

# Exploration of the X-band Phase Free Calibration Mode for Data Transmission Receiving Equipment

Tianhe Xia Lingheng Zhang Zhenhua He She Li Zikai Feng

State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an, Shaanxi, 710043, China

## Abstract

Currently, the installed 4.5-meter data transmission receiving equipment does not have tower phase calibration conditions in the X-band, and the commonly used fast phase calibration method for satellites has a significant impact on data reception under certain conditions. In order to achieve X self tracking of satellite phase free calibration by data transmission receiving equipment, it is proposed to use a biased antenna for phase correction. When the tracking link changes with temperature or equipment combination, resulting in changes in phase and slope, the relative phase and slope of the X data transmission tracking link are measured, and the actual phase and slope of the current X tracking link are calculated. In the actual tracking process, phase free direct self tracking is implemented. This method can solve the problem that when the data transmission receiving device needs to quickly calibrate the phase of the satellite in the X frequency band and the calibration is limited, the task cannot be executed using the X self tracking method.

## Keywords

data transmission receiving equipment; dual channel system; X-band angle tracking; bias feedback closed-loop phase calibration

## 数传接收设备 X 频段免校相模式探讨

夏天鹤 张铃珩 贺振华 李社 凤梓凯

宇航动力学国家重点实验室, 中国·陕西 西安 710043

## 摘 要

目前已安装 4.5m 数传接收设备在 X 频段基本不具备塔校相条件, 且常用的对星快速校相方式在某些条件下对数据接受有较大影响。为了实现数传接收设备对星免校相完成 X 自跟踪, 提出利用偏馈天线实施校相, 当跟踪链路随温度变化或设备组合更改导致相位和斜率发生变化后, 测得 X 数传跟踪链路相对相位和相对斜率, 推算当前 X 跟踪链路实际的相位和斜率, 在实际跟踪过程中实施免校相直接自跟踪。该方法可解决数传接收设备 X 频段需要对星快速校相且校相受限制时无法采用 X 自跟踪方式执行任务的问题。

## 关键词

数传接收设备; 双通道体制; X 频段角跟踪; 偏馈闭环校相

## 1 引言

X 频段数传接收设备多数采用单脉冲双通道跟踪体制, 跟踪链路的相位和斜率不易保持, 受跟踪链路温度变化、馈源状态、跟踪链路设备组合变动、基带跟踪单元参数设置、ACU 校相流程设置等影响而发生改变。若在射频信号部分加装移相合成设备则跟踪链路相位和斜率能保持较长时间, 但绝大部分测控设备未安装移相合成设备, 因此需要定期及时对特定频点的相位和斜率进行重新标定, 否则在实际跟踪时跟踪相位与实际不符合会导致天线无法维持自跟踪甚至大幅度晃动; 跟踪斜率与实际不符合会导致天线在跟踪过程中持

续震荡<sup>[1]</sup>。因此, 需要对 X 频段进行校相, 但不是目标已经进站后实施。

当前数传接收设备主要采用对星校相。因为若要采用对塔校相, 在满足远场条件下, 4.5m 口径天线所需标校塔要建在距离站点大于 1.215km 之外, 且标校塔天线架设处高度大于 64m。而标校塔建造与普通建筑要求不同, 成本高昂。标校塔修建易受地形和环境影响, 尤其在城区等人流密集的区域, 影响尤为显著。因此, X 频段天线绝大部分场景下无法实施有塔校相, 主要采用无塔方式校相。结合实际任务需求和工作环境, 当前无塔校相主要采用近场校相和对星快速校相。近场校相天线与信标信号距离需满足远场校相距离的 1/2, 对应 4.5m 天线即 607m 以上。架设信标同比例换算需高于 32m, 在实际工作中很难找到符合条件的信标架设点, 且即使找到了任务协调在相应点位通电架标, 实际操作难度较大。实施对星校相易受当前天气状况、测站遮蔽角、数传

