

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.001

引用格式:许志民.多体制转发式卫星导航信号源的总体设计[J].电讯技术,2014,54(7):863-868.[XU Zhi-min. Overall Design of Multi-band RF Retransmission Satellite Navigation Signals Simulator[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7):863-868.]

多体制转发式卫星导航信号源的总体设计*

许志民**

(中电科航空电子有限公司,成都 611731)

摘要:为解决机载接收机无法正常接收真实卫星导航信号的问题,提出了一种多体制转发式卫星导航信号源的总体设计方案,并分析了涉及的关键技术。采用“接收机+发射机”的原理,通过对卫星导航信号接收、解扩解调、抗干扰、频率变换、调制扩频和放大等处理,实现信号的转发。该方案支持当前全球多种主流卫星导航系统体制,例如 GPS、BDS 和 GLONASS 等信号,实际试验证明了其有效性。该技术方案还可用于导航设备研制、调试和通信导航的集成验证等特殊场景。

关键词:卫星导航接收机;多频段;导航信号源;转发式;机载设备

中图分类号:TN967 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0863-06

Overall Design of Multi-band RF Retransmission Satellite Navigation Signals Simulator

XU Zhi-min

(CETC Avionics Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: To solve the problem that airborne receiver cannot receive real satellite navigation signals, an overall design scheme of multi-band RF retransmission satellite navigation signals simulator is presented and related key techniques are analyzed. According to the principle of “a receiver+a transmitter”, the RF signals of satellite are retransmitted through receiving navigation signal, de-spread-spectrum and demodulation, anti-interference processing, changing carrier frequency modulation and spread-spectrum amplifying. The scheme is suitable for GPS, BDS and GLONASS signals. Engineering application proves its effectiveness. The scheme can be used extensively in satellite navigation equipment development and verification of integration of communication and navigation.

Key words: satellite navigation receiver; multi-frequency band; navigation signals simulator; RF retransmission; airborne equipment

在卫星导航接收机研制及卫星导航应用领域,卫星导航信号源都不可或缺。卫星导航信号源根据信号产生的来源可分为自主式信号源和转发式信号源,根据转发频率可分为同频转发和变频转发,根据对卫星信号的处理方式不同可分为直接转发和信号处理后的转发。本设备属于后一类,即为可变频的转发式导航信号源。

该技术来源于机载导航应用。由于机体和机翼阻挡等原因,原机载卫星接收机因不能收到外部真实卫星信号而无法定位,需要外部设备来接收真实卫星信号并生成模拟导航信号,使原接收机可正常定位。

该方案采用了“接收机+发射机”的设计原理,可生成多种体制的卫星导航信号^[1],包括 BDS(Bei-

* 收稿日期:2014-04-29;修回日期:2014-07-09 Received date:2014-04-29;Revised date:2014-07-09

** 通讯作者:xzm.win@163.com Corresponding author:xzm.win@163.com

Dou Navigation Satellite System)、GPS(Global Positioning System)、GLONASS(Global Navigation Satellite System),其应用目标既可作通用信号源,也可在特殊场景下作信号转发使用。

1 基本功能和原理

1.1 基本功能要求

(1) 射频信号接收

接收多体制的卫星导航信号,包括目前全球主要的导航信号频段^[2]:

- GPS L1/L2 频点(1 575.42/1 227.6 MHz);
- GLONASS L1 频段(1 598~1 607 MHz);
- BDS B1/B3 频段(1 561.098/1 268.52 MHz)。

(2) 信号处理和控制

实现信号处理和参数控制等。完成对接收真实卫星信号 A/D 转换、解扩、解调等和抗干扰处理,然后作定位解算、频率偏移控制,最后进行扩频、调制和 D/A 转换发送信号发射模块。通过显控终端或外部接口实现对频率和功率参数的控制。

(3) 射频信号发射

根据不同要求发射不同频率和功率的导航信号。设备对不同频率的中频信号进行调制、混频等上变频处理,生成所需要的卫星导航信号。发射功率和频率通过外部接口由显控终端实现可调节。

