

基于 55 nm CMOS 工艺的可变增益放大器

安文星¹, 佟玲¹, 刘亚轩¹, 张娜^{2†}

(1. 天津大学 微电子学院, 天津 300072; 2. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:为了实现 5G 通信系统中高数据传输速率的要求, 满足宽带条件下接收信号幅度的大动态范围变化, 基于 Global Foundries 55 nm CMOS 工艺提出一种宽带且增益大范围线性变化的可变增益放大器. 在该可变增益放大器中, 采用改进型 Cherry-Hooper 放大器结构使其动态范围和电路带宽有效扩展, 并利用晶体管的可调谐特性, 在不使用附加电路的前提下使增益变化具有良好线性, 解决了 CMOS 电路中放大器增益与控制电压非线性变化的难题, 同时添加低截止频率的高通滤波器, 消除可变增益放大器的直流偏移, 并降低其误码率. 版图仿真结果表明, 在-33.4~46.9 dB 的超宽动态范围内实现增益线性变化, 3-dB 带宽对应的频率达到 1.89 GHz(0.000 12~1.9 GHz), 可变增益放大器芯片(核心区域, 不含焊盘)面积仅为 0.006 mm². 该可变增益放大器指标完全满足目前 5G 宽带通信系统的要求.

关键词:放大器; 互补金属氧化物半导体; 宽带; 增益控制

中图分类号: TN722

文献标志码: A

A Variable Gain Amplifier Based on 55 nm CMOS Process

AN Wenxing¹, TONG Ling¹, LIU Yaxuan¹, ZHANG Na^{2†}

(1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: To achieve the demanding of high data transmission and meet large dynamic range under wideband conditions, a wide-band and high dynamic range variable gain amplifier with dB-linear characteristic based on the Global Foundries 55 nm CMOS process is presented. In this variable gain amplifier, a modified Cherry-Hooper amplifier gain cell is adopted to expand the dynamic range and the bandwidth of circuit, and the tunable characteristics of the transistor are used to make the dynamic range more linear and solve the problem that the amplifier's gain variation is nonlinear with the control voltage in the CMOS circuit without any additional exponential circuit. Meanwhile, a high-pass filter with a low cut-off frequency is added to eliminate the DC offset of the variable gain amplifier and reduce its bit error rate. The layout simulation results show that the variable gain amplifier achieves a ultra gain range of -33.4~46.9 dB with dB-linear characteristic, the 3-dB bandwidth is 1.89 GHz which is from 0.000 12 to 1.9 GHz, and the area of the variable gain amplifier chip (core area, excluding PAD) is only 0.006 mm². All indicators in variable gain amplifier are suitable for the 5G wide-band wireless communication system totally.

Key words: amplifier; Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS); wideband; gain control

* 收稿日期:2019-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701462), National Natural Science Foundation of China(61701462); 广东扬帆计划引进创新创业团队项目(2016YT04G420), Guangdong Yangfan Plans to Introduce Innovative Entrepreneurship Team Project(2016YT04G420)

作者简介:安文星(1984—),男,河南周口人,天津大学副教授

† 通讯联系人, E-mail: baiquanbaiquan@126.com

近年来,5G 通信对数据传输速率的高要求,使得无线通信系统的信道带宽成为研究的重要指标,而可变增益放大器(Variable Gain Amplifier,VGA)作为影响收发机芯片信道带宽的重要模块,其带宽特性直接影响数据传输的快慢.在接收机中,VGA 能对不同幅度的输入信号产生不同的增益,从而增大接收机的动态范围^[1-2],为了满足 5G 通信的数据吞吐量,应用于 5G 中 VGA 的 3-dB 带宽必须在吉赫兹以上^[3].为了保证通信系统拥有稳定的建立时间,VGA 必须具有增益线性变化特性.因此,具有增益线性变化特性的宽带 VGA 得到了广泛研究.

VGA 主要分为开环与闭环两种,由于难以实现高增益、宽带宽的运算放大器,闭环 VGA 的带宽往往受到极大限制,仅为几十兆赫兹^[4].现有的基于锗硅双极型互补金属氧化物半导体(SiGe Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor,SiGe BiCMOS)工艺和互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor,CMOS)工艺的宽带中频或基带 VGA 多为开环结构^[5-10],按控制方式又可分为数字控制与模拟控制两种.在具有精确增益线性特性的宽带 VGA 中,数字控制的 VGA 占主导地位^[11-12],但其增益变化为离散型,严重限制了其应用领域;模拟控制的 VGA 增益虽然能够连续变化,但需要多级低增益、宽带宽的可变增益单元级联,这就带来功耗、成本增加、整体 VGA 线性度下降等问题.例如文献[7]中提出的采用 65 nm CMOS 工艺实现的一种模拟电流控制的 VGA,带宽达到 4 GHz,但其功耗超过 25 mW,功耗过高,不利于系统集成,在应用上具有一定局限性.在利于系统集成的 CMOS 工艺中,实现增益线性变化具有挑战性,文献[9]虽然在低功耗下实现了宽带特性,但增益变化为非线性,不适用于需要稳定建立时间的系统中.

