

# 基于 ADS 的 PCM/ FM 遥测系统 自跟踪信号的仿真\*

邢开亮<sup>1,2</sup>, 高勇<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

**摘要:**文中分析了在 PCM/ FM 遥测地面接收设备中广泛采用的比相单通道单脉冲测角原理。借助数学模型阐述了遥测系统自跟踪信号实现过程。利用 ADS 软件仿真了遥测自跟踪信号并进行结果分析。形象地阐述了 PCM/ FM 遥测地面接收设备中方位误差信号和俯仰误差信号的合成过程。对研究和调试遥测系统中自跟踪分系统具有一定的参考价值。

**关键词:**遥测; 自跟踪; PCM/ FM; ADS

**中图分类号:** TN911

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2009)04-0088-03

遥测系统是航天飞行器在试验和运行过程中不可缺少的重要支持系统。在导弹、卫星的研制阶段, 利用遥测系统获取试验飞行中的导弹、卫星的工作状态参数和环境参数, 可以为检验导弹、卫星的性能及故障分析提供依据。地面遥测接收设备是接收试验数据的重要设备, 主要完成目标的捕获跟踪、信号的分析处理、数据的解调传输。随着软件无线电技术的发展, 遥测接收设备逐渐迈向了数字化、模块化和小型化, 通过仿真建模实现遥测信号的合成, 可以为研究航天遥测技术提供一种方便的手段。

PCM/ FM 遥测体制是目前国内外广泛采用的一种遥测传输体制。PCM/ FM 遥测信号是传输遥测信息的载波信号, 同时也是地面接收设备自跟踪信号的副载波信号。地面遥测接收设备的自跟踪就是天线的指向自动地跟随目标而转动。当设备处于自跟踪状态时, 目标将一直落在波束照射区域, 并且天线的角度与目标的实际角度始终保持在一定的误差范围之内(即角度误差)。设备不断测量运动目标的方向和天线轴之间的角误差, 并将其换为电压, 控制天线的伺服机构, 纠正天线的角度, 使它缩小与目标方向的偏差。在 PCM/ FM 遥测接收设备中广泛采用比相单通道单脉冲测角原理(Phase Compared Single Channel Mono-pulse, 简称 PCSCM<sup>[1]</sup>), 利用天线波束形成网络输出的角误差信号(即方位误差信号  $A$  和俯仰误差信号  $E$ ), 经过一组低频信号调制后再与射频信号合并形成一个单通道信号, 角误差接收机用解调出的误差电压去控制伺服系统以完成对目标的自跟踪。本文在分析 PCM/ FM 遥测接收设备采用的 PCSCM 技术基础上, 通过仿真实现了角误差信号, 获取了角误差信号的波形, 可为下一步研究遥测系统提供参考。

## 1 PCSCM 的基本原理

### 1.1 PCM/ FM 调制信号的模型

遥测接收设备接收的信号为 PCM/ FM 调制的调频信号<sup>[2]</sup>, 其表达式为

$$S(t)_{FM} = A \sin(\omega_c t + \phi(t)) = A \sin(\omega_c t + \phi_{FM}) \quad (1)$$

其中, 载波角频率  $\omega_c = 2\pi f_c$ ,  $A$  是载波调制幅度, 调频分量

$\phi_{FM} = K_{FM} \int m(t) dt$ ,  $K_{FM}$  为调制常数,  $m(t)$  是 PCM 数据转换为 NRZ 双极性码经过成型滤波器后的波形。

### 1.2 比相单脉冲测角原理

比相单脉冲测角是由两个彼此邻近的天线在接收同一目标时, 通过测量行程差以得到角误差信号, 其原理如图 1 所示。

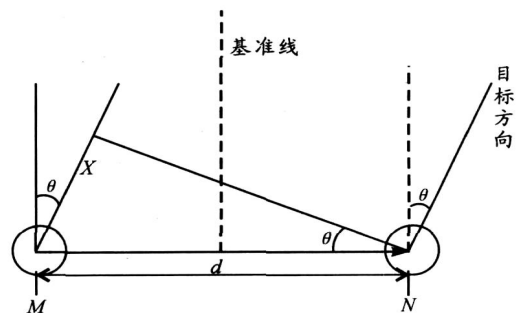


图 1 比相单脉冲测角原理

$M$ 、 $N$  两个天线间距离为  $d$ , 两天线间的垂线为基准

\* 收稿日期: 2009-01-31

作者简介: 邢开亮(1978—), 男, 四川西昌人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事通信与信号处理研究; 高勇(1969—), 男, 博士, 教授, 中国电子学会高级会员, 中国通信学会高级会员, 主要从事阵列信号处理、软件无线电、通信抗干扰技术、实时信号处理、嵌入式系统开发等研究。