1.2 卫星导航工作原理

卫星导航定位是通过终端接收机接收、处理和解算卫星导航信号完成终端定位的。以 GPS 为例,导航信号包括载波、扩频码(C/A 码和 P 码)和导航电文,其中导航电文又称数据码或 D 码,是用户用来定位和导航的数据基础,主要包括卫星星历、时钟校准、电离层时延校准、工作状态和 C/A 码转换到捕获 P 码等信息,其结构如图 1 所示。

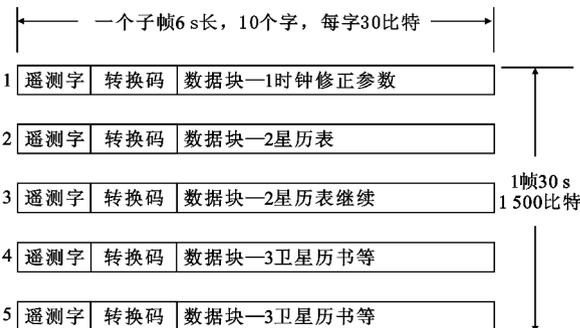


图 1 GPS 导航电文格式
Fig. 1 The format of GPS code

卫星将这些信息以二进制码调制后向终端发送,基本单位是包含 1 500 b 的一个主帧,码速率为 50 b/s。一个主帧含 5 个子帧,其中第 1~3 子帧各有 10 个字码,每个字码为 30 b;第 4~5 子帧各有 25 个页面,37 500 b。

各个导航系统的调制方式不同,GPS 和 BDS 都采用码分多址(CDMA)调制原理,终端根据不同的扩频码标示卫星;而 GLONASS 采用频分多址(FDMA)调制方式,根据不同频率标示卫星。

以 GPS L1 为例,采用如下公式调制信号:

$$S_1(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_c C_i(t) D_i(t) \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

关于导航信号具体内容可参见《GPS 系统原理和应用》或“北斗”导航原理等资料^[3],本文不再赘述。

卫星导航接收机即通过对收到的导航电文数据解算并实现定位,通常采用成熟的三球定位原理进行位置坐标解算,使用多普勒频移法进行速度测量。

1.3 信号转发的一般原理

一般情况下,要实现卫星信号的转发和放大,通常采用接收、滤波和放大的原理设计,其原理如图 2 所示。

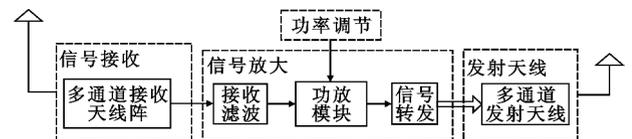


图 2 一般导航信号转发原理图
Fig. 2 Schematic diagram of signal retransmission

图 2 所示方案的转发原理比较简单,特点是仅能信号放大和同频转发,无法实现对转发器本身的定位、频移和抗干扰等功能。

1.4 基于“接收机+发射机”的转发原理

为了某些特殊用途和实现更多功能,还有一种采用“接收机+发射机”的设计^[5],其原理如 3 图所示。

图 3 采用“接收机+发射机”的转发技术,其原理首先对收到的卫星信号下变频、A/D、解扩解调和抗干扰,生成中频信号并解算,即为接收机^[4];数字信号处理后,频偏处理再功放、D/A、上变频,最后通过天线以原来频率或变化的频率向外部的机载接收机天线辐射载波,即为发射机功能。该技术有一个重要功能,就是发射频率可设置,这是一种创新性设计,在工程中有重要用途,后文将进行介绍。

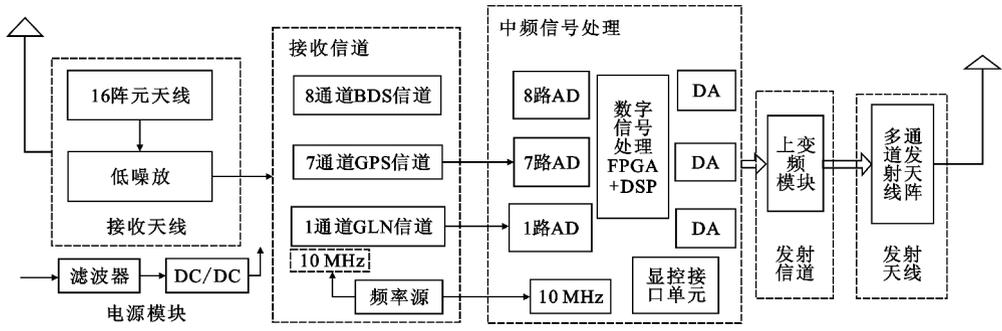


图 3 基于“接收机+发射机”的信号转发设计图

Fig.3 Signal retransmission design based on “a receiver+a transmitter”

