

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107599

小型化低相噪星载铷原子频标研制及其性能分析

王剑祥, 崔敬忠, 王世伟, 张俊, 刘志栋

(中国空间技术研究院 兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

摘要:随着我国天地一体化通信网络的建设,采用微小卫星作为天基平台,与地面站相互配合,可实现信号的全球覆盖和高速传输。新的通信方式对时钟的稳定性和精确性提出了更高的要求,采用晶振已无法满足。针对这种需求,结合铷原子频标具有较好的短期频率稳定度的特点,采用微波锁相倍频、数字频率综合以及 TE_{011} 模式磁控管腔等技术,对星载铷原子频标进行了小型化设计,并扩展了铷原子频标的 100 MHz 锁相输出功能。性能分析表明,所研制的小型化低相噪星载铷原子频标具有稳定度高、相噪低、工作温度范围宽的特点。产品重量 1.8 kg, 稳态功耗 22 W, 100 MHz 信号频率稳定度 $\sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ ($1 \text{ s} \leq \tau \leq 10\,000 \text{ s}$), 远端相噪 -162 dBc/Hz (@ 1 MHz), 能够长期在轨稳定运行,可作为通信卫星载荷的时钟源。

关键词: 铷原子频标;小型化;低相噪;星载

中图分类号: TH714 V443+.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.30

Development and performance analysis of a miniaturized low phase noise space borne rubidium atomic frequency standard

Wang Jianxiang, Cui Jingzhong, Wang Shiwei, Zhang Jun, Liu Zhidong

(Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the construction of satellite-ground integrated communication network, the collaboration between space borne microsattellites and ground stations can achieve global coverage and high-speed transmission of signals. This new communication mode puts forward higher requirements for the stability and accuracy of the clock, which cannot be satisfied by using crystal oscillator. Combining with the requirements of satellite-ground integrated communication network and the excellent short-term frequency stability of rubidium atomic frequency standard (RAFS), the miniaturization design of RAFS is carried out by using phase-locked microwave generation, direct digital frequency synthesizer, preamplifier, phase sensitive detection and TE_{011} mode magnetron microwave cavity. The 100 MHz phase-locked output function is added to RAFS to meet the requirements of communication payload on clock frequency as well. Performance analysis exhibits that the miniaturized low phase noise space borne RAFS has the characteristics of high stability, low phase noise and wide operating temperature range. The weight of the product is 1.8 kg, the steady-state power consumption is 22 W, the frequency stability of 100 MHz signal is $\sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ ($1 \text{ s} \leq \tau \leq 10\,000 \text{ s}$) and the phase noise @ 1 MHz is -162 dBc/Hz . The RAFS can operate stably in orbit for a long time, which can be used as the clock source of communication satellite payload.

Keywords: Rubidium atomic frequency standard; miniaturization; low phase noise; space borne

0 引 言

导航卫星能够为人提供精确的定位服务,很大程度上是由原子频标的优异性能所决定的^[1]。对导航卫星而言,高精度的原子频标是实现系统精确定位、守时、授时的基础与核心设备^[2]。现代卫星导航最常用的原子频标包括铷原子频标、铯原子频标以及氢原子频标。美国的全球定位系统

(global positioning system, GPS)卫星以铯原子频标和铷原子频标作为星载原子频标,欧洲的 Galileo 系统选用铷原子频标搭配氢原子频标的方案,而我国的北斗导航系统 (beidou navigation system, BDS) 选用铷原子频标作为主钟,搭配氢原子频标的方案^[3],且已对星载铷原子频标工程样机进行了搭载飞行验证。上述导航卫星系统均选用铷原子频标作为星载原子频标。铷原子频标是一种广泛使用的二级原子频标,其具有体积小、功耗低、短期稳定度高等优点,大量的应用于

导航、定位、通信、时间服务等领域^[4-5],是导航系统的首选。铷原子频标作为导航卫星的主载荷,能够为整星提供具有高稳定性和准确度的 10 MHz 基准信号,通过星载时频系统生成授时和定位用时间信号。

我国的原子频标研制工作始于 20 世纪 50 年代,1973 年研制完成了首台铷原子频标原理样机。星载铷原子频标的预研工作始于 1999 年^[6],在北斗导航工程的支持下,经过国内多家研究所和高校的大力协同,于 2006 年完成国内星载铷原子频标的首次在轨飞行验证。2009 年起,我国的星载铷原子频标进入全面在轨应用阶段,每颗北斗组网卫星均配置有国产的星载铷钟。随着北斗卫星工程的进一步建设,后续的卫星所使用的铷原子频标全面实现国产化,至 2020 年北斗系统全面建成运行,我国自主研制的星载铷原子频标已经工作 10 余年时间,在轨表现优异,满足北斗系统的性能需求,已经成为北斗导航系统的主钟^[7]。这标志着我国开始全面掌握星载铷原子频标的研制技术,国产星载铷钟性能指标达到了国际先进水平,优于欧洲同类产品,这也是我国北斗导航工程建设取得的重要成果之一^[8]。

小型化是卫星近年来发展的趋势之一,在保持原有功能和性能的前提下,卫星及其有效载荷的体积、重量、功耗都需要相应的缩减以达到小型化的目的^[9]。随着小卫星及微小卫星技术的蓬勃发展,可以预见,未来的 5 到 10 年内将有数百颗甚至更多的小卫星升空^[10]。为提高应用效益,综合化卫星系统是小卫星的一个重要发展趋势,尤其是商业航天卫星系统。这类商业化运行的小卫星往往是以组网的方式进行运行,重点针对 5G 通信、天地一体化互联网工程等领域,对高稳定度的时钟源有着迫切的需求。商用铷原子钟已经在通信基站、电力系统等领域应用并发挥了明显的技术和经济效益,如能将星载铷原子频标

