

# 高精度中继星自动跟踪系统设计

周勇<sup>1</sup>, 马超<sup>1</sup>, 庞洁<sup>1</sup>, 张岸琪<sup>2</sup>, 苏峰<sup>1</sup>

1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100

2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065

**摘要** 为实现用户星天线对中继卫星的高速数据传输和高精度跟踪,设计了一种由TE<sub>21</sub>模跟踪天线,一体化Ka跟踪接收机和终端控制器组成的系统,采用Ka频段单通道单脉冲跟踪体制。该系统在非线性机电数字仿真模型基础上,建立了跟踪接收机模型。通过仿真计算,得到自动跟踪响应结果,比较仿真结果和试验结果,验证了所建模型。通过远场测试自动跟踪S曲线,验证跟踪的动态性能和稳态跟踪精度。试验结果表明,自动跟踪系统的功能及性能均满足任务要求。

**关键词** 自动跟踪;Ka跟踪接收机;跟踪精度

中图分类号:V444+.5

文献标识码:A

文章编号:1006-3242(2024)06-0071-07

## Design of Relay Satellite High-Precision Auto-Tracking System

ZHOU Yong<sup>1</sup>, MA Chao<sup>1</sup>, PANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Anqi<sup>2</sup>, SU Feng<sup>1</sup>

1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China

2. Dept. Control Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,  
Chongqing 400065, China

**Abstract** In order to achieve high-speed data transmission between the user satellite antennas and relay satellite, single channel monopulse tracking systems are used to realize high-precision tracking. The design of auto tracking system based on integration of Ka-band tracking receiver and Servo controller is described in this paper, where TE<sub>21</sub> mode coupler is used on Ka-band antenna. Tracking receiver model is established on the nonlinear dynamics model. Auto-tracking pointing error is provided by the model. Comparing the simulation with experiment results, the math model is correct and reliable. The Auto-tracking system is test on far-field. Tracking receiver's S curve, dynamic performance and pointing error are applied to test. The experiment results demonstrate the auto-tracking system function and performance meets the requirements of task by precision pointing.

**Key words** Auto-tracking; Ka Tracking receiver; Pointing error

基金项目:国家重大科技专项工程

收稿日期:2024-06-12

作者简介:周勇(1976-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为捕获跟踪系统设计。

引用格式:周勇,马超,庞洁,等. 高精度中继星自动跟踪系统设计[J]. 航天控制,2024,42(6):71-77. (ZHOU Yong, MA Chao, PANG Jie, et al. Design of relay satellite high-precision auto-tracking system[J]. Aerospace Control, 2024, 42(6): 71-77.)

## 0 引 言

随着航天器数据中继、星间链路等任务的日益增多,为完成对中继星或目标星的指向跟踪,实现高速数据传输<sup>[1]</sup>,对用户星自动跟踪的需求也随之增多。由于 Ka 频段天线波束宽度为  $\pm 0.4^\circ$ ,用户星 Ka 天线的轨道预报指向计算误差、天线在轨热变形误差以及卫星姿态的变化等因素可能导致天线路径跟踪指向误差大于天线的 3 dB 波束宽度角,不能确保用户星天线波束中心指向中继星,从而引起链路增益下降,导致星间链路数据传输失败。因此,需要用户星对中继星进行自动跟踪,完成用户星终端天线对中继卫星 Ka 信标的高精度跟踪。

文献[2]介绍的单通道单脉冲自动跟踪中继星系统采用的接收机微波前端为独立设备,和、差支路相移调整采用移相器校准,移相精度为  $11.25^\circ$ <sup>[2]</sup>。文献[3]介绍了地面站对低、高轨卫星的自动跟踪系统,系统采用双通道单脉冲,微波前端为独立设备,但未介绍和、差支路相移校相措施。本文设计了基于单通道单脉冲跟踪体制的星间链路自动跟踪系统。用户星 Ka 天线采用 X/Y 轴型二维机械可动环焦双反射面天线<sup>[4]</sup>、波导 TE<sub>21</sub> 多模跟踪,机械转动处用旋转关节连接。Ka 跟踪接收机采用一体化设计、单脉冲单通道误差信号调制解调方案,用数字方案实现和、差支路相移调整功能,提高了和支路移相器移相精度,简化了单通道调制器设计。单通道调制器信号经两次变频至固定中频,进入中频数字处理单元进行误差信号解调,实现跟踪接收机的小型化设计<sup>[5]</sup>。