2 详细设计

根据“接收机+发射机”的原理,设备主要组成单元包括接收天线、接收信道、信号处理、发射信道、发射天线、显控终端和电源模块等。下面重点介绍收发天线、收发信机和电源模块等关键模块的详细设计。

2.1 接收天线设计

接收天线位于飞机背部,用于接收真实信号。为了抗干扰,卫星接收天线设计为多个天线阵的调零天线,接收卫星右旋圆极化信号,并将其放大送给主机处理。因天线阵距离主机较远,采用有源设计,即将 LNA 模块与多天线阵集成。

天线包括天线阵、低噪声放大器(LNA)等模块,其原理图见图4。不同导航信号经过低噪声放大器放大后,在合成器合成为一路输出,这样可以减少电缆数量。

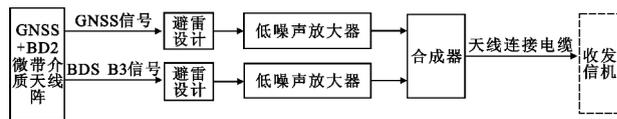


图 4 天线阵及 LNA 设计图

Fig.4 Schematic diagram of antenna and LNA

其中,天线阵是调零天线的重要组成,因此后文关键技术中将对天线阵设计进行详细描述。

2.2 信号处理单元

该单元主要完成中频信号数字化采样、抗干扰处理、信号解调、解扩处理、同步信号提取等功能,实现多系统导航信号的融合,将剥离噪声的卫星信号进行反调制、数字域合成、数模转换处理。信号处理采用直接中频采样和全数字化信号处理方案实现;数据处理采用高速数字信号处理(DSP)来完成信号

的捕获、跟踪及定位、测速等算法^[5]。

该单元主要由 AD、DA、FPGA、DSP 等组成,还包括 1553B、RS232 串行接口芯片等硬件电路和数据处理软件,RS232 用于调试,1553B 用于与飞机控制系统通信,其原理框图如图 5 所示。

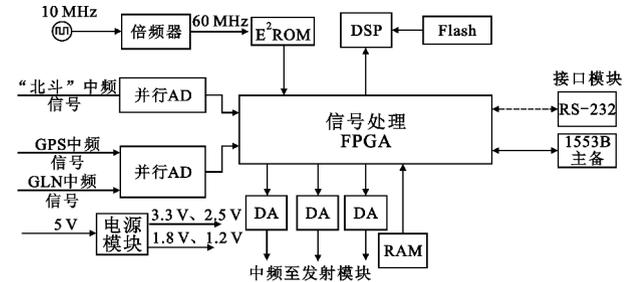


图 5 信号处理单元设计图

Fig.5 Schematic diagram of signal processing

2.3 射频通道设计

射频通道包含一个接收通道和一个发射通道,将收到的射频信号变为中频数字信号,将经过信号处理的中频信号再变为射频信号,经过发射天线发射出去,其设计原理如图 6 所示。

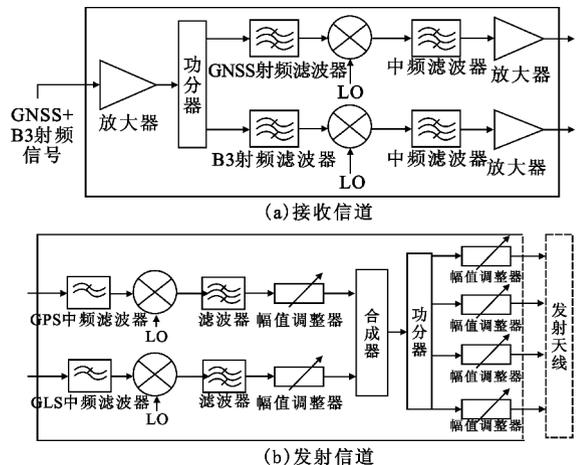


图 6 射频通道设计图

Fig.6 Schematic diagram of RF channel

在下行的接收通道中,从天线接收的导航射频信号经过放大后功分成两路,一路进入 B3 射频滤波器,另一路进入 GNSS 射频滤波器。经过滤波器后的信号通过混频、中频滤波及放大后得到中频信号,该中频信号经过 A/D 转换器成数字信号。其前端是带通滤波器,可使有用信号通过并抑制镜像频率和放大器中产生的谐波分量,另外也能改善通道的寄生响应,防止噪声进入混频器。而上行的发射通道中,幅值调整器可单独调整各频段和各路信号的发射电平。