适当改造,采用小型化设计使其满足小卫星对载荷的容纳能力,将会对商业通信卫星特别是我国的 5G 通信和天地一体化互联网建设产生积极的推动作用。如果能将全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)与商业通信卫星网络相融合,利用通信卫星很强的信号接收与中继能力,对 GNSS 的导航信号增强后进行转发,将会极大的提高导航卫星的覆盖能力和应用范围。

星载铷原子频标的小型化面临一系列难题,包括物理部分的小型化、电路部分的小型化、整机的综合集成设计等技术。本文对小型化星载铷原子频标的设计技术进行了研究,包括铷钟物理部分的小型化设计、电路部分的小型化设计,最后对所研制的用于通信卫星的一种小型化铷原子频标单机进行初步测试和性能分析。

1 铷原子频标的工作原理及组成

1.1 铷原子频标的组成

非自激型光抽运铷原子频标是一种比较成熟的星载铷原子频标方案。具有结构简单、可靠、短期稳定度好、工艺易于实现等优点,能够适应空间环境的苛刻要求。如图 1 所示,其组成包括物理部分、微波环路、伺服环路、控温电路、压控晶振等部分。其中物理部分是决定铷原子频标性能的重要部件^[11],在整个环路中起到鉴频器的作用,由灯激励电路、铷光谱灯、滤光泡、吸收泡、控温电路以及光检测电路组成。电子学部分主要功能是为铷原子频标的锁频环路提供必要的信号,包括微波激励信号、鉴相参考信号、压控电压等。主要由微波链路、伺服环路和压控晶振构成。电子学部分与物理部分联合作用实现铷原子频标的闭环锁定功能。

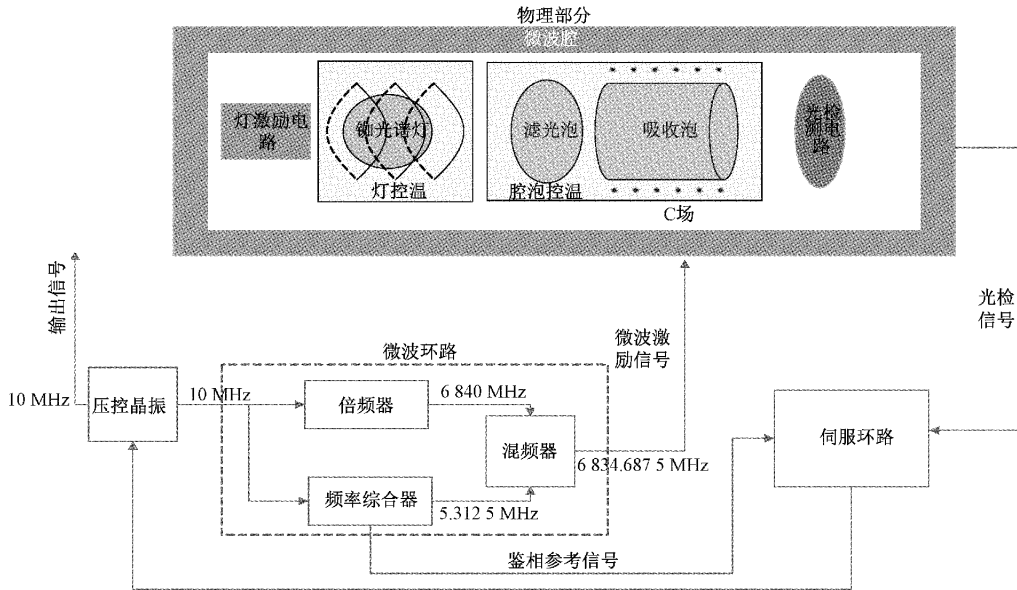


图 1 非自激型铷原子频标组成框图

Fig. 1 Block diagram of passive rubidium atomic frequency standard

1.2 铷原子频标的工作原理

如图2(a)和(b)所示。铷光谱灯和吸收泡主要成分为 ^{87}Rb ,滤光泡中为 ^{85}Rb 。铷原子频标的工作过程包括光抽运和微波激励。铷光谱灯内的 ^{87}Rb 原子被灯激励电路激励后点亮,发出 D_1 和 D_2 两条谱线,波长分别

