

一种 CPT 铯原子钟控制系统的设计

王淼儿, 姚燕

(中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 实现微型化、低功耗的相干布居囚禁(CPT)原子钟对于其在通信、定位等精密测量领域的应用具有重要意义。而外围控制电路控制频率和激光精准输出是实现相干布居囚禁原子钟的关键技术。设计了一种 CPT 铯原子钟外围控制电路系统。系统利用微调 and 粗调两级电流调节共同驱动 VCSEL 激光器工作, 相对于单一电流调节, 输出更加精准; 采用锁相环电路产生可调制的微波信号; 为实现微波功率可以调节, 采用 PIN 二极管调节微波功率衰减; 同时采用软件调制解调方法代替传统硬件调制解调电路, 节约电路逻辑资源。实验测试结果表明, 微波调制激光器产生相干调频多色光, 微波频率为 4.596 267 GHz 时, 微波输出功率达到 -3.33 dBm。微波射频电路在 1 kHz 频率偏移量下, 相位噪声低于 -80 dBc/Hz, 具有较好的性能。

关键词: 相干布居囚禁; 原子钟; 控制系统; 调制解调; 相位噪声

中图分类号: TB939

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200805

中文引用格式: 王淼儿, 姚燕. 一种 CPT 铯原子钟控制系统的设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 57-60, 66.

英文引用格式: Wang Miaoer, Yao Yan. Design of control system for a CPT Cesium atomic clock[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 57-60, 66.

Design of control system for a CPT Cesium atomic clock

Wang Miaoer, Yao Yan

(College of Metrology and Testing Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The realization of coherent population trapping(CPT) atomic clock with miniaturized, low-power is of great significance for its applications in the fields of precision measurement such as communication and position. The peripheral circuit controlling accurate frequency and laser output is the key technology to achieve coherent population trapping atomic clock. A peripheral control system of CPT Cesium atomic clock is developed in this paper. The system uses two levels for fine-tuning and coarse-tuning to drive the VCSEL laser to work, which is more accurate than single current adjustment and uses phase-locked loop circuit to generate modulated microwave signal. PIN diodes are used to adjust the microwave power attenuation in order to realize the adjustment of microwave power. In the meanwhile, software modulation and demodulation methods is applied to replace traditional hardware modulation and demodulation circuits, which saves circuit logic resources. The testing results show that the output of the microwave power reaches -3.33 dBm when the microwave frequency is 4.596 267 GHz. The phase noise of the radio frequency circuit is better than -80 dBc/Hz under the frequency offset of 1 kHz which has better capability.

Key words: coherent population trapping; atomic clock; control system; modulation and demodulation; phase noise

0 引言

1967 年国际计量大会将时间单位秒定义为原子秒, 时间秒是基于铯原子(^{133}Cs)在其基态的超精细能级间跃迁频率(9 192 631 770 Hz)^[1]。传统原子钟精确度很高, 但由于其体积很大, 应用范围较小, 1976 年 ALZETTA C 等人发现粒子数相干布居囚禁(Coherent Population Trapping, CPT)现象^[2], 这使原子钟系统向微型化发展成为可能^[3]。随着科技发展, 精确定时在水下石油勘探、移动网络通信和全球定位系统等领域的应用, 推动了紧凑型、高性能原子钟的发展^[4], 所以研制具备小型化、低相位噪声、低功耗、高频率稳定度的原子钟具有重要意义。而

原子钟外围控制电路作为原子钟系统重要组成部分, 是实现精准频率输出的关键。

本文基于相干布居数囚禁(CPT)原理, 设计并研发了铯原子钟外围控制系统, 包括硬件电路主要模块设计方案和软件调制解调算法等, 并对电路主要模块进行相关参数测试。

1 CPT 原子钟工作原理

CPT 是一种量子干涉现象, 即 Λ 型三能级结构原子在相干激光作用下, 当相干激光频率差等于原子超精细能级差对应频率时, 原子被制备到两超精细能级相干叠加态^[5]。图 1 所示为原子能级结构图, 其中 $F=1$ 、 $F=2$ 为

