

文章编号:1001-893X(2012)06-0873-05

S 频段联试应答机的改进设计^{*}

江晓凤

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对 S 频段联试应答机提出了接收和发射频综共用的改进设计方案,对改进后的应答机频率关系、组合干扰、信号处理单元以及信道单元设计进行了分析、仿真和测试,结果表明其功能和性能指标满足 S 频段测控系统的系统联试要求。该设计在满足接收和发射载波频率相干转发比的同时节省了一个频综,同以往的 S 频段联试应答机相比具有硬件电路简单、成本低、可靠性更高的优点。

关键词:航天测控系统;S 频段应答机;相干转发比;软件无线电

中图分类号:TN802;TN958.96 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.008

Improved Design of S-band Unified Test Transponder

JIANG Xiao-feng

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

Abstract: An improved design scheme with only one common frequency synthesizer used for RF receiving and transmitting channel of S-band unified test transponder is proposed in this paper. The improved transponder's frequency flow, combined frequency interference, the design of signal processing unit and signal channel is analysed, simulated or tested. The results show that its functions and performance satisfy the test requirements of S-band TT&C system. One frequency synthesizer is saved in this design under the condition that the coherent turn-around ratio between receiving frequency and transmitting frequency is satisfied at the same time. Compared with the unimproved one, it has simplified hardware, lower cost and higher reliability.

Key words: space TT&C system; S-band transponder; coherent turn-around ratio; software defined radio

1 引言

测控任务的不断增加以及测控系统的不断更新,对相应的星载设备及地面设备的要求也越来越高,除要求地面设备满足各种功能指标外,还需具备高可靠性。联试应答机在地面测控站中广泛使用^[1]。S 频段联试应答机是 S 频段航天测控系统的重要配套设备,它主要用于模拟星上设备,在不执行任务时与 S 频段统一测控系统构成闭环,完成测控站的系统功能检查和指标测试^[2]。为了满足 S 频段上、下行频率相干转发比(221/240)的要求,传统的

设计方法是分别为应答机接收信道和发射信道配置不同的频综,且满足一定的频率关系。频综是射频信道的关键部件,设计复杂,指标要求高,体积大,成本高。因此,如果能够实现接收和发射频综的共用,将对简化应答机硬件配置、减小设备体积、降低成本具有重要意义,同时也有利于提高设备的可靠性。

本文提出了一种新的改进电路设计。在基于与系统钟同源的基础上,对联试应答机的信道电路进行简化设计,通过对信号处理单元输出频率的预置,来满足宽频段输出的要求,实现接收和发射频综的共用。同时,在电路设计时采用了数字电路和软件

^{*} 收稿日期:2012-03-12;修回日期:2012-05-31

无线电技术,从而大大提高了应答机的综合化能力,在工程中具有一定的适用性。

2 联试应答机方案的设计及工作原理^[3-4]

传统应答机的原理框图如图 1 所示,主要由上变频器、下变频器、本振、信号处理单元、电源模块、接收频综以及发射频综组成。应答机内部的模块共用一个参考源,设备引入了宽带频综,按照指令设置频率,实现收、发信道的全频段覆盖^[5]。

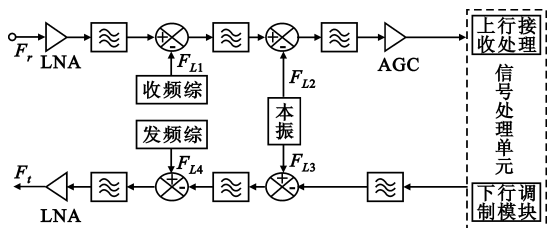


图 1 改进前联试应答机原理框图

Fig.1 Principle diagram of unimproved transponder

从测控系统的要求考虑,希望设计出一种设备体积较小、成本较低、同时应用范围广的应答机。根据技术指标要求,对可能实现的各种方案进行了反复的论证。在基于与系统钟同源的基础上对信道电路进行简化,省去了一个频综,其原理框图如图 2 所示。接收信号经二次下变频及 AGC 放大后获得幅度稳定的中频信号,在射频信号没有多普勒的情况下该中频信号频率 f_r 是固定值。再进行 A/D 采样变换成为数字信号,数字信号进入信号处理单元中实现信号的解调、调制,产生发射中频信号 f_t ,由于射频信号 F_r 在一定范围内变化,固发射中频 f_t 在一定范围内可变。发射中频信号再经 D/A 输出到上变频器,在上变频器中完成两次上变频、功率放大后输出。

