

# 宽带瞬时精确测频技术及其应用

李小琳<sup>1,2</sup>, 庞旭东<sup>1</sup>, 舒汀<sup>3</sup>, 徐巍<sup>3</sup>, 张文俊<sup>2</sup>

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 2. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444;

3. 上海交通大学信息技术与电气工程研究院, 上海 200240)

**摘要:** 随着电磁对抗和雷达技术的不断演进, 雷达信号由传统的连续波、单脉冲形式逐步向宽带线性调频、捷变频、跳频等复杂波形发展, 常用的频率测量方法在测频精度和测频速度等方面很难满足要求。针对宽带相控阵雷达目标回波模拟器瞬时信号带宽高达 2 GHz、扫频或随机跳频信号带宽覆盖整个工作频段的特点, 创新性地采用瞬时测频引导结合实时宽带数字信道化精确测频技术, 设计研制了超宽带、高精度的瞬时测频模块和相应软件, 并应用于宽带目标回波模拟器的研制之中。通过实测和半实物仿真试验验证, 测频精度、测频范围和测频的实时性等指标完全满足整体性能要求。

**关键词:** 宽带; 瞬时测频; 频率引导; 数字信道化; 雷达模拟器

中图分类号: TN 955

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.020

## Broadband Instantaneous Accurate Frequency-Measurement Technology and Its Application

LI Xiaolin<sup>1,2</sup>, PANG Xudong<sup>1</sup>, SHU Ting<sup>3</sup>, XU Wei<sup>3</sup>, ZHANG Wenjun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Electro-Mechanical Engineering, Shanghai 201109, China; 2. School of Communication and

Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. School of Electronic Information and

Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the continuous evolution of electromagnetic countermeasure and radar technologies, radar signal has gradually developed from the traditional continuous wave and monopulse form to the complex waveforms such as broadband linear frequency modulation, frequency agility, and frequency hopping. The frequency-measurement methods commonly used are difficult to meet the requirements in the aspects such as the frequency-measurement accuracy and the frequency-measurement speed. Aiming at the characteristics that the instantaneous signal bandwidth of broadband phased array radar target echo simulator is up to 2 GHz and the sweep or random frequency hopping signal bandwidth covers the whole working frequency band, in this paper, the technology of instantaneous frequency-measurement guidance combined with real-time broadband digital channelized precise frequency-measurement is innovatively adopted. An ultra-broadband and high-precision instantaneous frequency-measurement module and the corresponding software are designed, developed, and applied to the development of broadband target echo simulator. The results are verified by actual measurement and hardware-in-the-loop simulation test, and the indicators such as the accuracy, range, and real-time performance of the frequency-measurement can fully meet the overall performance requirements.

**Key words:** broadband; instantaneous frequency-measurement; frequency guidance; digital channelized; radar simulator

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2019-06-13

基金项目: 装备预先研究资助项目(41401030102)

作者简介: 李小琳(1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为半实物仿真技术、通信与信息系统、电磁场与微波技术等。

## 0 引言

作为电磁对抗、雷达信号模拟和抗干扰等领域的一项关键技术,宽带瞬时测频能够完成对所接收到的雷达信号载波频率进行快速测量。瞬时测频技术起源于 20 世纪 50 年代,随着宽带雷达技术的发展和电磁信号实时侦收的需求,对雷达辐射和电磁环境信号瞬时测频的要求越来越高<sup>[1]</sup>。传统的测频方法主要分为鉴频法、多信道法、干涉仪比相法等<sup>[2]</sup>。近些年,国内外研究人员在测频技术方面进行了深入的研究。文献[3]提出了一种基于时间数字转换器的瞬时测频技术,提高了频率测量的稳定性,但缺点是测量信号动态范围较小。文献[4]提出了基于CORDIC算法的瞬时测量方法,该方法具有对单频点测量精度高、瞬时性好的优点,但对多频和复杂调制信号不适用。文献[5]对计数式瞬时测频技术进行了研究,但该方法测频精度低。国内外学者把微波光子技术引入到宽带接收机的瞬时测频理论研究之中,大大提高了测频的带宽范围,但在工程实践上鲜有报道<sup>[6-9]</sup>。

在半实物仿真试验环境下,通常运用雷达目标回波模拟器来产生回波或干扰信号。对于主动雷

达制导体制,模拟器需要快速、精确地侦收雷达发射信号,叠加目标特性、多普勒、延时等信息后实时生成目标回波信号。由于目标回波模拟器要应对多个型号的仿真需求,且各型号工作频率跨度大、信号形式多样,特别是捷变频、变重频雷达信号对接收机前端瞬时测频提出了更高的要求。本文采用瞬时测频引导结合实时宽带数字信道化精测频技术,设计研制了超宽带、高精度的瞬时测频模块和软件,提高了测频精度和测频速度,并把研究成果应用于宽带目标回波模拟器的研制之中。

## 1 宽带瞬时测频变频引导技术

### 1.1 瞬时测频引导方法

在实际半实物仿真应用中,由于目标回波模拟器系统的前端带宽较宽,覆盖 X、Ku、Ka 频段,要在 4 GHz 以上的射频带宽内完成频率跟踪,需要采用实时的频率跟踪手段。本文采用微波瞬时测频技术,完成对工作频段内的微波信号粗测频,进而引导频综产生相应的本振。相应的微波系统原理框图如图 1 所示。