本文采用 55 nm CMOS 工艺实现了一种模拟电压控制,增益具有线性的宽带可变增益放大器.在不显著增加功耗的基础上,实现了对数增益随控制电压连续、线性、大范围的变化,且 3-dB 带宽对应的频率达到 1.89 GHz.

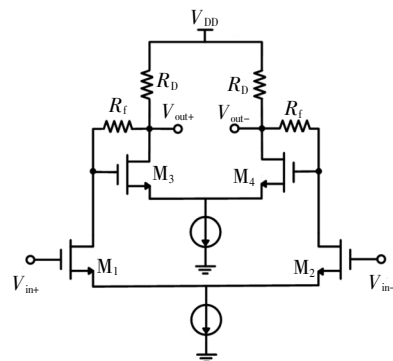
1 电路设计

1.1 可变增益单元的设计

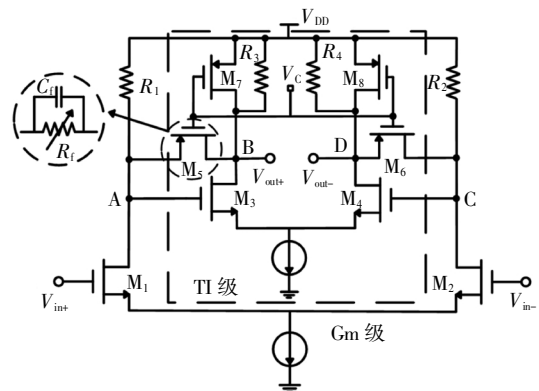
考虑到接收机一定的动态范围和带宽需求,本设计采用一种改进型的 Cherry-Hooper 放大器,这种

带有反馈结构的电路可以通过将输出极点移向更高的频率来扩大增益带宽,并且不会使增益显著降低.

传统的 Cherry-Hooper 型放大器如图 1(a)所示,这种结构有两点不足之处:首先,为使所有晶体管在饱和区域工作,大偏置电压会造成高功耗;其次, R_D 限制了放大器的最小增益,也就限制了放大器的可调谐范围.因此,本文对传统的 Cherry-Hooper 放大器进行了改进,使其在不增加功耗的情况下,具有更宽的增益调谐范围,如图 1(b)所示.其中可用工作在三极管区的 PMOS 管 M_5 、 M_6 来代替反馈电阻 R_f , C_f 为 M_5 、 M_6 的等效寄生电容.利用施加在 M_5 、 M_6 栅极上电压 V_C 的变化来实现可调电阻的功能^[13].所有 CMOS 晶体管都采用低阈值电压模型来缓解功耗问题.外接控制电压的 PMOS 晶体管 M_7 、 M_8 分别与 R_3 、 R_4 并联,以降低最小增益,从而增加整体增益调谐范围.此外,NMOS 管 M_1 、 M_2 分别由偏置电阻 R_1 、 R_2 提供直流电流.最终优化得到的各晶体管的参数如表 1 所示.



(a)传统的 Cherry-Hooper 型放大器



(b)改进型 Cherry-Hooper 型放大器

图 1 可变增益单元的设计

Fig.1 Design of variable gain cell

1.1.1 宽带的实现

为减小分析复杂度,图 2 给出了可变增益放大

器半边小信号模型. 其中 Gm 级和 TI 级的直流增益可分别由公式(1)和(2)进行定义.

$$A_{v0,Gm} = g_{m1} \cdot \frac{R_A(R_B + R_f)}{R_A + R_B + R_f + g_{m3}R_AR_B} \quad (1)$$

$$A_{v0,TI} = \frac{g_{m3}R_f - 1}{1 + R_f/R_B} \quad (2)$$

表 1 可变增益放大单元中晶体管的栅宽和栅长值

Tab.1 Gate width and gate length values of transistors in the variable gain amplifier cell