在远场完成用户星终端天线对中继星 Ka 信标的自动跟踪系统的功能和性能的测试验证。首先完成和、差支路的相位校准,进行方位和俯仰方向 S 曲线测试,确保和、差支路无交叉耦合,避免影响跟踪性能。对远场 Ka 信标的自动跟踪性能证明了系统的可行性。

## 1 自动跟踪原理

星载自动跟踪系统通常采用基于 TE<sub>21</sub> 模单通道单脉冲跟踪体制<sup>[6-7]</sup>,当用户星天线对准中继卫星时,接收的中继星 Ka 信标电磁波在用户星天线波纹喇叭馈源中激励的电磁场只有主模 TE<sub>11</sub> 模,当

偏离卫星时,一次辐射器中除激励起主模 TE<sub>11</sub> 模外,还会激励起高次模 TM<sub>01</sub>、TE<sub>01</sub> 和 TE<sub>21</sub> 等。在这些高次模 TM<sub>01</sub>、TE<sub>01</sub> 和 TE<sub>21</sub> 中,由于 TE<sub>21</sub> 比其它高次模具有更强的适应性、较小的电轴漂移和较小的交叉耦合性,从而被广泛用于多模跟踪系统。自动跟踪利用了 TE<sub>11</sub> 主模的单峰特性和 TE<sub>21</sub> 高次模的双峰特性。图 1 为用户星天线指向轴指向偏离中继星时,差模信号和方位差、俯仰差的向量分解关系。

用户星馈源波纹喇叭接收中继星 Ka 信标电磁波,馈线系统耦合的和、差信号分别为<sup>[8]</sup>

和信号:

$$\Sigma = E_{\Sigma}(\theta) \cdot \cos(\omega t) = A_m \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

差信号:

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_{AZ} + j \cdot \Delta_{EL} = E_{\Delta}(\theta) \cdot \cos\varphi \cdot \cos(\omega t) + j \cdot E_{\Delta}(\theta) \cdot \sin\varphi \cdot \cos(\omega t) \\ &= \mu\theta A_m \cdot \cos\varphi \cdot \cos(\omega t) + j \cdot \mu\theta A_m \cdot \sin\varphi \cdot \cos(\omega t) = \mu\theta A_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $E_{\Sigma}(\theta)$ 和 $E_{\Delta}(\theta)$ 分别为和差通道的方向图函数。当 $\theta$ 很小时, $E_{\Sigma}(\theta)$ 为一常数, $E_{\Delta}(\theta)$ 与 $\theta$ 成线性关系, $A_m$ 为和信号幅度。 $\omega$ 为天线馈源接收的 Ka 信标频率, $\theta$ 为终端天线偏离中继卫星的空间角度, $\varphi$ 为 TE<sub>21</sub> 模误差向量的相位,它反映了目标偏离的方向。

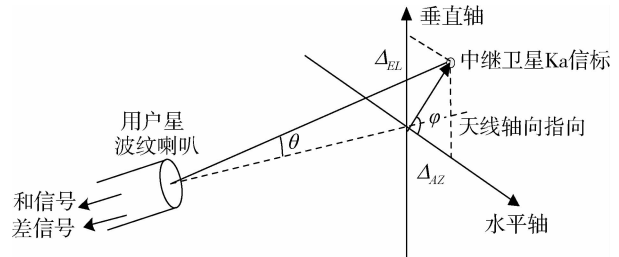


图 1 差模信号向量分解

将和信号  $\Sigma$  和差信号  $\Delta$  送至跟踪接收机,将差信号进行四相调制,再与和信号合成,对角误差解调输出方位角度差  $\Delta_{AZ}$  和俯仰角度差  $\Delta_{EL}$ ,从而引导伺服跟踪系统自动跟踪中继卫星。