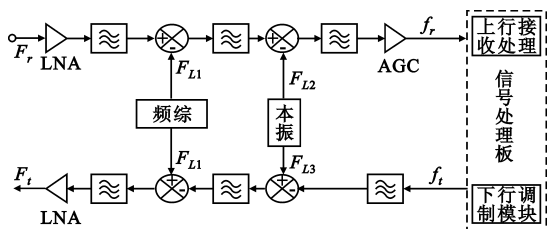


图 2 改进后应答机原理框图

Fig.2 Principle diagram of improved transponder

3 关键单元的设计与关键技术分析

在方案设计和电路实现中,主要考虑了以下关键技术问题。

3.1 频率关系的分析

由图 2 可得:

$$F_r = F_{L1} + F_{L2} + f_r \quad (1)$$

$$F_t = F_{L1} + F_{L3} + f_t \quad (2)$$

在设计联试应答机内部频率关系时需要合理设计频率关系并考虑本振的组合干扰。在设计时,选择接收、发射一本振 F_{L1} 共用一个宽带频综;接收二本振和发射二本振 F_{L2} 为同一固定点频信号;接收中频信号 f_r 为一固定点频,发射中频信号 f_t 为在一定范围内可变的中频信号,通过预置频率和频综配合使用来实现输出全频段的覆盖。

仿真得到组合干扰如图 3 所示,因涉及具体工程的频率关系,图中对相应频率进行了处理。从图中可知,合理选择内部频率关系,信号的幅度和本振信号组合干扰的幅度之差至少有 50 dB,满足系统指标要求。加强本振的抑制同样是非常必要的,可通过加滤波器压制(一混后的滤波器对二本振信号的抑制需达到 50 dB 以上)和增加本振隔离度(混频器对本振的抑制通常能达到 20 dB 左右)来减少本振泄漏干扰。

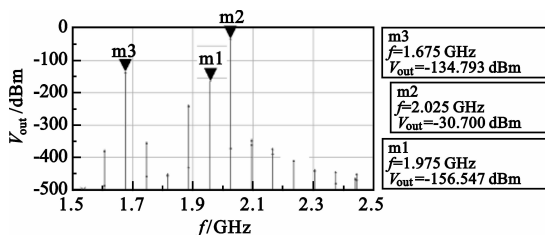


图 3 组合干扰仿真结果

Fig.3 Simulation results of combination interference

由于联试应答机在工作时与地面系统钟同源,因此方案设计中无需考虑非相参的频率分量,在 S 频段范围内始终能实现相参转发。

3.2 信号处理单元的设计^[6]

信号处理单元采用软件无线电技术实现:所有电路、算法以及 FPGA 配置程序、DSP 程序文件和计算机应用程序保存在计算机中,将相应用途的配置程序从计算机文件系统通过串口加载到 FPGA 或 DSP 配置芯片中,调用相应用途的计算机处理软件模块,即可构成相应的信号处理单元。关机后,配置

软件保存在配置芯片中,再次开机无需重新加载,操作控制简便。功能更换或设备升级时,可对配置程序现场编程,重新下载,完成任务转换。

信号处理单元能中频数字化和所有的收发信号处理功能。信号处理单元的硬件电路主要由 FPGA 及其外围器件、DSP 及其外围器件、模数变换和数模变换器等几部分构成。该基带处理板采用了 2 片大容量 FPGA、一片高速 DSP 和相关外围电路。FPGA 主要完成解调核心算法的实现,DSP 主要完成复杂运算和控制功能。