晶体管	栅宽/ μm	栅长/nm
M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄	24	
M ₅ , M ₆	6	60
M ₇ , M ₈	20	

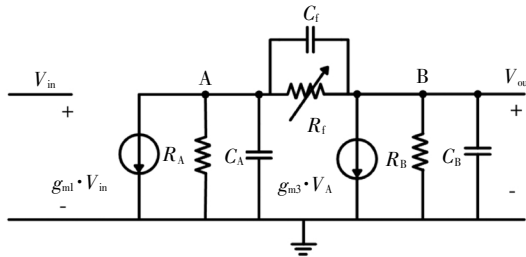


图 2 可变增益单元半边小信号模型

Fig.2 Half small-signal model of variable gain cell

改进的 Cherry-Hooper 放大器增益单元可视为跨导 Gm 级和跨阻抗 TI 级的级联, 则增益单元的直流增益 A_{v0} 为:

$$A_{v0} = A_{v0,Gm} \cdot A_{v0,TI} = g_{m1}R_f \times \frac{(1 - 1/g_{m3}R_f)}{1 + (R_A + R_B + R_f)/g_{m3}R_AR_B} \quad (3)$$

式中: g_{m1} 和 g_{m3} 分别为 M₁ 和 M₃ 的跨导; R_A 和 R_B 为主节点 A 和 B 处的输出电阻; 反馈电阻 R_f 为 M₅、M₆ 的等效电阻. 该增益单元的传输函数 A_v(s) 为:

$$A_v(s) = A_{v0} \cdot \frac{1 - sC_fR_f/(g_{m3}R_f - 1)}{as^2 + bs + 1} \quad (4)$$

式中: C_f 为 M₅、M₆ 的等效寄生电容. a 和 b 的表达式分别为:

$$a = \frac{R_AR_BR_f(C_AC_f + C_BC_f + C_AC_B)}{R_A + R_B + R_f + g_{m3}R_AR_B} \quad (5)$$

$$b = \frac{g_{m3}R_AR_BR_fC_f + R_fR_B(C_B + C_f)}{R_A + R_B + R_f + g_{m3}R_AR_B} + \frac{R_fR_A(C_A + C_f) + R_AR_B(C_B + C_A)}{R_A + R_B + R_f + g_{m3}R_AR_B} \quad (6)$$

式中: C_A 为节点 A 处的总寄生电容; C_B 为输出节点 B 处的总负载电容. 通常忽略 C_f 的值, 电路中晶体管 M₇ 可增大 R_A 和 R_B 的值, 使 R_A >> R_f 和 R_B >> R_f, 则节点 A 和节点 B 处的极点为 g_{m3}/(C_A + g_{m3}R_fC_f) 和 g_{m3}/

(C_B + g_{m3}R_fC_f), 进一步化简得 g_{m3}/C_A 和 g_{m3}/C_B.

可以发现除了寄生电容 C_A、C_B, 该可变增益单元的带宽只由 g_{m3} 决定, 与 g_{m1} 无关, 这种设计的优点在于某个增益水平下, 可以通过调节 g_{m3} 来扩展带宽. 由于差分电路的对称性, 另一半电路中节点 C 和 D 同理可得与上述节点 A 和 B 相同的结论, 即可通过调节与 g_{m3} 相对应的 g_{m4} 来扩展带宽.

在直流偏置一定的条件下, 改变晶体管 M₃、M₄ 的栅宽和栅长可以改变其跨导值. 图 3 给出不同栅宽 M₃、M₄ 的可变增益放大器频率特性. 可以看出栅宽过大时寄生电容也不断增大, 跨导 g_m 不再起主要作用, 可变增益单元通带内增益出现纹波. 因此根据实际需求选择 M₃ 和 M₄ 的栅宽为 24 μm . 从整体来看, 基于这种方式改进的 Cherry-Hooper 型放大器能够实现更宽的带宽.

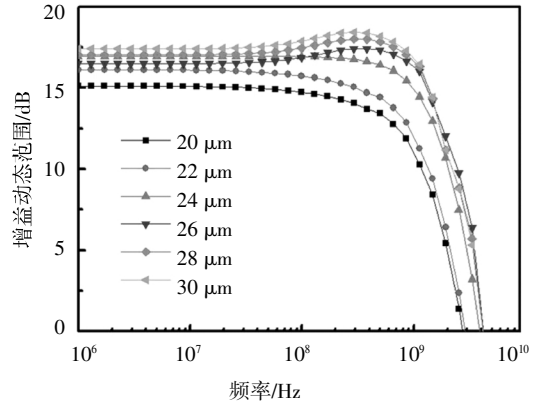


图 3 不同栅宽 M₃、M₄ 的可变增益放大器频率特性

Fig.3 Frequency responses of the variable gain amplifier with different gate widths of M₃, M₄