另外,由于设备对频率源的精度要求较高,信道单元还提供统一的基准频率源供各模块使用。

2.4 发射天线设计

由于转发的信号电平不高,不需要放大器,因此发射天线为无源天线,发射天线涵盖了 GPS L1/L2、GLONASS L1、BDS B1/B3 频点的信号,要求具有宽频带。因此可采用贴片天线,并使用层叠结构,由两层贴片和一个接地板组成。上层贴片辐射 BDS 频段,下层贴片既充当上层辐射贴片接地板,同时辐射其他频段。上层贴片与中层贴片及中层贴片与接地板之间为两层基板,这种设计具有复用度高、结构小、功能可靠的特点。

2.5 电源模块设计

由于在机舱使用,机载电源的特性复杂,所以在设计时应充分考虑,后文将详细说明。

3 关键技术分析

3.1 频率偏移设计

为了避免卫星导航接收机的多径问题,在信号转发时使用了频率偏移技术,可以保证目标卫星导航接收机可正常收星和定位,而其他普通接收机不能接收转发信号。因此,这是一种针对某些特殊场景情况下使用的关键技术。

使用该技术为一种创新性设计。对目标卫星接收机来说,当加入一定的频率偏移后,可以不改动原接收机的硬件设计,仅对其软件部分做相应的修改或参数设置,即可以只接收具有频偏的转发信号,而屏蔽掉可能存在的真实卫星信号影响。经计算,当偏移值设置为 $N \times 50$ kHz ($N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,可屏蔽真实卫星信号对目标接收机的影响。

当目标接收机不需要转发信号时,通过外部接口下发参数控制命令,可以使其恢复正常的收星频

率,从而接收真实卫星信号,同时不会对目前卫星导航接收机定位造成干扰,并具有定位连续性。

3.2 链路增益设计

信号在整个转发通道中,信号功率被不断放大、衰减和再放大,信号的增益不断变化,需要考虑链路增益分配。链路增益设计如表 1 所示。

表 1 链路增益分配

Table 1 The gain configuration of link

主要模块	插损 /dB	增损 /dB	输入功率 /dBm	输出功率 /dBm	变化值 /dB
接收天线阵	-2	27	-120	-95	25
接收天线馈线	-10		-95	-105	-10
接收信道		20	-105	-85	20
数字信号单元		65	-85	-20	65
发射信道	-20		-20	-40	-20
发射天线馈线	-8		-40	-48	-8
发射天线阵	-2		-48	-50	-2
最大发射功率				-50	

接收天线阵包括了 LNA 模块,因此增益较高。

3.3 关于调零天线设计

抗干扰设计主要采用了调零天线和抗干扰算法。关于抗干扰算法可参见相关资料,此处不再赘述,仅描述调零天线的设计。

每种频段采用多个微带贴片,用矩形贴片方式,将贴片放在一块大的基板上按阵列形式排列,但微带贴片天线存在表面波,导致天阵之间的互耦。

为减少互耦,每一微带天线阵的基板都是单独的。由于需要接收 3 种导航系统的信号,其频率差别大。对于微带天线来说,接收带宽较窄,根据频率特性采用了两种微带天线,分别接收 1.5 GHz 和 1.2 GHz 频段。天线阵数目较多,多种天线并排放将增加天线尺寸,因此 BDS B1/B3 微带天线和 GPS 微带天线采用叠层的方式设计,上层接收 1.5 GHz 频段,中间层接收 1.2 GHz 频段。这种设计解决了互耦和尺寸等问题。

