

## 一种无线体域网发射机体偏置线性化技术

柳 扬\* 杨银堂 李 迪 石佐辰  
(西安电子科技大学微电子学院 西安 710071)

**摘 要:** 该文针对无线体域网人体介质通信(Human Body Communication, HBC)发射机严格的输出频谱指标, 提出一种利用体偏置线性化技术进行频谱整形的技术。通过设计缓冲器中晶体管体偏置, 从而调整晶体管二阶非线性系数, 最终消除输出端的二阶互调项(Second order InterModulation, IM2)。采用 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺和 1.8 V 供电电压设计了一个基于体偏置技术的 HBC 发射机实例。仿真结果显示二阶输入截点(IIP2)优化到 90 dBm, 输出频谱在 1 MHz 处抑制-130 dBr。较传统电路, 该技术提高了 23 dB 频谱抑制, 使输出频谱符合无线体域网 IEEE 802.15.6 协议中-120 dBr 的指标。

**关键词:** 无线体域网; 放大器; 线性化; 集成电路

**中图分类号:** TN402; TN830.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)02-0499-05

**DOI:** 10.11999/JEIT160297

## Body Biasing Linearization Technique for Wireless Body Area Network Transmitter

LIU Yang YANG Yintang LI Di SHI Zuochen  
(School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A body biasing linearization technique is proposed to shape output spectrum mask to meet the stringent specification of the Human Body Communication (HBC) standard for Wireless Body Area Network (WBAN). Body biasing of the buffer transistors is properly designed, accordingly second-order nonlinearity coefficient is tuned so that Second order InterModulation product (IM2) at the output of buffer is cancelled. Under 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS process and a supply voltage of 1.8 V, a sample HBC transmitter based on body biasing is designed. Simulation results show that an optimum of 90 dBm IIP2 can be obtained and output transmit spectral mask at 1 MHz is attenuated to be -130 dBr (dB relative to the center frequency). Compared with conventional circuits, an improvement of 23 dB spectrum attenuation is achieved, satisfying the -120 dBr requirement of IEEE 802.15.6 for WBAN.

**Key words:** Wireless Body Area Network (WBAN); Amplifier; Linearization; Integrated circuit

### 1 引言

无线体域网技术(Wireless Body Area Network, WBAN)被广泛应用于主动医疗<sup>[1,2]</sup>, 人体生理指标实时监测等领域, 在我国逐步迈入老龄化社会, 医疗资源日益紧张的大环境下, 具有广阔的应用前景。体表可穿戴设备或植入体内的传感器和中心节点通常组织成星形 WBAN 网络, 然后把提取出的人体心电图, 脑电图等生理信号传输到 WBAN 中心节点, 最终通过手机发送到医院或是云端服务器进行进一步诊断和数据存储。构建 WBAN 技术的一个

关键是选择网络节点之间短距离无线通信方式。针对 WBAN 应用, 目前主流的短距离无线通信方式例如蓝牙, Zigbee 等技术存在功耗限制。为促进适用于 WBAN 低功耗芯片的设计发展, 在 2011 年, IEEE 802.15 第 6 工作组(Sixth Task Group, TG6)批准了制定 IEEE 802.15.6 协议<sup>[3]</sup>。IEEE 802.15.6 协议定义了一个媒体存取控制层(Medium Access Control, MAC)和其支持的 3 个物理层: 超宽带(Ultra-WideBand, UWB), 窄带(NarrowBand, NB)和人体介质通信(Human Body Communication, HBC)。其中 HBC 使用人体作为通信介质, 中心频率是 21 MHz, 在此频段上, 信号传输的路径损耗小, 并且使用面积小的人体接触电极而不是面积大低阻天线, 所以 HBC 更适合高集成度低功耗的 WBAN 应用。

收稿日期: 2016-03-31; 改回日期: 2016-07-28; 网络出版: 2016-10-09

\*通信作者: 柳扬 liu\_yang@stu.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61504102)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61504102)

## 2 HBC 发射机设计挑战

HBC 发射机设计的一个最大挑战是 IEEE 802.15.6 协议规定的严格输出频谱要求：在 2 MHz 相对于中心频率抑制比至少 -80 dBr (dB relative to the center frequency), 1 MHz 和更低频率抑制比至少 -120 dBr<sup>[3]</sup>。因此目前主流的 HBC 发射机采用频谱整形技术。文献[4]提出首个完全基于 IEEE 802.15.6 HBC 协议的发射机, 使用八阶的数字带通滤波器来进行整形；文献[5,6]为了进一步在 1 MHz 处进行频谱抑制, 不仅加入了高达九阶的高通滤波器, 还在缓冲器后面又使用二阶的无源高通滤波器。同时采用了更加节省功耗的结构, 在数字 FSDT 调制后, 直接用模拟滤波器来处理信号, 避免了使用高功耗的数模转换器。