微电子技术 Microelectronic Technology

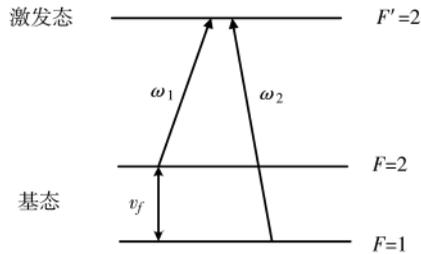


图1 原子能级结构图

基态超精细能级, $F'=2$ 为激发态能级, ω_1 、 ω_2 为基态跃迁角频率, ν_f 为能级差频率^[6]; 碱金属原子的基态能级会分裂成超精细能级 ($F=1$, $F=2$), 在激光作用下, 基态超精细能级发生跃迁到激发态, 原子吸收激光, 激光光谱会出现暗线; 当采用半宽调制时, 利用微波频率等于 $\nu_f/2$ 信号调制激光器, 原子不再跃迁, 此时激光光谱出现明线, 发生 CPT 共振现象^[7]。利用控制电路锁定激光器电流值与 CPT 共振峰值, 即实现频率准确输出。

本文采用 VCSEL 激光器产生激光, 加入微波进行调制, 形成相干光束^[8]。对激光器进行调制后, 发射光频谱方程可以表示为^[9]:

$$E = E_0 \cos 2\pi v_{\text{opt}} t + E_{-1} \cos 2\pi (v_{\text{opt}} - f) t + E_{+1} \cos 2\pi (v_{\text{opt}} + f) t + E_{-2} \cos 2\pi (v_{\text{opt}} - 2f) t + E_{+2} \cos 2\pi (v_{\text{opt}} + 2f) t + \dots \quad (1)$$

其中 v_{opt} 为激光器驱动电路为直流时的光频率, f 为调制微波频率, 原子所需相干光频为其中正负一级频带。

2 电路设计

2.1 硬件方案

芯片级原子钟外围控制电路本质是将压控晶体振荡器输出频率通过倍频锁定到铯原子能级跃迁频率上, 控制系统结构框图如图 2 所示。硬件电路由锁相环电路、激光器驱动电路、微波功率衰减电路和光电检测电路等组成; 软件部分由数据采集、处理、传输和频率控制等部分构成^[10], 本文选用的控制芯片型号为 STM32L010RB, 是意法半导体的一款低功耗芯片。压控晶体振荡器输出 10 MHz 参考信号经过锁相环倍频到 4.6 GHz 左右, 经过微波功率衰减器耦合到 VCSEL 激光器驱动电流上, 输

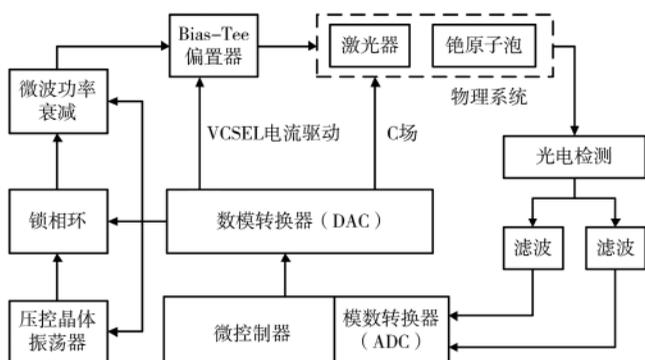


图2 系统结构框图

入到物理系统中, 光电检测器检测光误差信号, 由微控制器进行处理, 并将结果通过数模转换器 (DAC) 反馈给晶体振荡器等部分, 使频率最终锁定在原子跃迁频率上。

2.2 锁相环电路

基于数字分频锁相技术的频率合成器具有良好的长期稳定性^[11], 图 3 所示为锁相环结构框图, 由压控晶振 (TCXO)、鉴相器、环路滤波和压控振荡器 (VCO) 构成。锁相环是一种相位自动锁定控制电路, 将压控晶体振荡器输出信号相位与输入参考信号进行比较, 鉴相器的输出电流与两个信号相位差成正比^[12]。压控晶振 10 MHz 信号经过 R 分频, 与压控振荡器信号经过 N 分频后的信号进行鉴相, 得到物理系统所需的微波信号。环路滤波作为锁相环重要的一部分, 采用无源比例积分滤波器, 可以滤除鉴相器产生的高频谐波, 改善射频电路相位噪声等参数。



