

文章编号: 1001 - 893X(2012)06 - 0948 - 04

单脉冲天线角度跟踪模拟技术*

苏 勋

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:通过对单脉冲天线方向图数学模型的研究,提出了一种角度跟踪模拟方法。采用信标和数控衰减器组合的方式,结合 VxWorks 操作系统成功实现了天线主、副瓣信号的模拟,工程应用情况良好,对当前武器装备仿真模拟训练系统的研制具有重要的参考价值。

关键词:测控系统;单脉冲天线;天线方向图;偏离角模拟;天线副瓣

中图分类号: TN82; V556 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.023

Angle Tracking Simulation Technology for Monopulse Antenna

SU Xun

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: An angle tracking simulation method is proposed based on mathematic model of the monopulse antenna pattern. Signal simulation of both main lobe and side lobe of the antenna is successfully realized on the platform of VxWorks operation system by adopting both beaconing and digital controlled attenuator. The proposed simulator works well in engineering application. The work in this paper has important reference to the research of simulation training system for current weapon equipment.

Key words: TT&C system; monopulse antenna; antenna pattern; deviation angle simulation; antenna side lobe

1 引言

仿真模拟训练系统的研制是当前武器装备建设的重要内容,在测控领域已经引起了广泛关注。对靶场测控系统使用的训练模拟器而言,模拟内容包括角跟踪性能模拟、距离和速度动态模拟^[1-3]、遥测遥控功能模拟、数传接收解调性能模拟等多项具体内容,其中角跟踪性能的仿真模拟难度较大。

测控系统中角度捕获是关键,它关系到整个测控活动的成败。S 频段测控系统可以通过跟踪过境卫星进行角度捕获的任务演练,但对于 C 频段测控系统,由于没有过境的低轨卫星跟踪,测控系统缺少一种可随时对设备跟踪性能进行检查、模拟演练的环境,因此有必要研究一种角跟踪模拟设备,与测控系统的天线与接收分系统一起构成角跟踪闭环系统,通过模拟各种测控活动前的校相过程、实际捕获

过程,以达到对岗位人员进行实景训练提升技能的目的。

2 角跟踪仿真模拟原理

角跟踪模拟器以射频信号源、数控衰减器、数控移相器、信号处理单元为基础构建硬件模拟环境,模拟信号从高频接收机场放输入端注入测控系统。根据天线和路/差路信号幅度归一化数学模型进行波束跟踪信号仿真,可得到天线波束捕获目标过程中完整的和路/差路信号电平、天线偏离角、误差电压理论值等原始数据;通过天线对塔标校可获得跟踪系统的 AGC - S/Φ 曲线、和路与差路信号在波束内的真实幅度差值。据此可建立天线偏离角与角误差信号之间的参数映射表,存储在信号处理单元中以备调用。

进行系统跟踪性能模拟仿真时,根据所选飞行

* 收稿日期:2012-03-05;修回日期:2012-05-18

器的理论轨道预报数据,通过数字引导(或手动)方式将天线置于目标进站点,采用时间符合方式控制系统模拟进程。待目标进入天线波束以后,角跟踪模拟器根据轨道预报值与天线当前实际指向值之间的角度偏差,分别计算出天线指向的方位和俯仰偏离角;根据天线偏离角,通过查表方式从角误差映射表中获取方位、俯仰误差模拟衰减器的相应衰减量,模拟产生馈源激励出的和、差电压信号。和路、差路跟踪信号再经过高频接收链路放大、下变频后送中频跟踪接收机,在跟踪接收机中进行角误差信号解调,输出角误差信息给天线控制单元,完成系统角度闭环跟踪。

通过仿真模拟软件,瞬间切断角跟踪模拟器输出的和路、差路信号,可以模拟目标突然丢失的情况,来辅助训练岗位人员快速、重新捕获目标的应对能力。

角跟踪性能的仿真模拟工作原理如图 1 所示。

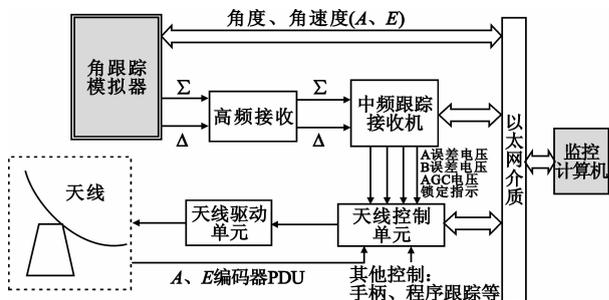


图 1 角跟踪模拟器工作原理框图

Fig.1 Operation principle diagram of the angle tracking simulator

3 角度跟踪模拟功能实现方案

3.1 双通道单脉冲体制角误差信号数学模型

为了提高跟踪精度,TT&C 测控站使用的双通道单脉冲天线大部分采用多模馈源结构。在接收单频信号时,以天线三轴中心为原点建立 XOY 平面测量坐标系,如图 2 所示。