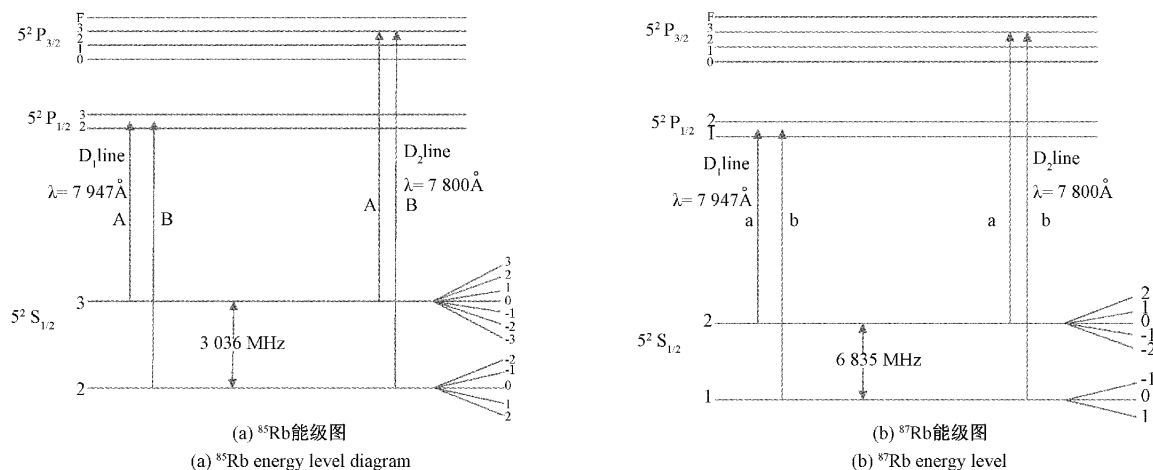


图2 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 能级图

Fig. 2 ^{85}Rb and ^{87}Rb energy level diagram

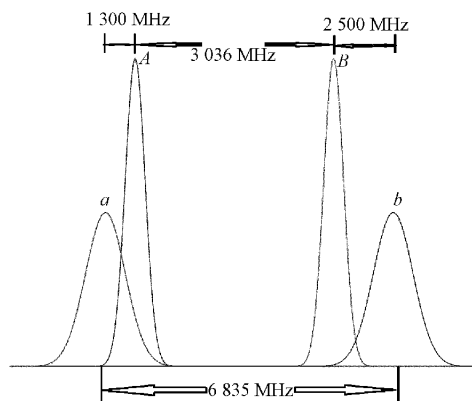


图3 ^{85}Rb A线、B线与 ^{87}Rb a线、b线的相对位置

Fig. 3 Relative position of ^{85}Rb line A and B to ^{87}Rb a and b

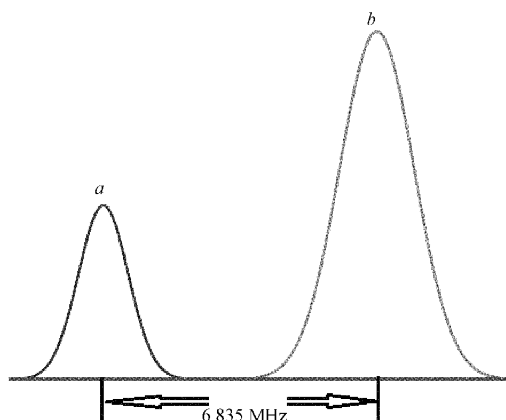


图4 经 ^{85}Rb 滤光泡后进入 ^{87}Rb 吸收泡的光谱

Fig. 4 Spectrum of ^{87}Rb absorption cell after ^{85}Rb filter cell

为794.7 nm和780 nm^[12],是从激发态 $5^2\text{P}_{1/2}$ 和 $5^2\text{P}_{3/2}$ 自发辐射获得的。铷光谱灯发出的光线经过滤光泡以后,由于 ^{85}Rb 的A线距离 ^{87}Rb 的a线较近,而B线相较于b线较远,如图3所示,所以可以滤除 ^{87}Rb 释放出的大部分a线而保留b线,如图4所示。

经过铷光谱灯的抽运作用,一段时间后, $F=1$ 上的原子大部分都被抽运到 $F=2$ 能级上,并且等概率的分布在 $F=2$ 的5个塞曼子能级上^[13]。这时吸收泡将不再继续吸收b线抽运光,处于吸收泡后端的光检测电路将接收到相对最大的光强^[14]。此时如果给微波腔馈入频率为6.84 GHz左右的微波, $|F=2, m_F=0\rangle$ 和 $|F=1, m_F=0\rangle$ 的两个超精细能级就会发生磁共振,从而使一部分处于 $|F=2, m_F=0\rangle$ 的原子跃迁到 $|F=1, m_F=0\rangle$ 。而处于 $|F=1, m_F=0\rangle$ 能级上的原子会被抽运光激发,跃迁到激发态,光检测电路接收到的光强减弱。光检测电路的输出能够随微波频率变化,当微波频率与基态能级 $|F=2, m_F=0\rangle$ 和 $|F=1, m_F=0\rangle$ 所对应的跃迁频率一致时,光检测电流最小。只要在微波上施加一个调制信号,使微波激励信号的频率随时间有一个小幅的周期性变化,就可以判断出微波频率与跃迁频率之间的差别,实现对原子跃迁的光检测。

2 小型化星载铷原子频标功能模块设计

2.1 微波腔

微波腔是一种具有储能和选频特性的微波元件,能够为微波和原子作用提供场所。微波腔的模式和结构会对微波与原子的相互作用产生显著影响。对原子频标而言,最重要的就是提高物理部分光检测的信噪比,即增大原子跃迁的信号强度,使参与0~0跃迁的原子数尽可能

增加^[15]。微波腔选用 TE₀₁₁ 模式,可使腔体内电磁场的磁场分量在腔体轴线附近(正好是微波-原子作用区)与腔轴向(Z 方向)平行且密集分布,所以这种场模式非常适合用于激发⁸⁷Rb 原子 0~0 跃迁,且 Q 值较高,可以实现高信噪比^[16]。磁控管腔内有若干极片对称的固定在腔内,极片和极片之间的空隙形成集总 L-C 结构,腔频主要由极片和空隙的尺寸决定,与腔长度无关,恰好弥补了 TE₀₁₁ 体积较大的不足,使物理部分的小型化,微波腔内场分布如图 5 所示。

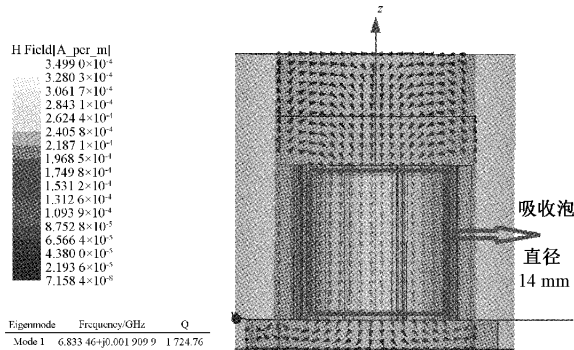


图 5 磁控管微波腔内微波磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution of magnetron microwave cavity

磁控管微波腔谐振频率 f 的半经验计算公式为:

$$f = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2 - (a+d)^2}} \sqrt{\frac{nw}{\pi d \epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\frac{1}{1 + cw/d}} \quad (1)$$

其中,磁控管腔半径为 b ,长度为 L ,极片半径为 a 、长度为 l 、极片厚度为 d ,缝隙宽度为 w ,经验补偿系数为 c ,缝隙数目为 n ,真空介电常数为 ϵ_0 ,真空磁导率为 μ_0 。实际设计中,磁控管腔需要容纳吸收泡,因此可根据吸收泡的直径来确定参数 b ,空载的微波腔频要高于 6.8 GHz。通过对以上参数的不断优化,可得到最佳参数组合,图 6 所示为一个小型化磁控管微波腔频测试曲线,其带载(吸收泡)腔频为 6.834 969 GHz, Q 值为 418.59。磁控管微波腔直径 14 mm,本体长约 30 mm,如图 7 所示。