图3 锁相环结构框图

2.3 VCSEL 激光器驱动电路

如图 4 所示, 物理系统中垂直腔面发射激光器 VCSEL 激光器是由数模转换器 (DAC) 输出一定电压经过电阻转化为电流驱动, 其中采用外置 16 位 DA 芯片实现多路输出。为实现激光器电流的精确调节, 通过选择合适的支路电阻值, 设置粗调和微调两条支路, 其中微调支路电阻值为 25 kΩ, 粗调支路电阻为 200 Ω; 同时开启模数转换器 (AD) 通道实时采样支路电压, 上位机显示当前激光器电流值, 实现对激光器电流精确控制。激光器电流值为:

$$I = \frac{U_7 - U_6}{R_{32}} \quad (2)$$

其中 U_7 和 U_6 分别为激光器电流粗调和微调端模数转换器 (ADC) 通道采样值。激光器电流经过直流偏置器 (Bias-Tee) 与射频电路产生的微波耦合, 驱动激光器产生相干调频多色光^[13]。

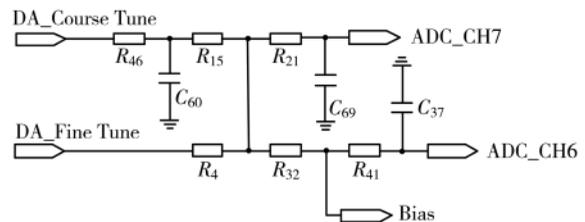


图4 激光器电流驱动电路

2.4 微波功率衰减电路

微波功率是影响原子钟长期稳定性的一个关键因素, 它影响 VCSEL 驱动电流幅度, 决定微波对激光器的调制指数, 从而影响激光在各级边带上的能量分布^[14]。功

微电子技术

Microelectronic Technology

率衰减是将功率信号衰减为电路所需的功率值。PIN 二极管作为微波衰减电路主要元器件, 体积较小、损耗较低、衰减范围大, 利用其在正向偏置电压下可等效为可变电阻的特点, 从而控制微波能量衰减。微波功率衰减电路如图 5 所示, C_{11} 和 C_{28} 为射频耦合电容, 同时隔离直流, 电感 L_3 防止微波泄漏, D_1 和 D_2 为 PIN 二极管, 工作频率最大为 6 GHz, 数模转换器 (DAC) 端输出电压经过电阻转化为电流控制二极管衰减, 增大电流, PIN 二极管电阻减小, 衰减变大, 反之减小。如图 6 所示为测试微波输出功率值随 DA 端输出电压变化曲线图, 随控制电压增大, 微波功率逐渐衰减。

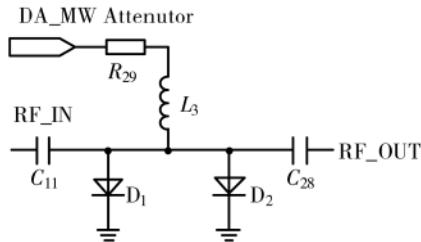


图 5 微波功率衰减电路

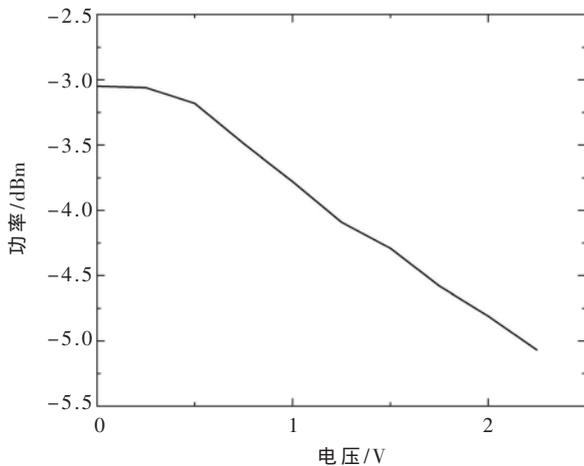


图 6 功率衰减曲线

2.5 光电检测电路

利用微波信号对激光器进行调制, 当两个相干光场频率严格等于原子 D1 线跃迁频率的一半时, 原子不再吸收光子, 透射光信号增强。物理系统内的光电检测器检测透射光强度变化, 将激光功率信号的变化转换为电流信号^[15], 经过放大滤波后, 分两路分别进行锁定放大, 得到由微控制器解调处理的误差信号后, 其中一路信号用于控制激光器电流并锁定在原子超精细能级跃迁所对应的波长下, 另一路信号来微调压控晶体振荡器 (TCXO) 控制电压, 将 TCXO 倍频后的频率锁定在原子 CPT 谐振峰上。光电检测电路如图 7 所示, R_3 将光电检测器电流信号转化为电压信号, 信号经放大器 A_1 放大, 经过低通滤波检测出特定频率的调制信号后, 进入微控制后由 AD 分别对两个调制信号进行解调处理。