在本文中, 低频频谱整形的瓶颈被定位在图 1 中发射机最后一级缓冲器的输出二阶互调项 (Second-order InterModulation, IM2)。如图 1 所示, 随着频率不断降低, IEEE 802.15.6 协议要求的频谱抑制逐渐苛刻, 但是非线性缓冲器产生的 IM2 项却污染低频频谱, 使 1 MHz 实际输出频谱停止下降, 未能满足协议要求。线性化技术是有效的用于发射机功率放大器或输出缓冲器频谱整形方式之一。根据频率范围不同, 频谱整形可分为基波附近的邻信道抑制比 (Adjacent Channel Leakage Ratio, ACLR) 和低频处的频谱抑制。文献[7]利用预失真器补偿掉 AM-PM 失真中的相位误差, 提高 ACLR 2.6 dB。不足在于预失真器中的电感无法高度集成。因此, 可以使用高度集成的反相器和 MOS 可变电容来补偿相位<sup>[8]</sup>。低频处的频谱抑制主要通过消除偶次失真来实现。文献[9]通过校正功率放大器的导通角 (conduction angle), 使传输函数傅里叶级数展开中的偶次项系数近似为 0, 从而消除输出偶次谐波, 完成低频处的频谱抑制。线性化技术电路实现主要受功耗限制。文献[10]在单支路非线性电路并联一路可调衰减器和非线性发生器, 两支路叠加起来提高

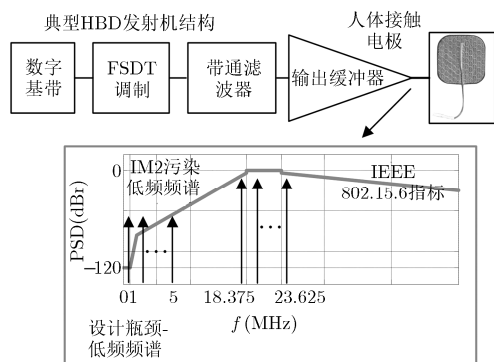


图 1 典型 HBC 发射机结构

线性度。文献[11]提出了两步 IM2 消除技术, 但是第 1 级只有一半信号被利用, 因此功率效率较低。

## 3 发射机前端电路设计

### 3.1 初步整形带通滤波器

带通滤波器 (BandPass Filter, BPF) 完成初步的频谱整形。虽然 IEEE 802.15.6 协议对于低频频谱要求严格, 但是对高频部分指标不苛刻, 通过带通滤波器可以获得足够抑制。基于阶梯法 (LC-ladder) 综合出来的高阶滤波器对于每一级器件参数波动不敏感。阶梯法中, 首先根据指标得到无源 RLC 结构, 然后利用信号流程图 (Signal Flow Graph, SFG) 把无源模型转成有源的结构。图 2(a) 给出了用于 HBC 发射机初步频谱整形的八阶带通 Gm-C 滤波器结构。如图 2(b) 所示, 跨导单元采用了非线性反馈和交叉耦合技术来减小失真, 灰色部分电路为电流源负载和提供共模反馈模块, 同时也为下一级直接耦合的缓冲器提供稳定的输入共模电平。通过采用高线性度跨导单元和使用全差分的电路架构, 极大消除带通滤波器产生的偶次失真和实现了低功耗。

### 3.2 体偏置 IM2 消除技术缓冲器

缓冲器核心工作原理是通过体偏置引入非对称来抵消缓冲器原有的非对称性, 工作原理等效于不含偶次失真的全差分结构。传统的有源电流镜作负载的双端转单端缓冲器并不是理想的对称结构, 因为两端分别是高阻的电流源和低阻的二极管连接 MOS 管。非对称性使传统有源电流镜作负载的缓冲器不能像全差分电路完全消除偶次失真。如图 3 所示。输入管  $M_1, M_2$  的体偏置  $V_{B1}, V_{B2}$  被电流镜  $M_{11}, M_{12}$  和  $M_{13}, M_{14}$  控制, 通过微调  $V_{B1}, V_{B2}$  引入输入差分对  $M_1, M_2$  直流工作点轻微不平衡, 抵消掉有源电流镜负载已有的不平衡, 从而实现伪全差分工作。