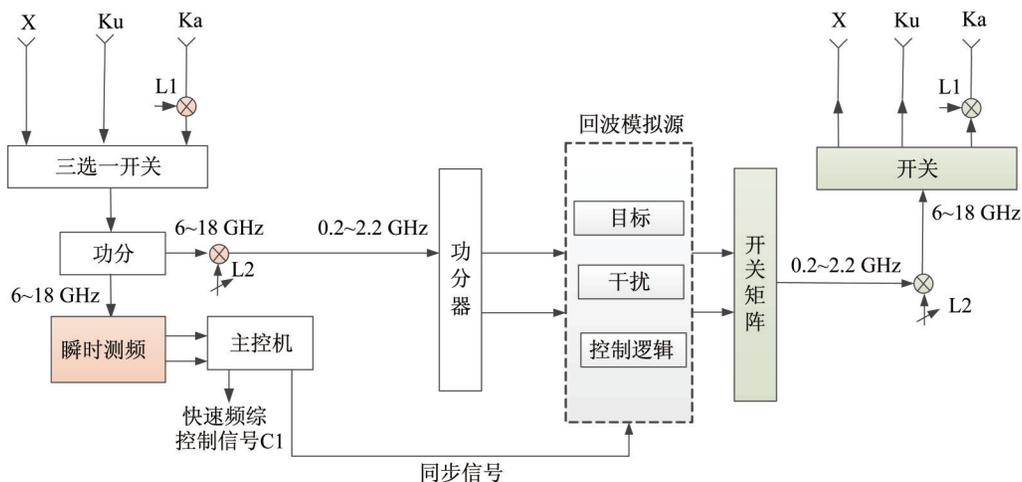


图 1 模拟器微波系统原理框图

Fig.1 Principle block diagram of the microwave system of the simulator

在接收雷达发射信号时,将接收前端收到的信号分为 X、Ku 和 Ka 3 个波段的射频信号,经统一下变频到 6~18 GHz。输出信号功分两路,一路输出至瞬时测频模块,瞬测的输出经信号分选之后,输出频综控制信号 C1,进而频率引导,并同时产生本振信号 L1;另一路信号经本振 L2,得到 0.2~2.2 GHz 的中

频信号。中频信号再经过 2 路功分,分别输入至目标模拟信号源、欺骗/压制干扰源进行数字调制处理。此外,瞬测接收机输出射频脉冲的检波信号输出到模拟源,用于产生同步信号。通过上述工作流程描述,模拟器系统可以实现将大于 4 GHz 的捷变频带宽引导到 2 GHz 的中频带宽内进行数字信号处理。

1.2 瞬时测频工作原理

瞬时测频接收机以宽开的模式,接收并测量每个雷达信号的载频、脉宽幅度、到达时间等信息。

实现瞬时测频有多种技术途径,但只要能瞬时(单脉冲)给出输入射频(RF)信号的频率代码,均可称为瞬时测频。文中的多通道延迟线鉴频体制的瞬时测频技术建立在相位干涉原理之上,所采用的

自相关技术是波的干涉原理的一种具体应用<sup>[2,10]</sup>。

实现瞬时测频的核心部件是微波鉴相器,它由功分器 1、延迟线、功分器 2、3 个 3 dB 90°电桥、4 个平方律检波器以及 2 个差分输入、差分输出的视频放大器组成。其中,功分器 2 及 3 个 3 dB 90°电桥组成的部件称为相关器。微波鉴相器电原理如图 2 所示。

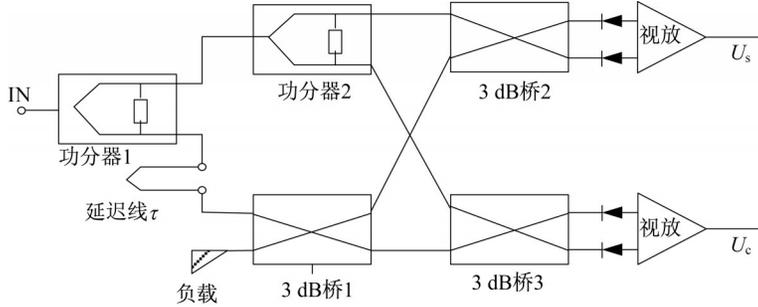


图 2 微波鉴频器原理框图

Fig.2 Principle block diagram of the microwave frequency discriminator

功分器将输入 RF 信号分成两路:一路不经延迟线直接送入相关器;另一路则通过一段延迟时间为  $\tau$  的射频同轴电缆后再送入相关器。两路信号由于延时线的存在而形成了  $\theta = 2\pi f\tau$  的相位差。这个相位差由鉴相器检出,在差分视放的输出端分别给出以下信号:

$$U_s = KU^2 \sin \theta \quad (1)$$

$$U_c = KU^2 \cos \theta \quad (2)$$

式中:  $U_s$ 、 $U_c$  分别是相位  $\theta$  的正余弦函数;  $\theta$  取决于频率和延迟时间  $\tau$ 。由于  $\tau$  是确定的,因此,只要对  $U_s$ 、 $U_c$  进行幅度量化的,即可对  $\theta$  实现编码,从而也就可得到频率  $f$  的数字代码。

