

## 利用矢量电压表进行快速校相的研究

尹美良<sup>1</sup> 王双庆<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所 成都 610036; 2. 西安卫星测控中心厦门站 厦门 361023)

**摘要:** 在航天测控系统中,校相是日常设备维护必不可少的手段之一。通常情况下,校相的相位修正值是运用软件无线电的方法计算而得。矢量电压表是一种能同时测量信号幅度和相位的仪器,具有精度高、频带宽、灵敏度高的特点。利用矢量电压表测量和差通道相位差,计算出相位修正值,在硬件设备上实现了相位快速校准。该技术已在工程中成功实现。

**关键词:** 校相;矢量电压表;相位修正值

**中图分类号:** V556.1   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 590.6020

## Research of fast phase calibration based on vector voltmeter

Yin Meiliang<sup>1</sup> Wang Shuangqing<sup>2</sup>

(1. 10th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China;

2. Xiamen TT&amp;C Station of Xi'an Satellite Control Center, Xiamen 361023, China)

**Abstract:** Phase calibration is an essential means for daily equipment maintenance in space tracking, telemetry, command (TT&C) system. Generally phase-corrected value of the phase calibration is analyzed through applying software defined radio (SDR). Vector voltmeter is an advanced instrumentation with high-precision, wide band and high sensitivity, which can test amplitude and phase simultaneously. The phase difference of sum-differential channel is calculated by using vector voltmeter. A novel phase calibration method is realized under the hardware platform. The technique discussed in this paper has been successfully applied in project.

**Keywords:** phase calibration; vector voltmeter; phase-corrected value

## 0 引言

根据测控对象及所要求的测角精度的不同,微波统一系统的天线角度自动跟踪和天线座可采用不同形式。用于中、低轨道航天器各轨道测控及地球同步轨道卫星发射段测控的微波统一系统天线均采用振幅比较单脉冲自跟踪体制(三通道单脉冲、双通道单脉冲和单通道单脉冲)完成精密角度自跟踪<sup>[1]</sup>。其中,双通道单脉冲体制具有设备相对简单、测角精度高、角误差解调性能优良等优点,在精密跟踪测量雷达中得到了广泛应用。但该体制存在和差通道相移不一致引起的交叉耦合问题,系统需要不定期地进行校相<sup>[2-3]</sup>以满足使用要求。

尽管近年来先后提出了射电星校相<sup>[4]</sup>、快速校相<sup>[5]</sup>、对地校相<sup>[6]</sup>等多种校相方案,但是当前最被广泛采用的仍是标校塔校相。射电星校相方案在深空测控网(deep space network, DSN)中应用较多,要求测控地面站需要有很高的品质因素(G/T值),且受到时间、天气等因素制约。快速

校相方案利用过境目标的下行信号对测控站设备进行快速的相位修正,这个过程至少需要花费10 s时间,在一些对测控时间有严格要求的测控地面站就无法应用。对地校相方案在无法建立满足远场条件的标校塔的场所下有应用,应用范围很有限。标校塔校相通常以软件控制的方式,将天线电轴中心偏离标校塔信号源一定角度,使得地面站差支路激发出幅度与偏离角度成正比的信号,然后自动地通过调整跟踪接收机(或者基带)中差支路的相移值,实现校相功能。本文提出的利用矢量电压表进行校相是以硬件的方式,利用仪器测量出和差通道的相位差值,系统加载该相位差值后,跟踪性能与标校塔校相所得结果一致。