【作者简介】夏天鹤 (1988-), 男, 中国新疆阿克苏人, 本科, 工程师, 从事网络应用、计算机技术、航天技术应用等研究。

信号下发时间、跟踪天线仰角、跟踪使用链路等多种因素影响，且对星实施 X 频段校相在自动校相过程中存在数传信号闪锁导致数据接收质量变差的风险。因此，实际卫星跟踪过程中，若以数传数据接收成功为标准，对星校相失败率较高（50%左右）。

数传接收设备切实存在需要 X 校相但当圈次不满足对星快速校相条件（目标出遮蔽时已经开始下传数传数据、S 和 X 信号同时进站），导致当圈卫星跟踪无法采用 X 自跟踪的问题。因此，论文主要探讨在任务前获取将要跟踪的 X 频段卫星的相位和斜率的方法。

4.5m 数传接收设备天线主反射面边缘安装有一个全向性天线（偏馈振子），偏馈振子由 1 根收共用线缆连接至校零变频器。日常跟踪卫星前会进行距离零值的标定，并以此确定收发链路状态良好。偏馈闭环则是上行信号经天线副反射面反射后到达偏馈振子，由偏馈振子至校零变频器变频后再由偏馈振子发出，经天线馈源接收后通过下行链路回到基带。若将偏馈振子所连接线缆连接至信号源，下行链路用 X 接收链路，则可实现 X 频段偏馈闭环，下行 X 链路与实际跟踪时完全一致。

在此状态下测量 X 校相的相位和斜率，得到的结果不能用于实际对星自跟踪。但若能得到需二次校相时间段内相对相位和相对斜率变化，根据梳理校相原理，当硬件状态不变，只需知道初始准确相位和斜率、变化后的相对相位和斜率，则可计算得出变化后的相位和斜率。

## 2 可行性分析

以上仅从大方向讲述了偏馈闭环得出校相结果的可能，下面从理论分析其可行性。

### 2.1 校相原理分析

正常校相结果中，和、差信号用三角函数可表示为：

$$u_{\Sigma}(t) = \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$u_{\Delta}(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \pm E \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中， $A \cos(\omega t + \varphi)$  为方位差信号， $E \sin(\omega t + \varphi)$  为俯仰差信号， $\varphi$  为跟踪和、差链路的相对相位，正负号与跟踪基带设备参数设置以及 ACU 校相程序有关，此处不进行详细区别分析。

当基带跟踪单元中的初始相位和斜率记为  $\theta_0$  和  $k_0$  时，差路鉴相器的参考信号中方位为  $k_0 \cos(\omega t + \theta_0)$ ， $k_0 \sin(\omega t + \theta_0)$  俯仰为。跟踪链路送来的和差信号经过基带鉴相滤波后得出方位、俯仰角误差电压分别为：

$$U_a = \frac{k_0}{2} (A \cos(\varphi - \theta_0) + E \sin(\varphi - \theta_0)) \quad (3)$$

$$U_e = \frac{k_0}{2} (E \cos(\varphi - \theta_0) + A \sin(\varphi - \theta_0)) \quad (4)$$

这里不讨论天线异常的情况，假设交叉耦合满足指标要求，拉偏方位，记录此时方位、俯仰差信号幅度为  $A_1$  和  $E_1$ ，因只拉偏方位， $E_1 \approx 0$ 。校相结果的得出是通过使天线偏

离目标得出误差电压，再以误差电压推算相位和斜率。具体流程分两步：第一步采用相位步进搜索法调整  $\theta$  值使  $\theta = \varphi$ ，记录此时  $\theta$  值为  $\theta_1$ ；第二步按照 ACU 软件设定的定向灵敏度设置斜率  $k$  值，即天线方位、俯仰分别偏开固定角度，使 ACU 误差示波器能出现此时定向灵敏度对应的理论误差电压，记录此时为  $k$  值为  $k_1$ 。 $\theta_1$  和  $k_1$  即为此时的校相移相值和斜率，填入基带跟踪单元相应位置，即可完成天线 X 自跟踪。