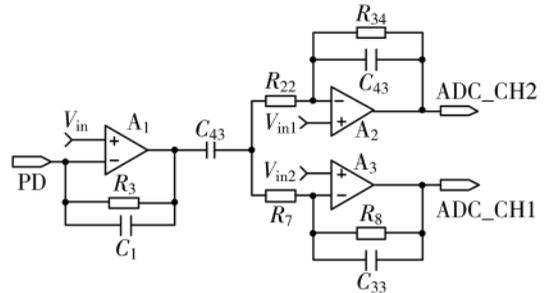


图 7 光电检测电路

3 信号调制解调

3.1 驱动电流信号

激光器直流电流信号在施加 4.596 GHz 微波调制下光电检测器检测的透射光强信号, 信号最大吸收峰为最终激光器锁定对应的电流值。原子钟外围电路通过检测误差信号实现激光器锁定, 本文采用软件调制解调方法, 利用 2.5 kHz 低频方波信号对 VCSEL 激光器注入的直流信号进行调制, 光电检测器检测的光强信号输入微控制器中, 由数字锁定放大器进行鉴相滤波处理, 获得误差信号, 控制数模转换器 (DAC) 输出调节信号, 形成反馈回路, 锁定激光器电流值在最大吸收峰附近。当激光器驱动电流小于锁定值时, 光电检测器检测电压信号频率与调制信号相同, 且相位相反; 当激光器驱动电流大于锁定值时, 检测电压信号频率与调制信号相同, 且相位相同; 当激光器驱动电流等于锁定值时, 检测电压信号频率为调制信号两倍。

数字方法实现相敏解调和低通滤波器, 利用调制方波进行解调, 矩形法积分实现低通滤波。模数转换器 (ADC) 在一定周期内对光电检测器检测到的基波信号进行采样, 将前半周期采样值累加值与后半周期累加值相减等于一定周期内光检信号采样信号的幅值; 连续对多个周期进行采样, 采样值累加后取平均值, 若幅值为负, 则电流值小于锁定值, 若幅值为正, 则电流值大于锁定值, 若幅值为零, 则为锁定电流值; 根据幅值调整 DA 端输出值。

3.2 微波频率信号

当激光器环路锁定后, 对微波频率进行扫描, 当射频模块输出信号频率等于原子基态超精细能级频率的二分之一时, 此时原子处于 CPT 态, 光电检测器输出信号明显增强。基于 2FSK 调制方法, 调制频率为 200 Hz 左右, 调制深度为 400 Hz 左右; 微波频率锁定环路采用周期性写入锁相环值, 锁相环芯片有 8 个 24 位寄存器 $R_0 \sim R_7$, R_0 和 R_5 寄存器确定 N 分频和分频小数部分。通过定时器中断以一定频率改变寄存器值, 实现微波频率调制。根据数字相敏解调原理, 当微控制器端计算得到信号幅值为正时, 微波信号频率小于 CPT 峰值对应频率; 信号幅值为负时, 微波信号频率大于 CPT 峰值对应频率; 信号幅值为零时, 微波信号频率等于 CPT 峰值对

微电子技术

Microelectronic Technology

应频率;根据解调结果调整 DA 端输出控制电压对压控晶振进行微调,将微波频率锁定在 CPT 峰值附近。

4 测试结果与分析

硬件电路板采用罗杰斯高频板材^[16],面积大小为 90 mm×50 mm;实验采用 Keysight PXA 系列高性能频谱分析仪,可测频率范围是 2 Hz~13.6 GHz,图 8 所示为微波频谱图,测试电路系统微波频率为 4.596 267 GHz,并且通过软件编程实现其在 4.595 1 GHz~4.596 3 GHz 范围内可调。微波输出功率为 -3.33 dBm,可驱动物理系统内部原子产生 CPT 共振;目前已有微型原子钟相位噪声在 -70 dBc/Hz 左右,图 9 所示为测量微波射频电路相位噪声曲线,在 1 kHz 偏移量下^[17],相位噪声为 -80 dBc/Hz 左右,测量结果显示具有较好性能。