由于  $U_s$ 、 $U_c$  是  $\theta$  的正余弦函数,因此,它是  $2\pi$  为周期的,则有

$$2\pi f\tau = 2\pi \quad (3)$$

即

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

由此可见,延迟线长度确定以后,测频范围即不模糊带宽也确定了。

采用单个鉴相器的瞬时测频分辨率有限,量化最多可达 6 bit,平均测频分辨率为  $\Delta f/2^\circ$ 。且因  $U_s$ 、 $U_c$  为  $\theta$  的正、余弦函数,故当输入信号引起  $\theta$  以  $2\pi$  为周期的变化时,鉴相输出就产生周期变化,即出现了测频模糊。为保证一定的测频精度,对延迟线和相关器的相位精度及系统的信噪比的要求也很高。

为克服这些缺点,可采用多通道方案,由最长的延迟线通道来决定频率分辨率和精度,用最短延迟线通道来决定瞬时频率覆盖范围,根据通道之间的延迟线长度的比例关系来解决测频模糊问题。

6~18 GHz 频段我们采用 5 通道混合延迟线长度比的测频方案,5 个通道的延迟线长度分别为  $\tau$ 、 $2\tau$ 、 $8\tau$ 、 $32\tau$ 、 $128\tau$ 。最粗测频通道(对应延迟线长度  $\tau$ )量化 1 bit 二进制码,其次 3 个通道(对应延迟线长度分别为  $2\tau$ 、 $8\tau$ 、 $32\tau$ )各量化 2 bit 二进制码,精测频通道(对应延迟线长度  $128\tau$ )量化 6 bit,给出 13 bit 二进制频率代码。频率计算公式为:RF=起点+频率码  $\times 1.5$  MHz。

瞬时测频接收机主要包括限幅放大器、功分器组件、延迟线、相关器、检波器、视放及量化编码电路。5 通道混合延迟线长度比的测频方案系统框图如图 3 所示。

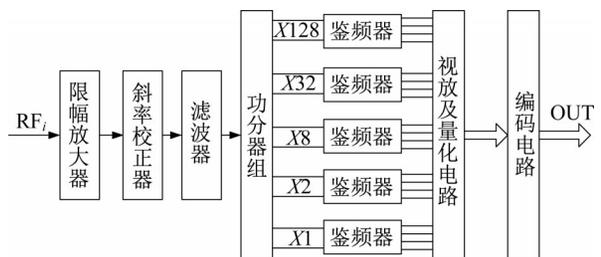


图 3 延迟线长度比瞬时测频系统框图

Fig.3 Block diagram of the instantaneous frequency-measurement system for the delay line length ratio

视放及移相量化电路完成将雷达载波信号经微波鉴频器输出的 4 路信号:  $1 + \sin \theta$ 、 $1 - \sin \theta$ 、 $1 + \cos \theta$ 、 $1 - \cos \theta$ , 由视频差分运算放大器进行差分放大, 使之变成完全正交的  $\sin \theta$ 、 $-\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ 、 $-\cos \theta$  4 路信号。通过调整增益电位器, 使 4 路输出信号幅度归一化。

量化编码电路将差分视放电路输出的 4 路正交信号通过电阻环网络进行量化, 根据编码要求输出一组移相信号, 再通过高速比较器进行模数转换。由于编码要求最终输出 13 bit 二进制码有 5 路微波通道, 因此, 视放及移相量化电路也由 5 个通道组成, 电阻环专门定制, 数值精度较高, 因此, 移相误差  $< 2^\circ$ 。我们采用大规模可编程器件来实现频率编码, 完成通道间纠错及生成二进制单调增长的频率代码的功能。

为保证测频精度, 通过温度传感器对周围环境温度进行监控, 频率编码电路根据当前温度选择不同的频率校正数据对频率码进行校正。

## 2 实时宽带数字信道化精测频技术

目标回波模拟器系统采用瞬时测频技术, 可以

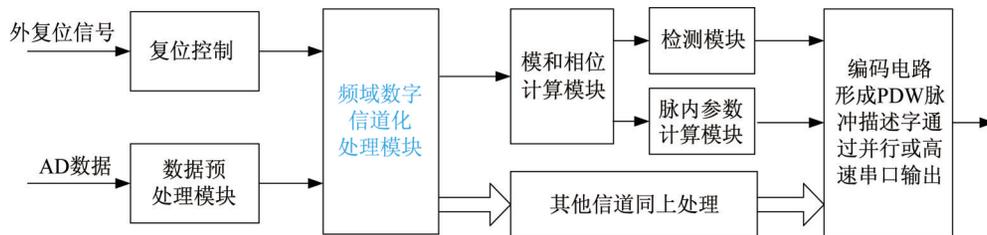


图 4 精测频软件处理构架图

Fig.4 Processing framework diagram of the precision frequency-measurement software

