

铷原子频标低噪声9次倍频链设计

邱紫敬^{1,2,3}, 祁峰^{1,2}, 明刚^{1,2}, 钟达^{1,2}, 梅刚华^{1,2}

(1. 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北武汉 430071;
2. 中国科学院原子频标重点实验室, 湖北武汉 430071; 3. 中国科学院大学, 北京 100080)

摘要: 铷原子频标短期频率稳定度由物理系统和电路系统共同决定. 微波链的相位噪声是电路系统影响铷频标短期频率稳定度的主要因素. 本文分析了传统铷频标微波链的结构和工作原理, 指出9次倍频器和调制器是微波链相噪的主要来源. 为抑制微波链噪声, 采用肖特基二极管倍频和提高载波频率的调制方案, 设计出一种低噪声9次倍频链. 实验结果表明, 该倍频链输出90MHz信号的相噪比传统方案降低了12dB以上, 可将微波链噪声对铷频标1s频率稳定度的贡献控制在 $1.9E-13$. 将该倍频链应用于铷频标, 测得铷频标短稳为 $3.53E-13(1s)$ 、 $1.27E-13(10s)$ 和 $3.97E-14(100s)$.

关键词: 铷原子频标; 倍频; 调制; 相位噪声; 频率稳定度

中图分类号: TM935.115, TN771 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2017)12-3046-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.12.030

Design a Low Noise $\times 9$ Frequency Multiplication Chain for Rubidium Atomic Frequency Standard

QIU Zi-jing^{1,2,3}, QI Feng^{1,2}, MING Gang^{1,2}, ZHONG Da^{1,2}, MEI Gang-hua^{1,2}

(1. Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
2. Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Both physics package and electronic system contribute to the short-term frequency stability of a rubidium atomic frequency standard (RAFS). The contribution of the electronic system to RAFS short-term frequency stability depends mainly on the phase noise of microwave chain. Structure and operating principle of a typical traditional microwave chain are analyzed, and the $\times 9$ frequency multiplier and the modulator are found to be main sources of noise. To depress phase noise of the whole microwave chain, a new type of $\times 9$ frequency multiplication chain is designed by using SBD (Schottky Barrier Diode) for multiplication and increasing carrier frequency of modulation. Test showed that the phase noise of the 90MHz output signal of the chain is reduced by more than 12dB, and contribution of the chain to the frequency stability of RAFS is less than $1.9E-13$ at 1s. A short term frequency stability $3.53E-13(1s)$, $1.27E-13(10s)$ and $3.97E-14(100s)$ of RAFS has been achieved by using the multiplication chain.

Key words: Rubidium atomic frequency standard; frequency multiplication; frequency modulation; phase noise; frequency stability

1 引言

近年来,在卫星导航应用需求驱动下,铷原子频标性能得到大幅提升. 频率稳定度是铷原子频标最重要的性能指标,一般分为两类,一是取样时间较短的短期频率稳定度,二是取样时间较长的长期频率稳定度. 短稳与物理系统原子信号信噪比和微波链的相位噪声水

平相关,长稳则除了这些影响因素外,还与原子跃迁谱线频率的环境效应相关,如光频移、温度系数等等. 目前世界上稳定度最好的铷频标是由美国 Perkin Elmer 公司研制的用于 GPS-III 卫星的星载铷频标,其短期稳定度优于 $1 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$, 天稳定度达到 $5 \times 10^{-15}[1,2]$, 与被动氢原子频标稳定度处于同一水平. 这一结果大大超出人们最初的预期,也引发了人们对探索铷频标稳定

度极限的兴趣. 当物理系统原子信号信噪比足够高时, 微波链的噪声成为限制铷频标短期频率稳定度的关键因素. 在对微波链各模块噪声进行建模分析的基础上, 我们设计了一种新型 9 次倍频链, 它具有相位噪声低、谐波抑制度高、结构简单、调试方便的特点, 可将微波链噪声对铷频标稳定度的贡献控制在 $1.9 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 以内. 将该电路应用于铷频标, 使铷频标短稳得到显著提升, 达到 $4 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 水平. 本文分析微波链噪声影响铷频标短期稳定度的机理, 介绍这种倍频链电路的设计要点, 给出其主要特性.