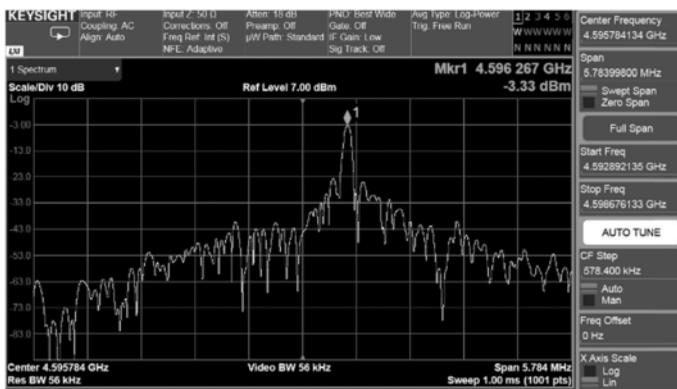


图 8 微波频谱图

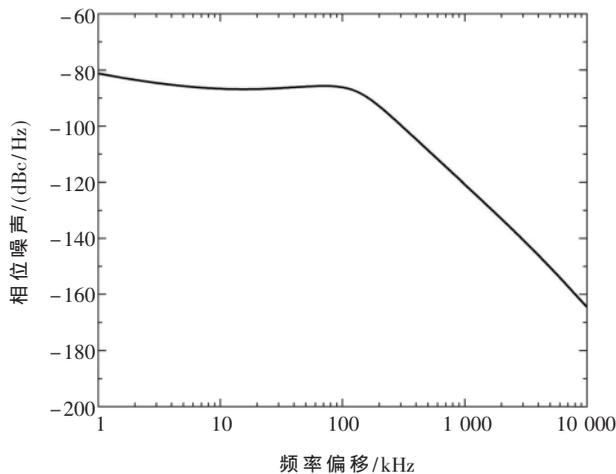


图 9 相位噪声特性曲线

5 结论

本文设计了一种针对铯原子钟外围控制系统,包括射频电路模块、激光器电流模块、功率衰减模块、光电检测模块和数字调制解调软件设计。测试系统微波频率、输出功率以及相位噪声参数,验证了该系统针对铯原子钟控制的可行性,本系统硬件电路目前采用的芯片封装都较大,后面会将芯片换成小封装,电路结构更加紧凑,

面积将缩小为原来的一半大小。

参考文献

- [1] 张禹.铯喷泉钟系统优化相关技术研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [2] ANDREEVA C, KRASTEVA A, MARKOVSKI A, et al. Excitation transfer from second to first resonance line of potassium observed in hot atomic vapor[J].Optical & Quantum Electronics, 2018, 50(5): 213.
- [3] 徐建.被动型相干布居数囚禁原子钟系统关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [4] GUIDRY M A, KUCHINA E, NOVIKOVA I, et al. Characterization of frequency stability in EIT-based atomic clocks using a differential detection scheme[J].Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(10): 2244.
- [5] GERGINOV V, SHAH V, KNAPPE S, et al. Atomic-based stabilization for laser-pumped atomic clocks[J].Optics Letters, 2006, 31(12): 1851-1853.
- [6] 曹延昌.冷原子束干涉仪信号检测技术研究[D].太原:中北大学,2015.
- [7] CAMPARO J, HUANG M, DRISKELL T. The influence of laser polarization noise on the short-term stability of CPT atomic clocks[C].European Frequency & Time Forum & International Frequency Control Symposium. IEEE, 2014.
- [8] BOBROV M A, MALEEV N A, BLOKHIN S A, et al. Mechanism of the polarization control in intracavity-contacted VCSEL with rhomboidal oxide current aperture[J].Journal of Physics Conference, 2016, 741(1): 012078.
- [9] Xu Jian, Shi Xiong, Gan Zhiyin, et al. Design and realization of light source system for passive CPT atomic clock[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011(12).
- [10] 王亚军,张磊,谷扬,等.基于FPGA的北斗驯服铷原子频标装置的研制[J].计量学报,2020,41(3): 359-362.
- [11] 刘颖,田泽,邵刚,等.一种6.5 GHz~11 GHz宽频带低噪声LCVCO电路的设计与实现[J].电子技术应用,2020,46(3): 58-60, 65.
- [12] 史学明.CPT原子频标电路的研究与设计[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所),2012.
- [13] VANIER J, LEVINE M W, JANSSEN D, et al. Contrast and linewidth of the coherent population trapping transmission hyperfine resonance line in 87Rb: effect of optical pumping[J].Physical Review A, 2003, 67(6): 103-111.
- [14] 张振伟.CPT原子频标的参数研究和电路优化[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [15] Xing Cheng, Zhang Yaolin, Wu Jiutao. Low power chip-scale CPT atomic clock with new microwave frequency modulation technique[C].Frequency Control Symposium. IEEE, 2014.
- [16] 王磊.基于多层板的多功能组件微波互联技术研究[J].电子技术应用,2019,45(6): 7-10.