1.1.2 增益线性的实现

为了实现恒定的环路稳定时间和宽范围增益调节, VGA 要求具有指数增益特性, 从而可实现增益线性变化. 使用具有本征指数特性的双极型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT) 器件或异质结双极型晶体管 (Heterojunction Bipolar Transistor, HBT) 可较为轻松地实现可变增益放大器的指数增益特性. 而在 MOS 管中, 由于漏源电流与栅源电压的平方律关系, 难以实现指数增益特性. 考虑到功耗问题, 本文利用可调谐 MOS 管工作在线性区的特点实现增益线性变化.

Cherry-Hooper 型放大器单元的直流增益 A_{v0} 可简化为 A_{v0} ≈ g_{m1}R_f. 因此, R_f 与 A_{v0} 具有线性关系, 即可变电阻 R_f 具有指数特性时, 便可实现增益线性变化.

如图 1(b)所示,在改进型 Cherry-Hooper 放大器电路中, R_f 是由可调谐 PMOS 管 M_5 、 M_6 实现的,当 PMOS 管工作在线性区时,可以得到表达式(7),其中 V_c 和 V_s 分别为栅极电压和源极电压.

$$R_f = \frac{1}{\mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_s - |V_{TH}|)} \cdot \frac{1}{1 - V_c / (V_s - |V_{TH}|)} \quad (7)$$

根据泰勒展开公式,当允许一定误差存在时, $e^x \approx 1/(1-x)$, $|x| < 1$,通常在设计中 V_c 的取值为 0~电源电压, V_s 在本设计中为 1.1 V,为满足条件 $|x| < 1$, V_c 取值要小于 0.691 V,此时式(7)可写成:

$$R_f = \frac{1}{\mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_s - |V_{TH}|)} \cdot \exp\left(\frac{V_c}{V_s - |V_{TH}|}\right) \quad (8)$$

将式(8)换算成对数形式可得:

$$R_f(\text{dB}) = K_1 + K_2 V_c \quad (9)$$

式中: $K_1 = 20 \lg \frac{1}{\mu C_{ox} (W/L) (V_s - |V_{TH}|)}$; $K_2 = \frac{20 \cdot \lg e}{(V_s - |V_{TH}|)}$.

显然, K_1 和 K_2 是常数, R_f 相对于栅极电压 V_c 成增益线性的关系,即增益 A_{v0} 与栅极电压 V_c 成增益线性关系.

通过以上推导可以得出,只要调节作为可调电阻 R_f 的可调谐 PMOS 管的参数和工作区,就能使电路的对数增益随着控制电压 V_c 呈线性变化.

1.2 整体 VGA 系统与其他关键模块的设计

1.2.1 整体 VGA 架构

图 4 为本文提出的 VGA 系统框图.本文采用的 VGA 系统为级联结构,能提供足够的增益来放大接收到的较弱信号.设每个可变增益单元的 3-dB 带宽为 B_c ,增益为 A_c ,级联系统的 3-dB 带宽为 B_{tot} ,增益为 A_{tot} ,则有关系式(10)和(11),其中 n 代表级联的个数.为达到高速通信的目的,整体 VGA 需满足带宽大于 1 GHz 的设计目标,因此在权衡 n 与总噪声系数之间的矛盾之后,选择 $n = 3$.

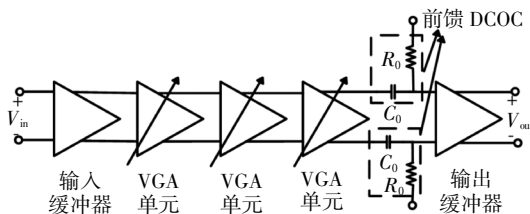


图 4 所提出的 VGA 系统框图

Fig.4 Overall block diagram of proposed VGA

$$A_{tot} = nA_v \quad (10)$$

$$B_{tot} = B_{cell} \sqrt[2^n]{2^{1/n} - 1} \quad (11)$$

整个 VGA 的增益变化由控制电压 V_c 决定,三级 VGA 单元由相同的改进型 Cherry-Hooper 放大器组成;由具有较低截止频率的高通滤波器构成的前馈电路有效消除了直流偏移.为了在实际环境中匹配 50Ω 的阻抗,在电路输入和输出端添加了缓冲器,能够有效地进行隔离并起到阻抗匹配的作用.