二阶互调项消除依赖于通过体偏置来调节 MOS 二阶非线性系数。由于 NMOS 使用了单独的体偏置, 所以需要用到具有 P 阱 CMOS 工艺。MOS 晶体管非线性来源有  $g_m$  和  $g_{ds}$ , 但是  $g_m$  非线性占据绝对主导。在 HBC 发射机中, 中心频率为 21 MHz, 此时电容影响可以忽略, MOS 管沟道电流用 Taylor 级数展开为

$$i_{DS} = I_{DS} + g_m v_{gs} + k_{2gm} v_{gs}^2 + k_{3gm} v_{gs}^3 + \dots \quad (1)$$

$$g_m = \frac{\partial i_{DS}}{\partial v_{gs}}, \quad k_{2gm} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i_{DS}}{\partial v_{gs}^2}, \quad k_{3gm} = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 i_{DS}}{\partial v_{gs}^3} \quad (2)$$

其中,  $k_{2gm}, k_{3gm}$  分别为二阶, 三阶非线性系数,  $v_{gs}$  是栅极输入电压,  $i_{DS}$  为源漏沟道电流。利用式(2)

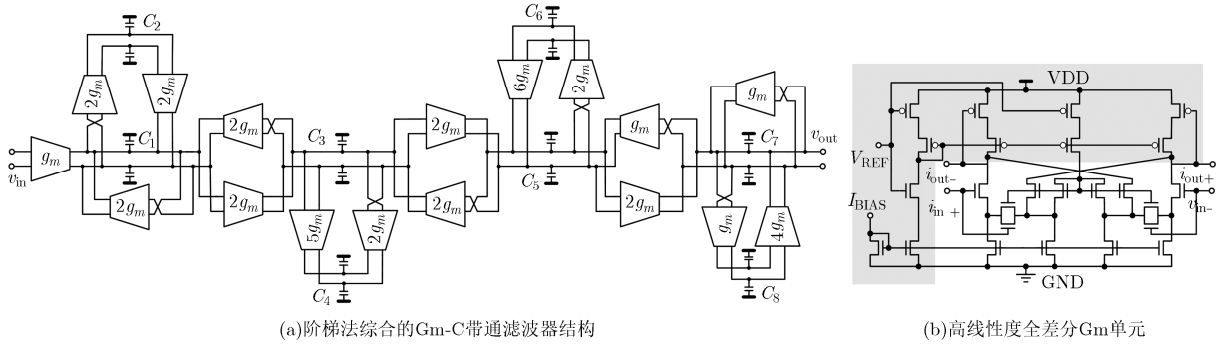


图 2 8阶带通滤波器电路

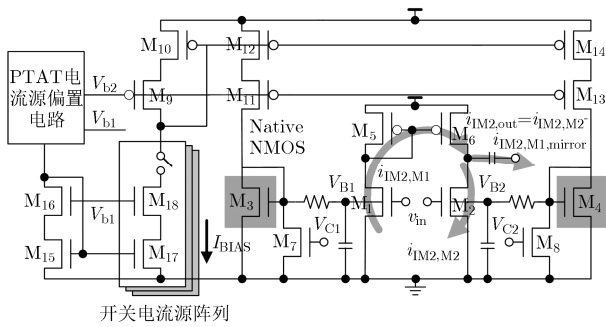


图 3 消除IM2的体偏置技术缓冲器

对沟道电流进行二重和三重微分就可以得到二阶、三阶非线性系数。当栅极输入信号为

$$v_{gs} = A(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)) \quad (3)$$

其中  $A$  是输入信号幅度， $\omega_1, \omega_2$  是输入信号的双音频率。根据式(1)中的展开式和式(2)中的非线性系数定义，沟道二阶互调(IM2)电流为

$$i_{IM2} = k_{2gm} A^2 \cos(\omega_1 t - \omega_2 t) \quad (4)$$

图 4 给出了在不同  $V_{BS}$  偏置下  $k_{2gm}$  曲线。可以看出随着  $V_{BS}$  增大， $k_{2gm}$  曲线整体向左平移，意味着在相同  $V_{GS}$  下， $k_{2gm}$  更小，所以根据式(4)，沟道二阶非线性电流  $i_{IM2}$  电流幅度减小。回顾图 3，输出二阶互调电流  $i_{IM2,out}$  由两部分组成，分别是  $M_1$  产生的 IM2 电流镜像  $i_{IM2,M1,mirror}$  和  $M_2$  产生的  $i_{IM2,M2}$ 。由于电流方向相同， $i_{IM2,out}$  的大小是它们的幅度之差。如图 5