(下转第 66 页)

表 1 与其他小数分频锁相环性能对比

参数	工艺/ nm	电源 电压/V	输出频率 范围/GHz	相位噪声/ (dBc·Hz ⁻¹)	锁定 时间/ μ s
文献[7]	180	1.8	1.5~4.5	-93.8@1MHz	8
文献[8]	130	1.2	2.1~5.1	-123@1MHz	4
文献[9]	65	1.0	1.9~2.7	-120@1MHz	12
文献[10]	65	1.2	1.3~2.65	-90@1MHz	8
本文	130	1.5	0.8~2.0	-79@1MHz	2

PLL。对于文献[9-10]使用了更先进的 65 nm 工艺,输出频率两者和本文 PLL 相近,也同时具有较好的相位噪声,但锁定时间慢于本设计。可见,本文的小数分频锁相环是同时具有低相位噪声和快速锁定的优势。

3 结论

本文 PLL 是在整数分频锁相环的基础上,通过加入了 MASH3 结构的数字 DSM 使锁相环具有小数分频的功能,且最小输出频率步进为 396 Hz。另外设计了一款电流转向电荷泵,且在电荷泵中加入电荷注入抵消结构,加快了电荷泵的充放电速度和增加 PLL 的动态稳定性。在 VCO 的设计中,使用了有较高输出增益的环形差分反相器,同时增加了负载单元和输出缓存单元有效降低了相位噪声。通过这些模块的优化和环路匹配,最终本小数分频 PLL 能在 2 μ s 内完成锁定最高 2.0 GHz 的输出频率,并且输出 1 GHz 时相位噪声仅为 -146 dBc/Hz。

参考文献

- [1] CHEN X, CAI L W, XU X, et al. A 0.13 μ m low phase noise and fast locking PLL[C]. IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2019: 1468-1471.
- [2] HSIEH F J, KAO S K. Fast locking PLL with all-digital locked-aid circuit[C]. IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits, 2010: 1-4.
- [3] SAW S K, NATH V. A low power low noise current starved

CMOS VCO for PLL[C]. IEEE International Conference on Computing, Communication Automation, 2015: 1252-1255.

- [4] ZHOU B, LI Y, ZHAO F. Noise and spur comparison of delta-sigma modulators in fractional-N PLLs[J]. Journal of Electronic Testing, 2019, 35: 917-923.
- [5] AMER A G, IBRAHIM A I, RAGAI H F. A novel current steering charge pump with low current mismatch and variation[C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Montreal, 2016: 1666-1669.
- [6] 刘姗姗, 万培元, 李建军, 等. 1.5 GHz Serdes 低抖动锁相环的设计[J]. 中国科技论文, 2015, 10(2): 130-133, 138.
- [7] 林鑫. 基于小数 N 分频的电荷泵锁相环研究与设计[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [8] MANAS H K, TARUN K B. A fast automatic frequency and amplitude control LC-VCO circuit with noise filtering technique for a fractional-N PLL frequency synthesizer[J]. Microelectronics Journal, 2016, 52: 134-146.
- [9] LEE Y, KIM S, SHIN H. Design of a 1-V 3-mW 2.4-GHz fractional-N PLL synthesizer in 65nm CMOS[C]. IEEE International SoC Design Conference, 2017: 230-231.
- [10] UN K-F, QI G Z, YANG S H, et al. A 0.12-mm² 1.2 to 2.4 mW 1.3 to 2.65 GHz fractional-N bang-bang digital PLL with 8- μ s settling time for multi-ISM-band ULP radios[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019: 3307-3316.

(收稿日期: 2020-06-19)

作者简介:

区健川(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 集成电路设计。

蔡良伟(1964-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 智能信息处理和智能计算。

徐渊(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: FPGA 和 ASIC 设计。

(上接第 60 页)

- [17] JI L, TANG L, LI X W. Design of a VCO for rubidium atomic frequency standard[C]. Proceedings of the 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. IEEE, 2014.

(收稿日期: 2020-08-03)

作者简介:

王淼儿(1997-), 通信作者, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统研究, E-mail: wangmiao1520@163.com。

姚燕(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 自动测控技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所