## 1 基带设备相位修正值的计算方法

双通道单脉冲自跟踪体制<sup>[7]</sup>的原理图如图1所示。

图1中, $H_s(j\omega)$ 为和通道的传递函数, $H_d(j\omega)$ 为差通道的传递函数。

$$H \sum(j\omega) = K \sum e^{j\varphi\Sigma} \quad (1)$$

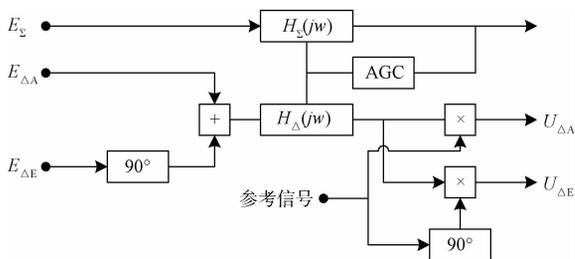


图1 双通道单脉冲原理

$$H\Delta(j\omega) = K\Delta e^{j\varphi_\Delta} \quad (2)$$

式中:  $K_\Sigma$ 、 $\Phi_\Sigma$  为和通道的增益和相移,  $K_\Delta$ 、 $\Phi_\Delta$  为差通道的增益和相移, 它们之间用和通道的自动增益控制 (AGC) 电压进行幅度的归一化, 然后用两个相位相差  $90^\circ$  的相参乘法器实现正交相位分路, 将方位误差信号和俯仰误差信号解调出来, 乘法器的参考信号用锁相环实现与和路信号相干。

$$U_{\Delta A} = \frac{K_\Delta}{K_\Sigma} \mu \theta A \cos \Delta \varphi + \frac{K_\Delta}{K_\Sigma} \mu \theta E \sin \Delta \varphi \quad (3)$$

$$U_{\Delta E} = \frac{K_\Delta}{K_\Sigma} \mu \theta E \cos \Delta \varphi + \frac{K_\Delta}{K_\Sigma} \mu \theta A \sin \Delta \varphi \quad (4)$$

$$\Delta \varphi = \varphi \sum - \varphi \Delta \quad (5)$$

从式(3)、式(4)可以看出, 当和差通道相移一致 (即  $\Delta \Phi = 0$ ) 时, 方位误差电压  $U_{\Delta A}$  与目标偏离电轴的方位角  $\theta_A$  成正比, 而与目标偏离电轴的俯仰角  $\theta_E$  无关; 俯仰误差电压  $U_{\Delta E}$  与俯仰角  $\theta_E$  成正比, 而与方位角  $\theta_A$  无关。当和差通道相移不一致 (即  $\Delta \Phi \neq 0$ ) 时, 便会使方位、俯仰两支路相互影响产生交叉耦合, 即方位误差电压受到俯仰角的影响, 俯仰误差电压受到方位角的影响。较大的交叉耦合系数使天线跟踪目标时, 产生螺旋形跟踪, 导致收敛速度慢、动态跟踪性能差。根据以上数学模型分析, 校相的主要目的就是如何“去掉”和差通道相位之间的固定差  $\Delta \Phi$ 。

基带设备自动校相是在标铁塔等合作目标的配合下, 对差通道解调基准移相器进行自动化调整, 得到基带设备跟踪单元跟踪接收机的方位、俯仰支路相位零值以及斜率修正值, 以保证伺服系统能够正常跟踪目标, 原理如图2所示。

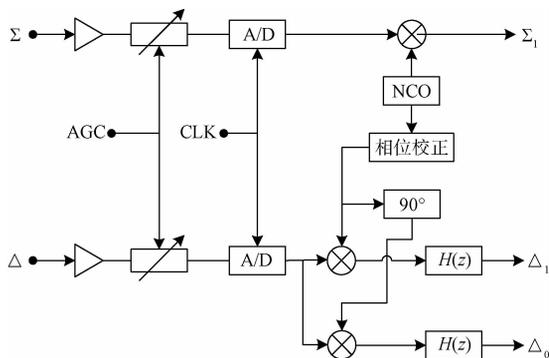


图2 基带设备自动校相原理

首先, 由系统监控台 (MCS) 通知天线控制单元<sup>[8]</sup> (ACU) 控制天线俯仰指向零点  $E_0$ , 方位指向正偏 2 mil, 并上报执行结果。ACU 完成天线指向操作后, 监控台通知基带设备可以进行自动校相。基带设备收到自动校相的命令后, 用于自动校相的相位校正器开始  $0^\circ \sim 360^\circ$  移相, 并记录相应的方位、俯仰误差值, 并根据事先确定的误差极性进行数据分析, 然后, 拟合出相位误差曲线, 判方位角误差绝对值的最大值即可求得移相控制码, 并按相应信道配置代码进行存储。