### 2.2 数字信道化精测频系统软件模块设计

#### 2.2.1 数据预处理模块

数据预处理模块主要根据系统的需要选取合适的窗函数, 对截取的数据进行加权处理, 减小由于数据截取产生的信号旁瓣泄漏。为了满足系统动态要求, 本设计采用 128 阶窗函数, 该窗函数可以达到优于 55 dB 的处理动态。数据预处理窗函数如图 5 所示。

#### 2.2.2 频域数字信道化模块

频域数字信道化模块是系统的主要处理模块, 它采用频域抽取的方式, 将频域划分成 32 个均匀分布的信道, 相邻信道按照 50% 进行交叠, 如图 6 所

示。将满足频域最小间隔的信号, 在不同的信道中输出, 从而使得系统具有区分同时到达信号的能力。

### 2.1 数字信道化精测频系统架构设计

目标回波模拟器系统在上电后自动执行系统复位操作, DRFM (Digital Radio Frequency Memory) 在复位完成后可接收中频 2 GHz 带宽内的 AD 量化数据。数字测频模块首先进行预处理, 然后将数字信号送入信道化处理模块, 信道化处理模块输出正交的复信号, 经模和相位处理模块后, 输出信号幅度和相位信息送入检测模块、脉内参数计算模块。检测模块判断出信号的有无, 脉内参数计算模块测量脉冲的参数, 最后形成的结果送到编码模块, 形成 PDW (Pulse Description Word) 脉冲描述字输出给系统进行分选<sup>[11-12]</sup>。数字信道化精测频软件处理构架如图 4 所示。

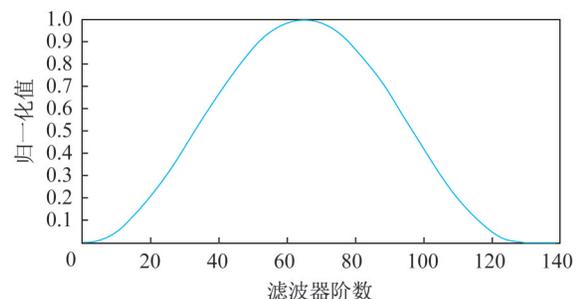


图 5 数据预处理窗函数

Fig.5 Window function for data preprocessing

示。将满足频域最小间隔的信号, 在不同的信道中输出, 从而使得系统具有区分同时到达信号的能力。

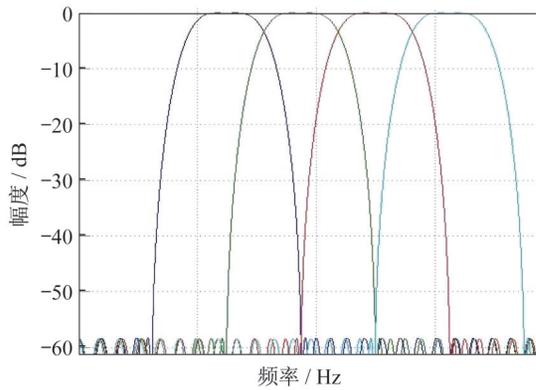


图 6 频域信道划分仿真特性图

Fig.6 Simulation characteristic chart of channel partitioning in the frequency domain

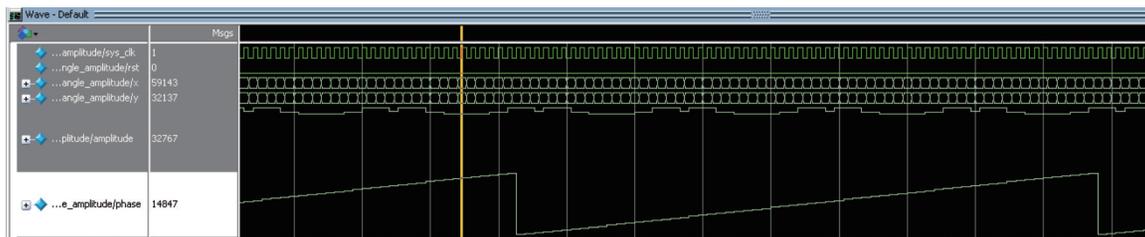


图 7 幅相计算模块输出结果

Fig.7 Output of the amplitude and phase calculation module

采用了基于总和法与表决法的时域检测方法,门限采用噪声统计的自适应门限与 2 次门限相结合的方式,对窄脉宽和宽脉宽的信号分别用不同的匹配准则,对较长的输入脉冲,具有更高的灵敏度。

#### 2.2.4 脉内参数精确测量模块

脉内参数主要包括脉宽、重频、载频、到达时间和其他一些信息。脉内参数计算模块就是根据模和相位计算模块的结果计算、统计脉内的参数,并实现信息的综合。

脉冲幅度通过对过门限值的脉冲幅度值作累加平均得到,脉冲幅度一半所对应的前沿时刻即为脉冲到达时间,前后沿时间间隔为脉冲宽度。对一个脉冲内的瞬时频率进行平均,便可以测得准确的载频信息。对于脉冲压缩信号,得到的载频是指该信号的中心频率。脉内参数处理流程如图 8 所示。