1.2.2 直流偏移消除电路

直流失调是设计高增益放大器时必须考虑的问题,即使一个很小的输入直流失调电压,经过多级放大后可能使输出饱和,导致 VGA 输出为恒定电平.实际中,一般采取电容耦合或直流失调消除电路来降低直流失调电压.其中电容耦合是在前馈路径中每级放大器之间使用大尺寸的电容和电阻,来避免损失信号通路中的低频分量,这种方式往往见于低频应用.典型的直流失调消除电路是通过带有 RC 低通滤波器的单个反馈放大器提取输出直流失调电压,将其部分反馈到输入端,逐步在输入端校正直流失调电压^[4,8-10],加入反馈放大器后往往会引入额外功耗,不利于整体设计.

图 5 为前馈直流失调消除电路,利用晶体管代替高通滤波器中的大电阻 R_0 和大电容 C_0 ,在降低电路复杂度的同时减小了芯片面积,并使得该高通滤波器的截止频率大大降低,从而降低了该可变增益放大器的下截止频率,可以有效提升数据传输速率,降低误码率.

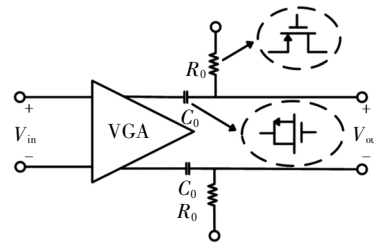


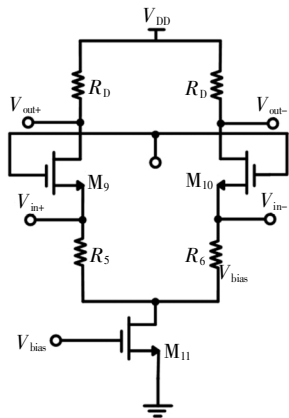
图 5 前馈直流失调消除电路

Fig.5 Feed-forward DC offset cancellation circuit

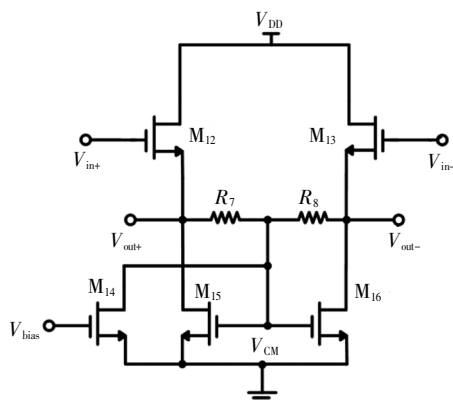
1.2.3 输入缓冲器与输出缓冲器

为方便在实际环境中进行测试,VGA 系统在输入输出端分别使用缓冲器来获得良好的匹配,便于驱动低阻抗负载.输入与输出缓冲器的原理图如图 6 所示.输入缓冲器采用基本的共栅极放大结构^[9],其输入阻抗为 $R_5 / (1 + g_{m9} R_5)$, $g_{m9} R_5$ 的值很小,可忽略不计;输出缓冲器采用具有共模反馈电路的射极跟随器的结构^[14],其输出阻抗为 $Z_{out} = (1/g_{m15}) \parallel (1/g_{m16})$; M_{15} 、 M_{16} 影响着 VGA 的输出匹配.缓冲器电路

中关键器件的参数见表 2.



(a)输入缓冲器



(b)输出缓冲器

图 6 缓冲器电路图

Fig.6 Buffer circuit

表 2 缓冲器电路中晶体管的栅宽和栅长值
Tab.2 Gate width and gate length values of transistors in the buffer circuit

晶体管	栅宽/ μm	栅长/nm
M ₉ , M ₁₀	20	60
M ₁₂ , M ₁₃	30	
M ₁₄	10	
M ₁₅ , M ₁₆	200	

2 结果与分析

本文设计的 VGA 版图如图 7 所示,由于芯片设计时未使用任何电感,故芯片面积小,制作成本低.芯片面积为 0.006 mm^2 (芯片核心区域尺寸,不包括焊盘),直流功耗为 19.68 mW .使用仿真软件基于 Global Foundries 55 nm CMOS 工艺模型对该宽带 VGA 进行版图后仿真.图 8(a)给出了该 VGA 的对数增益在不同频率上的响应结果.该放大器 3-dB 带

宽为 $1.89 \text{ GHz}(0.000 12\sim 1.9 \text{ GHz})$,带内平坦度极佳.