2.2 抽运光源

抽运光源的组成包括铷光谱灯、灯激励电路及其配套的控温电路。铷光谱灯为球形如图 8 所示,充有⁸⁷Rb 和惰性起辉气体,可以降低谱灯的起辉电压,提高空间环境适应性。灯激励电路采用 Clapp 电路^[17],其原理如图 9 所示。提供维持铷光谱灯发光的射频场,铷灯泡是该振荡电路的负载,在射频振荡信号激发下,发射抽运光,抽运光波长分别为 780 nm 和 794.7 nm。

控温电路为铷光谱灯提供温度稳定的工作环境,为实现小型化并提高产品在轨可靠性,采用结构简单的桥

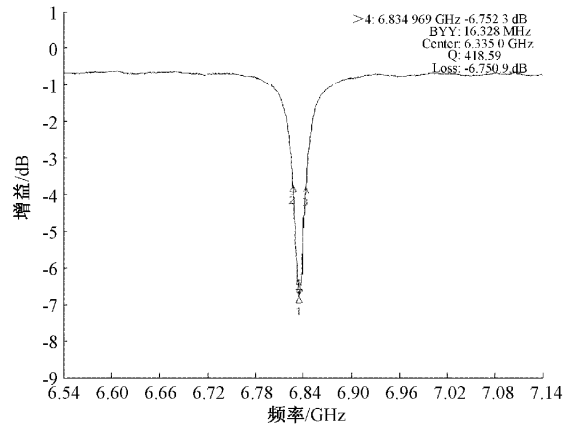


图 6 微波腔频测试曲线(含吸收泡)

Fig. 6 Resonant frequency of microwave cavity (absorption cell inside)

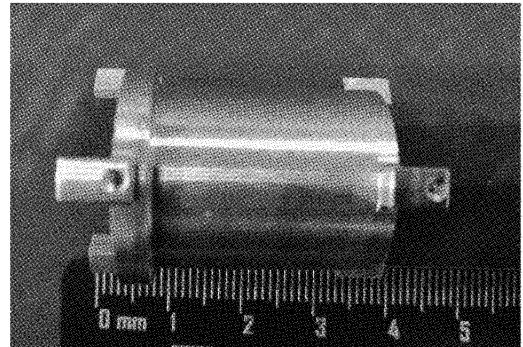


图 7 磁控管微波腔

Fig. 7 Microwave cavity

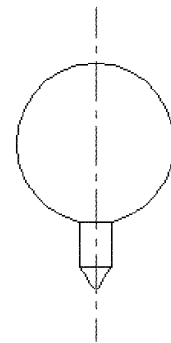


图 8 铷光谱灯结构

Fig. 8 Structure of the rubidium lamp

式控温,如图 10 所示。测温热敏置于灯室内,当温度产生波动时,桥臂会产生压差,驱动加热丝发热,温度达到控温点时,加热丝电流减弱,起到保温作用。振荡频率与激发功率成反比,激发功率大时容易点灯,但铷灯泡的寿命短,因此需要在确保灯稳定工作前提下尽可能减小激发功率。灯激励电路产生高频电场对⁸⁷Rb 气体中存在的少量离子和电子加速,使动能较高的离子或电子与起辉

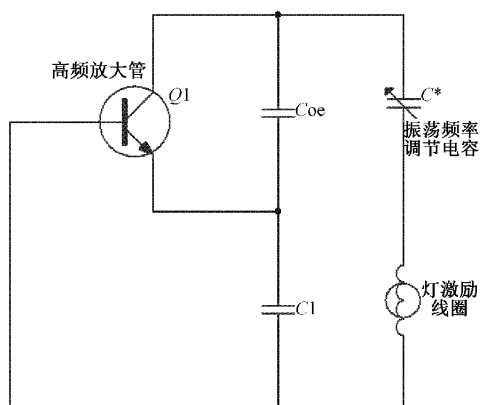


图9 灯激励电路原理

Fig. 9 Principle of lamp exciting circuit

气体分子碰撞发光^[18]。对铷光谱灯采用高电压点亮,低电压维持起辉的策略,以达到降低功耗和延长灯泡寿命的目的。星载铷原子频标的寿命主要是由铷光谱灯的寿命决定的。灯激励电路功率和控温是影响铷光谱灯点亮快慢的重要因素,直接决定铷钟入锁时间。通过调整灯激励功率和控温点,可使铷原子频标在常温下5 min内快速锁定。

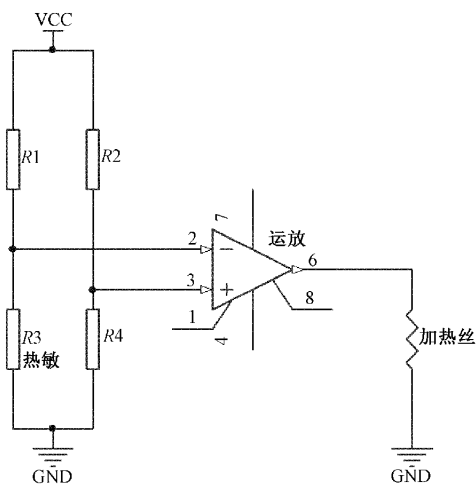


图10 控温电路原理

Fig. 10 Schema of thermal control

2.3 微波链路

微波链路的主要功能是产生带有调制的微波激励信号,并为伺服环路提供相同的调制方波作为鉴频参考。微波链路分为倍频器、频率综合器以及混频器3部分。倍频器将压控晶振输出的本振信号倍频至6 840 MHz,频率综合器将本振信号分频至5.312 5 MHz±100 Hz范围内并添加FSK调制,倍频和频率综合器产生的信号进行减法混频后得到激发 $m_F=0$ 两个能级跃迁的微波激励信