轴.若目标为无穷远,当目标偏离基准轴一个角时,这时在天线  $M$ 、 $N$  上所接收到的信号有一个行程差<sup>[3]</sup>  $X$ ,则

$$X = d \sin \theta \quad (2)$$

式中:  $\theta$  是目标偏离俯仰基准轴的角度(弧度).这个行程差与信号到达两天线时的相位差  $\phi$  成正比<sup>[4]</sup>.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (3)$$

当目标偏离基准轴较小时  $\sin \theta \approx \theta$ ,式(3)可写为:

$$\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \theta \quad (4)$$

式中:  $d$  是  $M$ 、 $N$  两个天线间距离,  $\lambda$  是天线接收信号的波长.

### 1.3 遥测地面接收设备误差信号合成

PCM/ FM 遥测地面接收设备的天线由 4 个天线单元两两正交放置在基准轴的两侧(上、下、左、右)组成,通过波束形成网络可获得方位支路误差  $A$ 、俯仰支路误差  $E$  及 4 个单元天线的和信号,如图 2 所示.

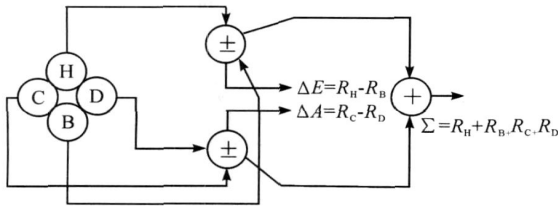


图 2 遥测地面接收设备波束形成网络

当飞行距离较远的一个点目标在垂直方向偏离基准轴时,相应的一对天线 H、B 接收到的信号  $R_H$ 、 $R_B$  分别为:

$$R_H = A \sin(\omega t + \omega_M + \phi_1) =$$

$$A \sin(\omega t + \omega_M) \cos \phi_1 + A \sin \phi_1 \cos(\omega t + \omega_M) \quad (5)$$

$$R_B = A \sin(\omega t + \omega_M - \phi_1) =$$

$$A \sin(\omega t + \omega_M) \cos \phi_1 - A \sin \phi_1 \cos(\omega t + \omega_M) \quad (6)$$

其中:  $\phi_1$  是由目标信号到达天线 H、B 的行程差而引起的相位差.  $A$  为振幅,即天线收到的信号幅度.

当目标偏离基准轴的俯仰角度  $\theta_1$  很小时,信号到达天线 H、B 时的相位差也很小,  $\sin \phi_1 \approx \phi_1$ , 所以由式(4)、(5)、(6)可得:

$$E = R_H - R_B = 4A \frac{d}{\lambda} \cos(\omega t + \omega_M) \quad (7)$$

同理,相应的另一对天线 C、D 接收到的信号  $R_C$ 、 $R_D$ , 当目标偏离基准轴的方位角度  $\theta_2$  很小时,信号到达天线 C、D 时的相位差也很小,  $\sin \phi_2 \approx \phi_2$ , 得:

$$A = R_C - R_D = 4A \frac{d}{\lambda} \cos(\omega t + \omega_M) \quad (8)$$

当  $\theta_1$  和  $\theta_2$  很小时,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  也很小,  $\cos \phi_1 \approx 1$ ,  $\cos \phi_2 \approx 1$ , 其 4 个天线信号的和为:

$$\begin{aligned} \Sigma &= R_H + R_B + R_C + R_D = \\ &A \sin(\omega t + \omega_M + \phi_1) + A \sin(\omega t + \omega_M - \phi_1) + \\ &A \sin(\omega t + \omega_M + \phi_2) + A \sin(\omega t + \omega_M - \phi_2) \\ &= 4A \sin(\omega t + \omega_M) \end{aligned} \quad (9)$$

为了传输方位和俯仰角误差信号,需进行  $0^\circ/\pi$  调制,将其调制到副载波信号的幅度上,形成幅度调制信号.  $0^\circ/\pi$  调

制后的信号为:

$$E_s = 4A \frac{d}{\lambda} \cos(\omega t + \omega_M - \phi_{s1}) = 4A \frac{d}{\lambda} \cos \phi_{s1} \cos(\omega t + \omega_M) \quad (10)$$

$$A_s = 4A \frac{d}{\lambda} \cos(\omega t + \omega_M - \phi_{s2}) = 4A \frac{d}{\lambda} \cos \phi_{s2} \cos(\omega t + \omega_M) \quad (11)$$

其中:  $E_s$  为调制后俯仰误差信号,  $A_s$  为调制后方位误差信号,  $\phi_{s1}$  和  $\phi_{s2}$  为调制相位  $0$  或  $\pi$ .