编码模块是处理模块的最后一级,负责将所有信息进行综合和融合,因此,编码模块直接影响系统的输出结果。在完成脉内参数的精确测量后,编码模块将脉内的参数进行整合形成 PDW 脉冲描述字,编码模块还需要根据设定的规则对当前的数

信道化处理模块是整个设计的核心处理模块,信道化处理模块的处理能力、处理的动态范围、处理输出信号的正交度等对测量精度有非常大的影响。我们针对该模块专门进行了优化设计,既保证了流水线处理的高处理带宽,又保证了测量精度的要求。

#### 2.2.3 幅相计算和信号检测模块

该模块使用旋转坐标系的处理方法,将信道化输出的复信号数据转化成信号的幅度和相位实数据,模块输出结果如图 7 所示。幅度数据用来检测信号的存在,确认信号的峰值等。相位数据用来计算信号的频率和判断信号类型等。

据进行识别,减小由于各种原因产生的虚警。

### 3 瞬时测频硬件实现

瞬时测频模块将接收频段内的射频信号放大、滤波、均衡、功分、延时、混频后、形成视频信号和检波信号,分别对视频信号 AD 采样后进行鉴相、温度校正、校码及拼接后产生数字频率码和相关状态码。

#### 3.1 瞬测模块控制接口时序

##### 3.1.1 外读模式时序

图 9 所示为外读模式时序图。图 9 中,  $t_1 < 30$  ns;  $t_2 \leq 200$  ns;  $t_3 \leq 100$  ns;  $t_w > 100$  ns。若无 ACK 信号,则 D\_RDY 在 0.1 ms 后自动复位。

##### 3.1.2 内读模式时序

图 10 所示为内读模式时序图。图 10 中,  $t_2 \leq 200$  ns,  $t_3 \leq 100$  ns,  $t_w > 100$  ns, 若无 ACK 信号,则 D\_RDY 在 0.1 ms 后自动复位。

##### 3.1.3 调频模式时序

图 11 所示为调频模式时序图。图 11 中,  $t_p > 4$   $\mu$ s;  $t_c \leq 500$  ns;  $t_{H1} > 250$  ns。

