

文章编号: 2095-4980(2018)02-0347-05

一种用于无线脑电信号检测系统的发射机电路

龙 洋^{1,2}, 高同强¹, 杨海钢^{*1,2}

(1.中国科学院 电子学研究所, 北京 100190; 2.中国科学院大学 微电子学院, 北京 100190)

摘 要: 设计了一款应用于无线脑电信号(EEG)检测系统的射频发射机芯片。该发射机采用标准的 0.18 μm CMOS 工艺设计, 主要包含锁相环(PLL)和功率放大器(PA)模块。锁相环电路中采用新型 16/17 预分频器结构以提高分频器的工作频率, 同时压控振荡器采用数字调谐与模拟调谐相结合的方式拓宽了频率输出范围。测试结果显示, 锁相环输出频率范围为 2 225~2 580 MHz, 锁定时间约为 49 μs , 发射机采用高效率 E 类功率放大器, 最大输出功率达 -3.14 dBm。发射数据采用二进制启闭键控(OOK)调制方式, 最大传输速率可达 5 Mbps。

关键词: 锁相环; 16/17 预分频; 数字调谐; 模拟调谐; 启闭键控(OOK)

中图分类号: TN832^{+.8}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0347

A transmitter circuit for wireless electroencephalogram system

LONG Yang^{1,2}, GAO Tongqiang¹, YANG Haigang^{*1,2}

(1.Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A Radio Frequency(RF) transmitter circuit is designed for wireless Electro-Encephalogram(EEG) system. The transmitter is manufactured in 0.18 μm Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) process and it consists of two parts, Phase-Lock Loop(PLL) and Power Amplifier(PA). A novel 16/17 prescaler is proposed in PLL, which improves the circuit speed. The range of frequency is expanded in result of combining digital tuning with analog tuning. As is measured, the output has a wide range of frequency from 2 225 MHz to 2 580 MHz. The lock-time is about 49 μs . The output power of the transmitter can achieve -3.14 dBm by using the class E PA. The transmitter utilizes On-Off Keying(OOK) with a max data rate of 5 Mbps.

Keywords: Phase-Lock Loop; 16/17 prescaler; digital tuning; analog tuning; On-Off Keying

近年来, 随着慢性精神疾病患者数量逐渐增加, 人们对脑电信号检测的需求越来越强烈^[1-3]。与传统的有线检测方式相比, 无线脑电信号检测(EEG)系统更加轻便、灵活。无线 EEG 系统通常采用无线体域网(Wireless Body Area Networks, WBAN)协议, 该协议被广泛应用于人体各生理参数的监控, 如心电检测、脑电检测和肌电检测等^[4]。在 EEG 无线传感节点中, 射频收发电路所占功耗一般在 40%以上^[5], 而且上行通道传输的数据量远大于下行通道, 发射机功耗远大于接收机功耗, 于是一系列基于 WBAN 的发射机电路被提出。2007 年池保勇等设计了一款应用于无线消化道内窥镜系统的射频 OOK 发射机^[6], 采用 0.25 μm CMOS 工艺, 工作频率为 2.4 GHz, 数据速率达 1 Mbps, 输出功率为 -23 dBm; 2010 年, A. Bonfanti 等面向多通道脑电信号检测需求, 设计了一款多通道低功耗的 FSK 发射机^[7], 采用 0.35 μm CMOS 工艺, 工作频率为 400 MHz, 可支持 64 个通道, 总耗能 16.6 mW, 但是数据速率仅为 1.25 Mbps, 而且电路结构较复杂, 版图面积较大; 2014 年, CHEN Weiming 等设计了一款无线脑电检测芯片^[8], 功耗为 2.8 mW, 数据速率可达 4 Mbps, 但是可工作频率范围较窄, 为 401~406 MHz, 通道数量较少。针对无线 EEG 系统中多节点、多通道的需求, 本文提出了一种宽频率调谐范围的发射机电路, 该电路中压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)采用数字调谐和模拟调谐相结合的方式, 大大拓宽了输出频率范围, 另外采取新型分频器结构提高了电路工作速度。

收稿日期: 2016-11-28; 修回日期: 2017-02-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2014CB744600); 国家自然科学基金资助项目(61474120)