号。由于频率综合器输出的信号是有调制的,所以混频后的微波激励信号也具有相同的调制特性,微波激励信号作用于吸收泡后,光检测电路输出的交流信号能与伺服环路形成闭环锁频系统。

1) 倍频器

常用的倍频方法有傅里叶级数法和锁相倍频法两种^[19]。锁相环倍频是一种较为简单的倍频方式,由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器(voltage-controlled oscillator, VCO)以及分频器组成,能够提供较为稳定的频率输出,有利于电路的小型化。倍频器选择以锁相的方式进行倍频,利用压控晶振输出的10 MHz基准信号作为本振,输入到鉴相器,锁相环内部VCO的频率为6 840 MHz,鉴相器输出的电压信号与晶振和VCO分频后的信号的相位差成正比,通过滤波器处理后变为VCO的压控电压,从而实现倍频。

$$V_c(t) = V_m \sin \{ (L\omega_i - \omega_o)t + [\theta_i(t) - \theta_o(t)] \} \quad (2)$$

VCO上施加的压控电压可由式(2)来表示, V_m 是VCO频率范围内的最大压控电压值, ω_i 是锁相环的输入参考信号的角频率, ω_o 是输出信号经过分频器之后的频率, $\theta_i(t)$ 是输入信号的瞬时相位, $\theta_o(t)$ 是输出信号经过分频后的瞬时相位。当 $dV_c(t)/dt = 0$ 时,即压控电压不变或者为直流时,锁相环路锁定,6 840 MHz信号与10 MHz信号实现锁相倍频。

2) 频率综合器

频率综合器产生频移键控(frequency-shift keying, FSK)中频信号并向伺服环路输出调制方波。采用简化的直接数字频率综合(direct digital synthesis, DDS)算法,由现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)对时钟信号分频产生中心范围5.312 5 MHz±100 Hz的FSK信号和调制方波,时钟信号与晶振输出的10 MHz信号保持倍频关系,从而确保FSK信号和调制方波与本振同源,以便于铷钟环路实现锁定。同时FSK信号对频率控制字可进行线性调节,从而实现微波环路输出频率的调节,进而完成微波与泡频的匹配,实现频率准确度的调节。

DDS输出频率与时钟信号的关系可以用式(3)表示:

$$f_o = \frac{f_{clk} \cdot FTW}{2^N} \quad (3)$$

式中: f_o 为DDS的输出频率; f_{clk} 为FPGA的系统时钟; FTW 为频率控制字; N 是累加器位数。式(3)可以使中频信号和调制方波的产生可编程化并将调制转化为加法运算,只需通过程序修改频率控制字即可实现调制深度为110 Hz,调制频率为82 Hz的FSK中频信号。

频率准确度的调节方式如下,设频率准确度为 N ,输

出标准 10 MHz 信号所需的中频频率为 X (单位: MHz), 则微波激励与标准 10 MHz 信号之间的关系可表述为式(4):

$$684 * 10 * (1 + N) \approx 6840 - X \quad (4)$$

由可以推得中频信号频率的最小变化量与频率准确度的变化量为:

$$\Delta N \approx -\frac{\Delta X}{6840} \quad (5)$$

通过对软件进行设计,理论上可以实现频率准确度任意量级的调整,实际使用时,考虑到铷原子频标本身的漂移特性,频率准确度调节步长设置为 3×10^{-12} 有较强的实用意义。

本设计选用国产抗辐照型 FPGA BQR2V3000, 系统时钟 100 MHz(经 10 MHz 晶振输出锁相), 经片上 DCM 倍频后做 DDS 分频时钟, 累加器设置为 32 位, 可实现铷钟的频率准确度以步长 7.1×10^{-13} 调节。在设计时取消了 DDS 的只读存储器(read-only memory, ROM)和数模转换(digital-to-analog convert, DAC)输出的方式, 采用直接方波输出选频滤波获得中频信号。图 11 所示为频率综合器输出的方波经过四阶滤波器放大后的频谱。

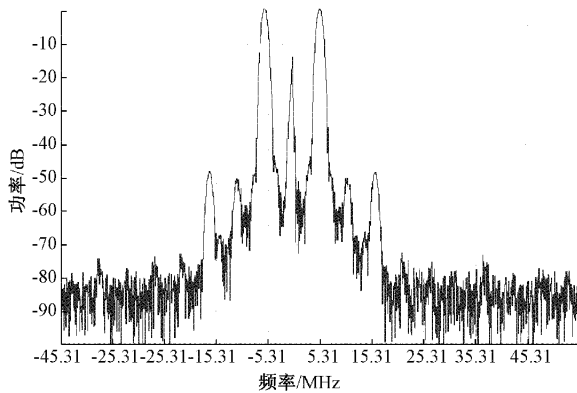


图 11 频率综合器输出信号频谱(中心频率 5.312 5 MHz)

Fig. 11 Spectrum of frequency synthesizer
(Center: 5.312 5 MHz)

微波环路采用片上系统(system-in-package, SIP)设计, 将倍频器和混频器封装在一个模块中, 尺寸约为 $21 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$, 可在印制板焊装如图 12 所示, 使电路小型化, 体积较传统星载铷钟使用的微波模块减少 $2/3$ 左右。使用时输入 10 MHz 参考信号和频综信号, 即可获得微波激励信号。