信号处理单元的核心是数字锁相环(DPLL),包括载波跟踪环、主侧音环、次侧音环、遥控信号解调以及主、次侧音调制度控制等电路,主要完成对上行残留载波的跟踪、相干解调及遥控指令解调、主、次侧音解调的任务。恢复的载波经送到 DDS 控制输出的载波频率,以实现相参转发。解调的主、次侧音经调制制度调节后与输入的遥测信号相加,对输出载波进行调相转发。

需要注意的是,在射频信号没有多普勒的情况下,输入中频信号是固定点频,而发射中频信号频率 f_t 是在一定范围内可变: $f_t = F_T - F_{L1} - F_{L3}$,由公式可知只要输出射频频率 F_t 和一本振频率 F_{L1} 确定,那么发射中频的频率 f_t 就确定了。通过预置发射中频的频率控制字来实现输出中频频率的变化,每一个输出射频频率对应一个发射中频频率。在射频信号有多普勒的情况下,发射中频是在一定范围内变化,变化的范围等于多普勒频率乘上转发比。转发比是一个无限小数,由于中频处理的数字化带来的有限字长效应,这样就引入了转发误差。根据工作中的各种转发比,频率控制字取 40 位,转发频率误差为 1.23×10^{-4} Hz,完全满足系统测速精度的要求^[7]。

3.3 信道的硬件设计^[8]

3.3.1 噪声系数估算

接收噪声系数的计算主要考虑由接收信号背景噪声和接收信号从进入高放混频模块输入端口到达中放输入端口的过程中引入的噪声总和。设这段信道的参照模型如图 6 所示。

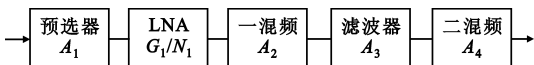


图 4 联试应答机噪声等效模型

Fig.4 Equivalent noise model of transponder

设接收噪声系数为 NF ,预选器/滤波器的损耗为 A_1 ,高放的增益为 G_1 ,高放的噪声系数为 N_1 ,一混频损耗为 A_2 ,一混频后的滤波器损耗为 A_3 ,二混频损耗为 A_4 ,则

$$NF = A_1 + \frac{N_1 - 1}{1/A_1} + \frac{A_2 - 1}{G_1/A_1} + \frac{A_3 - 1}{G_1/(A_1 A_2)} + \frac{A_4 - 1}{G_1/(A_1 A_2 A_3)} \tag{3}$$

若取 $A_1 = 1.58$ (2 dB), $A_2 = A_3 = A_4 = 5.012$ (7 dB), $G_1 = 1\,000$ (30 dB), $N_1 = 2$ (3 dB), 可以计算出

$$NF = 1.58 + \frac{2 - 1}{1/1.58} + \frac{5.012 - 1}{1000/1.58} + \frac{5.012 - 1}{1000/(1.58 \times 5.012)} + \frac{5.012 - 1}{1000/(1.58 \times 5.012^2)} = 3.36 \tag{4}$$

对 3.36 取对数得 5.26,在预留余量的原则下,取 $NF = 6$ dB,即接收噪声系数约为 6 dB,满足实际使用要求。

3.3.2 时延的估算^[9]

由于信道所使用的放大、混频器的宽带足够宽,对系统时延影响极小,信号通过电路的绝对时延可由下式估算:

$$\tau = \frac{0.35}{B_W} \tag{5}$$

如器件带宽 B_W 为 2 GHz,则 $\tau = \frac{0.35}{2 \times 10^9} = 0.175$ ns。

根据工程经验数据,在温度 $-30^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ 范围,时延变化 10%,则 $\Delta\tau = 0.0175$ ns。

由于通道中放大器、混频器均为宽带器件,由式 (5)可见其时延变化很小。

在链路中,带宽最小的器件为滤波器,滤波器引入的时延波动在接收机的总时延波动中起主要作用。因此,在滤波器的设计时,为了减小滤波器的有用信息带宽范围内的时延波动,在带外抑制等技术指标满足要求的前提下,尽量展宽滤波器的带宽。设备的输出滤波器带宽最窄,为 200 MHz 左右,时延 $\tau \approx 1.75$ ns, $\Delta\tau_1 \approx 0.2$ ns,考虑链路中放大、混频级联对带宽的影响,在设计中按最恶劣情况考虑,并考虑一定余量,电路各级有源器件所产生的 $\Delta\tau_2$ 按 0.5 ns 计算。总的时延变化是能满足指标要求。图 5 和图 6 为阻带抑制和群时延波动仿真图,由仿真结果可知,阻带抑制为 45 dB @ 2 100 MHz/2 400 MHz,通带内最大群时延波动为 1.11ns @ $f_0 \pm 3$ MHz。