2 微波链噪声对铷频标频率稳定度的影响

铷原子频标本质上是一个以物理系统为鉴频器的锁频环路. 传统的环路设计方案示于图 1. 压控晶振输出的 10MHz 信号经微波链转化为带调制的 6.834GHz 微波探寻信号, 馈入物理系统, 使其中的铷原子发生能级跃迁, 产生带有鉴频信息的光检信号. 光检信号经前置放大、同步检波和积分滤波后转化为纠偏信号, 去控制晶振频率, 最终实现环路锁定. 物理系统具有非线性响应特性, 微波探寻信号在调制频率偶次频处的噪声, 会通过交互调制效应转化为调制频率 f_M 处的噪声, 后级伺服电路无法将其滤除. 这种噪声具有白频特性, 会直接恶化铷频标的频率稳定度指标. 通常, 调制频率 f_M 与物理系统原子跃迁谱线线宽有关, 一般为原始线宽的 1/3, 国内外的铷频标调制频率一般设置在 126Hz ~ 146Hz 之间, 本实验室将调制频率 f_M 定为 136Hz.

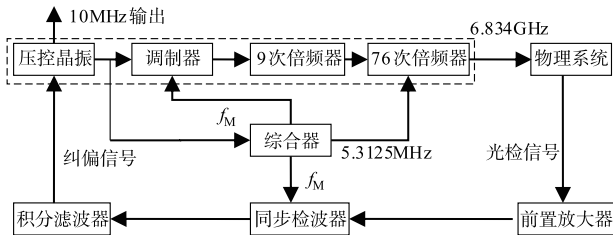


图1 铷频标锁频环路（虚线框内为微波链）

如图 1 所示, 微波链由晶体振荡器、调制器、9 次倍频器和 76 次倍频器组成^[3]. 一般地, 76 次倍频器采用阶跃二极管作为倍频器件, 附加噪声低, 可视为理想倍频, 对倍频链噪声的贡献可忽略. 故交调噪声仅与晶体振荡器、调制器和 9 次倍频器相关, 我们将此三模块构成的电路定义为 9 次倍频链.

9 次倍频链输出频率信号的相位噪声与铷频标频率稳定度的关系可用 Allan 方差描述^[4]:

$$\sigma_y(\tau) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} C_{2n}^2 S_{\varphi}(2nf_M) \right]^{1/2} / \tau^{1/2} \quad (1)$$

其中

$$C_{2n} = \frac{2n}{(2n-1)(2n+1)} \frac{f_M}{\nu_0} \quad (2)$$

$$S_{\varphi}(2nf_M) = 2 \times 10^{L(2nf_M)/10} \quad (3)$$

ν_0 为载波信号频率, $S_{\varphi}(2nf_M)$ 为与 ν_0 相距 $2nf_M$ 处随机相位抖动的单边带功率谱密度, $L_{\nu_0}(2nf_M)$ 为与 ν_0 相距 $2nf_M$ 处的相位噪声谱, 可由实验测量得到^[5]. 所以, 交调效应对稳定度的限制直接由 $L_{\nu_0}(2nf_M)$ 决定, 其表达式为^[6]:

$$L_{\nu_0}(2nf_M) = L_{\nu_{osc}}(2nf_M) + L_{mod} + L_{mult} + 20 \log\left(\frac{\nu_o}{\nu_{osc}}\right) \quad (4)$$

其中 $L_{\nu_{osc}}(2nf_M)$ 为晶振的相位噪声, L_{mod} 和 L_{mult} 分别为调制器和 9 次倍频器引入的附加相位噪声, $20 \log\left(\frac{\nu_o}{\nu_{osc}}\right)$ 为倍频引入的固有相位噪声. 固有相噪对铷频标的稳定度没有影响, 所以, 改进 9 次倍频链的相噪特性, 只需考虑式(4)右方前三项的贡献, 即选用低相噪晶振, 降低 9 次倍频器附加相噪, 并减小调制器相噪的影响.