4 主要技术特征

4.1 卫星信号的接收和发射设计

设备对接收的卫星信号进行抗干扰处理后完成解调、解扩、捕获和跟踪等处理,得到没有噪声的数字信号,进行调制、加入频移、数字域信号合成处理,送到 DA 模块产生中频模拟信号,经过上变频后辐射。卫星导航信号的接收、转发和频偏原理如图 7

所示。

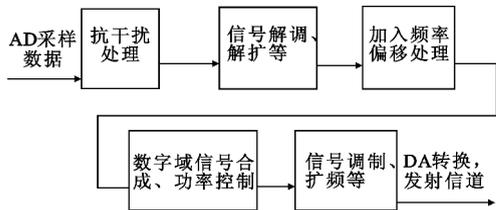


图7 信号“接收机+发射机”的转发原理

Fig. 7 Schematic diagram of “RX+TX”

4.2 机载电源设计

由于机载电子设备多,共用一个电源,电磁环境很复杂,电源特性较差,如具有浪涌、尖峰多、50 ms 瞬时断电等特点,因此需采用特殊设计。

设备有模拟电路、数字电路,必须解决数模电路的电磁干扰,因此采用了3块28.5 V转5 V的DC/DC模块,各路输出地分别连接到模拟地,而模拟地与飞机地隔离,电源输出电流分若干并行线输出,可降低每根线上通过的电流,其原理如图8所示。

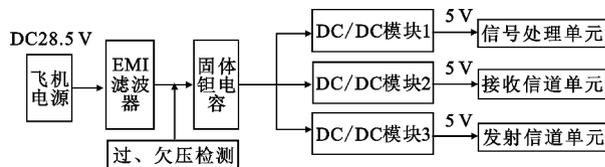


图8 机载电源设计图

Fig. 8 Schematic diagram of power supply

设计时选用带抗浪涌电压的电源滤波器来满足其电压浪涌、尖峰的要求。电源滤波器前端有一个110 V的TVS管和电子开关,TVS管可将所有高于110 V的电压稳定到110 V左右,而电子开关将110 V的电压再下拉到30 V左右,使过压浪涌和尖峰不会对后端的电源模块和电路造成损害;当外加电源跌落到18 V以下之后,电源滤波器后端采用24 000 μF 的大容量固体钽电容在欠压或者断电情况下为设备提供50 ms的供电,这样让设备不间断地工作,完全满足要求。

直流供电经过滤波后,经过欠压检测电路进入DC/DC。过欠压检测电路检测到输入直流电压超过电源模块正常范围时,DC/DC可实现本机直流供电与机载其他设备的隔离,实现保护功能。

5 试验情况

对本次工程样机进行了地面试验和飞行试验。

在试验时,将信号源主机安装于电子舱,接收天线装于飞机背部,发射天线装于机翼下侧,而目标导航接收机安装于机翼下侧的某载体上,无法正常接收真实卫星信号,但可接收转发式导航信号源辐射的模拟信号。

为了避免部分真实信号可能形成的多径干扰,因此试验时使用了频率偏移设置并进行了对比。设备经过多次空中试飞试验,主要数据记录如表2所示。

表2 飞行试验记录表

Table 2 The records of flight test

次数	实验条件	频率偏移 /kHz	发射功率 (天线口) /dBm	接收机工作情况	备注
1	水平直飞	0	-55	接收、定位正常	
2	水平直飞	+100	-60	接收、定位正常	
3	水平+转弯	+100	-55	接收、定位正常	转弯时会有卫星失锁,信号源作了失锁重捕处理
4	侧飞+升降	+100	-60	接收、定位正常	
5	水平+翻滚	+100	-55	接收、定位正常	收星数减少,但可定位
6	转弯+翻滚	+100	-55	接收、定位正常	同上

上述试验数据表明,通过对真实卫星导航信号的收发使机载目标接收机可接收由转发式信号源发出的模拟信号,而机载目标接收机在水平、转弯、侧飞和翻滚等飞行状态下可有效定位和导航。

6 结束语

本文提出了一种转发式卫星导航信号源的总体设计方法,描述了关键设计技术和试验情况。分析和试验证明,与一般的转发器相比,该方案具备多体制、多频段、抗干扰、可定位和发射频率可设置等特点,具有创新性和实用性。基于该技术研制的转发式卫星导航信号源在科研生产中有许多特殊用途^[6],包括航空航天的卫星信号转发、地面导航系统设计、空管领域和卫星导航接收机的研制等。但是,该技术实用性和创新性方面还需要进一步通过不同的系统应用进行拓展,特别是频率偏移设置技