2.4 伺服环路

伺服环路将物理部分输出的光检电流信号经低噪声前置放大器后转为电压信号, 然后经放大后与 FSK 调制

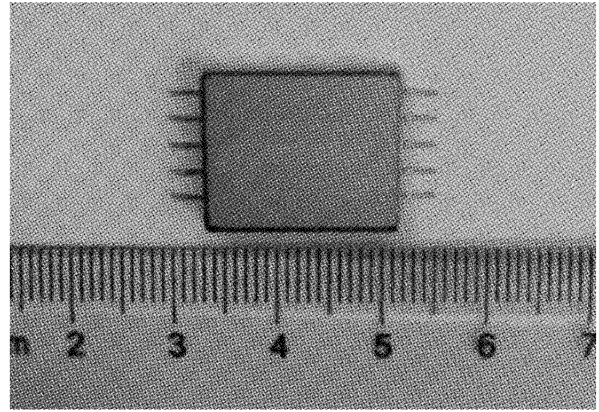


图 12 模块化的微波环路

Fig. 12 Microwave loop in package

方波进行鉴频, 积分得到控制压控晶振误差信号。伺服环路对于系统实现低噪声及控制的平稳性具有重要作用。

为了减小系统的稳态误差, 伺服环路必须要有足够的环路增益, 伺服环路中交流放大倍数为 2.5×10^3 倍, 直流放大倍数为 1×10^4 倍, 整个伺服环路的闭环增益为 2×10^5 左右。由于伺服环路的环路增益很大, 为了确保伺服环路能稳定工作, 环路的截止频率不能太高, 伺服环路的截止频率 f_c 由环路内低通滤波器的时间常数 RC 和环路增益 A_0 共同决定, 如式(6)所示: 低通滤波器的时间常数通常选为 200 s, 伺服环路的截止频率约为 159 Hz。

$$f_c \approx \frac{A_0}{2\pi RC} \quad (6)$$

鉴频信号是原子跃迁产生的光吸收峰, 当以一个调制的微波信号去激励原子发生磁共振跃迁时经光检测后, 得到原子鉴频信号, 也称为光检信号。光检信号的幅度和相位反映了激励信号频率 ν 和谱线中心频率 ν_0 之间的关系, 如图 13 所示。当 $\nu = \nu_0$ 时, 量子系统输出的光检信号频率为调制频率的 2 倍, 经过基波鉴相后, 不产生纠偏电压; 当 $\nu < \nu_0$ 时, 光检信号的频率与相位与调制频率相同, 经过基波鉴相后, 产生纠偏电压, 使压控振荡器的频率变高; 当 $\nu > \nu_0$ 时, 光检信号的频率、幅度与 $\nu < \nu_0$ 时相同, 但两者相位相反。因此, 经过基波鉴相后, 产生纠偏电压, 使压控振荡器的频率锁定在跃迁谱线上, 保持原子跃迁频率的稳定度。因此纠偏电压本质上是由微波激励信号频率 ν 偏离铷原子谱线中心频率 ν_0 的程度决定。因此, 伺服环路输出的压控信号特性曲线如图 14 所示。

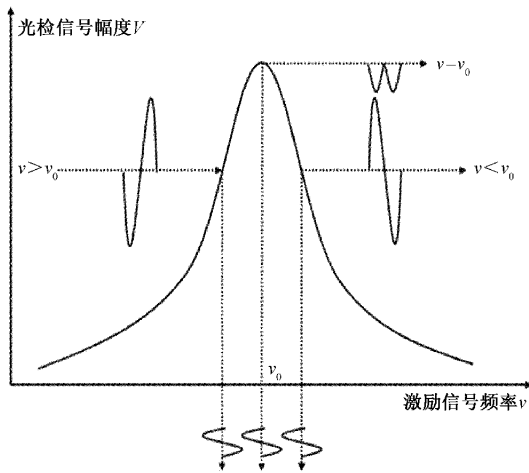


图 13 光检信号与激励频率的关系

Fig. 13 Relationship between optical detection signal and microwave frequency

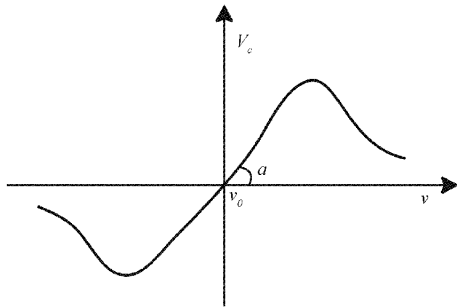


图 14 压控信号与微波频率的关系

Fig. 14 Relationship between control voltage signal and microwave

3 性能分析

本文论述了一种小型化铷原子频标的工作原理及其关键功能模块的设计,电路和物理部分均按照航天产品研制技术流程完成,所选用的元器件和材料也符合航天器单机产品选用要求,具有体积小、重量轻和功耗低的特点。在满足小型化产品需求的基础上,确保了铷原子频标的高稳定度特性和输出信号的低相噪指标。采用高功率锁相输出,使小型化铷原子频标能够为通信卫星载荷提供高稳定度低相噪的 100 MHz 时钟信号(星载铷钟为 10 MHz 输出),可用于天地一体化网络通信、导航增强等领域,能够在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内稳定工作。在 25°C ,真空条件下,经过 17 天测试后得到的 100 MHz 信号频率稳定度曲线如图 15 所示, $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 的热真空测试曲线如图 16 所示,相噪测试曲线如图 17 所示。频率稳定度与导航用高精度星载铷钟技术指标相当,真空条件下

17 天后测得的频率老化率为 $-6.07 \times 10^{-14}/\text{d}$,其余技术指标如表 1 所示。同星载高精度铷钟比较,其重量下降 60%,功耗下降 32%(真空常压条件)。小型化低相噪星载铷原子频标如图 18 所示,已经过卫星系统联试,满足设计需求,即将入役使用,可为通信卫星有效载荷提供高稳定度低相噪的时钟信号。