## 2 系统设计

系统可根据输入的 X/Y 轴角度值驱动 Ka 天线程控跟踪中继星。当 Ka 天线指向中继星偏差小于  $0.40^\circ$  时,跟踪接收机可以测量 Ka 天线偏离中继星角度的信息,自动控制天线精密指向跟踪中继星。捕获跟踪分系统主要由 Ka 天线(反射面及馈源)、

跟踪接收机及捕获跟踪控制器等设备组成,自动跟踪系统框图如图 2 所示。

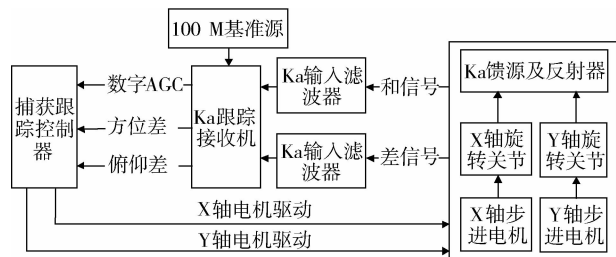


图 2 自动跟踪系统框图

### 2.1 Ka 频段天线设计

Ka 频段天线的任务是接收中继星前向信标信号,产生和、差信号送至 Ka 跟踪接收机;发送 Ka 频段数传信号至中继星。Ka 频段天线的频率、增益、旁瓣电平、收发隔离度、差零深、差零点与和最大偏差角度是设计的主要指标。

Ka 频段天线射频部分由发射(右旋圆极化)、和(左旋圆极化)及差(左旋圆极化)3 个通道构成。对于 Ka 频段接收信号,从中继卫星的 Ka 信标来波通过环焦双反射面,被馈源喇叭接收,当天线波束指向中继卫星波束时,喇叭只产生 TE<sub>11</sub> 模,TE<sub>11</sub> 模信号通过 TE<sub>21</sub> 耦合器主通道、截止波导、极化双工器及接收旋转关节进入到跟踪接收机。而当天线波束指向偏离中继卫星波束时,将在喇叭中激励起差模 TE<sub>21</sub> 模来进行跟踪。激励起的 TE<sub>21</sub> 模经过耦合器的耦合孔从主通道中耦合到差通道中,再经过合成网络合成一路信号,经过旋转关节进入到跟踪接收机。Ka 发射频段信号通过发射旋转关节、极化双工器、截止波导、TE<sub>21</sub> 耦合器主通道、喇叭馈源及环焦双反射面发向中继卫星。Ka 天线原理如图 3 所示。

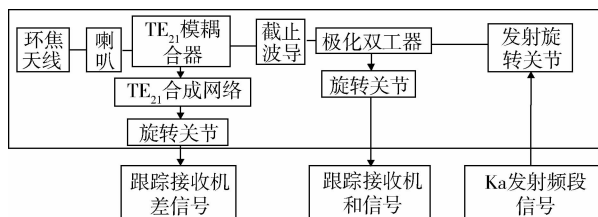


图 3 Ka 天线原理框图

星间链路天线是具有跟踪能力的高增益通信,电性能指标主要体现在和波束和差波束性能。由于天线口径上和幅度分布和差幅度分布不能单独控制,即存在和差矛盾,所以和波束和差波束的性能往往很难同时达到最佳,因此在设计中需要综合考虑。

和波束的性能主要是增益、副瓣电平和波束宽度。天线增益关系到通信链路增益裕量。副瓣电平关系到多路径效应对天线跟踪性能的影响。跟踪精度小于波束半宽度。

天线采用单脉冲跟踪方式,差波束的零深影响自动跟踪的精度。差波束的零深是指正前方零点方向的电平与左右两个差瓣电平的比值,零深直接影响差波束的差斜率,在 Ka 跟踪接收机中表现为 S 曲线斜率的大小,零点大,斜率就大,跟踪精度就相应提高。