术在实践方面是否存在问题需要进一步通过相关试验来验证和分析。

参考文献:

- [1] Kaplan E D, Hegart C J. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- Kaplan E D, Hegart C J. Understanding GPS: the Principles and Applications [M]. Translated by KOU Yan-hong. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2012. (in Chinese)
- [2] Wellenhof H, Wasle L. 全球卫星导航系统: GPS GLO-NASS Galileo 及其他系统[M]. 程鹏飞, 蔡艳辉, 文汉江, 等, 译. 北京: 测绘出版社, 2009.
- Wellenhof H, Wasle L. The Global Satellite Position System: GPS, GLONASS, Galileo and other [M]. Translated by CHENG Peng-fei, CAI Yan-hui, WEN Han-jiang, et al. Beijing: Survey Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- XIE Gang. The Principle and Receiver of GPS[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009. (in Chinese)
- [4] 占光, 徐飞, 段小辉, 等. GPS 射频信号源的设计与实现[J]. 电讯技术, 2010, 50(7): 81-85.

ZHANG Gguang, XU Fei, DUAN Xiao-hui, et al. The design scheme of GPS RF signal source [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7): 81-85. (in Chinese)

- [5] 张炜, 潘长勇, 郭兴波, 等. 卫星信号全数字解调器的研制[J]. 电讯技术, 2001, 41(1): 84-87.
- ZHANG Wei, PAN Chang-yong, GUO Xing-bo, et al. Development of A Low Bit Rate Satellite Signal Demodulator [J]. Telecommunication Engineering, 2001, 41(1): 84-87. (in Chinese)
- [6] 刘纪红, 王倩倩, 杨丽. “北斗”卫星导航系统在低空空域监管系统中的应用[J]. 电讯技术, 2012, 52(1): 18-22.
- LIU Ji-hong, WANG Qian-qian, YANG Li. Application of Beidou satellite navigation system in low-altitude airspace supervision system [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(1): 18-22. (in Chinese)

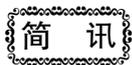
作者简介:



许志民(1973—), 男, 四川仪陇人, 工程师, 主要从事通信技术研究和产品设计。

XU Zhi-min was born in Yilong, Sichuan Province, in 1973. He is now an engineer. His research concerns communication system and equipment development.

Email: xzm. win@163. com



本刊编辑部工作会议在蓉召开

6月25日上午, 本刊编辑部工作会议在成都召开, 中国电子科技集团公司首席科学家雷厉、主办单位所领导唐军副所长、科技委喻光正研究员、相关领导以及编辑部全体人员参加了会议, 会议由唐副所长主持。

唐副所长首先宣读了《中国电子科技集团公司科技期刊管理办公室关于〈电讯技术〉调整总编辑的批复》, 宣布从7月起, 《电讯技术》总编辑由雷厉同志兼任, 喻光正同志因年龄和身体原因不再担任。随后, 《电讯技术》副总编赵勇作工作汇报, 从本刊审读员评价、读者来信、论文发表等方面简要介绍了2013年总体情况, 通过具体翔实的数据重点对本刊的同行竞争力进行了深入分析, 总结了存在的不足, 提出了相关改进措施。

听完汇报后, 前总编喻光正研究员、新任总编雷厉首席科学家、编委会副主任唐军副所长分别就《电讯技术》的发展提出了具体和明确的要求。与会成员就如何进一步提高《电讯技术》办刊质量和办刊水平、扩大期刊影响力、栏目设置、广告与发行等议题进行了热烈、充分的讨论, 达成共识, 形成了会议纪要。

由于多方面原因, 2013年编委会会议未能按例召开。此次编辑部工作会议虽然规模不大, 但有关领导和相关人员全部参会, 及时分析了刊物面临的机遇和挑战, 统一了思想, 明确了思路, 圆满完成了各项议程, 取得了预计的效果, 为编辑部开展后续工作奠定了基础, 必将促进本刊的健康发展。

(本刊编辑部)