*通信作者: 杨海钢 email: yanghg@mail.ie.ac.cn

1 EEG 系统发射机结构

基于 WBAN 协议的特点, 优先考虑系统的集成度和功耗, 最终选择无上变频发射机结构。对于数据的调制方式, 选择简单易实现、数据率较高的 OOK 调制。图 1 为无线 EEG 系统框图^[9], 框内为本文设计的发射机电路。电荷泵型锁相环产生载波, 载波输出给下一级功率放大器, 通过控制功率放大器的“开”和“关”, 实现 OOK 调制。

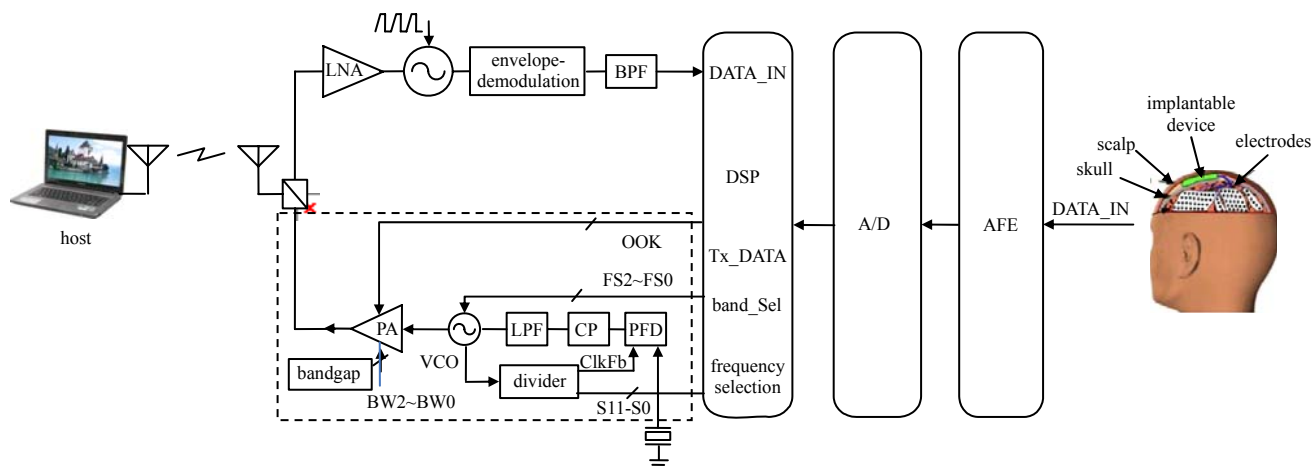


图 1 无线 EEG 系统框图

2 频率综合器设计

频率综合器(Frequency Synthesizer, FS)主要产生载波信号, 由于锁相环型 FS 具有频谱纯净、易于集成、功耗低等特点, 所以本设计中频率综合器采用电荷泵型整数锁相环结构, 该结构包括鉴频鉴相器(Phase Frequency Detector, PFD)、电荷泵(Charge Pumping, CP)、低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)、压控振荡器(VCO)和分频器(divider)。图 2 为采用的锁相环结构图。下面主要介绍 VCO 和分频器的设计。

2.1 VCO

本设计中采用互补交叉耦合的 LC 型 VCO 结构, 该结构相对于环型振荡器结构, 输出摆幅更大, 相位噪声性能更优, 功耗更低^[10]。滤波器 LPF 输出的控制电压 U_c 可以改变变容管 V_1 的电容值, 从而改变 LC 谐振网络的谐振频率, 实现模拟调谐, capbox 模块是电容管阵列, 通过开关控制产生不同的电容值, 实现数字调谐。根据上述分析, VCO 的振荡频率表达式为:

$$f_{\text{VCO}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_{C1} + C_{V1} + C_{V2} + C_{\text{MOS}})}} \quad (1)$$

