

单通道单脉冲跟踪系统自动校相的设计与实现

钟水和, 王建, 潘尧成, 陈玉龙

(中国酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

摘要:针对传统手动校相存在操作时间长、精度差的缺点,提出了连续波测速雷达的自动校相技术;研究了单通道单脉冲跟踪原理,建立了连续波测速雷达的自动校相模型,采用程序技术实现对连续波测速雷达全自动校相;试验结果表明:采用该技术对连续波测速雷达校相后,其交叉耦合优于 $1/20$,收敛特性好。

关键词:单通道单脉冲;连续波测速雷达;交叉耦合;自动校相

本文引用格式: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.

Citation format:ZHONG Shui-he, WANG Jian, PAN Yao-cheng, et al. Design and Implementation of Auto Phasing for Single Channel Monopulse Tracking System[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(7):97-99.

中图分类号:TN953

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)07-0097-04

Design and Implementation of Auto Phasing for Single Channel Monopulse Tracking System

ZHONG Shui-he, WANG Jian, PAN Yao-cheng, CHEN Yu-long

(Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

Abstract: Aiming at the shortage of long manipulate time and pour precision during the traditional manual phasing, an auto phasing technology of CW velocity radar was put forward. The auto phasing model was established for CW velocity radar which was based principle of single channel monopulse tracking. The program technology was taken for realize the auto phasing of CW velocity radar. The experiment result shows: the cross-coupling is better than $1/20$ and the convergence is better than before after taking the auto phasing technology at CW velocity radar.

Key words: single channel monopulse; CW velocity radar; cross-coupling; auto phasing

单脉冲自跟踪是一种零值自动跟踪体制,具有动态响应快、跟踪精度高的特点。利用差模电磁场的天线方向图,以轴向为零值,偏轴有极性的特点来实现自动跟踪的^[1-3]。与多通道接收机相比,单通道具有设备简单、影响跟踪性能的和、差通道相位一致性易调制、易保持等特点^[4],单脉冲单通道(Single Channel Monopulse, SCM)跟踪体制广泛应用于各种业务类型的自跟踪系统中。

由于天线电轴漂移、环境温度变化或天线极化跟踪等多种因素的影响引起和差通道相对相移,使得交叉耦合指标不断恶化^[4]。因此,必须定期对单通道单脉冲跟踪系统的和差通道相位差进行校正。传统手动校相采用人为干预的方法,

手动偏开天线,之后调整跟踪接收机的相位和差斜率参数,使交叉耦合和误差电压斜率达到系统要求。

传统手动校相存在操作时间长,精度差等缺点,文中分析了单通道单脉冲跟踪原理,建立了连续波测速雷达的自动校相模型,采用程序技术实现了对测速雷达自动校相,进一步提高了单脉冲单通道自跟踪系统的跟踪精度。

1 单通道单脉冲跟踪原理

本文所述的是以馈源网络中 TE₁₁ 模为和通道信号,以 TE₂₁ 模为差通道信号来实现 SCM 跟踪的。SCM 跟踪系统

框图如图 1 所示,来波信号经天线反射面进入馈源网络,形成和信号与差信号。差信号经过调制后与和信号合成形成单通道信号。单通道信号经接收及解调出方位误差电压和俯仰误差电压,送给伺服系统,驱动天线始终对准目标。在多模自跟踪系统中,方位误差信号 ΔU_a 和俯仰误差信号 ΔU_e 已经正交混合成 $\Delta U_a + j \cdot \Delta U_e$ (j 为正交系数)^[5]。根据前段误差电压的特点,在进行正交鉴相分离前,加入通道移相器和正交移相器。