相位校正器的核心模块为一个 10 位的数字移相器, 精度位  $0.35^\circ$  (即  $360^\circ/2^{10}$ ), 方位和俯仰的正交性由数字算法保证, 即由正弦函数和余弦函数的正交性保证, 具体实现方案分两步完成: 第一步粗调, 移相范围  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 步长为  $5^\circ$ , 可获得数据, 并拟合角误差曲线, 然后根据天线指向状态和误差极性约定, 确定取值范围, 并求出相位值  $\Phi_1$ 。第二步精调, 移相范围  $\Phi_1 \pm 10^\circ$ , 步长为  $0.35^\circ$ , 可获得数据, 并拟合角误差曲线, 最后求出精确相位值  $\Phi_{A01}$ , 并作为自动校相的结果数据存储备用。同样, 由监控台通知 ACU 控制天线方位指向零点  $A_0$ , 俯仰指向正偏 2 mil, 求出相位值  $\Phi_{E01}$ 。以此类推, 再接着进行方位负偏 2 mil 求  $\Phi_{A02}$  和俯仰负偏 2 mil 求  $\Phi_{E02}$ , 取  $\Phi_{A01}$ 、 $\Phi_{E01}$ 、 $\Phi_{A02}$ 、 $\Phi_{E02}$  的均值作为自动校相的结果, 并将相应的移相控制代码按对应的信道设备配置代号存储备用。

## 2 矢量电压表的基本原理

中国西南电子技术研究所生产的 SS-DTR-70M-B 型双通道幅度相位测试仪<sup>[9]</sup>是一款自制的矢量电压表, 在很多场合能够替代美国惠普公司的 HP8508A 型矢量电压表。该设备以 70 MHz 模拟信号为输入接口, 先经过适当的预滤波、AGC 放大处理, 然后进行采样量化, 形成的数字信号分成两路, 一路与本地的数字控制振荡器 (NCO) 进行乘法运算, 实现载波捕获。2 个通道 NCO 模块的输出信号均是通过查询正弦函数表所得, 在正弦函数表中, 1 个地址码对应 1 个相位值, 通过减法运算, 可得 2 个通道的相位差值。另一路数字信号与 NCO 正交信号进行乘法运算, 滤波后输出反映输入信号幅度的直流信号, 经误差监测器后输出误差校正电压, 经 D/A 转换器转换成模拟电压去控制 AGC 放大器, 使 A/D 输入端信号幅度保持稳定。根据 AGC 电压与输入信号幅度的线性关系, 可得 2 个通道输入信号的幅度, 同时也可得到二者之间的幅度差, 原理如图 3 所示。

## 3 利用矢量电压表进行校相的方法

根据基带软件相位修正值的计算方法, 可以分析出: 俯仰正偏 2 mil 时的相位差应该与方位正偏 2 mil 时的相位差相差  $90^\circ$ , 方位负偏 2 mil 时的相位差应该与方位正偏 2 mil 时的相位差相差  $180^\circ$ , 俯仰负偏 2 mil 时的相位差应