假如  $\theta_1 \neq \varphi$ ，交叉耦合结果将不等于 0。一般情况下天线的交叉耦合都不为 0，即方位角度拉偏时，天线俯仰有角误差电压输出；天线俯仰角度拉偏时方位也有角误差电压输出，这是正常的交叉耦合，小口径天线满足自跟踪条件的交叉耦合值需小于 1/5。交叉耦合值超差会导致天线跟踪时出现震荡，严重时甚至丢失目标出现天线“飞车”。如果  $k$  值计算不准确，值偏小则天线误差随动能力不足，即天线运动速度较快时会出现较为明显的动态滞后，偏大则会导致天线收敛特性变差，极易引起跟踪过程中天线震荡。因此，校相结果是否准确对于天线能否保持自跟踪状态至关重要。

误差电压中的  $\varphi$  值受馈源结构的不对称、馈源喇叭的形变、馈源口是否有异物、微波通过的波导腔体、波导开关、场效应放大器、下变频器、带通滤波器的相位特性等多种因素共同影响。校相斜率主要受跟踪链路器件中的场效应放大器、跟踪下变频器、同轴切换开关、线缆增益和衰减影响。跟踪链路中的有源器件（场效应放大器、跟踪下变频器、滤波器）及信号经过线缆的相位变化、温度变化导致的斜率变化影响。当跟踪链路本身变更、工作环境变更、温度变化较大时， $\theta$  值和  $k$  值均会有所改变。

当跟踪链路相位和斜率发生变化时，我们设相位变化量为  $\Delta\varphi$ ，斜率变化量为  $\Delta k$ 。则式（3）、式（4）变为：

$$U_a = \frac{k_0}{2} (A \cos(\varphi + \Delta\varphi - \theta_0) + E \sin(\varphi + \Delta\varphi - \theta_0)) \quad (5)$$

$$U_e = \frac{k_0}{2} (E \cos(\varphi + \Delta\varphi - \theta_0) + A \sin(\varphi + \Delta\varphi - \theta_0)) \quad (6)$$

在校相完成后得到  $\theta_1$  和  $k_2$ 。由上式推导：

$$\theta_2 = \varphi + \Delta\varphi = \theta_1 + \Delta\varphi \quad (7)$$

$$k_2 = k_1 / \Delta k \quad (8)$$

由式（7）和式（8）可以看出，秩序得到相位变化量  $\Delta\varphi$ ，斜率变化量  $\Delta k$ ，再知道初始相位和斜率，则无需实施对星校相。结合初始相位和斜率，以及相位变化量  $\Delta\varphi$ ，斜率变化量  $\Delta k$ ，通过上式就可得出当前实际的相位斜率。

### 2.2 偏馈闭环校相分析

偏馈闭环校相如图 1 所示，用天线主反射面边缘的偏馈振子发出模拟卫星信号，信号源发出一个 X 频段信号，通过射频线缆输送至偏馈振子，偏馈振子辐射至副反射面，副反射面反射后信号经馈源网络进入高次模耦合器，分离为和差信号经过相应链路至基带跟踪单元进行校相。