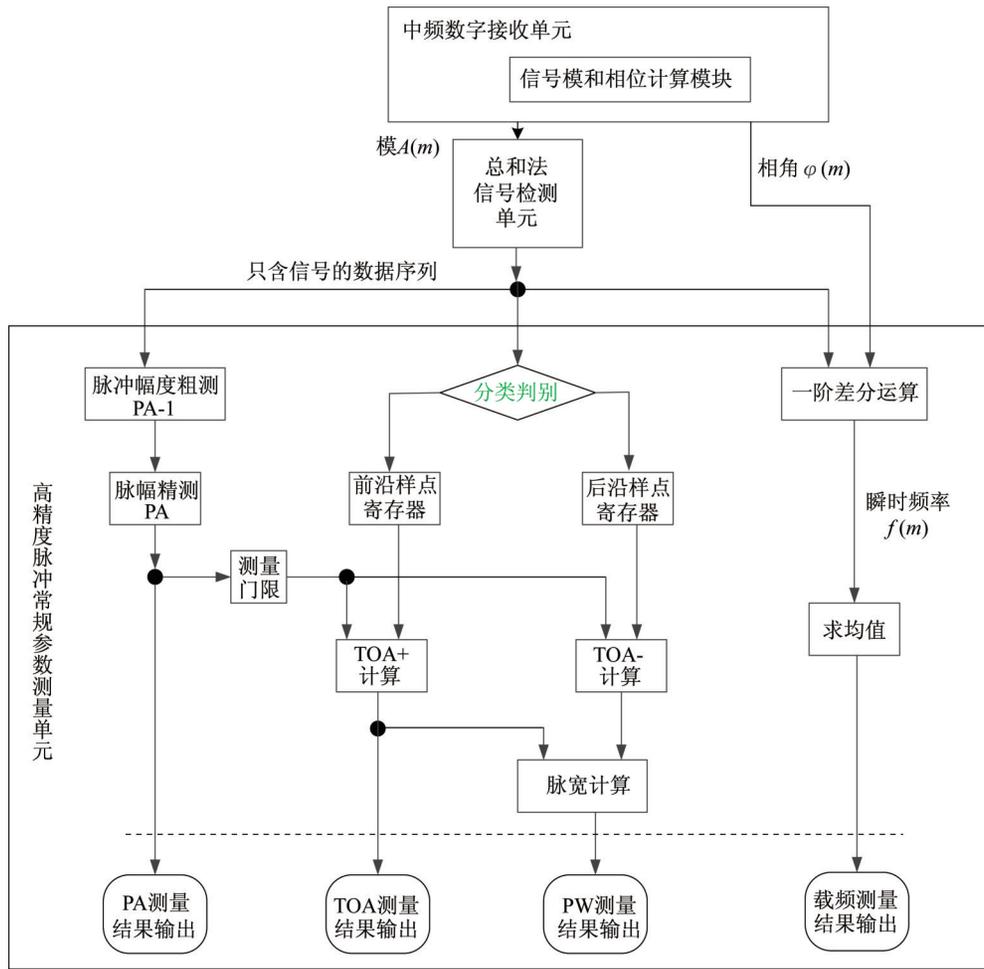


图 8 脉内参数处理流程图

Fig.8 Flow chart of intra-pulse parameter processing

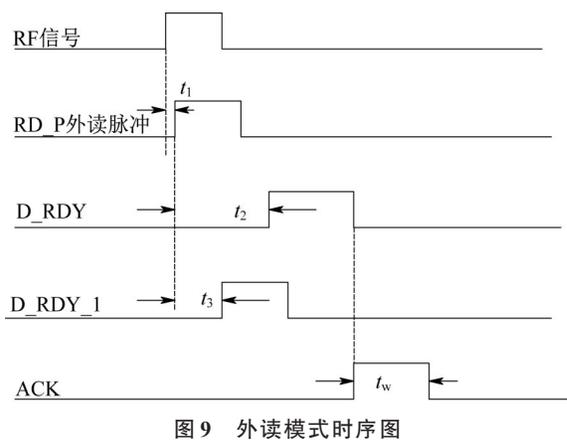


图 9 外读模式时序图

Fig.9 Sequence diagram of the external reading mode

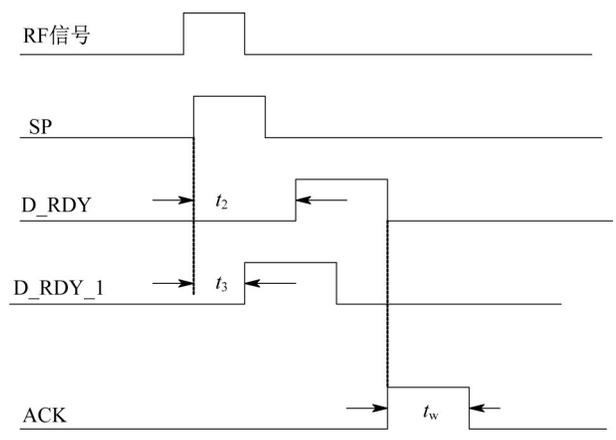


图 10 内读模式时序图

Fig.10 Sequence diagram of the internal reading mode

3.1.4 连续波模式时序

图 12 所示为连续波模式时序图。图 12 中,  $t_{c1}=1$  ms,若无ACK信号,则D-RDY在0.1 ms后自动复位。

3.2 瞬时测频模块结构设计

瞬时测频模块分为 3 个子模块,分别是变频部

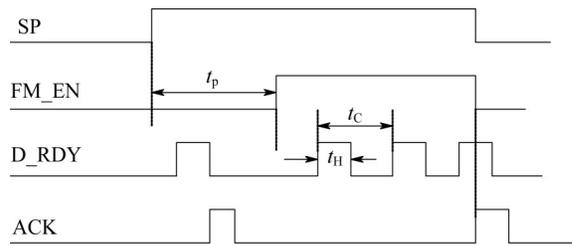


图 11 调频模式时序图

Fig.11 Sequence diagram of the frequency modulation mode

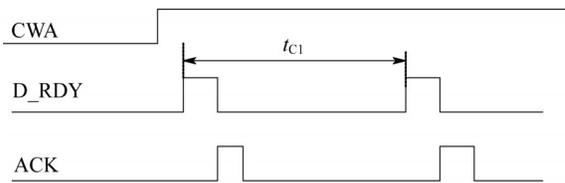


图 12 连续波模式时序图

Fig.12 Sequence diagram of the continuous wave mode

分、开关滤波器组和测频接收机,子模块间采用半刚成型电缆连接。箱体采用标准 CPCI 结构形式,占用一个槽位,尺寸为 233.35 mm×160 mm×48 mm。瞬时测频模块结构图如 13 图所示。测频接收机实物如图 14 所示。

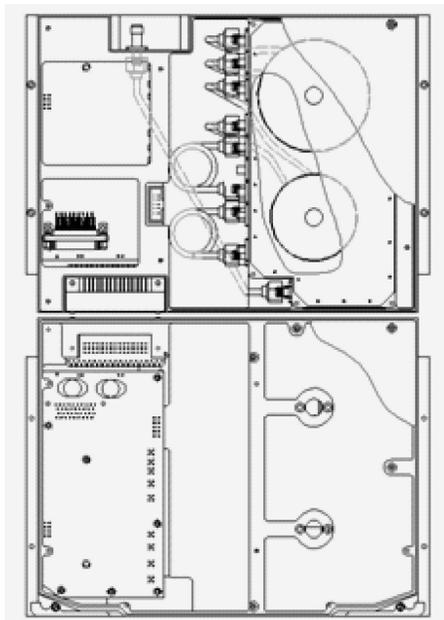


图 13 瞬时测频模块结构图

Fig.13 Structure diagram of the instantaneous frequency-measurement module

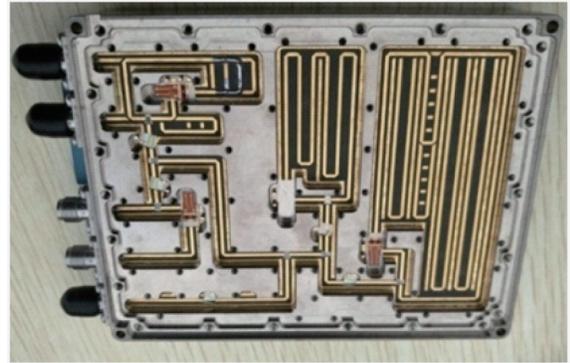


图 14 测频接收机实物图

Fig.14 Physical picture of the frequency-measurement receiver

## 4 瞬时测频模块的性能实测

### 4.1 瞬时测频接收机性能测试

通过实测,得到瞬时测频接收机的实测结果,包括常温、低温和高温,以及不同输入功率条件下的测频精度,结果见表 1。

表 1 测频精度汇总(R.M.S)