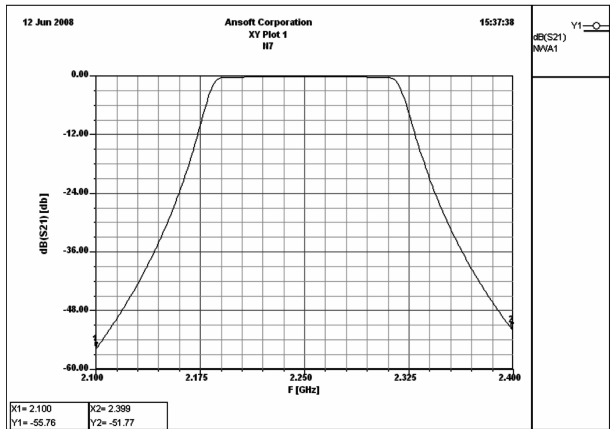


图 5 阻带抑制
Fig.5 Stopband rejection

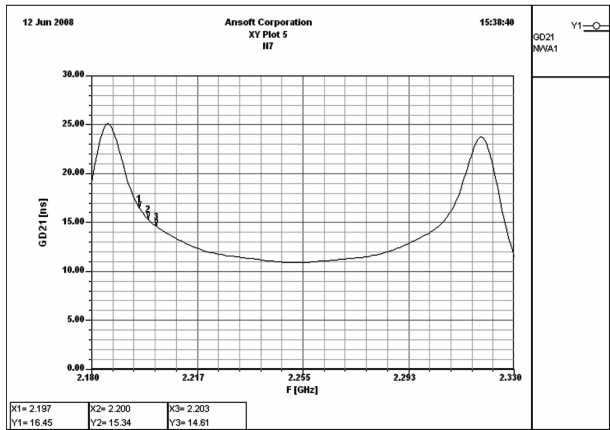


图 6 群时延波动
Fig.6 Group delay ripple

3.3.3 接收信道增益分配

若中频输出电平取为 -10 dBm,以接收灵敏度电平 -70 dBm 计算,接收信道的总增益为 $G \geq -10 - (-70) = 60$ dB,增益取为60 dB。接收信道电平分配如图 7 所示。