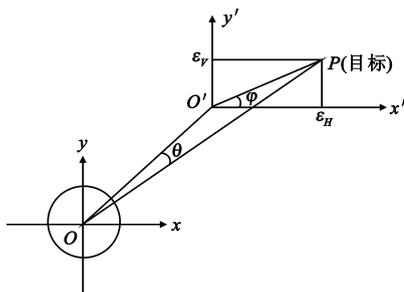


图 2 地面站测量坐标系示意图

Fig.2 Sketch map of measurement reference frame of the ground station

当角度误差 θ 很小时,天线接收到的和路信号 (Σ) 可以表示为

$$s_{\Sigma}(t) = A \cos \omega_c t \quad (1)$$

差路信号 (Δ) 可以表示为

$$s_{\Delta}(t) = A\mu\theta \sin(\omega_c t + \varphi) \quad (2)$$

式中, ω_c 为单频信号频率, A 为信号幅度, μ 为天线归一化差斜率, θ 为入射电波与天线电轴之间的夹角, φ 为入射电波在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角。

差信号进一步表示为

$$s_{\Delta}(t) = A\mu\theta \sin(\omega_c t + \varphi) =$$

$$A\mu\theta \sin(\omega_c t) \cos(\varphi) + A\mu\theta \sin(\varphi) \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

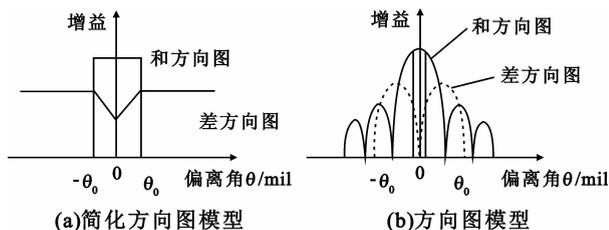
由上式可以看出,差信号的前项为方位误差信号,后项为俯仰误差信号。差信号 $s_{\Delta}(t)$ 在跟踪接收机中进行相干鉴相,和信号相移 90° 后与差信号相乘鉴相得到方位误差信号,和信号与差信号相乘鉴相得到俯仰误差信号,低通滤波后得到方位误差电压 U_A 和俯仰误差电压 U_E 分别为

$$U_A = K_s \mu \theta \cos(\varphi) \quad (4)$$

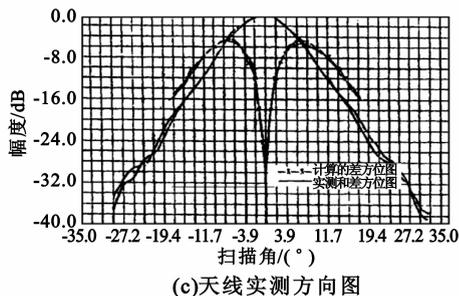
$$U_E = K_s \mu \theta \sin(\varphi) \quad (5)$$

式中, K_s 为鉴相器增益因子。由式(4)、(5)可以看出,方位、俯仰的角误差信号与目标偏离天线电轴的角度 θ 成正比。

利用式(1)、(2)可以建立单脉冲天线方向图的简化模型,如图 3(a)所示,该模型适用于信号入射方向与天线电轴偏离角度不大的情况(差波束线性区内)。当偏离角 θ 较大时(非线性区),可采用图 3(b)所示方向图模型,该模型由若干抛物线构成,是对实际天线和差方向图的近似。图 3(c)是一个天线实际测量出的和差方向图的一部分。



(a)简化方向图模型 (b)方向图模型



(c)天线实测方向图

图 3 天线方向图建模曲线

Fig.3 Modeling curve of antenna pattern

3.2 硬件设计

根据天线方向图简化模型构建的模拟电路原理如图4所示。信标单元模拟产生卫星或飞船的下行射频信号,工作频率由信号处理单元控制。接口卡与天伺馈分系统轴角编码器通信,实时获取天线角度数据 A' 、 E' ,并将天线实时角度数据送主CPU卡。主CPU卡接收 A' 、 E' 和轨迹数据文件提供的天线 A 、 E 角度值,并完成方位偏离角和俯仰偏离角的实时计算,计算结果送信号处理单元。信号处理单元完成相应的数值换算,通过 A 、 E 方向图归一化差信号幅度查表,实现对角度模拟衰减器衰减量的数字化控制。