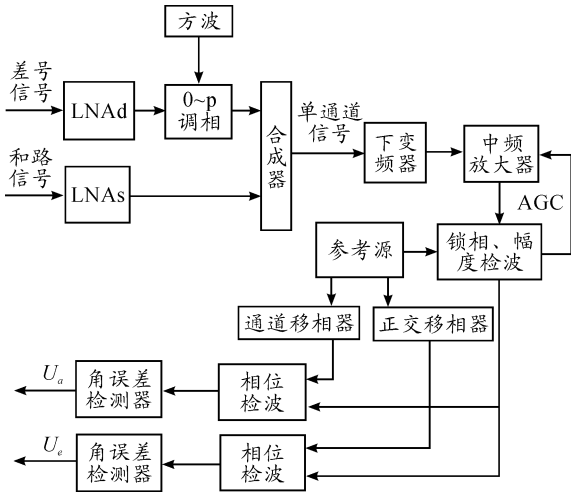


图 1 单通道单脉冲跟踪系统原理框图

假设目标与天线的角度关系如图 2 所示。 XOY 坐标系为垂直于天线电轴的目标平面^[2,5]。

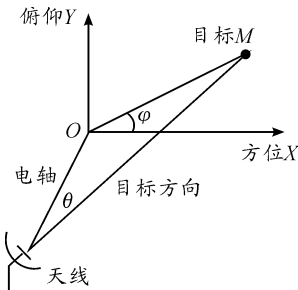


图 2 目标与天线的角度关系

当目标偏离天线电轴的角度 θ 很小时,从天线馈源所激励的和信号与差信号的表达式为

$$S_{\Sigma}(t) = A(r) \cdot \cos(\omega_c t + \gamma_1) \quad (1)$$

$$S_{\Delta}(t) = \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \sin(\omega_c t - \varphi - \gamma_2) \quad (2)$$

式中: $A(r)$ 为和信号幅度; ω_c 为载波角信号频率; μ 为天线归一化差斜率; φ 为跟踪坐标系下目标在目标平面与水平轴 X 的夹角; γ_1 为和通道相位; γ_2 为差通道相位; $0 \sim \pi$ 调相后的差信号为

$$S_{\Delta\text{调}}(t) = \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \sin(\omega_c t - \varphi - \gamma_2 + \psi(t)) \quad (3)$$

式(3)中, $\psi(t)$ 为低频调制信号,其波形如图 3 所示。 T 为调制周期, $F = 1/T$ 为调制频率, $\Omega = 2\pi F$ 。

$$S_{\Delta\text{调}}(t) = \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \sin(\omega_c t - \varphi - \gamma_2) \cdot \cos(\psi(t)) \quad (4)$$

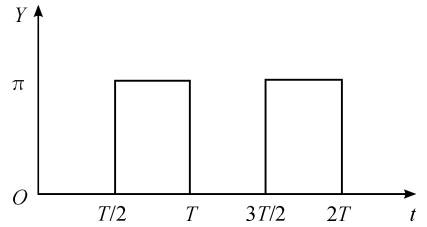


图 3 调制信号波形

合成后的单通道信号为

$$S(t) = S_{\Sigma}(t) + S_{\Delta\text{调}}(t) \quad (5)$$

与本地正交相干载波进行混频、低通滤波处理,再经移相器移相(为使和、差通道相移一致,设通道移相值为 γ_1 ,正交移相值为 γ_2),本地信号 $\sin(\psi(t))$ 混频滤波后得到:

$$\Delta U_a(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \cos\varphi \quad (6)$$

$$\Delta U_e(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \sin\varphi \quad (7)$$

以上两式就是解调的方位、俯仰误差电压。

2 建立校相模型

目标信号进入天线形成和信号与差信号经过较长的信道才进行单通道合成,和通道与差通道的相位关系随着时间的推移,由于温度、电路参数等因素会发生改变。这种和差相位的相对变化,会引起角误差特性变坏。

从方位俯仰误差的表达式来看,当和、差通道相移不一致时(即 $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2 \neq 0$),便会使方位、俯仰之路相互影响产生交叉耦合。

在连续波测速雷达中,理想情况下,当天线方位正向拉偏时, $\varphi = 0$,俯仰误差电压 ΔU_e 应为零;而由于 $\Delta\gamma$ 的存在, $\Delta U_e(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \sin\Delta\gamma$,不等于零。同样,当天线俯仰正向拉偏时, $\varphi = \pi/2$,方位误差电压 ΔU_a 应为零;而由于 $\Delta\gamma$ 的存在, $\Delta U_a(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \mu \cdot \theta \cdot A(r) \cdot \cos\Delta\gamma$,不等于零。

天线方位正向拉偏误差电压示意图如图 4 所示。图 4 中, U_s 为存在交叉耦合时的误差电压, U_L 为没有交叉耦合时理想的误差电压。建立自动校相模型就是通过调整自跟踪参数使得实际误差电压 U_L 变换成理想误差电压 U_s 。自跟踪参数包含通道、正交移相值和增益。