3 低噪声 9 次倍频链设计

传统 9 次倍频链采用 10MHz 调制和三极管倍频方案. 这种设计的缺点, 一是调制器位于链路始端, 它引入的噪声抬高了倍频的基准噪声, 二是三极管引入的噪声过大. 我们提出的设计方案示于图 2. 其主要特点是需用低相噪压控晶振, 将 10MHz 调制改为 30MHz 调制, 并用肖特基势垒二极管 (SBD) 替代三极管作为倍频器件.

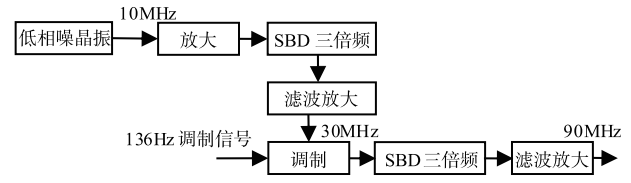


图2 低噪声9次倍频链方案

根据图 2 的方案, 式(4)可重写为:

$$L_{\nu_0}(2nf_M) = L_{\nu_{osc}}(2nf_M) + L_{mod} + L_{mult1} + 20 \log\left(\frac{\nu_{mod}}{\nu_{osc}}\right) + 20 \log\left(\frac{\nu_o}{\nu_{mod}}\right) \quad (5)$$

其中 L_{mod} 为调制器附加相噪, L_{mult1} 和 $20 \log\left(\frac{\nu_{mod}}{\nu_{osc}}\right)$ 分别为

第一级倍频器附加相噪和固有相噪, L_{mult2} 和 $20 \log\left(\frac{\nu_o}{\nu_{mod}}\right)$ 分别为第二级倍频器附加相噪和固有相噪.

SBD 倍频电路示于图 3. SBD 为金属半导体接触型二极管, 利用其在高频下良好的非线性特性实现倍频. SBD 还具备开关转换速度快、恢复时间短、闪变相位噪声低等优点^[7]. 同时由于 SBD 为无源器件, 所以不会引入电源噪声. 电路采用两对 SBD 组成全波桥式整流器, 用一个大电感将其两个直流输出端短路. 两对 SBD 随输入信号正负变化而交替导通. 当输入信号在正(负)

半周变化时,电感在高频下的高阻特性确保流经电感的电流维持不变.因此,在第一级 SBD 三倍频输入端注入 10MHz 正弦波时,输出端得到 10MHz 方波,测试结果示于图 4.由于二极管在输入信号过零点处开关,还可避免 AM-PM 噪声.

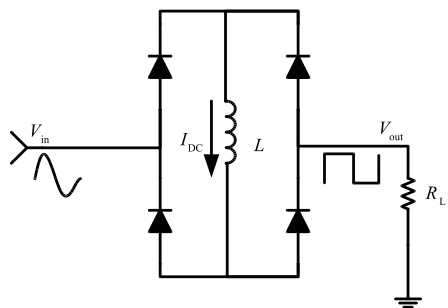


图3 SBD倍频电路结构

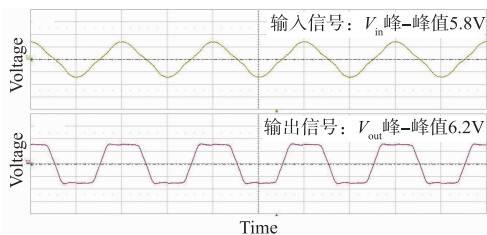


图4 10MHz正弦输入和10MHz方波输出波形

当 SBD 三倍频器输入信号为 10MHz 正弦波时,输出方波信号用傅里叶展开可表为^[8]:

$$f(x) = A \times \sum \frac{\sin(n\omega x)}{n}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (6)$$

由式(6)可知方波频谱只含奇次谐波,谐波幅度与谐波次数成反比,故 SBD 倍频能有效抑制正弦输入信号的偶次谐波.