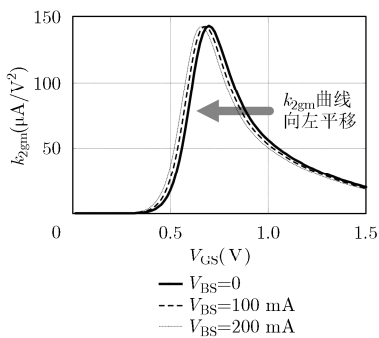


图 4 二阶非线性系数  $k_{2gm}$  随  $V_{BS}$  变化曲线

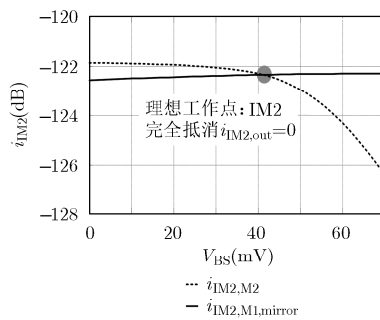


图 5 最佳体偏置工作点

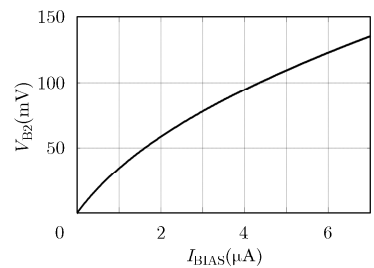


图 6 低精度偏置电流生成高精度体偏置电压

所示，通过精细调整  $V_{BS}$ ，根据图 4 中的  $k_{2gm}$  与  $V_{BS}$  关系，会略微减小  $i_{IM2,M2}$ ，直到大小与  $i_{IM2,M1,mirror}$  相同，此时输出中的 IM2 成分被完全抵消。

调整  $V_{BS}$  消除 IM2 需要高精度的体偏置电压。本文利用低精度的偏置电流阵列来生成高精度的体偏置电压。在强反型的 MOS 管中，沟道电流与过驱动电压成平方关系，在弱反型的 MOS 管中，电流和过驱动电压成指数关系。所以弱反型下，利用反指数关系，可以用电流偏置生成电压偏置。如图 3 所示，灰色覆盖的 native NMOS  $M_3, M_4$  工作在弱反型区域，它们设计成二极管连接提供精细的  $V_B$ 。采用 native NMOS 管是为了产生较低的电压，来偏置输入管  $M_1, M_2$ 。图 6 显示低精度偏置电流产生高精度体偏置电压曲线。产生的体偏置电压被低通 RC 网络滤除高频噪声后施加到  $M_1, M_2$ 。图 3 的缓冲器有两个控制开关  $M_7, M_8$ 。同一时刻，只有一路开关闭合，一路开关断开。这是考虑器件参数波动和失配下，当  $i_{IM2,M1,mirror} > i_{IM2,M2}$  时候， $V_{C1}=0, V_{C2}=VDD, V_{B2}=0$ ，调节  $V_{B1}$ ；当  $i_{IM2,M1,mirror} < i_{IM2,M2}$  时候， $V_{C1}=VDD, V_{C2}=0, V_{B1}=0$  调节  $V_{B2}$ 。

#### 4 仿真结果与讨论

采用  $0.35 \mu m$  CMOS 工艺，1.8 V 电源电压设计了图 1 中的 HBC 发射机。包括 FSMT 调制、预处理无源 RC 网络、八阶 Gm-C 带通滤波器和 IM2