### 2.2 Ka 跟踪接收机设计

Ka 跟踪接收机的任务是接收天线馈源输出的和、差两路信号,不失真地解出方位差  $\Delta_{AZ}$  和俯仰差  $\Delta_{EL}$ 。Ka 跟踪接收机的灵敏度、动态范围和捕获时间是跟踪接收机要考虑的主要技术指标。

天线馈源的 TE<sub>11</sub> 模和信号  $\Sigma$  进入到 Ka 跟踪接收机和信号接收通道。差模 TE<sub>21</sub> 模差信号  $\Delta$  进入 Ka 跟踪接收机差信号接收通道。和、差分别经过低噪声放大,为减小信号传输通道相位不一致性而影响跟踪性能,差路信号四相调制后直接与和信号合成形成单通道调制器信号,最后将合成信号下变频至 C 频段后输出到中频模块。中频模块首先将 C 频段单通道调制器信号经下变频至固定中频 40 MHz,然后由中频数字处理单元进行误差信号解调,产生方位误差信号  $\Delta_{AZ}$  和俯仰误差信号  $\Delta_{EL}$ ,并作为控制信号送至捕获跟踪控制器。跟踪接收机结构如图 4 所示。

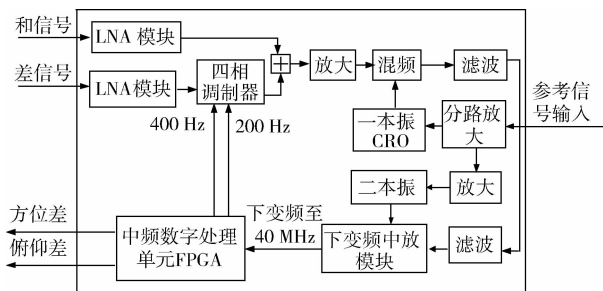


图 4 Ka 跟踪接收机原理框图

#### 2.2.1 和差信号单通道合成

和、差信号分别经过低噪声放大  $K_s$  和  $K_d$  后变为

$$e_s = K_s A_m \cos \omega t \quad (3)$$

$$e_d = \mu \theta K_d A_m \cos(\omega t + \varphi + \alpha) \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为和、差信号从天线馈源输出后经过不同信道带来的相对相位差。

用 200 Hz 和 400 Hz 方波信号对差信号(式

(4) 进行四相调制, 调制后的差信号为<sup>[5]</sup>

$$e'_d = \mu\theta K_\Delta A_m \cos[\omega t + \varphi + \beta(t) + \alpha] \quad (5)$$

$$\beta(t) = \begin{cases} 0, & 2nT \leq t < 2nT + \frac{T}{4} \\ \frac{\pi}{2}, & 2nT + \frac{T}{4} \leq t < 2nT + \frac{T}{2} \\ \pi, & 2nT + \frac{T}{2} \leq t < 2nT + \frac{3T}{4} \\ \frac{3\pi}{2}, & 2nT + \frac{3T}{4} \leq t < 2nT + T \end{cases} \quad (6)$$

将调制后的差信号经过定向耦合器后, 与和信号合成, 合成信号为

$$u_c(t) = e_s + e'_d = K_\Sigma A_m \cos\omega t + \sqrt{M}(\mu\theta) K_\Delta A_m \cos(\omega t + \varphi + \beta(t) + \alpha) \quad (7)$$

式中:  $M$  为定向耦合器的系数, 一般取 8 ~ 12 dB。

### 2.2.2 角误差电压的提取

合成信号经下变频到中频, 经放大、AGC 调整后, 由式(7)得

$$u_c(t) = c(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

$c(t)$  为合成信号的包络。设计时, 一般  $K_\Sigma \approx K_\Delta$ , 并且在  $M$  和  $\theta$  很小时, 经过检波滤除直流分量可得

$$c(t) = K_\Delta A_m \sqrt{M}(\mu\theta) \cos[\beta(t) + \varphi + \alpha] \quad (9)$$

