

# 车载测控系统标校过程中校相新方法研究

庄传刚, 刘莉, 李彬

(空间物理重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 为提高车载测控设备展开和撤收的速度, 增强车载设备的机动性能, 提出利用偏馈进行校相的方法; 该方法简化了车载测控系统的体系结构, 校相过程中不需要联试应答机和标校塔的配合, 利用偏馈代替联试应答机发射下行信号作为校准源, 调整跟踪和/差通道间的相移, 使得基带接收解调出的误差电压能准确反映目标的位置; 试验结果表明, 偏馈校相的相移结果一致性和稳定性较好, 精度满足系统的指标要求, 且与传统校相的相移结果基本一致; 偏馈校相方法可以在车载测控系统中推广使用。

**关键词:** 测控; 偏馈; 校相

## Research on New Method of Phase—Calibration in TT&C System

Zhuang Chuangang, Liu Li, Li Bin

(Key Lab. of Science and Technology on Space Physics, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to speed up the spread and withdrawal of onboard TT&C equipment, and to enhance the flexibility of onboard equipment, this paper puts forward a new calibration method by use of Offset—antenna which can simplify the architecture of onboard TT&C system. The new method makes use of the downlink carrier—frequency from the Offset—antenna as the signal—source, and adjusts the phase dispersion between sum channel and difference channel, so that the error voltage can indicate the position of the target. The experiment data shows that the result of the new method has good consistency and stability, and can meet the requirement, and also is consistent with the result of traditional method. So the new method can be used in Onboard TT&C system.

**Keywords:** TT&C; offset—antenna; phase—calibration

### 0 引言

在测控系统中, 角度跟踪技术是通过基带跟踪接收机对和差信号进行幅/相处理, 将解调出的角误差信号送伺服驱动天线跟踪目标。在测控任务前, 需要对测控系统的下行跟踪和/差通道间的相位差进行校正, 校相结果对天线跟踪性能起着决定性的作用。天线要能正常跟踪目标, 必须调整好跟踪和差通道相对相移, 使得基带接收解调出的误差电压能准确反映目标的位置<sup>[1-3]</sup>。因此, 校相成为测控系统使用中的一项目常性工作。

### 1 校相原理

车载测控系统中基带跟踪接收机大多采用双通道单脉冲体制进行目标角度的跟踪, 该体制具有跟踪精度高、动态性能好的优点。其角误差信号解调流程如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

在基带中, 相位校正单元通过一个 10 位数字移相器实现对和通道本振信号进行 0°~360°范围的高精度移相, 通过搜索最大误差电压的方法完成校相: 当方位误差电压为一定数值且俯仰误差电压为零时, 调整方位移相器, 使得方位误差电压输出最大, 俯仰误差电压输出最小, 即完成了方位通道相移的校正; 同样, 当俯仰误差电压为一定数值, 方位误差电压为零时, 调整俯仰移相器, 使得俯仰误差电压输出最大, 方位误差电压输出最小<sup>[5]</sup>。

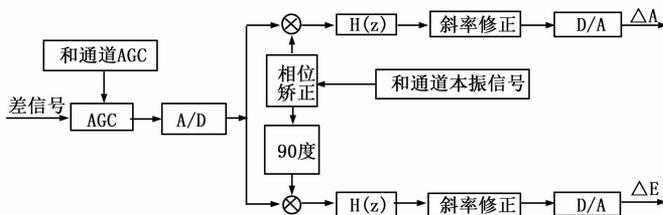


图 1 基带角误差信号解调流程

在双通道单脉冲体制下, 我们一般定义输出和信号、左旋误差信号、右旋误差信号:

$$(1)$$

$$U_{L\Delta}(t) = \Delta A \cos(\omega t + \phi_1) + \Delta E \sin(\omega t + \phi_1) \quad (2)$$

$$U_{R\Delta}(t) = \Delta A \cos(\omega t + \phi_1) + \Delta E \sin(\omega t + \phi_1) \quad (3)$$

式中,  $\phi$  为和路信号的相位;  $\phi_1$  为差路信号的相位;  $\Delta A$  为方位误差信号幅度;  $\Delta E$  为俯仰误差信号幅度;  $\omega$  为信号频率;  $t$  为时间。