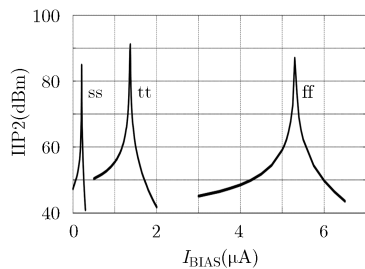


图7 不同工艺角下缓冲器最佳 IIP2

线性化技术缓冲器。图7显示了在不同工艺角下双音测试的结果。输入频率分别为20 MHz和21 MHz, 它们的频率差为1 MHz, 这里采用1 MHz是因为输出频谱观测的关键频率点是1 MHz。在不同工艺角下, 校正 IIP2 所需要的  $I_{BIAS}$  不同, 最佳 IIP2 在80~90 dBm 的区间。图8显示了采用体偏置技术与否输出频谱对比, 其中黑色的粗实线是 IEEE 802.15.6 HBC 物理层的输出频谱指标, 灰色是实际输出频谱。图8(a)给出了正确配置  $I_{BIAS}$  后发射机输出频谱, 此时在1 MHz 抑制有-130 dBr, 满足 IEEE 802.15.6 HBC 物理层输出频谱-120 dBr 的要求。而在图8(b)中, 没有进行任何优化, 即  $I_{BIAS} = 0$ , 此时代表输出频谱指标的粗实线与频谱相交, 频谱抑制-107 dBr。对比可以观察到两个输出频谱的主要差别是在低频区域, 高频区域如21 MHz 及以上的输出频谱是相同的。在5.25 MHz 频率处可以观测到毛刺, 这是分量18.375 MHz 和23.625 MHz 二阶

互调产生的, 但是依旧满足 IEEE 802.15.6 HBC 指标。表1 对比不同频谱整形技术发射机。文献[4,6] 使用高功耗的滤波器技术, 但未能分离出偶次失真的影响, 因此输出频谱在1 MHz 处依旧不满足 IEEE 802.15.6 协议。文献[9]提出导通角校正从而消除偶次谐波, 但插入的辅助缓冲器消耗额外功耗。文献[12]采用基于 DLL 校正扩频时钟技术来实现频谱抑制, 但是复杂的数字信号处理电路消耗显著功耗。文献[13]通过引入谐波陷波旁路, 虽然没有额外直流功耗, 但是获得有限的-53 dBr 最大频谱抑制。本文提出的体偏置技术在低功耗设计约束下, 完成了-130 dBr 输出频谱整形。

## 5 结束语

IEEE 802.15.6 协议 HBC 物理层定义了严格的输出频谱要求。本文首先把频谱整形关键定位在发射机最后一级输出缓冲器的二次非线性上, 分析出二阶互调项(IM2)会折叠到低频处。然后提出了基于体偏置的 IM2 消除技术, 通过设计体偏置消除缓冲器的非对称性, 从而实现伪全差分工作。仿真显示缓冲器的 IIP2 可以优化到90 dBm。相较于传统电路, 在1 MHz 处发射机输出频谱抑制从-107 dBr 被提高到-130 dBr, 达到 IEEE 802.15.6 协议 HBC 物理层-120 dBr 的指标, 并且缓冲器功耗只有91  $\mu$ W, 适合低功耗约束的无线体域网应用。

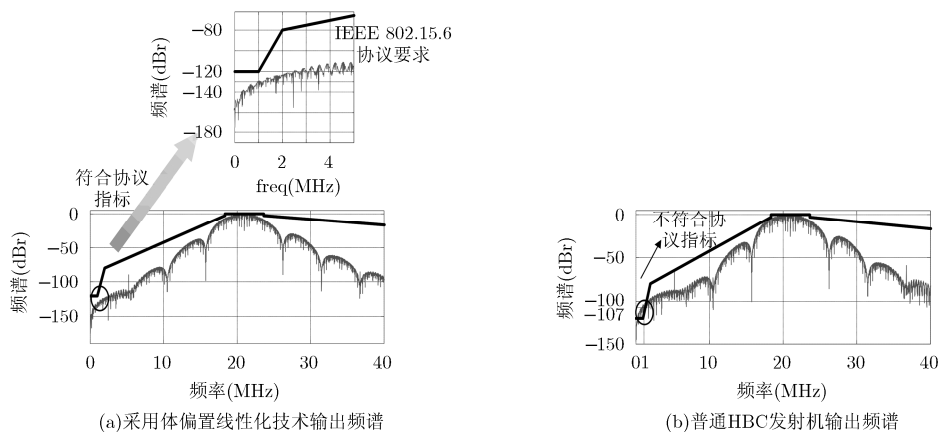


图8 发射机输出频谱对比

表1 频谱整形发射机性能比较

	文献[4]	文献[6]	文献[9]	文献[12]	文献[13]	本文
工艺	0.13 $\mu$ m	0.13 $\mu$ m	40 nm	0.18 $\mu$ m	0.18 $\mu$ m	0.35 $\mu$ m
频谱整形技术	八阶带通滤波器	九阶高通滤波器	导通角校正	扩频时钟	谐波陷波旁路	体偏置
最大频谱抑制	-80.3 dBr	-63 dBr	-58 dBr	-80 dBr	-53 dBr	-130 dBr
频谱整形模块功	-	1.3 mW	-	<72 mW	无额外功耗	0.091 mW