10MHz 方波信号再经功率匹配和滤波放大后,得到 30MHz 标准正弦信号,测试结果示于图 5.

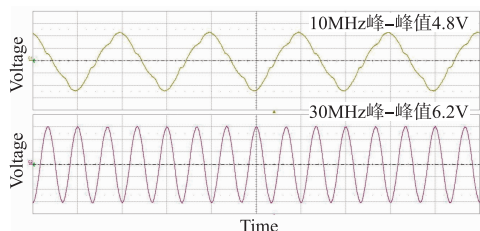


图5 10MHz和30MHz信号波形

第二级三倍频器的工作原理与第一级类似,作用是将 30MHz 信号转变为 90MHz 信号,为后续的 76 次倍频器提供输入信号.在两级倍频器中用 SBD 替代三极管作为倍频器件,可有效克服式(5)中 L_{mult1} 和 L_{mult2} 的影响.

在传统的 9 次调制倍频器设计中,调制一般加在

10MHz 上(图 1).在图 2 的设计中,我们将调制器移至第一级倍频器之后,对 30MHz 信号进行调制.分析式(5)可知,在调制器噪声一定的情况下,提高调制载频有助于减小调制器噪声对整个倍频链噪声的贡献.在对 10MHz 信号进行调制的情况下,由于晶振的噪声很低,调制器噪声 L_{mod} 将全部贡献为第一级倍频器输入信号的噪声;如果对 30MHz 信号进行调制,第一级倍频器输入信号降低为晶振的噪声,而 L_{mod} 与第一级倍频器的固有相噪 $20\log(v_{mod}/v_{osc})$ 相比通常为小量,故第二级倍频器输入信号的相噪无明显增加,最终效果是使 90MHz 信号的相噪降低.另一种选择是对 90MHz 信号进行调制,但此时会加重倍频链的负载效应,需要在信号输出端增加多级缓冲电路,大大增加电路结构的复杂程度.

4 测试结果和分析

基于以上设计方案,研制了低噪声 9 次调制倍频链.利用罗德施瓦茨-FSW26 频谱仪和 PN9000 相噪仪,测量了该电路的频谱和相噪.

图 6 是测量到的 90MHz 信号的频谱.90MHz 信号功率为 19dBm,二次谐波优于 -50dB,谐波杂波特性可以满足高精度铷频标的应用需求.

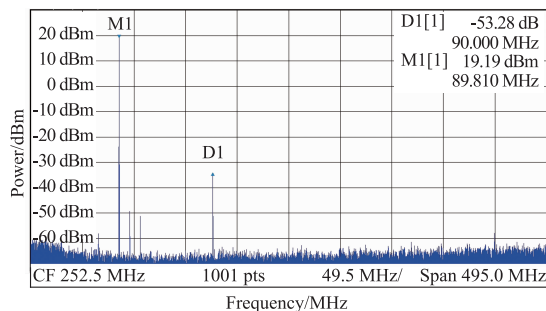


图6 低噪声9次倍频链输出信号频谱

低噪声倍频链、传统倍频链和低相噪晶振的相位噪声测试示于图 7.为方便比较,测试过程中低噪声倍频链和传统倍频链采用同一个低相噪晶振.由图 7 可见,新方案 90MHz 相噪比低噪声晶振 10MHz 相噪仅高出 18~20dB,与 9 次倍频器的固有噪声 19dB 相当,这表明 9 次倍频器的附加相噪趋近于 0,接近于理想倍频.另一方面,在偏离载波频率 272Hz~100kHz 处,新方案倍频链相噪比传统方案低 12dB 以上,表明传统倍频器和调制器共引入了 12dB 附加相噪,采用新方案以后,该附加相噪得以完全消除.由低噪声 9 次倍频链相噪曲线可知,在 272Hz~292Hz 之间 (f_m 在 136Hz~146Hz 之间变化),相位噪声测量值随频率增大而减小,减小幅度在 2dB 以内.而传统 9 次倍频链,在 272Hz~292Hz 之间,相位噪声测量值随频率增大保持不变.采