图 3 右侧所示为电容阵列实现方法,通过引入 3 组电容阵列,使 VCO 具有 8 个子频带,分别由 000,001,010,011,100,101,110,111 八个控制字控制,从而覆盖更大的频率范围。其中,采用一个开关 Ma 控制 2 个电容的结构可将导通电阻降低一半。通过 M1 和 M2 可以将开关管 Ma 导通时源漏极电压拉低到地,避免了恶化电容阵列的品质因数;上述结构需要合理选择开关管的尺寸,增大开关管尺寸虽然可以减低导通电阻,提高电容阵列的品质因数,但是也会增大寄生电容,恶化电容阵列的调频能力。

由于变容管随电压变化的线性范围较窄,因此电路中采用对变容管分段直流偏置的方法改进 VCO 的调谐线性度,经过仿真发现,在电源和地之间合理选择 2 个偏置电压,可以达到比较理想的效果。图中 $U_{b1}(0.35\text{ V})$ 和 $U_{b2}(1.6\text{ V})$ 为偏置电压。

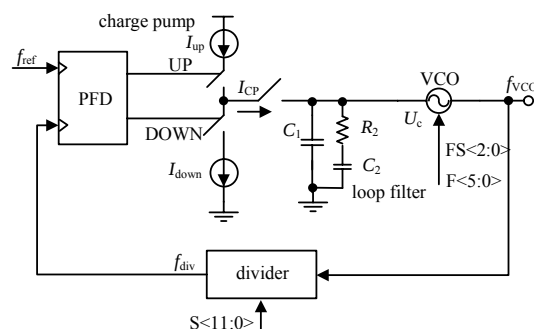


图 2 电荷泵型锁相环结构图

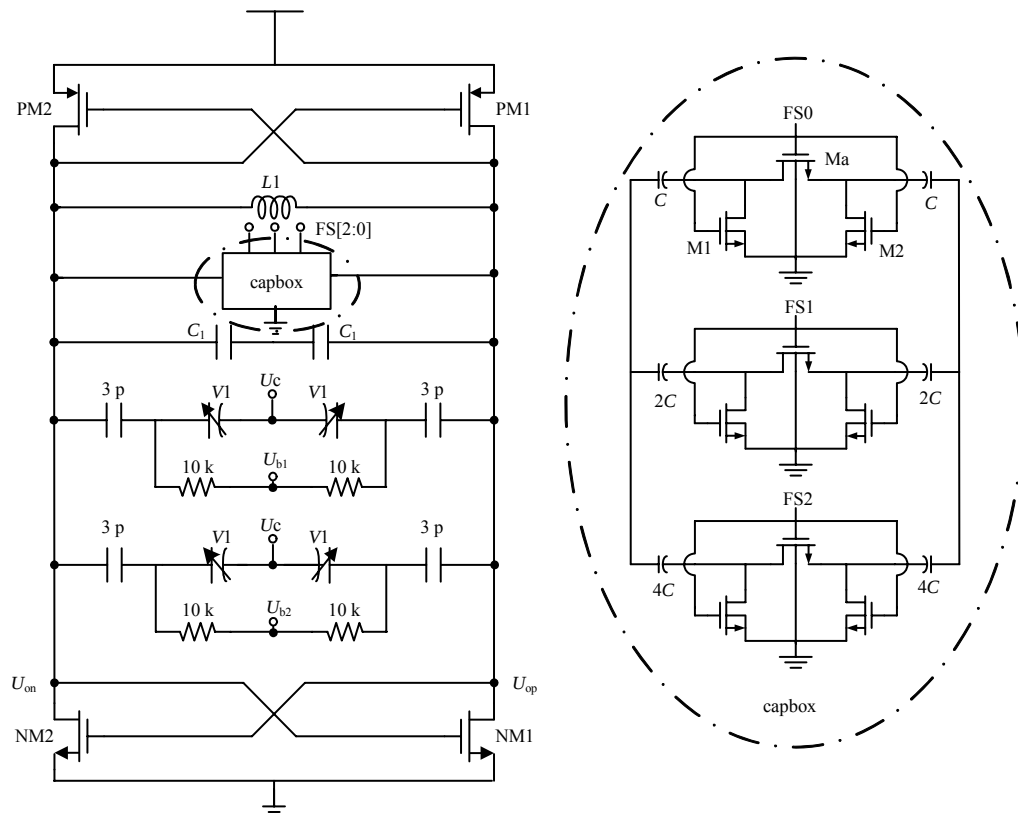


Fig.3 Schematic of LC-VCO
图 3 LC-VCO 电路图

2.2 分频器

分频器(divider)是把输入信号进行分频后输出的电路,在 PLL 中的作用是把 VCO 产生的振荡信号分频,VCO 信号需经分频器分频后才能与参考信号进行相位比较。常用的分频器有 2/3 预分频器级联分频器和吞没式分频器,吞没式分频器较级联分频器虽然实现更加复杂,但是可工作频率更高,工作更加稳定。因此本设计中分频器采用的是吞没式分频器结构,它由 16/17 双模预分频器、可编程计数器和吞脉冲计数器组成,如图 4 所示。

16/17 双模预分频器的工作频率和 VCO 的振荡频率一致,在分频器中所占功耗最大,它的速度也决定了分频器的最高工作频率。传统的 16/17 分频器结构如图 5(a)所示,它由 1 个 2/3 分频器级联 3 个 2 分频器以及 1 个 4 输入的与非门构成。其中 2/3 分频器工作频率最高,所占功耗也最大,它有一个控制端 MC1,当 MC1 为“0”时,为 3 分频工作状态;当 MC1 为“1”时,为 2 分频工作状态。当 MC 为“0”时,双模预分频器实现 16 分频;当 MC 为“1”时,双模预分频器实现 17 分频。

为了降低功耗,提高电路工作速度,本设计提出了一种改进的 16/17 预分频器结构,如图 5(b)所示,新结构将 2/3 分频器中的 2 个或门和 1 个与非门精简为 2 个与门,减少了关键路径延时,提高了电路工作速度。可以看到触发器 D0 和 D1 的