以左旋信号为例, 接收机和路锁定之后, 和通道本振信号经过移相器, 产生差路鉴相器的方位参考信号  $A(t)$ , 俯仰参考信号  $E(t)$ , 并保证  $\phi + \theta_1 = \phi + \theta_2 = \phi_1$ , 通过鉴相, 就可以单独提取差路角误差电压  $\Delta A, \Delta E$ 。

$$A(t) = K_1 \cos(\omega t + \Phi + \theta_1) \quad (4)$$

$$E(t) = K_2 \sin(\omega t + \Phi + \theta_2) \quad (5)$$

式中,  $K_1, K_2$  为方位、俯仰支路的增益系数;  $\theta_1, \theta_2$  为方位、俯仰支路的移相值。

收稿日期: 2014-02-23; 修回日期: 2014-03-25。

作者简介: 庄传刚(1979-), 男, 湖北汉川人, 硕士, 工程师, 主要从事指挥控制系统设计方向的研究。

## 2 传统校相

目前测控系统进行和/差通道校相时, 通常采用联试应答机作为信号源, 标校信号通过固定在标校塔顶端的标校天线转发, 经跟踪天线、低噪声放大器、下变频器、中频放大单元和中频矩阵开关, 最后到达基带, 通过基带的相位校正单元完成下行和差通道的相移校正。校相的过程与系统的上行信道无关, 其信号流程如图 2 所示。

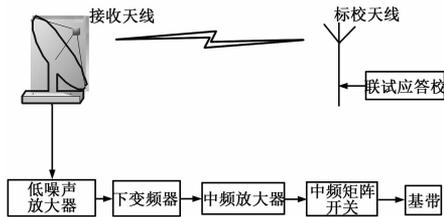


图 2 传统校相的信号流程

在进行传统校相时, 其操作流程如下:

- (1) 由系统监控计算机完成信道配置、参数设置、并调整联试应答机输出中等电平;
- (2) 调整基带方位移相器, 从  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  范围内变化, 每变化一个度数记录方位电压值、俯仰电压值, 根据数据画出相移量对应电压的曲线;
- (3) 调整基带俯仰移相器, 从  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  范围内变化, 每变化一个度数记录方位电压值、俯仰电压值, 根据数据画出相移量对应电压的曲线;
- (4) 计算方位移向值, 俯仰移相值;
- (5) 检查相位极性和交叉耦合。

通过对传统校相的信号流程以及操作流程分析, 发现传统校相需要在联试应答机及标校塔配合下才能进行。相对固定测控站而言, 车载测控站机动性要求高, 转场比较频繁, 在每次转场的过程中, 都需要对联试应答机和标校塔进行撤收和展开, 这在一定程度上制约了车载测控站的机动性能。

本文通过对偏馈校相方法进行研究, 从理论上证明了偏馈校相的可行性, 并通过传统校相和偏馈校相试验结果数据比较, 进一步证实了偏馈校相结果的正确性和稳定性。

## 3 偏馈校相

### 3.1 偏馈校相方法

偏馈校相不需要联试应答机和标校塔配合, 通过偏馈天线和校零变频器将基带输出的上行信号转换为下行信号, 作为标校信号源供系统使用。偏馈校相的信号流程如图 3 所示:

通过对比图 2 传统校相信号流程和图 3 偏馈校相的信号流程可以看出, 传统校相与偏馈校相的区别只是标校信号的来源不一样。当进行传统校相时, 标校信号来自联试应答机, 而进行偏馈校相时标校信号来自偏馈天线。无论传统校相过程还是偏馈校相过程, 标校信号都要经过天线、低噪声放大器、下变频器、中频放大单元、中频矩阵开关, 最后由基带进行处理。在传统校相和偏馈校相的过程中, 标校信号从天线到基带都要经过相同的下行信道。正是基于这一事实, 使用偏馈天线发射