Tab.1 Summary of the frequency-measurement accuracy

序号	工作温度	脉宽	输入功率/ dBm	测频精度/ MHz
1	常温	0.1 μs	-45	2.68
2		0.1 μs	5	2.48
3		CW	-45	2.19
4		CW	5	2.10
5	低温 (-40 °C)	0.1 μs	-45	2.57
6		0.1 μs	5	2.73
7		CW	-45	2.73
8	高温 (70 °C)	CW	5	2.49
9		0.1 μs	-45	2.75
10		0.1 μs	5	2.53
11		CW	-45	2.78
12		CW	5	2.42

### 4.2 数字信道化精测频性能测试

利用宽带数字储频模块、任意波形发生器、示波器和频谱仪等,对数字信道化接收机模块进行性能测试。

主机通过 JTAG 加载处理程序到处理板 FPGA 中,通过 Signaltap 将处理结果读出显示,根据输入结果和输入信号对处理软件的相应参数进行调整。

设计指标和实际完成指标的对应关系见表 2。

表 2 设计要求与实际完成指标

Tab.2 Design requirements and actual achievement indicators

序号	性能指标	设计要求	实际完成指标
1	频率范围	1 200~2 200 MHz	200~2 200 MHz
2	瞬时带宽	1 000 MHz	2 000 MHz
3	动态范围	40 dBc	40 dBc
4	适应信号密度	50 万脉冲/s	优于 50 万脉冲/s
5	测频精度	1 MHz	优于 500 kHz
6	脉宽测量范围	0.2~1 000 $\mu$ s	0.2~1 000 $\mu$ s

## 5 结束语

在电子侦测和宽带雷达目标信号模拟等实际应用中,瞬时测频技术特别是宽频带瞬时精确测频技术是所需研究的关键技术之一。本文利用瞬时测频引导和实时宽带数字信道化精测频等技术,在保证测频带宽覆盖整个 X、Ku、Ka 的前提下,确保了测频的精度和实时性,能够满足宽带相控阵雷达目标回波模拟器的半实物仿真要求。基于现有研究成果,将微波光子技术应用于超宽带瞬时测频模块的工程研制将是后续的研究重点。

### 参考文献

[ 1 ] SHIRMAN Y D, LESHCHENKO S P, ORLENKO V M. Advantages and problems of wideband radar [C]// 2003 Radar Conference. 2003:15-21.

[ 2 ] 胡来招. 瞬时测频[M]. 北京:国防工业出版社,2002.  
 [ 3 ] 凌祥,张树森. 一种基于时间数字转换器的瞬时测频技术[J]. 电子测量技术,2016,39(11):16-18.  
 [ 4 ] 郑斌,蒋碧颖. 基于CORDIC算法的数字瞬时测频[J]. 信息技术,2017(10):129-132.  
 [ 5 ] 姜永华,杜文超. 级数展开法在捷变频雷达综合测试仪误差估计中的应用[J]. 海军航空工程学院学报,2003,18(5):525-527.  
 [ 6 ] DRUMMOND M V, MONTEIRO P, NOGUEIRA R N. Photonic RF instantaneous frequency measurement system by means of a polarization-domain interferometer [J]. Opt Expr, 2009, 17(7):5433-5438.  
 [ 7 ] DRUMMOND M V, MARQUES C A F, MONTEIRO P, et al. Photonic instantaneous frequency measurement system using complementary modulation [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(3):143-144.  
 [ 8 ] ZOU X H, LU B, PAN W, et al. Photonics for microwave measurements [J]. Laser and Photonics Reviews, 2016, 10(5):711-734.  
 [ 9 ] PAN S L, ZHANG Y M. Microwave photonics radar and key technologies [J]. Science and Technology Review, 2017, 35(20):36-52.  
 [ 10 ] 陈晓威,李彦志,何文波. 瞬时测频系统测 LFM 信号载频误差分析[J]. 现代电子技术,2015,38(19):28-32.  
 [ 11 ] 朱晓,司锡才. 一种高效动态数字信道化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):161-164.  
 [ 12 ] BERAQ B. A digital instantaneous frequency measurement receiver [J]. Microwave Journal, 2007, 50(5):276-280.

