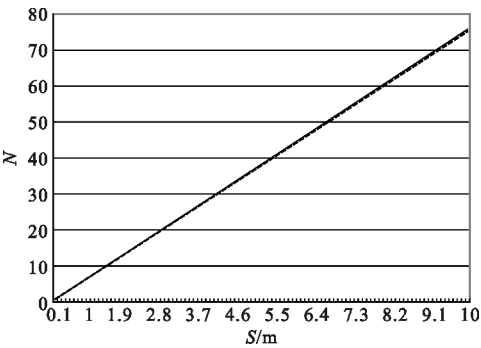


图 2 N 值变化趋势
Fig. 2 The curve of N vs. S

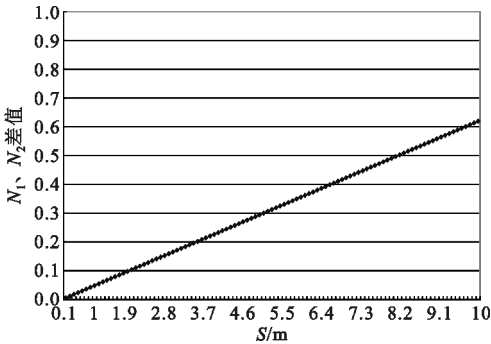


图3 N_1 、 N_2 差值
Fig. 3 The difference between N_1 and N_2

由图2和图3可以看出,对于该遥测设备, N_1 、 N_2 值随 S 增大呈线性增大趋势,且当 S 达到最大时 N_1 、 N_2 的差值仍小于1,说明以上两个点频 f_1 、 f_2 经历相同整数倍的波长,因此可以认为 $N_1 = N_2$,代入公式(8)中可以得到

$$N=\frac{\lambda_2\theta_2-\lambda_1\theta_1}{360(\lambda_1-\lambda_2)}。$$

(9)

将某卫星两个点频的卫星法左旋方位校相值 θ_1 、 θ_2 代入到公式(9)中作为精确校相值,计算后取整,得到 $N_1 = N_2 = 37$,通过公式(6)可以得到 $S = 4.97\text{ m}$ 。当固定波程差 S 确定后,利用 N 值可以得到左旋方位校相值与工作频率的对应关系,同理可得左旋俯仰、右旋方位和俯仰的对应关系,进而能够计算出该遥测设备工作频段内各频点的校相值。选取计算出的左旋方位校相值,得到关系曲线如图4所示。

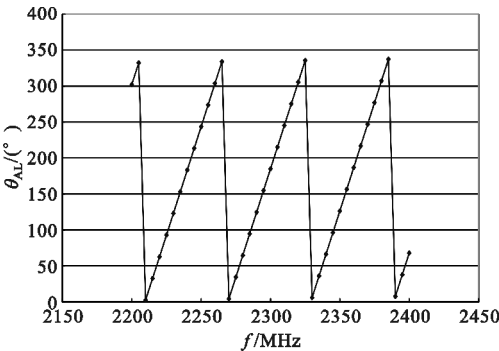


图4 左旋方位校相值 θ_{AL} 计算结果
Fig. 4 Calculation result of levogyration azimuth phase calibration value θ_{AL}

可以发现,通过计算得出的校相结果在一定频率周期内呈 $0^\circ \sim 360^\circ$ 线性变化;与左旋俯仰、右旋方位和俯仰规律一致,各旋相方位、俯仰计算公式如下:

$$\begin{cases} \theta_{AL}=6.0282f+k\times360 \\ \theta_{EL}=5.9544f+k\times360 \\ \theta_{AR}=5.9976f+k\times360 \\ \theta_{ER}=5.9889f+k\times360 \end{cases}$$

(10)

式中, $k \in \mathbb{Z}$ (整数),为确保校相值落于 $[0,360^\circ)$ 内, θ_{AL} 为左旋方位校相值, θ_{EL} 为左旋俯仰校相值, θ_{AR} 为右旋方位校相值, θ_{ER} 为右旋俯仰校相值。

为验证计算结果的可靠性,选取某频点历次对太阳校相均值与该频点计算值进行比较,结果如表3所示。

表3 计算值与实测值比对结果				
Table 3 The comparison between calculated and measured values				
结果	$\theta_{AR}/(^{\circ})$	$\theta_{ER}/(^{\circ})$	$\theta_{AL}/(^{\circ})$	$\theta_{EL}/(^{\circ})$
计算值	273.7	254.50	341.3	178.4
太阳校相均值	260.2	255.41	347.6	181.9
对比结果	13.5	-0.91	-6.3	-3.5

通过对比发现,对同一点频,太阳校相均值与计算值相差在 $\pm 13.5^\circ$ 以内,在历次测试和试验性任务中,该系统积累到多个频率的太阳校相数据,选取各频率左旋方位校相均值为例绘制曲线,如图5所示。

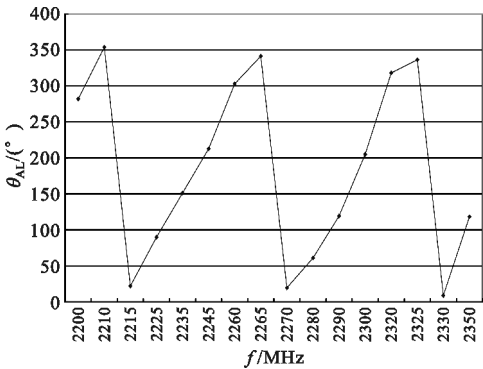


图5 太阳校相左旋方位校相值
Fig. 5 Levogyration azimuth phase calibration value with solar phase calibration method