用低噪声 9 次倍频链还有一个优势,即可通过适当提高调制频率进一步降低 90MHz 信号在偏离载波 $2f_M$ 处的相位噪声。

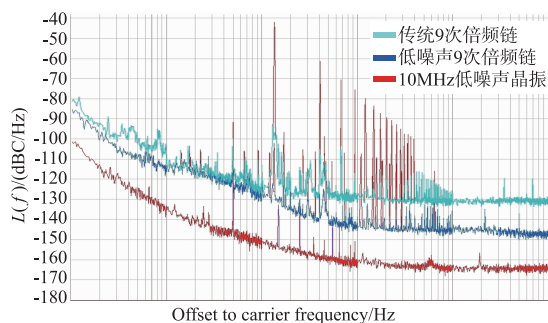


图7 两种倍频链90MHz信号相噪对比

表 1 低噪声 9 次倍频链的相噪对短稳的限制

f	$2f_M$	$4f_M$	$6f_M$	$8f_M$
$L_{v0}(2nf_M)$ (dBc/Hz)	-138	-142	-145	-145
$[C_{2n}^2 S_{\phi}(2nf_M)]^{1/2}$	1.8×10^{-13}	4.5×10^{-14}	2.1×10^{-14}	1.5×10^{-14}
$\sigma_y(\tau)$	$1.9 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$			

将图 7 给出的低噪声 9 次倍频链相噪测试结果代入(1)式,定量计算了倍频链噪声对铷频标频率稳定度的贡献,结果示于表 1. 由表 1 可知调制频率偶次噪声对稳定度的总贡献约为 $1.9 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$,其中 2 次频(272Hz)噪声的贡献最大,为 $1.8 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$,高次频噪声的贡献基本上可以忽略.我们还计算了传统 9 次倍频链 90MHz 信号噪声对铷频标频率稳定度的贡献,结果为 $7.8 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$.由此可见,如果不考虑物理系统的影响,采用新倍频链设计后,铷原子频标的频率稳定度可以改善 4 倍.

为了验证设计效果,我们将低噪声 9 次倍频链用于铷原子频标,实现了铷频标的闭环锁定.采用 Quartzlock 公司的 A7 频率稳定度测试仪,测量了铷频标的频率稳定度,测试结果示于图 8. 取样时间为 1 秒、10 秒和 100 秒的频率稳定度分别为 3.53×10^{-13} 、 1.27×10^{-13} 和 3.97×10^{-14} ,表明铷频标的短稳已达到 $4 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ 水平.据我们所知,这是目前有报道的铷频标最好的短稳指标.但是,测量结果仍然比表 1 所预期的要差一些,此时铷频标的短期频率稳定度主要受限于物理系统信噪比.而铷频标长期频率稳定度主要受限于物理系统原子谱线频率的环境效应,如光频移、温度系数、磁敏感因子等等,如果克服以上问题,将改善铷频标长期频率稳定度.