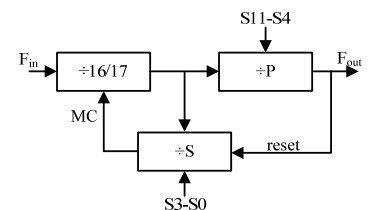


Fig.4 Pulse-swallow divider
图 4 吞没式分频器

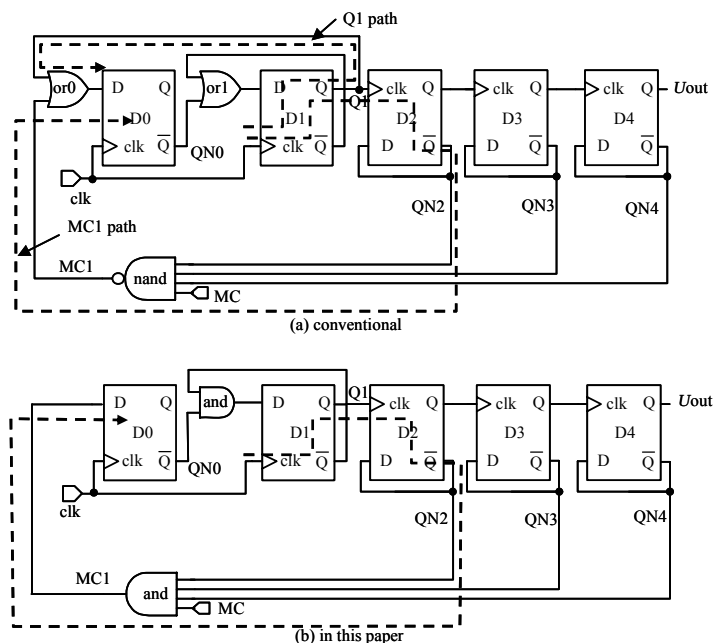


Fig.5 Topologies of 16/17 prescaler
图 5 16/17 预分频器结构对比

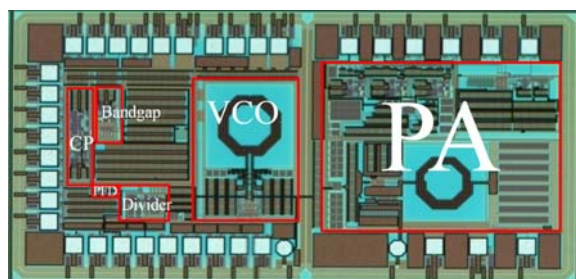


Fig.8 Micro photo of the transmitter
图 8 发射机显微照片

表 1 本文工作与相关文献对比
Table1 Comparison between this work and others

option	ref. [6]	ref. [7]	ref. [8]	this work
process/ μm	0.25	0.35	0.18	0.18
modulation	OOK	FSK	OOK	OOK
frequency	2.4 GHz	400 MHz	401–406 MHz	2 225–2 580 MHz
consumptions/mW	7.93	16.6	2.8	30.8
data rate/Mbps	1.00	1.25	4.00	5.00
output power/dBm	-23.22	-2.00	-17.00	-3.14
area/ mm^2	3.62	8.37	13.47	2.75

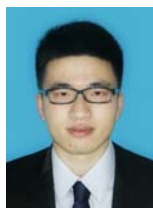
5 结论

本文介绍了一款全集成的基于 WBAN 的无线 EEG 系统中射频发射机电路, 该发射机采用 SMIC 0.18 μm CMOS 工艺, 供电电压为 1.8 V, 工作频率为 2 225~2 580 MHz, 相位噪声为 -113.33 dBc/Hz@1 MHz, PLL 锁定时间约为 49 μs , 系统最大输出功率为 -3.14 dBm, 总功耗为 30.8 mW, 版图面积为 2.75 mm^2 , 发射数据采用 OOK 调制方式, 最大传输速率可达 5 Mbit/s, 满足无线 EEG 系统发射机的基本要求。

参考文献:

- [1] SENEVIRATNE U, HEPWORTH G, COOK M, et al. A typical EEG abnormalities in genetic generalized epilepsies[J]. Clinical Neurophysiology Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2016, 127(1): 214–220.
- [2] WESTHALL E, ROSSETTI A O, VAN ROOTSELAAR A F, et al. Standardized EEG interpretation accurately predicts prognosis after cardiac arrest[J]. Neurology, 2016, 86(16): 1482–1490.
- [3] PONOMAREVA N, KLYUSHNIKOV S, ABRAMYCHEVA N, et al. Alpha-theta border EEG abnormalities in preclinical Huntington's disease[J]. Journal of the Neurological Sciences, 2014, 344(1/2): 114–120.
- [4] IEEE 802.15.6–2012. IEEE standard for local and metropolitan area networks[S]. 2012.