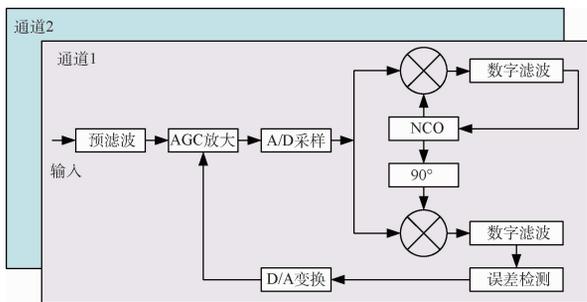


图 3 自制的矢量电压表原理

该与俯仰正偏 2 mil 时的相位差相差 180°如图 4 所示。

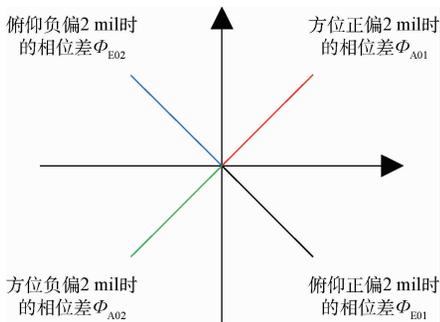


图 4 矢量电压表测量的相位差相对关系

以北斗一号<sup>[10-11]</sup>01 星为例,设备组合号为 B110,利用基带设备自动校相完成后,方位交叉耦合度为 0.05/0.96,俯仰交叉耦合度为 0.08/0.92,方位定向灵敏度为 0.45 V/mil,俯仰定向灵敏度为 0.43 V/mil。

矢量电压表测量数值(差通道减去和通道的相位差)如下:俯仰正偏 2 mil 与方位正偏 2 mil 时的相位差相差 90.5°,方位负偏 2 mil 与方位正偏 2 mil 时的相位差相差 180.5°,俯仰负偏 2 mil 与俯仰正偏 2 mil 时的相位差相差 182.4°。测量数据基本符合图 4 所示关系。

基带软件得出的相位修正值是以方位正偏 2 mil 时的相位修正数据为参考数据,也就是把方位正负偏 2 mil 和俯仰正负偏 2 mil 时得出的 4 个实际相位值都换算到方位正偏 2 mil 时的相位值,然后再计算平均值,以此作为最终的相位修正值,这个结论用矢量电压表在校相过程中进行了验证,那么“去掉”和差信道的相位差,就可以利用仪器测量方位正负偏 2 mil 和俯仰正负偏 2 mil 时的相位差。一般把这一相位差修正到 -90°(俯仰误差电压的相位超前方位误差电压 90°,同时天线正偏时出负电压)的相位修正值进行平均值的计算和处理。

$$\text{当 } 0^\circ < \Phi_{A01} < 180^\circ \text{ 时, } \Phi = 270^\circ - [\Phi_{A01} + (\Phi_{A02} + 180^\circ) + (\Phi_{E01} + 90^\circ) + (\Phi_{E02} - 90^\circ)]/4 \quad (6)$$

$$\text{当 } -180^\circ < \Phi_{A01} < 0^\circ \text{ 时, } \Phi = 270^\circ - [\Phi_{A01} + (\Phi_{A02} - 180^\circ) + (\Phi_{E01} + 90^\circ) + (\Phi_{E02} - 90^\circ)]/4 \quad (7)$$

若是快速地对相位进行校准,则只需要用仪器测量方

位正偏 2 mil 时的和差相位差  $\Phi_{A01}$ ,把这一相位差修正到 -90°,相位修正值  $\Phi = 270^\circ - \Phi_{A01}$ ,并把相位修正值  $\Phi$  写入基带的相位修正参数,拉偏后若极性相反,则  $\Phi' = \Phi + 180^\circ$  ( $0 < \Phi < 180^\circ$ ) 或  $\Phi' = \Phi - 180^\circ$  ( $180^\circ < \Phi < 360^\circ$ ),再将  $\Phi'$  写入基带的相位修正参数,即可做到相位的快速粗略校准,此时检查定向灵敏度,若定向灵敏度不符合要求,调整方位斜率、俯仰斜率数值,以使定向灵敏度满足要求。

### 4 效果检验

利用现有的北斗卫星和风云卫星<sup>[12]</sup>对矢量电压表校相方法进行试验,试验测试数据如表 1 所示。

表 1 试验测试数据

天线位置/mil	相位差 1/(°)	相位差 1/(°)
方位正偏 2	-36.7	-59.8
方位负偏 2	141.2	115.7
俯仰正偏 2	-129.7	-146.3
俯仰负偏 2	50.7	32.1

试验条件:

- 北斗一号 01 星 B 点频,设备组合号为 B110,AGC=2.73 V,S/Φ=77.9 dBHz;
- 风云二号 06 星 A 点频,设备组合号为 5600,AGC=2.51 V,S/Φ=73.9 dBHz。