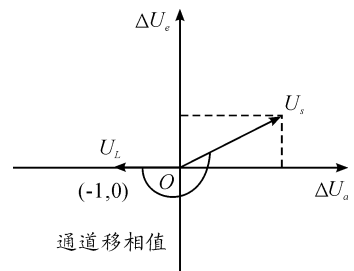


图 4 天线方位正向拉偏误差电压示意图

如图4所示,当天线方位正向拉偏时, $\varphi = 0$,通道移相值即为 U_s 和 U_L 的角度差 λ_1 。依据 U_s 所在的不同象限利用反三角函数计算得到^[8]。

$$\lambda_1 = \begin{cases} \pi + \arccos\left(\frac{\Delta U_a}{\sqrt{\Delta U_a^2 + \Delta U_e^2}}\right) & \Delta U_e \geq 0 \\ \pi - \arccos\left(\frac{\Delta U_a}{\sqrt{\Delta U_a^2 + \Delta U_e^2}}\right) & \Delta U_e < 0 \end{cases} \quad (8)$$

增益 K_a 由 U_s 和 U_L 的功率差得到。即

$$K_a(t) = 20 \cdot \lg \frac{|U_L|}{|U_s|} \quad (9)$$

当天线方位负向拉偏时, $\varphi = \pi$,通道移相值 $\lambda_2 = \lambda_1 - \pi$;当天线俯仰正向拉偏时, $\varphi = \pi/2$,正交移相值 $\lambda_3 = \lambda_1 - \pi/2$;当天线俯仰负向拉偏时, $\varphi = 3 \cdot \pi/2$,正交移相值 $\lambda_4 = \lambda_1 - 3 \cdot \pi/2$ 。

由于通道移相值在 $0 \sim 2\pi$ 之间,正交移相值在 $0 \sim \pi$ 之间,所以需要 对 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 进行适应性调整。最后将天线正偏和副偏计算的增益和移相值求平均及进行合理性检验后,得到方位、俯仰增益和通道、正交移相参数^[6-7]。

3 自动校相的设计与实现

和差通道移相在自跟踪解调模块之前,由本地两个正交的相位旋转因子与主载波环路输出的两路正交信号进行复乘,在数字域通过相位旋转的方法来实现。这种数字信号补偿的方式比以前通过调节模拟电压来实现移相的方法更为精确和稳定,对自动校相的参数设置也更为简便,有利于设备的一体化设计。

连续波测速雷达的自动校相过程由监控分系统、数字基带分系统和天伺馈分系统协同完成。操作流程是监控分系统完成信道配置,调节联试应答机输出信号为合适电平,使接收机处于中等接收电平;监控分系统发出自动校相命令启动自动校相过程,天伺馈分系统完成天线找零点,记录零点方位、俯仰值,数字基带分系统启动自动校相程序。自动校相流程图如图5所示。

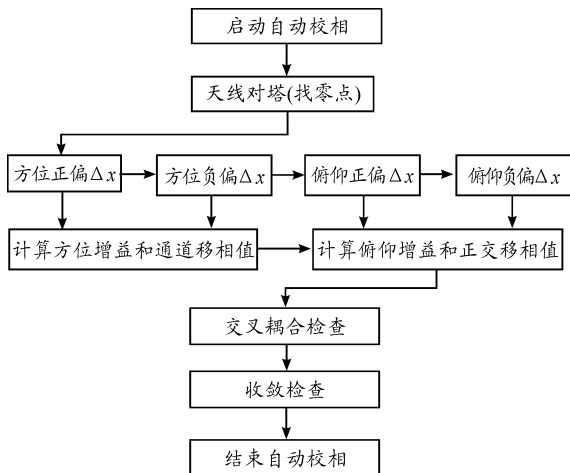


图5 自动校相流程

根据天线的 3 dB 波瓣宽度,设定天线偏移的角度为 8 mil;方位俯仰误差电压的采样间隔为 50 ms;天线偏移产生的方位俯仰误差电压采用 20 点求平均的方式获取。自动校相实现的效果图如图6所示。



图6 自动校相效果图

通过方位正向、方位负向、俯仰正向和俯仰负向拉偏 8 mil 检查交叉耦合情况,交叉耦合的最大值为 1/20。跟踪系统在对目标进行跟踪过程中,将跟踪接收机捕获并连续解调出的误差电压值描绘在直角坐标系上会构成一个点集。将这些点按照时间顺序连接后构成了一个有规律的曲线,称之为误差电压收敛曲线。