在 FPGA 内用 200 Hz 和 400 Hz 方波信号对调幅信号进行四相相干解调, 在四相 QPSK 相位调制的一个周期内, 根据  $\beta(t)$  的不同取值有

$$c(t) =$$

$$\begin{cases} U_{A1} = +K_\Delta A_m \sqrt{M}(\mu\theta) \cos(\varphi + \alpha), & t = 0 \sim t_1 \\ U_{A2} = -K_\Delta A_m \sqrt{M}(\mu\theta) \cos(\varphi + \alpha), & t = t_1 \sim t_2 \\ U_{E1} = -K_\Delta A_m \sqrt{M}(\mu\theta) \sin(\varphi + \alpha), & t = t_2 \sim t_3 \\ U_{E2} = +K_\Delta A_m \sqrt{M}(\mu\theta) \sin(\varphi + \alpha), & t = t_3 \sim t_4 \end{cases} \quad (10)$$

在时间  $t = 0 \sim t_2$  范围内, 可得

$$\Delta U_A = \Delta U_{A1} - \Delta U_{A2} = 2K_\Delta A_m \sqrt{M}\mu\theta \cos(\varphi + \alpha) \quad (11)$$

在时间  $t = t_2 \sim t_4$  范围内, 可得

$$\Delta U_E = \Delta U_{E1} - \Delta U_{E2} = -2K_\Delta A_m \sqrt{M}\mu\theta \sin(\varphi + \alpha) \quad (12)$$

$\Delta U_A$  和  $\Delta U_E$  就是方位误差和俯仰误差的电压值。

### 2.2.3 和、差支路相位校准

和、差支路在单通道合成前, 由于温度、电路参数等因素, 和、差支路信号存在的相位差, 会导致方

位/俯仰产生交叉耦合, 影响跟踪效果<sup>[8]</sup>。因此, 必须将式(11)和(12)中的  $\alpha$  消除。文献[2]中的方案是用移相器进行校准, 该跟踪接收机不再采用移相器实现和、差支路的相位校准, 而是采用数字方案实现, 即采用旋转因子对方位差  $\Delta A$  与俯仰差  $\Delta E$  进行解耦合处理:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{AZ} \\ \Delta_{EL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_E \end{bmatrix} \quad (13)$$

由上式得

$$\Delta_{AZ} = 2K_\Delta A_m \sqrt{M}\mu\theta \cos\varphi \quad (14)$$

$$\Delta_{EL} = -2K_\Delta A_m \sqrt{M}\mu\theta \sin\varphi \quad (15)$$

由于是软件补偿相位, 所以由模拟移相器改为数字调整后, 采用 8 bit 数据, 移相精度提升到  $1.4^\circ$ 。方位差  $\Delta_{AZ}$ 、俯仰差  $\Delta_{EL}$  输入捕获跟踪控制器, 用于驱动天线闭环控制。

### 2.3 天线伺服设计

天线伺服由捕获跟踪控制器、X-Y 型机械跟踪天线组成。天线驱动单元由步进电机、谐波减速器及旋转变压器等部件组成。控制器完成控制算法计算、电机驱动等功能; 电机采用两相混合式步进电机, 为实现低速平稳驱动天线, 其驱动方式为微步恒流斩波驱动<sup>[9]</sup>。

捕获跟踪控制器具备程序跟踪和自动跟踪功能。当接收到自动跟踪使能指令后, 控制器接收跟踪接收机的  $V_{AGC}$ 、方位差  $\Delta_{AZ}$  和俯仰差  $\Delta_{EL}$ , 自动跟踪中继星。自动跟踪控制策略需要解决两个问题: 1) Ka 跟踪接收机每 100 ms 周期更新数据, 由此会引起相位滞后, 造成控制带宽受限; 2) Ka 跟踪接收机在信标源低信噪比情况下, 输出的方位差俯仰差信息所含噪声比较大, 由此引起的跟踪误差较大。自动跟踪控制策略采用变参数 PI 算法, 根据 AGC 值的大小, 判断信标源是否为低信噪比。在高信噪比情况下, 采用大系数提高控制系统带宽; 在低信噪比情况下, 采用小系数降低干扰对跟踪精度的影响, 实现控制带宽的动态调整。