对于北斗卫星的相位修正值:

$$\Phi = 270^\circ - [-36.7^\circ + (141.2^\circ - 180^\circ) + (-129.7^\circ + 90^\circ) + (50.7^\circ - 90^\circ)]/4 = 308.625^\circ$$

对于风云斗卫星的相位修正值:

$$\Phi = 270^\circ - [-59.8^\circ + (115.7^\circ - 180^\circ) + (-146.3^\circ + 90^\circ) + (32.1^\circ - 90^\circ)]/4 = 329.575^\circ$$

基带设备加载上述相位修正值后,校相结果如表 2 所示。

表 2 校相结果

校相参数	北斗卫星	风云卫星
方位定向灵敏度(V/mil)	1.08	1.09
俯仰定向灵敏度(V/mil)	1.1	1.07
方位正偏 2 mil 交叉耦合度	0.059/-1.118	0.052/-1.102
方位负偏 2 mil 交叉耦合度	0.102/1.123	0.132/1.158
俯仰正偏 2 mil 交叉耦合度	0.093/-1.016	0.015/-1.085
俯仰负偏 2 mil 交叉耦合度	-0.132/1.165	-0.055/1.143

经检查,交叉耦合度和定向灵敏度均满足指标要求。天线在自跟踪模式下收敛正常、跟踪稳定。这表明利用矢量电压表进行校相的方法是切实可行的。

## 5 结 论

本文研究了利用矢量电压表测量相位差来进行基带相位修正值的计算方法,该方法在实战中得到了检验和应用,所测得的数据完全能满足设备使用要求。系统加载该相位差值后,跟踪性能与标校塔校相所得结果非常一致,这表明利用矢量电压表进行校相同样可以达到校相目的。目前通用的基带设备综合了跟踪、测量、遥控和遥测解调等多种功能,跟踪性能的可靠性不可避免地下降了,一旦跟踪出现问题,排查起来比较麻烦而且费时。而矢量电压表是一种通用仪器、操作简单、性能可靠、测量结果直观。矢量电压表本身就是在数字化双通道跟踪接收机的平台上开发而来,所以性能是与基带设备是一致的。利用矢量电压表进行校相虽然不大可能成为通用的校相手段,但这种方法为各个航天测控地面站维护设备和应急长管提供了备份手段,值得借鉴。

## 参考文献

- [1] 赵业福. 无线电跟踪测量系统[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [2] 宋晓瑞,王元钦,郑海昕,等. 一种基于正交处理的角跟踪系统数字校相方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10):41-45.
- [3] 钟水和,王建,潘尧成,等. 单通道单脉冲跟踪系统自动校相的设计与实现[J]. 四川兵工学报, 2015(7): 97-99.
- [4] 汪远玲,仇三山,汪晓燕. 深空系统低信噪比任意信号角跟踪接收机[J]. 电讯技术, 2009, 49(4):45-48.
- [5] 李珂. 一种双通道角跟踪的快速校相方法[J]. 电讯技术, 2007, 47(6):99-101.

- [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.
- [7] 刘嘉兴. 飞行器测控与信息传输技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- [8] 都伟伟,王成林,李娜. 基于 GPIB 总线的机载校验平台射频组件[J]. 电子测量技术, 2012, 35(6): 113-117.
- [9] 尹美良. 基于 FPGA+DSP 的双通道幅度相位测试仪的设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2015(4): 155-156.
- [10] 潘礁,叶芝慧,冯奇. 基于北斗/RFID 统一时空基准的系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10): 11-16.
- [11] 刘春,马颖. 改进卡尔曼滤波在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 780-785.
- [12] 鲁文强,冯庆玉,贾耀红. 应用故障树分析风云二号测距分系统常见故障[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 80-85.

## 作者简介

**尹美良**,工程师,2001年于南京航空航天大学获学士学位,现就职于中国电子科技集团公司第十研究所,主要研究方向为航天测控信道计和航天测控系统集成设计。

E-mail:yml3178@sohu.com

**王双庆**,工程师,2004年于西安交通大学获学士学位,现就职于西安卫星测控中心厦门站,主要研究方向为航天测控技术。

E-mail:double-1018@163.com