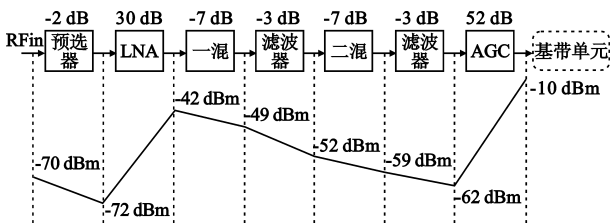


图 7 接收信道电平分配
Fig.7 Level allocation of receiving channel

3.3.4 发射信道设计

发射信道的电平分配也是非常重要的,在实际工作中既要保证信号工作在线性状态,同时又要求

不饱和。在设计时发射信道电平分配如图 8 所示。

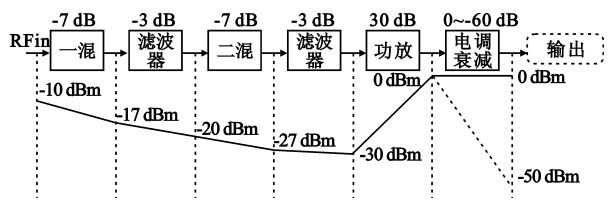


图 8 发射信道电平分配
Fig.8 Level allocation of transmitting channel

4 实验结果

改进后的联试应答机在地面测控站上运用,对联试应答机的主要指标进行测试,测距、测速的均值和方差测试结果分别如图 9 和图 10 所示。



图 9 测距均值和方差值
Fig.9 Mean and variance of ranging



图 10 测速的均值和方差值
Fig.10 Mean and variance of velocity measurement

由图 9 和图 10 可知,改进后的联试应答机与系统闭环后的测试结果完全满足要求。因此,联试应

答机的改进是合理可行的。

5 结束语

本文在传统应答机方案的基础上,提出了接收、发射频综共用的方案。采用该方案使设备电路结构更加简化、合理,提高了设备的可靠性,降低了设备的成本。同时,本文介绍了应答机的设计方案,对其中的关键技术、工作原理进行了论述。该应答机主要指标性能已经在实践中得到验证,技术成熟可行。联试应答机最重要的特点是基于应答机与系统钟同源的基础上,通过本振频率关联和中频数字处理,解决了相参转发问题;同时具备可方便加载不同信号体制、格式的功能,满足系统与不同国际标准兼容的要求。该方案也可以推广应用到其他频段联试应答机的设计、开发。

参考文献:

- [1] 万永伦. 应答机技术研究展望[J]. 电讯技术, 2009, 49(6): 102 - 106.
WAN Yong - lun. Transponder Technology: Research and Prospects [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(6): 102 - 106. (in Chinese)
- [2] 梁文权, 冯书兴. 航天测控对抗在未来战争中的应用[J]. 电讯技术, 2005, 45(2): 23 - 25.
LIANG Wen - quan, FENG Shu - xing. Application of Confrontation Based Aerospace Measurement and Control in Future Wars[J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(2): 23 - 25. (in Chinese)
- [3] 占荣辉, 万建伟. 一种新的双模应答机全数字中频接收机设计[J]. 系统工程与电子技术, 2006(2): 199 - 202.
ZHAN Rong - hui, WAN Jian - wei. Design of the IF all digital receiver for a novel dual - mode transponder[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006(2): 199 - 202. (in Chinese)
- [4] 郑林华, 袁继兵, 李星. 星用 DSPM 双模应答机的设计与实现[J]. 国防科技大学学报, 2004(4): 31 - 36.
ZHENG Lin - hua, YUAN Ji - bing, LI Xing. Design and Implementation of Satellite - based DS/PM Dual - mode Transponder[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004(4): 31 - 36. (in Chinese)
- [5] 刘祁. S 模式数据链应答机介绍[J]. 航空电子技术, 1996(4): 38 - 43.
LIU Qi. Introduction to transponder for data link in S mode [J]. Avionics Technology, 1996(4): 38 - 43. (in Chinese)
- [6] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
YANG Xiao - niu, LOU Cai - yi, XU Jian - liang. The theory and application of software radio [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2001. (in Chinese)
- [7] 周仲林, 刘靖. 一种双通道测速应答机及其精度分析[J]. 飞行器测控学报, 2004(3): 69 - 71.
ZHOU Zhong - lin, LIU Jing. One Kind of Two Channels Transponder For Velocity Measurement and Analysis of Its Precision[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2004(3): 69 - 71. (in Chinese)
- [8] 胡建平. 全频带适应统一应答机的设计[J]. 电讯技术, 1997, 37(1): 1 - 11.
HU Jian - ping. The Design of Full Band Adaptable TT&C Transponder[J]. Telecommunication Engineering, 1997, 37(1): 1 - 11. (in Chinese)
- [9] 喻芳. 一种新型应答机数字化终端的实现[J]. 电讯技术, 2002, 42(3): 39 - 43.
YU Fang. Implementation of Digitized Terminal of a New Type of Transponder[J]. Telecommunication Engineering, 2002, 42(3): 39 - 43. (in Chinese)

作者简介:

江晓凤(1983—), 女, 重庆人, 2006 年于西安电子科技大学获学士学位, 现为助理工程师, 主要从事航天测控技术方面的研究。

JIANG Xiao-feng was born in Chongqing, in 1983. She received the B.S. degree from Xidian University in 2006. She is now an assistant engineer. Her research concerns aerospace TT&C system technology.

Email: jiangxiaofeng1983888@yahoo.com.cn