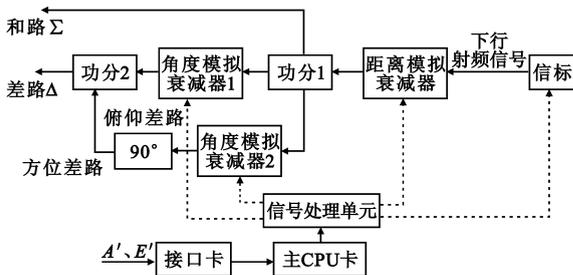


图4 角误差信号模拟原理框图

Fig.4 Principle diagram of angle error signal simulation

下行射频信标信号送距离模拟数控衰减器,地面站到目标的空间距离模拟功能完成后,射频信号送往功分器1进行信号分路。和路信号直接输出,差路信号分为方位差和俯仰差两路信号。两路差信号分别送衰减范围为40 dB的偏离角模拟衰减器1、2,角度模拟控制到位后,将方位差路信号移相 90° 后与俯仰差路信号合成一路输出。按照目标当前的距离值对距离模拟衰减器进行信号电平控制,将天线的 A 、 E 归一化差方向图关系表存放在信号处理单元中,根据偏离角度随时调用差信号衰减量,控制偏离角模拟衰减器1、2,即可实现角误差信号的模拟功能。

3.3 角度模拟软件设计

角跟踪模拟器软件主要功能如下:完成硬件模块状态参数的实时监控、控制及管理;模拟产生轨迹数据文件或接收监控台的轨迹数据文件;接收天伺馈分系统的实时角度数据,经过合法性判决、处理后转发至信号处理单元。角跟踪模拟软件由监控软件、通信和目标模拟软件两部分组成。

监控软件采用 Windows XP SP2 操作系统,提供

良好的人机交互界面,用于对硬件电路参数和工作状态进行监视、设置,将采集的各类信息上报监控分系统,产生轨迹数据文件等。

通信和目标模拟软件采用 VxWorks 5.5 实时操作系统,用于完成轨迹数据文件、天伺馈分系统实时角度数据的实时接收、处理、定时发送任务。

3.4 天线副瓣的模拟

当天线指向偏离目标角度较大时,目标将落入地面天线副瓣。在副瓣间的一定区域,通过天线接收到目标信号的特性与主瓣接收到的目标特性相同,当伺服操作手经验不足时,往往会误认为目标已经捕获,错误地将天线切换为自跟踪状态。靶场测试结果表明,副瓣接收到的信号误差电压线性范围更小,信号不稳定,采用副瓣跟踪很容易丢失目标,甚至出现天线飞车现象。因此,通过对天线副瓣的仿真模拟,让操作手对副瓣信号的特性有更深入的认识,对于保障测控活动的圆满成功意义重大。

经过外场试验研究,天线副瓣信号与主瓣信号的主要差异如下:信号幅度相差14 dB以上(第二副瓣-20 dBc左右、三阶副瓣-30 dBc左右、远旁瓣电平小于-40 dBc);副瓣跟踪目标时,误差电压线性范围、差斜率不再遵循主波束跟踪线性度的设计要求,极化特性、电平稳定性能严重恶化,难以稳定跟踪目标。天线副瓣信号模拟时需要体现上述特征。

为了真实、准确地模拟出天线副瓣的信号特征,以外场实际测量出的天线方向图为依据,准确绘制出主波束以外各个角度上的和差信号幅度差-偏离角关系、和差信号幅度差-误差电压关系、偏离角-误差电压关系、偏离角-AGC电压关系4组定标曲线(偏离角包括方位、俯仰二维),建立数据映射表;通过查表方法获取和差信号幅度差的控制量,直接对图4中角度模拟衰减器、距离模拟衰减器进行控制,即可实现天线副瓣接收信号的模拟。

3.5 角度模拟精度

角度模拟精度主要取决于以下两个方面的制约因素:一是硬件设备的控制精度,即角度模拟衰减器的步进精度;二是轨迹模拟数据的软件控制精度。

3.5.1 硬件设备精度分析

根据式(3), $\theta\cos\varphi$ 为方位偏离角度, $\theta\sin\varphi$ 为俯仰偏离角度,其模拟完全由衰减器实现,因此角度模拟精度与数控衰减器的精度有关。

由天线差斜率的定义,可推导出和差信号幅度

差 ΔA (即衰减器的衰减量) 与目标偏离角度之间的关系。令 $\zeta_1 = \theta \cos \phi$, $\zeta_2 = \theta \sin \phi$, 则有

$$\Delta A(\text{dB}) = \frac{16.67(\text{mil}) \times 10^{\frac{\zeta_1}{\mu}}}{\mu} = \frac{16.67(\text{mil}) \times 10^{\frac{\zeta_2}{\mu}}}{\mu} \quad (6)$$