## 3 仿真校验

### 3.1 仿真模型

在自动跟踪模式下, 系统的仿真模型见图 5。

图 5 中, 跟踪接收机模型接收来自电机的位置信号、系统的位置给定信号, 以及输出电流控制器所需的转速信号。跟踪接收机模型见图 6。

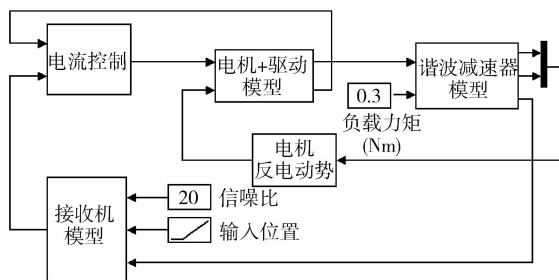


图 5 自动跟踪模式仿真模型

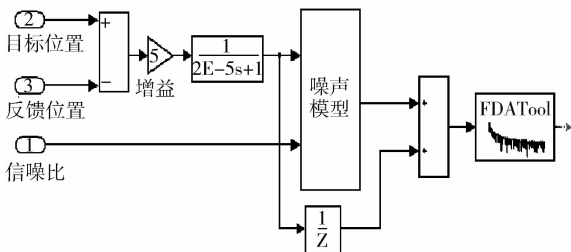


图 6 跟踪接收机模型框图

跟踪接收机接收信号采用 1 个传递函数,并在获取的信号的基础上,叠加某一信噪比为 SNR 的高斯白噪声,FDATool 为 FIR 低通滤波器模型。跟踪接收机的白噪声信号模型为

$$\Delta = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{2000} \delta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{2000} \sigma_i\right)^2} - \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{2000} \lambda_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{2000} \chi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{2000} \delta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{2000} \sigma_i\right)^2} + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{2000} \lambda_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{2000} \chi_i\right)^2}} \quad (16)$$

式中:  $\delta_i, \sigma_i, \lambda_i$  和  $\chi_i$  均为互不相关的随机白噪声。

表 1 仿真参数

部件	参数	数值
步进电动机参数	转子齿数	50
	定子绕组电阻	8 Ω
	电感	0.033 H
	转矩系数	0.2 Nm/A
	反电势系数	0.2 Nm · s/rad
	摩擦阻力系数	0.05
	转动惯量	0.3 kg · cm <sup>2</sup>
	直流母线电压	15 V
	电流额定值	0.6 A(有效值)
	电机驱动类型	微步恒流驱动
	细分数	64
谐波减速器参数	刚度系数	1.83 × 10 <sup>3</sup> Nm/rad
	齿间侧隙	空回 4'29"
	减速比	100
	传动效率	53.6%
角度传感器参数	类型	双通道旋转变压器
	电气精度	60"
	角度分辨率	0.00549°
跟踪接收机参数	数据更新周期	100 ms
	方位差,俯仰差输出范围	-5V ~ +5V

### 3.2 仿真结果

根据建立的跟踪接收机模型,进行仿真。当俯仰轴给定信号以恒定速度运转,方位轴保持固定,输入信号为斜坡信号,得到相应的仿真结果如图 7 所示。

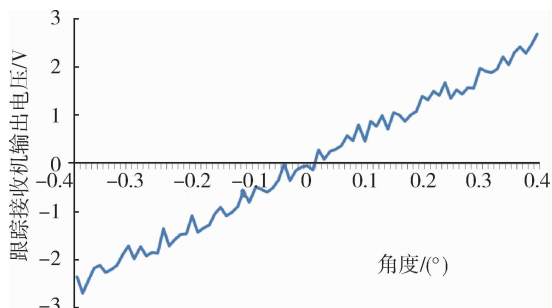


图 7 跟踪接收机仿真数据

横坐标输入位置从 -0.4° ~ 0.4° 变化时, Ka 跟踪接收机输出电压信号,图中所示的波动为由于噪声信号引起的波动。

## 4 外场捕跟试验

捕获跟踪系统的自动跟踪功能和性能需要在远场完成测试验证<sup>[10]</sup>,测试系统框图见图 8。信标天线安置在龙门架的升降舱内,用户星天线安装在二轴转台,转台上安装配重零重力卸载装置<sup>[11-12]</sup>。远场自动跟踪测试项目主要包括和差通道相位校准验证、不同性噪比下的 S 曲线测试以及动态跟踪测试等。