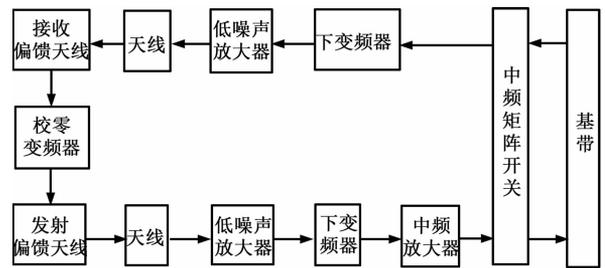


图 3 偏馈校相的信号流程

的信号对跟踪和/差通道相移进行校正成为一种可能。

下面首先通过试验对传统校相结果进行统计, 找出影响移相值的关键因素及其规律; 接着通过比较偏馈校相和传统校相结果, 找出两者之间的差异并分析其原因; 最后对偏馈校相的结果进行验证, 证明偏馈校相方法可行。

### 3.2 传统校相结果统计

根据校相原理, 对于左旋信号而言, 俯仰移相值与方位移相值相差  $180^{\circ}$ , 而右旋信号俯仰移相值与方位移相值相同。根据以上关系只要知道下行信号的旋向和方位移相值就可以得出俯仰移相值。本文以左旋信号的方位移相值为例进行分析。根据俯仰移相值与方位移相值相差  $180^{\circ}$  的关系可以推导出俯仰移相值。

考虑到测控系统的移相值与系统下行信道的设备组合以及下行信号频率有关, 为找出移相值与设备组合和下行信号频率之间的关系, 结合测控站的实际情况, 分别在全 A 和全 B 两者设备组合条件下, 在下行信号 S 频段  $2\ 200 \sim 2\ 300\ \text{MHz}$  范围内每隔  $5\ \text{MHz}$  进行一次传统校相, 并对其结果进行统计。为了更直观的说明问题, 对部分方位移相值进行周期处理, 使它们基本位于同一直线上, 如图 4。

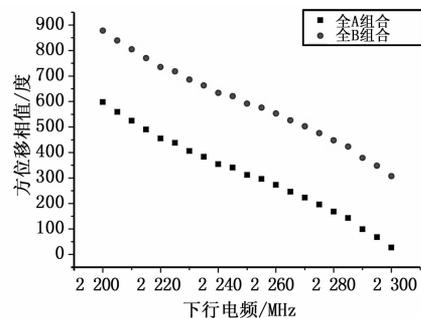


图 4 下行频率和方位移相值的关系

图 4 所使用的校相结果交叉耦合最大为  $1/9$ , 全部满足车载测控系统的指标要求。可以看出, 设备全 A 组合方位移相值的趋势和全 B 组合方位移相值的趋势基本相同。

如果使用一次函数  $\theta = a f_c + \varphi$  表示, 两条曲线的斜率  $a \approx -5.4$ 。正是由于全 A 组合与全 B 组合信道的差异导致了同频载波的校相结果相差  $230^{\circ}$  左右。如果排除全 A 组合与全 B 组合信道的差异, 可以看出影响校相结果的主要因素为信号频率。

### 3.3 偏馈校相结果与传统校相结果的关系

图 5 为全 A 组合条件下偏馈校相结果与传统校相结果的

对比关系图。从图 5 可以看出对于全 A 组合，偏馈校相结果与传统校相结果随频率变化的趋势相同。使用一次函数表示时，斜率  $a \approx -5.4$ ，只要对偏馈校相的结果进行适当的修正就可以得出正确的移相值。所以偏馈校相在原理上是可行的。

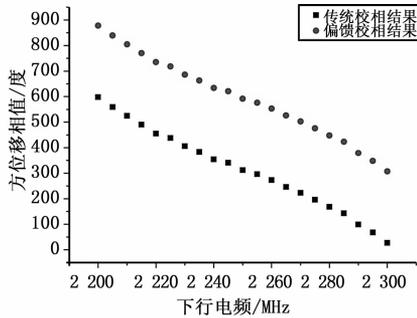


图 5 偏馈校相结果与传统校相结果的关系

两种校相过程中下行信号都要经过天线、低噪声放大器、下变频器、中频放大单元、中频矩阵开关最后由基带进行处理。从原理上看，同频载波的校相结果应该是一致的。但是当载波频率相同时，传统校相与偏馈校相结果有一个相对固定的差值。