最后,在相加器中将调制后方位误差信号  $A_s$  和俯仰误差信号  $E_s$  进行相加,相加后的误差信号再和同一旋向的和信号  $\Sigma$  相加,形成幅度调制信号,调制度取决于角误差信号的大小,最后输出的信号为  $\Sigma + A_s + E_s$ ,即比相单通道单脉冲跟踪信号.

$$\begin{aligned} \Sigma + A_s + E_s &= 4A \sin(\omega t + \omega_M) + \\ &4A \left( \frac{d}{\lambda} \cos \phi_{s1} + \frac{d}{\lambda} \cos \phi_{s2} \right) \cos(\omega t + \omega_M) \end{aligned} \quad (12)$$

## 2 在 ADS 中仿真实现

ADS2008(Advanced Design System 2008)仿真软件是 Agilent 公司推出的一种图形化的编程语言和开发环境,它是在 HP EESOF 系列 EDA 软件基础上发展完善起来的大型综合设计软件,为工程师们开发各种形式的系统提供了方便.可面向模拟和数字系统进行半实物仿真,功能强大、效率高效.运用 ADS 进行仿真,首先搭建系统仿真模型,确定系统的各个组成模块功能和信号的输入输出,最后搭建各个功能模块的仿真程序.

结合目前遥测地面接收设备采用的技术特点,将 PCM/ FM 遥测自跟踪信号的仿真模型设计为误差信号源和角误差接收机两部分.误差信号源由和差模块、调制模块、单通道合成模块构成,完成目标与天线基准轴形成的方位偏差值、俯仰偏差值与副载波信号的合成,将接收的无线电信号经波束形成网络产生的方位误差信号  $A$ 、俯仰误差信号  $E$  和射频和信号  $\Sigma$ ,与一组低频的 1 KHz 正交方波调制,最终输出比相单通道单脉冲跟踪信号.角误差接收机由混频模块、采样模块、检波模块构成,主要把单通道合成信号变换放大以后,一次解调出已含有  $A$  和  $E$  包络信号,这个信号由一组 1 KHz 的频率基准信号采样,分别输出  $A + E$  和  $A - E$  的脉冲信号,经窄带滤波后,再进行同步采样,以去除脉冲信号经窄带滤波后的延时效应,最后通过同步检波进行二次相干解调,分别得到方位与俯仰角误差直流电压,用于伺服系统驱动天线完成自动跟踪.图 3 是在 ADS 中 PCM/ FM 遥测自跟踪信号实现的原理.

仿真程序中方位偏差值为  $\pi/12$ ,俯仰偏差值为  $\pi/128$ ,副载波信号的频率为 2.2 GHz,  $0^\circ/\pi$  调制的基准方波的频率为 1 KHz ( $\pm 1$  V).通过 ADS 仿真合成方位支路误差  $A$ 、俯仰支路误差  $E$  及 4 个单元天线的和信号  $\Sigma$ .并利用两个相差  $T/4$  的 1 KHz ( $\pm 1$  V) 正交方波分别与  $A$ 、 $E$  完成信

号的  $0^\circ$  调制,进行一定的信号放大后与同一旋向的射频和信号 相加,形成幅度调制信号.图 4 是 1 KHz 基准方波,图 5 是信号源合成信号波形.