4 个象限的收敛轨迹曲线如图7所示。从曲线来看,在收敛过程中,轨迹表现为逆时针方向逐渐收敛于零点的螺旋线,曲线的曲率很大,收敛很迅速,具有良好的收敛特性。

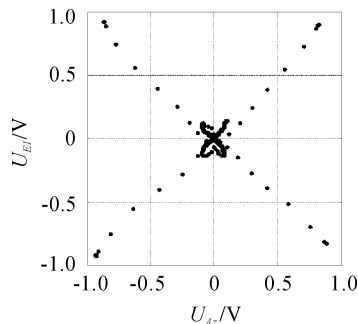


图7 收敛轨迹曲线

4 结束语

传统的手动校相方法,校相程序复杂、操作时间很长,而采用程序技术实现的自动校相方法简单可行,在短短几分钟内完成,交叉耦合优于 1/20,收敛特性好,满足了连续波测速雷达多点频、多设备组合条件下的快速校相,大大缩短了设备参加任务的准备时间。

经过校飞、执行任务等一系列考核,该雷达的自动校相稳定性好、可靠性高,具有很强的实用性。

期,算出时间值并显示在界面上,计算时间关键代码:

```
startPos = PRE_TRIG_POS;
//signal falling value 90%
ch2ThreadVal = signalADbuf [ PRE _ TRIG _ POS ]
* float(0.9);
fval = signalADbuf[ PRE_TRIG_POS];
for(i = PRE_TRIG_POS; i < sampleLen; i++)
{
    if((fval-signalADbuf[i]) >= ch2ThreadVal) //falling
edge
    {
        endPos = i;
        break;
    }
}
timeValue = (endPos-startPos)/float(65.0); //time u-
nit:us
```

4 结束语

本测量装置在研制中,针对性采取诸如滤波、模拟地与数字地间的隔离、电源隔离等一些抗干扰措施,为提高信号采样的准确性和减少外部信号干扰,所有连接线均采用高速屏蔽线,连接器选用射频连接器。在软件设计方面,采用了

分层和模块化设计思想,层次分明,功能明确,易于使用。该测量装置在经历了各项试验后,操作方便,工作正常、稳定、可靠,目前已在某型号项目成功应用。

参考文献:

- [1] PLX Technology Inc. PCI9054 Data Book Version2.1[M]. US:PLX Technology Inc,2000.
- [2] 武安河,邵铭,于洪涛. Windows 2000 /XPWDM 设备驱动程序开发[M]. 北京:电子工业出版社,2003:351-376.
- [3] 杨甘霖,蔡远文,姚静波,等. 基于CPCI总线的运载火箭脉冲信号多路采集卡[J]. 兵工自动化,2012,31(9):75-77.
- [4] 陈亮,江明,林园胜. 基于PSO算法的PID控制器参数优化研究分析[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2014,31(5):77-80.
- [5] 童鹏,吴新建. PCI9054 芯片接口设计中若干问题的深入研究[J]. 电子技术应用,2005,31(10):64-66.
- [6] 孙灯亮. 数字示波器原理和应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2012.

(责任编辑 杨继森)

(上接第99页)

参考文献:

- [1] 王玥. 单脉冲相控阵雷达通道不一致性校正方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2003.
- [2] 李靖. TE21 模单通道自跟踪系统[J]. 无线电通信技术,2005,31(6):42-44.
- [3] 杨锁强,林兴隆. 单脉冲跟踪系统中自动校相的设计与实现[J]. 信息通信,2011(3):23-24.
- [4] 李靖,李强,李硕. 单脉冲跟踪接收机相位自动校正的研究[J]. 无线电工程,2008,38(5):56-58.
- [5] 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.
- [6] 李白石,徐崇彦,付云起,等. 基于曲线拟合的单脉冲跟踪系统校相方法[J]. 现代雷达,2010,32(12):14-19.
- [7] 肖凯,周永辉. 不完全信号时内部交易[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2014,31(2):50-55.
- [8] 高山,李政. 高精度测速设备自动校相模型优化[J]. 导弹试验技术,2011(3):30-32.
- [9] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社,1979.
- [10] 高京龙. 单脉冲单通道跟踪体制精度分析方法[J]. 无线电工程,2007,37(7):32-34.
- [11] 乔博. 单脉冲角跟踪系统高精度实时校相技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.

(责任编辑 杨继森)