当使用联试应答机进行传统校相时，联试应答机的位置需要满足远场条件：

$$R \geq 2 * D^2 / \lambda \quad (6)$$

$$E \geq N * \theta \quad (7)$$

式中， $R$  为天线与标校塔顶端的距离； $D$  为天线直径； $\lambda$  为标校信号波长； $E$  为天线俯仰角； $\theta$  为半功率波束宽度； $N = 3 \sim 5$

以本车载测控系统为例，在  $R \geq 540 \text{ m}$ ， $E \geq 5.5^\circ$  的条件下，认为天线接收的下行信号为平面波，可以忽略地面反射所产生的杂波对校相结果的影响。在偏馈校相方法中，发射偏馈天线安装在天线的主反射面上，不能满足远场条件，正是由于这种差异导致了传统校相结果与偏馈校相结果不一致。由于偏馈天线的位置是固定的，所以这两种方法校相的结果之差也是固定的。

经过现场多次试验并对结果进行统计，发现传统校相与偏馈校相结果一致性很好，两者相差 280 度。

$$\theta_1 = \theta_2 | 280 \quad (8)$$

式中， $\theta_1$  为传统校相结果； $\theta_2$  为偏馈校相结果。

### 3.4 偏馈校相移相值对交叉耦合的影响

车载测控系统对交叉耦合的指标要求为 1/7，我们以 2 230 MHz 和 2 280 MHz 这两个下行频段的中间频点为例分析偏馈校相移相值对交叉耦合的影响，如表 1。

经过现场多次偏馈校相试验，当下行频点为 2 230 MHz，测试结果在  $32^\circ \sim 39^\circ$  的 7 度范围内时，交叉耦合满足指标要求。当下行频点为 2 280 MHz，测试结果在  $146^\circ \sim 152^\circ$  的 6 范

围内时，交叉耦合满足指标要求。由此可确定，偏馈校相结果稳定性较好，在一定范围内其对交叉耦合的影响不大。

表 1 移相值对交叉耦合的影响

2 230 MHz		2 280 MHz	
方位移相值(°)	交叉耦合最大值	方位移相值(°)	交叉耦合最大值
---	---	145	1/6
31	1/6	146	1/7
32	1/7	147	1/7
33	1/9	148	1/9
34	1/11	149	1/10
35	1/12	150	1/12
36	1/12	151	1/10
37	1/9	152	1/8
38	1/8	153	1/6
39	1/7	---	---
40	1/6	---	---

### 3.5 对偏馈校相方法进行验证

在现场利用车载测控系统以全 A 组合为例对实际使用的 3 个频点进行方位偏馈校相，通过偏馈校相结果推导出实际移相值，将移相值加载到跟踪接收机后检查交叉耦合是否满足指标要求，结果如表 2。

表 2 偏馈校相结果验证表

下行频点(MHz)	偏馈校相结果(°)	实际移相值(°)	交叉耦合
2 216.52	35	115	1/19
2 235.84	292	12	1/27
2 273.52	109	189	1/18

从表 2 可以看出，利用偏馈校相推导出的实际移相值，其交叉耦合满足指标要求。

## 4 结论

通过理论分析和实验证明：偏馈校相利用偏馈天线取代联试应答机和标校塔进行校相，简化了设备的操作流程，免除了设备展开和撤收过程，提高了车载测控系统的机动性能，其校相结果一致性和稳定性较好，其精度满足指标要求，可以在车载测控系统中推广使用。

### 参考文献：

[1] 王顺民. 雷达低仰角偏轴跟踪测量偏差补偿算法的改进研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (12): 1890-1892.  
 [2] 刘冰. 统一测控系统跟踪在轨目标自动校相方法研究 [J]. 遥测遥控, 2010, 31 (1): 37-40.  
 [3] 杨峰辉. 自动校相技术在现代测控雷达中的实现 [J]. 飞行器测控学报, 2003, 22 (3): 45-47.  
 [4] 杨锁强. 单脉冲跟踪系统中自动校相的设计与实现 [J]. 信息通信, 2011, 2011 (3): 23-24.  
 [5] 赵业福, 李进华. 无线电跟踪测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.