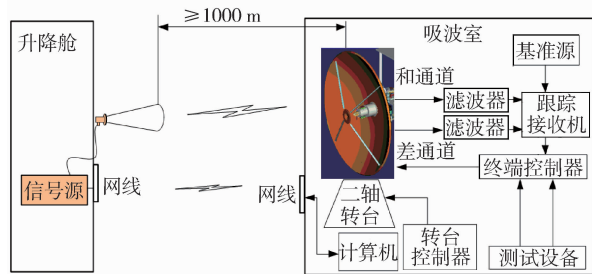


图 8 远场自动跟踪试验测试框图

首先,完成和差通道的相位校准。由于从用户星终端天线馈源输出的和差信号到 Ka 跟踪接收机的波导通道之间存在相位差,该相位差未知,需要测试出该相位差,即式(4)中的  $\alpha$ 。然后进行不同信噪比下的 S 曲线测试,确定 S 曲线线性区的斜率以及和差通道的交叉耦合。动态跟踪测试验证控制参数和自动跟踪精度。

### 1) S 曲线测试

保持方位轴固定,俯仰轴匀速扫过信标  $\pm 0.4^\circ$  范围,测试 S 跟踪曲线如图 9 所示。图中横坐标为角度。

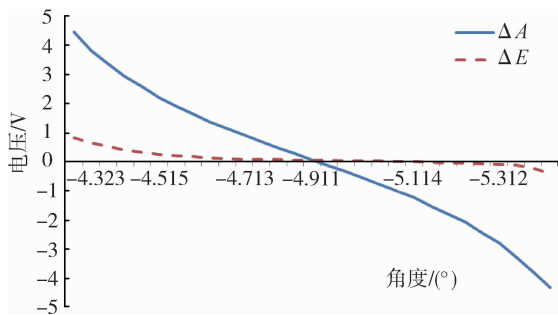


图 9 跟踪接收机 S 曲线

从图 9 中可得,方位误差  $\Delta A$  在  $\pm 0.4^\circ$  范围内基本呈线性,输出电压量程为  $\pm 5$  V,俯仰误差  $\Delta E$  接近 0。在  $\pm 0.4^\circ$  线性范围内,方位轴和俯仰轴的交叉耦合可以忽略,在接近  $\pm 0.4^\circ$  附近,交叉耦合现象增强, $\Delta E$  误差逐渐增大, $\Delta A$  曲线斜率改变。

### 2) 动态拉偏测试

将 Ka 天线沿方位轴拉偏信标天线一定角度,相当于输入阶跃信号,测试跟踪信标的动态性能和稳态误差。测试方位误差  $\Delta A$  结果见图 10。 $\Delta A$  从拉偏到对准信标天线动态过程有一定超调,稳态跟踪误差小于 0.1,基本对应 S 曲线中  $0.039^\circ$ ,该值即稳态误差。

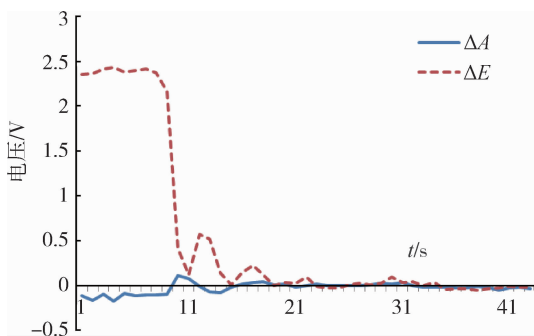


图 10 自动跟踪响应曲线

## 5 结 论

提出了适用于星间链路天线自动跟踪的系统组成以及关键技术,并建立自动跟踪模型,该模型考虑有噪声影响,以仿真信标天线在不同信噪比下的跟踪性能。通过实际产品测试验证了捕获跟踪系统仿真的正确性。