- [5] CHENG K W, ZOU X, JIA H C, et al. 100-channel wireless neural recording system with 54-Mb/s data link and 40%-efficiency power link[C]// 2012 IEEE Asian Solid State Circuits Conference. Kobe, Japan: IEEE, 2012: 185–188.
- [6] CHI B, YAO J, HAN S, et al. Low-power transceiver analog front-end circuits for bidirectional high data rate wireless telemetry in medical endoscopy applications[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 54(7): 1291–9.
- [7] BONFANTI A, CERAVOLO M, ZAMBRA G, et al. A multi-channel low-power IC for neural spike recording with data compression and narrowband 400-MHz MC-FSK wireless transmission[C]// 2010 Proceedings of the ESSCIRC. Seville, Spain: IEEE, 2010: 330–333.
- [8] CHEN W M, CHIU H, CHEN T J, et al. A fully integrated 8-channel closed-loop neural-prosthetic SoC for real-time epileptic seizure control[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(1): 232–247.
- [9] MAO Y Q, GAO T Q, YANG H G, et al. A fully integrated CMOS super-regenerative wake-up receiver for EEG applications[J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(9): 82–87.
- [10] QI N, CHEN F, ZHANG L W, et al. A reconfigurable multi-mode multi-band transmitter with integrated frequency synthesizer for short-range wireless communication[J]. Journal of Semiconductors, 2013, 34(9): 95008–95014.

作者简介:



龙 洋(1993–), 男, 湖北省咸宁市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为射频集成发射机. email: longy123456@126.com.

高同强(1970–), 男, 河北省邯郸市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 CMOS 射频模拟集成电路设计.

杨海钢(1960–), 男, 上海市人, 博士, 研究员/教授, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”引进国外杰出人才, 主要研究方向为可编程逻辑芯片设计技术以及大规模集成电路设计自动化技术.