通过系统闭环校相，交相结果无法用于自跟踪，但通过两次交相可以得到相对相位和相对斜率的变化。再根据上

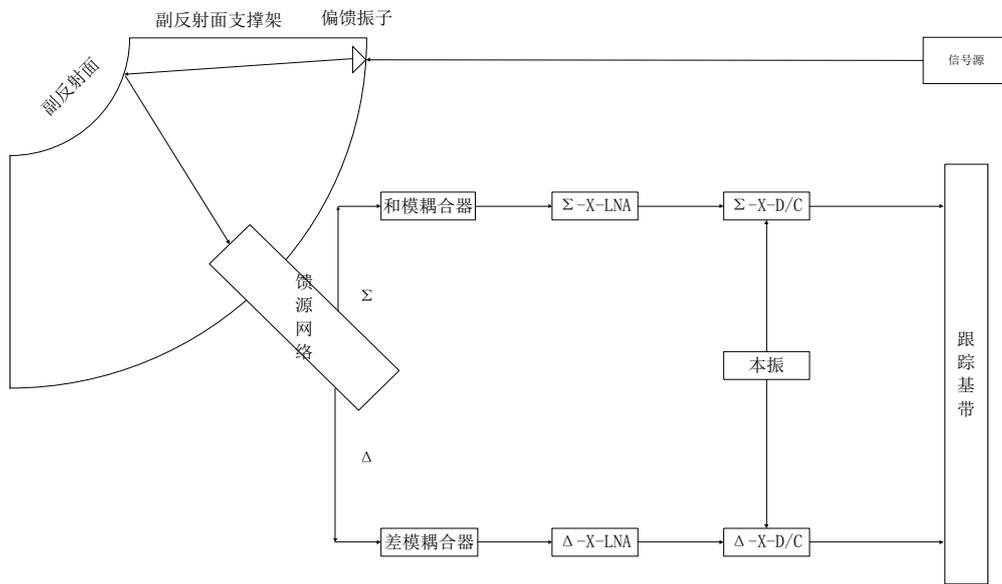


图1 偏馈闭环示意框图

述公式，结合初始正确的相位和斜率推算出系统当前的实际相位和斜率，用于完成自跟踪。

具体实施流程如下：

首先，天线实施对星校相，得出正确的相位和斜率，对星快速校相结果为  $\theta_1$  和  $k_1$ 。

其次，在完成对星校相后，立刻进行一次偏馈闭环校相，闭环校相结果为  $\theta'_1$  和  $k'_1$ 。

两小时后再次实施一次偏馈闭环校相，所得校相结果记录为  $\theta'_2$  和  $k'_2$ 。则2小时内跟踪链路的相对相位变化  $\Delta\varphi = \theta'_2 - \theta'_1$ ，相对斜率变化  $\Delta k = k'_1/k'_2$ ，按照式(7)和(8)推算系统相对相位和斜率为：

$$\theta_2 = (\theta_1 - \theta'_1) + \theta'_2 \quad (9)$$

$$k_2 = k_1 \cdot \frac{k'_1}{k'_2} \quad (10)$$

将计算得到的  $\theta_2$  和  $k_2$  填入基带跟踪单元，对星完成验证后即可完成天线 X 自跟踪。

偏馈振子安装在主天线反射面内，相当于标校天线与跟踪天线实际距离仅有 3m，远远无法满足天线远场标校测试条件。且天线反射面相位差和天线周边环境的多径干扰对校相结果的影响很大。但是本方法采用两次偏馈闭环校相来监测跟踪链路的相对相位和相对斜率变化，外界环境和天线面的相位差在计算过程中抵消，因此所得相对相位和相对斜率变化可以用于推算系统当前相位和斜率。

在数传接收设备开展入场安装时，若有条件可采用无

人机跟飞实验和对星跟踪进行验证。用外在条件变化前后两次闭环校相结果推算出的当前状态下实际校相结果，在基带跟踪单元填入该结果后天线对星，ACU 拉偏方位俯仰验证交叉耦合、移相值和斜率。

### 3 结语

偏馈闭环校相外界因素的影响较小，利用设备任务间隙实施可操作性较高，同时避免了在实际数传接收过程中对星快速校相天线拉偏导致的信号强度减小和数据丢失<sup>[2]</sup>。论文根据数传接收设备实际使用情况以及 X 数传任务执行情况，探讨了通过偏馈闭环校相利用相位和斜率变化量推算实际相位和斜率用于 X 频段天线自跟踪的可行性。后续考虑从以下方面做进一步研究：

①结合设备使用情况和维护情况，建立长期测试数据库，对该方法的可执行性进行进一步验证。

②对该方法进行持续优化，编写偏馈闭环校相流程软件，对 X 偏馈闭环校相流程进行自动化处理，提高本方法的便捷性和实用性，满足数传数据接收任务的需求。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李珂.一种双通道角跟踪的快速校相方法[J].电讯技术,2007(6):99-101.