(上接第 141 页)

[ 5 ] 张伟,赵艳彬,廖鹤,等. 动静隔离、主从协同控制双超卫星平台设计[J]. 上海航天,2014,31(5):7-11.  
 [ 6 ] 陈绍青,王永. 基于磁悬浮隔振器的主动隔振控制实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40:61-66.  
 [ 7 ] 裘俊,邓成晨,朱敏,等. 平板型电磁作动器优化研究[J]. 宇航计测技术,2016,36(3):15-18.

[ 8 ] SENNO H, TAWARA Y, HIROTA E. Coercive force of new Cu-substituted samarium cobalt alloys [J]. Applied Physics Letters, 2008, 29(8):514-526.  
 [ 9 ] KONOPINSK E J. What the electromagnetic vector potential describes [J]. American Journal of Physics, 1978, 46:499-503.

## 《上海航天(中英文)》征稿简则

《上海航天(中英文)》已列入中国知网、万方、维普、超星等数据库,并被收录为“中国科技核心期刊”和“中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊”(扩展版),是宣传航天技术发展、展示航天科研成果的重要窗口,也是各上级机关、高等院校、兄弟单位进行学术交流与互通信息的纽带。

### 一、征稿范围

稿件内容以研究论文与报告、技术交流、专题综述等形式为主,主要刊登有关卫星、火箭、载人飞船、深空探测、导弹等系统及其分系统的预先研究、研制、试验及工程实践等方面的科技论文,反映航天重点专业的新概念、新方法、新技术。栏目包括专家特稿、专业纵论、工程实践、创新与探索、学术争鸣、战略发展与情报研究、产学研园地等。

### 二、投稿要求

1. 本刊目前仅接收在线投稿,不接收纸质投稿或邮箱投稿。请登陆 <http://shht.ijournal.cn>,进入“作者投稿查稿”注册后投稿。

2. 作者在投稿前须对文章作脱密处理,并在投稿时按要求上传保密审查证明的扫描件。

3. 凡国家、省部级科技进步奖课题论文,自然科学基金项目论文,重点攻关项目论文,需提供项目编号,可提前安排发表。

4. 作者须遵守学术规范与准则,杜绝一稿多投及抄袭、剽窃等学术不端行为。

5. 本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》及CNKI系列数据库、万方数据库、维普数据库、超星数据库等收录,作者著作权使用费与本刊稿费一次性给付,作者若不同意文章被收录,请在来稿中予以说明,本刊将做适当处理。

### 三、写作要求

1. 来稿应突出航天理论研究与技术的创新性,兼顾工程应用,应给出相应的理论依据、参数确定原则,论文应注重理论性、新颖性、逻辑性,避免写成技术报告。

2. 来稿内容充实,论点明确,论据充分,层次分明,文字简练,字数一般以5000~6000字为宜(情况特殊可超出)。

3. 来稿应包括题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、作者简介、正文、参考文献著录。题目一般不超过20个汉字。摘要(200~300字)说明研究目的、方法、结果或结论等,突出创新点及工程应用价值。关键词5~8个。参考文献尽量在10篇以上,并在正文中标出引用处。请提供题目、作者、单位、摘要、关键词、图题、表题、参考文献的英译文。

4. 作者简介包括姓名、出生年、学历与职称、主要研究方向、电子邮箱。

5. 正文包括引言、主体、结论或结束语部分。引言说明研究历史、现状、存在问题、选题意义与创新性。主体要求语言简洁、准确无歧义、逻辑完整、结构严谨。结论或结束语对研究内容进行总结,提出展望。

6. 量与单位符合国家标准。每个量符号第一次出现时应给出物理意义说明,同一符号只能表示一个物理量,必要时可用下标区分。一般变量为斜体,矢量、矩阵、张量、向量为斜黑体。单位一般为正体。

7. 公式用公式编辑器输入。仅重要或文中引用的公式才需编号。

8. 正文中给出图表的引文。图数量一般不超过12幅,尺寸尽量小于8cm。图中文字、数字、符号清楚,横纵坐标的变量名、单位、刻度值准确完整,不同线型或图符有说明。图可在Word或Visio中修改。表格栏头简化,避免斜线,不能空白;项目栏中文字简练;栏内尽量不要出现公式;单元格内内容相同时不能用“同左”、“同右”、“同上”等表述,无内容时要用一字线补齐。图表中的量与单位采用“量/单位”方法标注。

9. 文中外文缩写第一次出现时给出中文全称。

10. 参考文献遵循“最新、关键、必要”的原则,在正文中顺序引述,未公开发表资料不引用。文献著录格式参考

国家标准《文后参考文献著录规则》。主要如下:

专著姓名.书名[M].版本(第1版不写).出版地:出版者,出版年:XX-XX(页).

期刊姓名.题名[J].刊名,出版年,卷(期):XX-XX(页).

报告姓名.题名[R].报告名称,编号,出版时间.

会议录姓名.题名[C]//会议名称.会议地点(城市):出版者,出版年:起止页码.

标准标准起草者.标准名称[S].标准发布者,标准号,出版年.

### 四、联系方式

编辑部地址:上海市闵行区元江路3888号技术基础所南楼

邮政编码:201109

联系电话:(021)24181441;(021)24181541

投稿网站:<http://shht.ijournal.cn>

电子邮箱:sht8075b@vip.163.com

《上海航天(中英文)》杂志编辑部