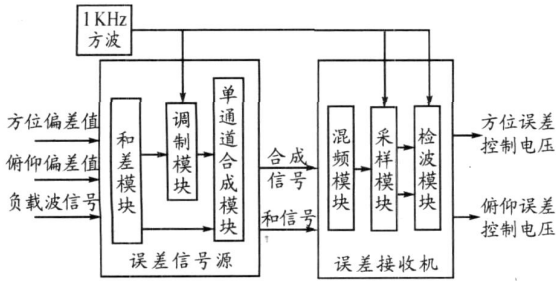


图 3 PCM/FM 测速自跟踪信号实现的原理

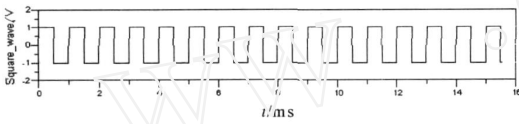


图 4 信号源 1 KHz 基准方波

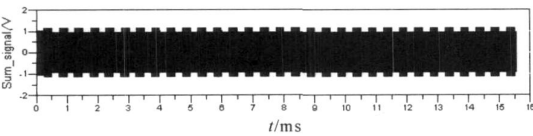


图 5 信号源合成信号波形

根据  $0^\circ$  相位调制原理,当两正交方波信号幅值为 +1 时,两误差信号相加;当两正交方波信号中一个为 -1 时,两误差信号相减.这种调制方式使得跟踪源信号包含了两误差信号的幅值变化情况,完成了“单通道单脉冲”的意义.

经过角误差接收机混频后,一次解调出已含有  $A$  和  $E$  包络信号得到的误差脉冲信号,具体波形见图 6.

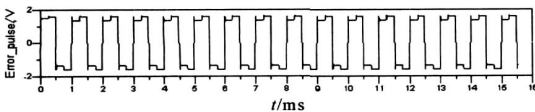


图 6 一次解调出的误差脉冲信号波形

利用信号源产生的一组正交的基准方波 ( $\pm 1$  V, 1 KHz),经采样模块进行同步采样分别提取方位误差信号和俯仰误差信号.即同步提取误差脉冲中正向的  $A + E$  和  $A - E$  的脉冲信号,相加后得到  $A$ ;同理,同步提取误差脉冲中负向的  $-A - E$  和  $-A + E$  的脉冲信号,相减后得负向的  $-E$ .图 7~8 是解调出的方位、俯仰误差信号的波形.

两路误差信号经过同步检波处理,转换为误差电压,并设置限幅放大器,控制输出电压的范围为  $\pm 15$  V.得到的方位误差电压和俯仰误差电压分别如图 9、图 10 所示.

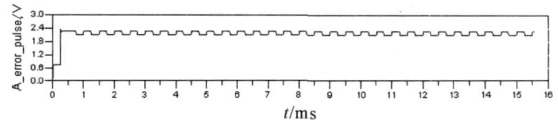


图 7 解调出的方位误差信号图

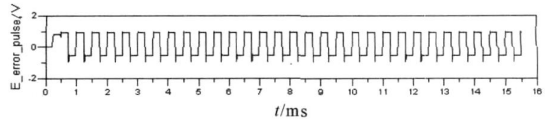


图 8 解调出的俯仰误差信号图

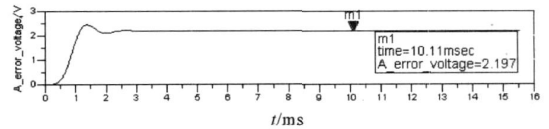


图 9 方位误差电压

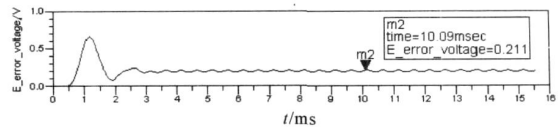


图 10 俯仰误差电压

以上就是通过 ADS 软件实现的测速系统自跟踪信号的仿真结果,可以直接观察到各个模块的输出波形,有助于进行系统顶层设计、分析.

### 3 结束语

实际的 PCM/FM 测速系统自跟踪系统结构复杂,通过 ADS 软件对自跟踪信号的仿真,使得分析系统变得直观简单.借助 ADS 对系统进行仿真,有助于熟悉系统原理,获取各节点信号波形,为分析和调试测速自跟踪系统的指标提供引导.

### 参考文献:

- [1] 徐兴源,高全辉.单通道单脉冲跟踪体制的角误差解调[J].遥测遥控,1998,19(5):51-55.
- [2] 谢铭勋.再入遥测技术[M].北京:国防工业出版社,1992
- [3] 沈亮,奇恩勇.数字式雷达角误差算法研究[J].航空兵器,2000(3):1-4.
- [4] 周智敏,陆必应.航天无线电测控原理与系统[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [5] 宋贵宝.雷达测定目标角误差仿真[J].系统工程与电子,1999,21(5):51-54.