式(6)说明偏移角度 ζ_1 、 ζ_2 的模拟精度不仅与衰减器的精度有关,也和模拟角度的大小有关,而衰减器的精度随着衰减量的增大而变差。

射频数控衰减器的控制精度与衰减量大小相关,当衰减量为 20 ~ 40 dB 时,衰减器控制精度为 0.2 ~ 0.4 dB;当衰减量为 0 ~ 10 dB 时,衰减器控制精度可达到 0.2 dB。

实际模拟过程中, ζ 不超过 10 mil (对应最大角误差电压 5 V)。数控衰减器精度按 0.2 dB 计算,控制精度最差为 0.15 mil (约 0.009°, 对应最小角误差电压 75 mV), 即方位、俯仰角度控制精度可以达到 0.15 mil, 不会对交差耦合以及自跟踪产生影响。

3.5.2 软件精度分析

软件的精度主要取决于偏离角数据的获取,以及模拟控制的实时响应精度。

角度数据的实时接收、处理、定时发送采用 Vx-Works 5.5 实时操作系统来实现。VxWorks 实时操作系统与 Windows 相比,具有高优先级任务可快速强制执行、数据传送时延稳定等优点。

通信和目标模拟数据从网络传输到 CPCI 总线需要经过如下几个步骤,消耗时间如下。

(1) 从网络接收数据耗费时间

TCP/IP 协议栈时间 $T1 < 300 \mu\text{s}$ (1 500 byte/packet), 网络接收函数时间 $T2 < 15 \mu\text{s}$, 数据预处理时间 $T3 < 20 \mu\text{s}$ 。

(2) CPCI 发送耗费时间

队列发送时间 $T4 < 1.5 \mu\text{s}$, 任务切换时间 $T5 < 2 \mu\text{s}$, 队列接收时间 $T6 < 1 \mu\text{s}$, CPCI 发送时间 $T7 < 100 \mu\text{s}$ (估算)。

总耗费时间: $T1 + T2 + T3 + T4 + T5 + T6 + T7 < 450 \mu\text{s}$ 。

按照模拟角速度 $10^\circ/\text{s}$ 来计算, $450 \mu\text{s}$ 引入的角度滞后误差为 0.075 mil, 对应角误差电压 40 mV, 完全不会对角度自跟踪稳定性带来影响。

4 工程验证情况

目前, S/C 频段角跟踪模拟器已研制完成, 并在外场开展了系统联试和验收测试。角跟踪模拟器按

图 1 接入现役测控设备构成角跟踪闭环系统, 由轨迹数据文件模拟产生校飞飞机 (或过境卫星) 的运行轨迹、径向距离、角度数据; 模拟器输出包含有天线偏离角度、目标距离等信息的射频模拟信号, 馈送至跟踪信道。通过多次模拟试验, 模拟产生的空间运动目标与任务中真实目标的运动特性无明显区别, 角度捕获整个过程与实际测控活动中的捕获过程一致, 伺服系统自跟踪正常、平稳, 满足用户使用要求。

5 结束语

采用上述方法研制的角跟踪模拟器目前已经在测控系统中成功应用。角跟踪模拟器可真实地模拟天线产生的主瓣、副瓣信号、角误差信号, 模拟校相过程、角度捕获过程、自跟踪过程与实际参加测控的流程相同。系统联式中发现, 软件的精度以及角度数据的频率对角跟踪模拟的性能影响较大, 如何提高角度数据的频率是需要进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 刘嘉兴. 基于运动方程的动态模拟方法[J]. 电讯技术, 2010, 50(5): 1-4.
LIU Jia-xing. Dynamic simulation method based on motion equation[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(5): 1-4. (in Chinese)
- [2] 邓永铭. 采用开环模式实现深空动态模拟源设计[J]. 电讯技术, 2009, 49(7): 73-76.
DENG Yong-ming. Implementation of dynamic simulating source design by using open loop mode[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(7): 73-76. (in Chinese)
- [3] 雷鸣, 李珂. 采用闭环双口 RAM 实现深空动态模拟器的设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(3): 33-36.
LEI Ming, LI Ke. Design of dynamic simulating source for deep space communication by using close loop dual-port RAM[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(3): 33-36. (in Chinese)

作者简介:

苏 勋(1977—), 女, 四川三台人, 2001 年于电子科技大学获学士学位, 现为工程师, 主要研究方向为飞行器测控总体技术。

SU Xun was born in Santai, Sichuan Province, in 1978. She received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2001. She is now an engineer. Her research concerns TT&C communication system for aerial vehicles.

Email: suxun20081225@163.com