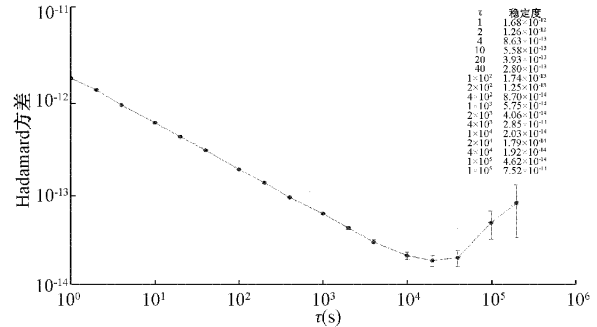


图 15 频率稳定度测试曲线

Fig. 15 Frequency stability result

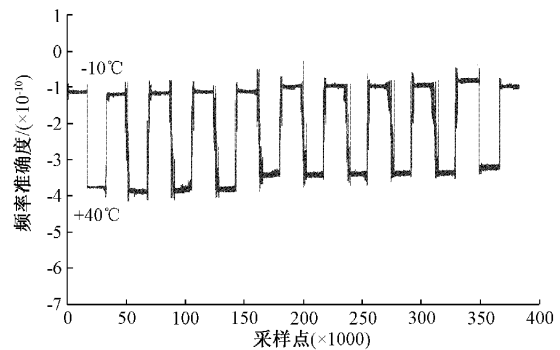


图 16 热真空温度循环测频曲线

Fig. 16 Frequency accuracy variation in thermal vacuum test

表 1 小型化低相噪星载铷原子频标主要性能指标

Table 1 Main performance index of miniaturized RAFS

项目	指标
本体尺寸	200 mm×150 mm×50 mm
重量	1.8 kg
频率老化率	$-6.07 \times 10^{-14}/\text{d}$
初始频率准确度	3.246×10^{-11}
标称频率	100 MHz
100 MHz 输出信号功率	18.53 dBm
谐波	-37.80 dBc
杂散	-83.84 dBc
工作温度	$-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$
频率温度变化量	1.35×10^{-10}
稳态功耗(真空)	22.0 W(20°C)
	19.9 W(40°C)
	23.8 W(-10°C)

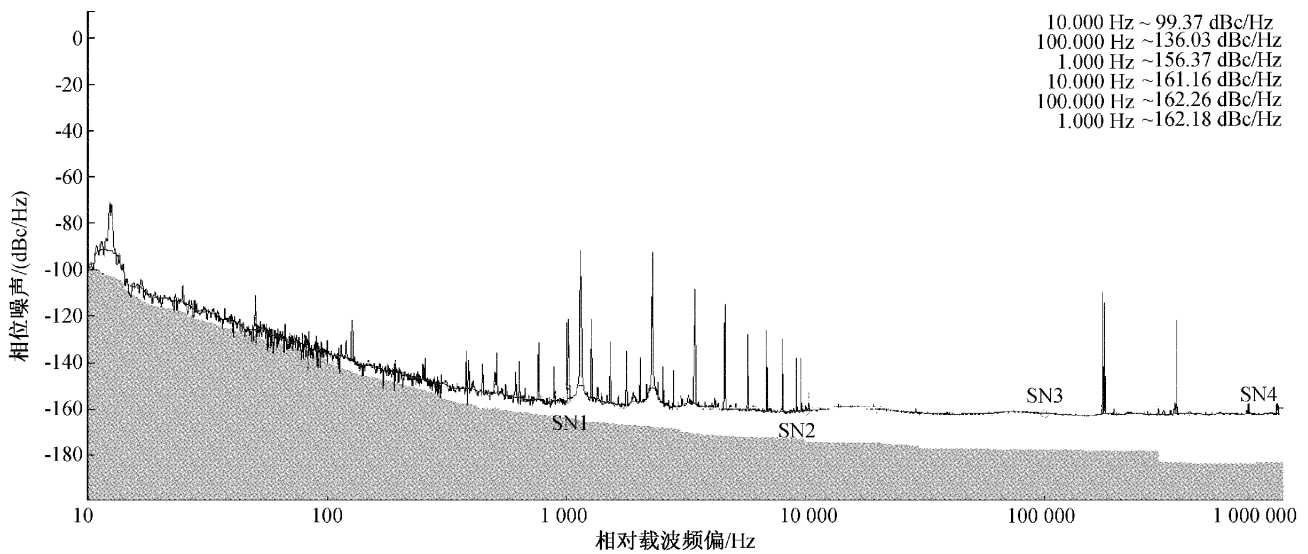


图 17 铷原子频标相噪

Fig. 17 Phase noise of miniaturized RAFS

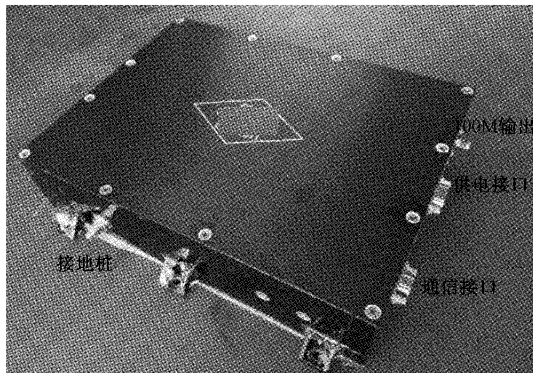


图 18 小型化低相噪铷原子频标产品

Fig. 18 Miniaturized space borne RAFS

4 结 论

本文针对天地一体化互联网工程卫星对低相噪时钟源的需求,设计了一款低相噪、具备 100 MHz 高稳定度高功率输出信号的小型化星载铷原子频标产品。在铷原子频标物理部分的设计中,采用了有利于小型化的 TE_{011} 模式磁控管微波腔,微波腔直径 14 mm,使物理部分达到小型化目的,重量为 430 g。电子学部分采用微波锁相倍频设计和基于 FPGA 的数字频率综合算法,实现了微波与泡频的匹配和数字化线性调频。伺服环路采用前置放大加积分环路控制,与倍频和光检电路相互作用,实现了铷原子频标的闭环锁定,在满足小型化的基础上确保了较高的频率稳定度。输出信号采用 100 MHz 正弦波,满足了通信卫星载荷对高稳定度时钟源的需求。100 MHz 输出信号功率在 19 ± 1 dBm 范围内保持了低相噪特性,