## 参 考 文 献

- [1] 邹卫霞, 康峰源, 杜光龙, 等. 基于中国医用体域网频段的物理层方案设计及干扰分析[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 429-434. doi: 10.11999/JEIT140901.
- ZOU Weixia, KANG Fengyuan, DU Guanglong, *et al.* Physical layer proposal design and interference analysis based on Chinese medical band in wireless body area network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 429-434. doi: 10.11999/JEIT140901.
- [2] 孙彦赞, 姜玉凤, 吴雅婷, 等. 基于改进式随机不完全着色算法的无线体域网干扰协调[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2204-2210. doi: 10.11999/JFIT141621.
- SUN Yanzan, JIANG Yufeng, WU Yating, *et al.* Improved random incomplete coloring for interference mitigation in wireless body area networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2204-2210. doi: 10.11999/JFIT141621.
- [3] IEEE 802.15.6-2012. IEEE standard for local and metropolitan area networks – part 15.6: Wireless body area networks[S]. 2012. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6161600.
- [4] LEE H, LEE K, HONG S, *et al.* A 5.5mW IEEE-802.15.6 wireless body-area-network standard transceiver for multichannel electro-acupuncture application[C]. IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, San Francisco, 2013: 452-453. doi: 10.1109/ISSCC.2013.6487811.
- [5] LEE H, CHO H, and YOO H J. A 33  $\mu$ W/node duty cycle controlled HBC transceiver system for medical BAN with 64 sensor nodes[C]. IEEE Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, 2014: 1-8. doi: 10.1109/CICC.2014.6946058.
- [6] CHO H, LEE H, BAE J, *et al.* A 5.2mW IEEE 802.15.6 HBC standard compatible transceiver with power efficient delay-locked-loop based BPSK demodulator[C]. IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, KaoHsiung, 2014: 297-300. doi: 10.1109/ASSCC.2014.7008919.
- [7] ONIZUKA K, ISHIHARA H, HOSOYA M, *et al.* A 1.9 GHz CMOS power amplifier with embedded linearizer to compensate AM-PM distortion[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(8): 1820-1827. doi: 10.1109/JSSC.2012.2196629.
- [8] HU S, KOUSAI S, and WANG H. A broadband mixed-signal CMOS power amplifier with a hybrid class-G Doherty efficiency enhancement technique[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, 51(3): 598-613. doi: 10.1109/JSSC.2015.2508023.
- [9] BA A, CHILLARA V K, LIU Y H, *et al.* A 2.4GHz class-D power amplifier with conduction angle calibration for -50dBc harmonic emissions[C]. Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, Tampa, 2014: 239-242. doi: 10.1109/RFIC.2014.6851708.
- [10] 刘洁, 胡波雄, 王刚, 等. 一种适用于 Ku 波段行波管放大器的预失真线性化器[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2515-2520. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01820.
- LIU Jie, HU Boxiong, WANG Gang, *et al.* A predistortion linearizer for Ku-band traveling wave tube amplifier[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2515-2520. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01820.
- [11] LIU Yang, ZHAO Bo, YANG Yintang, *et al.* A novel hybrid two-stage IM2 cancelling technique for IEEE 802.15.6 HBC standard[C]. IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, Lausanne, 2014: 640-643. doi: 10.1109/BioCAS.2014.6981807.
- [12] LEE I Y, KIM S, LEE S S, *et al.* Spur reduction techniques with a switched-capacitor feedback differential PLL and a DLL-based SSCG in UHF RFID transmitter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(4): 1202-1210. doi: 10.1109/TMTT.2015.2405536.
- [13] FRANCOIS B and REYNAERT P. Highly linear fully integrated wideband RF PA for LTE-advanced in 180-nm SOI[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(2): 649-658. doi: 10.1109/TMTT.2014.2380319.
- 柳 扬: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为模拟集成电路设计.
- 杨银堂: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为混合信号集成电路设计、模拟集成电路设计.
- 李 迪: 男, 1982 年生, 副教授, 研究方向为混合信号集成电路设计.
- 石佐辰: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为模拟集成电路设计.