5 小结

微波链的相位噪声是限制铷原子频标短期频率稳定度的重要因素.本文分析了传统铷频标微波链的结

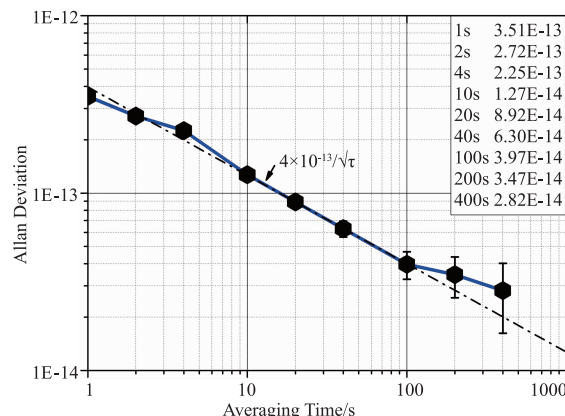


图8 铷频标整机短期稳定度测试结果

构和工作原理,指出 9 次倍频器和调制器是微波链相噪的主要来源,提出并实现了一种新的低噪声 9 次倍频链设计方案.主要特点是选用低相噪晶振,采用噪声特性优越的肖特基二极管代替三极管作为倍频器件,并将传统的 10MHz 调制改为 30MHz 调制.新方案 90MHz 输出信号在 272Hz ~ 100kHz 频段内的相位噪声比传统方案降低了 12dB 以上,可以将微波链噪声对铷频标频率稳定度的贡献控制在 $1.9 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ 以内.将该电路应用于铷频标后,铷频标整机短期稳定度达到 $4 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$,表明该电路能够满足高精度铷原子频标的应用需求.

参考文献

- [1] Dupuis, R T; Lynch, T J; Vaccaro, J R. Rubidium frequency standard for the GPS IIF program and modifications for the RAFSMOD Program [A]. Frequency Control Symposium, 2008 IEEE International [C]. Honolulu; IEEE, 2008. 655 - 660.
- [2] 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.
- [3] 梅刚华,钟达,安绍峰,等. 高稳铷频标若干问题研究 [A]. 全国时间频率学术报告会 2001 [C]. 成都:中国计量测试学会, 2001. 121 - 127.
- [4] Audoin C, Candelier V, Dimarcq N. A limit to the frequency stability of passive frequency standards [A]. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 90) [C]. Ottawa; IEEE, 1990. 93.
- [5] Rubiola E. 振荡器的相位噪声与频率稳定度 [M]. 北京: 科学出版社, 2014. 19 - 20.
- [6] 王义道,王庆吉,傅济时,等. 量子频标原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 246.
- [7] 姚常飞,周明,罗运生,许从海,寇亚男,陈以钢. 基于肖特基势垒二极管的太赫兹固态倍频源和检测器研制 [J]. 电子学报, 2013, 41(3): 438 - 443.

YAO Chang-fei, ZHOU Ming, LUO Yun-sheng, XU Cong-

hai, KOU Ya-nan, CHEN Yi-gang. Development of terahertz frequency solid state multiply sources and sensors with schottky barrier diodes [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 438 - 443. (in Chinese)

- [8] C Wenzel. New Topology Multiplier Generates Odd Harmonics [EB/OL]. <http://www.wenzel.com/pdf/files/RFDesign2.pdf>, 1987.

作者简介



邱紫敬 女, 1988 年 4 月出生于湖北省武汉市, 中国科学院武汉物理与数学研究所博士研究生, 主要从事铷原子频标电路系统研究.
E-mail: zijing405@126.com



祁峰 男, 1980 年 4 月生于甘肃省嘉峪关市, 中国科学院武汉物理与数学研究所高级工程师, 博士, 主要从事高性能星载铷原子频标及电子学等方向的研究.
E-mail: feng_qi@wipm.ac.cn



明刚 男, 1983 年 4 月生于湖北省襄阳市, 中国科学院武汉物理与数学研究所高级工程师, 博士, 硕士生导师, 主要从事无线电物理及原子频标研究.
E-mail: ming@wipm.ac.cn



钟达 男, 1961 年生于湖北省武汉市, 中国科学院武汉物理与数学研究所正高级工程师, 博士生导师, 主要从事原子分子物理及原子频标等方向的研究.
E-mail: zhongda@wipm.ac.cn



梅刚华(通信作者) 男, 1955 年 12 月生于湖北省武汉市, 中国科学院武汉物理与数学研究所研究员, 博士生导师, 原子频标研究室主任, 武汉大学、华中师范大学兼职教授, 中国计量测试学会时频专业委员会委员, 湖北省计量测试学会常务理事。主要从事原子频标研究.
E-mail: mei@wipm.ac.cn