1 MHz 处相噪 -162 dBc/Hz, 10 Hz 处相噪 -99 dBc/Hz。所研制的小型化低相噪星载铷原子频标重量仅 1.8 kg, 频率稳定度 $\sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ ($1 \text{ s} \leq \tau \leq 10\,000 \text{ s}$), 17 天测试频率老化率达到 $-6.07 \times 10^{-14}/\text{d}$,也可满足导航卫星对星载铷钟频率稳定度的需求。本文所述的小型化铷原子频标可满足低轨通信卫星的辐照工作条件,可在真空 $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 稳定工作,全温度范围内频率变化量 $\leq 2 \times 10^{-10}$,预期工作寿命 ≥ 5 年。后续将在小型化低相噪星载铷原子频标的环境适应性提升和进一步小型化方面开展研究工作。

参考文献

- [1] MALLETT L A, ROCHAT P, WHITE J, et al. A historical review of atomic frequency standards used in space systems[C]. IEEE International Frequency Control Symposium, 1996.
- [2] 米红, 谢军, 宋志强, 等. 北斗星载时间频率系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2014, 2(2): 1-5.
MI H, XIE J, SONG ZH Q, et al. An overview for beidou on-board time & frequency system development history[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 2(2): 1-5.
- [3] WU Z Q, ZHOU SH SH, HU X G, et al. Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 43.
- [4] PÉTRÉMAND Y, AFFOLDERBACH C, STRAESSLE R, et al. Microfabricated rubidium vapour cell with a thick glass core for small-scale atomic clock applications[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2012, 22(2): 025013.

- [5] 屈勇晟, 刘昶, 朱虹, 等. 导航卫星星载原子钟研发方向探讨[J]. 导航定位学报, 2013, 1(4): 55-60.
QU Y SH, CHANG L, ZHU H, et al. Discussion on development of space atomic clocks for navigation satellites [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(4): 55-60.
- [6] 谢军. 星载铷原子钟特性研究及地面试验要求[C]. 第五届中国卫星导航学术年会论文集, 2014.
XIE J. Research on characteristics of spaceborne rubidium atomic clock and requirements of ground test[C]. Proceedings of the 5th Annual Meeting of China Satellite Navigation Conference, 2014.
- [7] WANG B, LOU Y D, LIU J N, et al. Analysis of BDS satellite clocks in orbit [J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 783-794.
- [8] 谢军. 北斗导航卫星的技术发展及展望[J]. 中国航天, 2013 (3): 7-11.
XIE J. Technology development and prospect of Beidou navigation satellite [J]. Aerospace China, 2013 (3): 7-11.
- [9] KITCHING J, KNAPPE S, HOLLBERG L. Miniature vapor-cell atomic-frequency references [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(3): 553-555.
- [10] 沈大海, 蒙艳松, 边朗, 等. 基于低轨通信星座的全球导航增强系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(2): 209-215.
SHEN D H, MENG Y S, BIAN L, et al. A global navigation augmentation system based on LEO communication constellation [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(2): 209-215.
- [11] 魏秀燕. 用于微型铷原子频标中 6.835 GHz 微波器件的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
WEI X Y. Research of 6.835 GHz microwave devices in miniaturized rubidium atomic clock [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [12] GEORGESCU I L. Rubidium round-the-clock [J]. Nature Chemistry, 2015, 7(12): 1034.
- [13] 王义遒, 王庆吉, 付济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
WANG Y Q, WANG Q J, FU J SH, et al. Physics of quantum frequency standards [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [14] CAMPARO J C. The rubidium atomic clock and basic research[J]. Physics Today, 2007, 60(11): 33-39.
- [15] 陈溶波, 崔敬忠, 梁耀廷, 等. 铷原子频标物理部分改进[J]. 原子能科学与技术, 2016, 50(2): 380-384.
CHEN R B, CUI J ZH, LIANG Y T, et al. Improvement of physics package for rubidium atomic frequency standard[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(2): 380-384.
- [16] 何客亮, 张为群. 介质加载谐振腔的小型化氢脉泽的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1164-1171.
HE K L, ZHANG W Q. Study on miniaturized hydrogen maser with dielectric loaded resonance cavity [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2016, 37(5): 1164-1171.
- [17] 鞠青云, 汤亮, 栗新伟, 等. 一种用于铷原子钟的低相位噪声压控振荡器[J]. 电子技术应用, 2016, 42(11): 84-87.
JU Q Y, TANG L, LI X W, et al. Design of a low phase noise VCO for rubidium atomic clocks[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(11): 84-87.
- [18] 王芳, 赵峰, 祁峰, 等. 铷光谱灯的光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1164-1167.
WANG F, ZHAO F, QI F, et al. Spectroscopy study of rubidium spectrum lamps[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1164-1167.
- [19] 朱志勇, 王积勤. 微波倍频器的发展与设计[J]. 制导与引信, 2003, 24(3): 46-50.
ZHU ZH Y, WANG J Q. The development and design of microwave frequency multiplier [J]. Guidance & Fuze, 2003, 24(3): 46-50.

作者简介



王剑祥, 2010年于西北工业大学获得学士学位, 2013年于北京航空航天大学获得硕士学位, 现为中国空间技术研究院兰州空间技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向为原子频标技术。

E-mail: gabriel_wangjx@163.com

Wang Jianxiang received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2010, and received his M. Sc. degree from Beihang University in 2013. He is currently a senior engineer at Lanzhou Institute of Physics, CAST. His main research interests include atomic frequency standard technology.



崔敬忠(通信作者), 分别于1983年, 1990年, 1996年在兰州大学获得学士、硕士、博士学位, 现为中国空间技术研究院兰州空间技术物理研究所研究员, 主要研究方向为原子频标技术。

E-mail: cuijingzhong_1@sina.cn

Cui Jingzhong (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Lanzhou University in 1983, 1990 and 1996, respectively. He is currently a professor at Lanzhou Institute of Physics, CAST. His main research interests include atomic frequency standard technology.