对比图4和图5可以发现,各频点校相值计算结果与太阳校相实际数据变化趋势一致,且在数次对空间站以及同步卫星的跟踪过程中,设备加载计算值进行跟踪,角误差收敛正常,跟踪过程稳定,表明通过该方法得到的校相计算值稳定可用。

因此,采用该计算方法得到的大口径天线多模馈源跟踪系统校相参数与其工作频率的对应关系,能够作为一种方便快捷的手段提供较为准确的校相结果供试验设备使用。

5 结束语

本文通过对大口径天线多模馈源跟踪系统校相方法的分析研究,针对太阳校相单次校相结果不精确、需多次校相取均值使用导致校相周期长的缺点,提出了一种基于固定波程差的设备校相值计算方法,能够方便快捷地计算设备校相值,计算结果与实际校相结果相比,两者变化趋势一致,误差较小,实际跟踪表明计算结果稳定可用,具有较高的应用价值。

此外,对某遥测设备一天内的太阳校相结果进行分析,发现其校相结果与太阳辐射特性有一定的关联,若能揭示其变化原因,将大大提高太阳校相的精度。

参考文献:

- [1] 刘蕴才. 导弹卫星测控系统工程[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
LIU Yuncai. Missile and Satellite Test Control System Engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1996. (in Chinese)
- [2] 戴晴,黄纪军,莫锦军. 现代微波与天线测量技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
DAI Qing, HUANG Jijun, MO Jinjun. Modern Microwave and Antenna Measurement Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2008. (in Chinese)
- [3] 荣武平. 大口径反射面天线射频性能的近场聚焦测量[J]. 中国电子科学研究院学报,2010,5(4):430-434.
RONG Wuping. The Near-field Focus Way for RF Test of Big-Size Reflector Antenna [M]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology,2010, 5(4):430-434. (in Chinese)
- [4] 刘嘉兴. 利用射电星噪声的无塔校相方法[J]. 电讯技术,2010,50(6):1-4.
LIU Jiaying. Towerless Phase Calibration Using Radio Star Noise [J]. Telecommunication Engineering,2010, 50(6):1-4. (in Chinese)
- [5] 周阳辉,周朝猛,章剑. 和差极化方式不同导致跟踪问题的分析[J]. 电讯技术,2010,50(10):108-111.
ZHOU Yanghui, ZHOU Chaomeng, ZHANG Jian. Analysis of Tracking Problem Caused by Different Polarization Patterns of Sum and Difference Channels. [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(10): 108 - 111. (in Chinese)
- [6] 苏勋,席文君. 双通道跟踪接收机对地校相技术[J]. 电讯技术,2012,52(3):268-272.
SU Xun, XI Wenjun. Phase Calibration Technology of

Dual-channel Tracking Receiver with Ground Beacon Telecommunication Engineering [J]. Telecommunication Engineering,2012,52(3):268-272. (in Chinese)

- [7] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
DING Lufei, GENG Fulu. Principles of Radar [M]. Xian: Xidian University Press,2001. (in Chinese)
- [8] 李邦复. 遥测系统(上册)[M]. 北京:宇航出版社,1991.
LI Bangfu. Telemetry System [M]. Beijing: Aerospace Publishing House,1991. (in Chinese)
- [9] 仇三山,汪远玲,杨洪军. 深空测控系统跟踪接收机射电星校相的可行性分析[J]. 电讯技术,2010,50(8):22-25.
QIU Sanshan, WANG Yuanling, YANG Hongjun. Feasibility Analysis of Phase Calibration for Tracking Receiver Using Radio Star in Deep Space TT&C System [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 22 - 25. (in Chinese)
- [10] 周朝栋. 天线与电波[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.
ZHOU Chaodong. Antenna and Electric Wave [M]. Xi'an: Xidian University Press,1999. (in Chinese)

作者简介:



魏明山(1974—),男,甘肃兰州人,1998年获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航天测控总体;

WEI Mingshan was born in Lanzhou, Gansu Province, in 1974. He received the B. S. degree in 1998. He is now a senior engineer. His research concerns space TT&C system technology.

Email: nahsmw@sohu.com

葛铁志(1978—),男,吉林省吉林市人,2001年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为航天测控总体;

GE Tiezhi was born in Jilin, Jilin Province, in 1978. He received the B. S. degree in 2001. He is now an engineer. His research concerns space TT&C system technology.

杜潇(1989—),男,湖北当阳人,2010年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为遥测技术;

DU Xiao was born in Dangyang, Hubei Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2010. He is now an engineer. His research concerns telemetry technology.

Email: duxiao1989@126.com

何晓毛(1986—),男,湖南双牌人,2012年获学士学位,现为助理工程师,主要研究方向为遥测技术。

HE Xiaomao was born in Shuangpai, Hunan Province, in 1986. He received the B. S. degree in 2012. He is now an assistant engineer. His research concerns telemetry technology.