在完整的实际产品基础上进行自动跟踪系统远场测试,以验证系统功能及性能。通过远场测试,可以验证自动跟踪 S 曲线、跟踪信标天线的动态响应和稳态误差。远场测试结果表明该系统可以满足任务指标要求。

## 参 考 文 献

- [1] 王磊,姬涛,郑军. 中继卫星系统发展应用分析及建议[J]. 中国科学,2022, 52(2):303-317. (WANG Lei, JI Tao, ZHENG Jun. Investigations and proposals for data relay satellite systems [J]. Science China, 2022, 52(2):303-317.)
- [2] 万晓光. 星载单通道单脉冲自跟踪系统设计[J]. 电讯技术,2015,55(10):1130-1131. (WAN Xiaoguang. Design of a spaceborne single-channel monopulse auto-tracking system [J]. Telecommunication Engineering. 2015, 55(10):1130-1131.)
- [3] SANTOSH L, PANKAJ K G. Generic digital monopulse tracking receiver for advanced communication satellites [C]//IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies, Cholula, Mexico,2015:1-5.
- [4] 苏醒,张宇环,匡全进. 一种新型星间链路天线结构设计及仿真[J]. 航天制造技术,2021, 8(4):24-29. (SU Xing, ZHANG Yuhuan, KUANG Quanjin. Structure design and simulation of novel inter-satellite link antenna [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021, 8(4):24-29.)
- [5] 郭高龙. 一种小型化 Ka 频段跟踪接收机的研究[D]. 成都电子科技大学,2019. (GUO Gaolong. Research on a miniaturized Ka band tracking receiver[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.)
- [6] WU B T, ZHOU Y H, LIN X L. A phase compensation method for monopulse tracking receiver of ship-borne satcom station [C]//16th International Conference on Optical Communications and Networks, Wuzhen, China, 2017:1-3.
- [7] ZHENG Z, ZHAI J, JIA D R. The principle and implementation of monopulse antenna angle error signal simulator [C]//8th IEEE International Conference on Communication Software and Networks, Beijing, China, 2016:249-253.
- [8] CHEN K, WANG Y, YAO X L. Research on the calibration of amplitude phase consistency based on the system of multi-mode self-tracking [C]//IEEE International Conference on Safety Produce Information, Chongqing,

- China,2018;231-234.
- [ 9 ] 董毅,陈伟,李臣政. 高分五号卫星数传天线指向机构系统技术研究[J]. 上海航天,2019,36:73-78. (DONG Yi, CHEN Wei, LI Chenzheng. Technology research of GF-5 digital transmission antenna pointing mechanism system[J]. Aerospace Shanghai,2019,36:73-78.)
- [10] 苗常青,杨显强. 一种高精度中继卫星捕获跟踪外场无线试验方法[J]. 航天器工程,2018,27(6):114-115. (MIAO Changqing,YANG Xianqiang. High-precision method of outfield wireless test for data relay satellite acquisition and tracking[J]. Spacecraft Engineering, 2018,27(6):114-115.)
- [11] 王舒燕,吴芊,杨磊. 大承载低扰动六自由度磁卸载机构的设计[J]. 航天控制,2023,41(2):81-87. (WANG Shuyan, WU qian, YANG Lei. Design of six-degree-of-freedom unloading mechanism with large load and low disturbance[J]. Aerospace Control, 2023,41(2):81-87.)
- [12] 侯管仲,许煜. 星载机械可动天线地面零重力卸载概述[J]. 空间电子技术,2018,15(1):75-78. (HOU Guanzhong, XU Yu. Investigation on zero-g off-loading in mechanical turn satellite antenna on ground[J]. Space Electronic Technology,2018,15(1):75-78.)