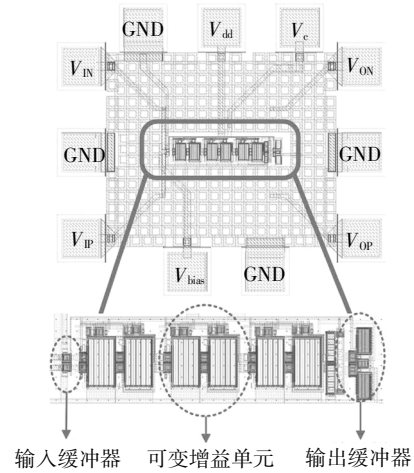
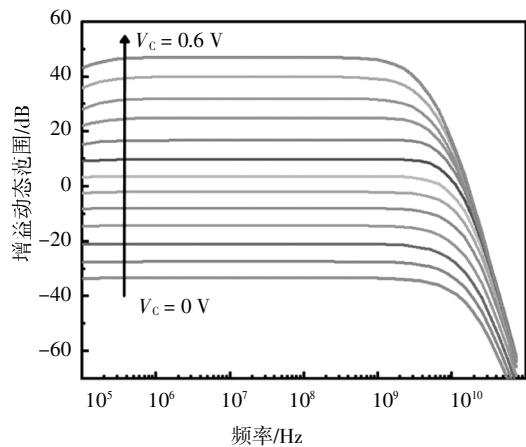


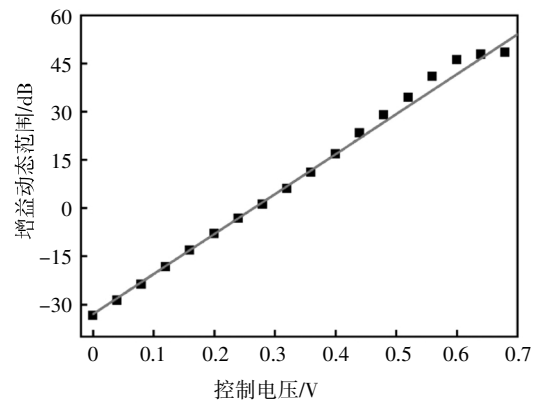
图 7 可变增益放大器的版图

Fig.7 Layout of the variable gain amplifier

该 VGA 的对数增益随控制电压变化结果如图 8 (b)所示,当控制电压 V_c 为 $0\sim 0.6 \text{ V}$ 时,电路的对数增益与控制电压 V_c 呈现相当好的线性关系,拟合度较高,增益线性变化的动态范围为 $-33.4\sim 46.9 \text{ dB}$,增益实现了最大范围的线性变化.



(a)可变增益放大器的频率响应



(b)增益与控制电压关系

图 8 可变增益放大器的性能

Fig.8 Performance of the variable gain amplifier

表3为本文中VGA的指标与已发表的同类采用CMOS工艺的可变增益放大器的性能比较。本文所提出的结构实现1.89 GHz (0.000 12~1.9 GHz)的3-dB带宽,并具有高达80.3 dB(-33.4~46.9 dB)的增益线性变化的增益。通常广泛使用的综合评价VGA性能的FoM公式如(12)所示,可突出设计在带宽BW、动态范围Gain Range、功耗Power、面积Core Area等方面的优越性。文献[9]的FoM虽高于本文中的VGA,其增益却不具备dB线性的特征,相较而言本设计可直接应用于自动增益控制系统中,在实际应用中更具有优势。

$$FoM = \frac{BW(\text{GHz}) \times \text{Gain Range}(\text{dB})}{\text{Power}(\text{mW}) \times \text{Core Area}(\text{mm}^2)} \quad (12)$$

表3 可变增益放大器性能总结与对比

Tab.3 Summary and comparison of the variable gain amplifier performance

文献	CMOS工艺 尺寸/nm	增益动态 范围/dB	带宽 /GHz	功耗 /mW	面积 /mm ²	FoM值
本文	55	80.3	1.89	19.68	0.006	1 292
[9]	90	60*	2.20	2.50	0.010	5 280*
[3]	65	22	2.00	3.48	0.010	1 201
[15]	180	67	1.00	9.60	0.190	36.73
[6]	130	41	0.57	4.98	0.100	46.93

注:*为增益变化不具有线性的范围,除本文外均为测试结果。

3 结论

本文设计了一种CMOS宽带可变增益放大器,该放大器采用三级级联结构,增益单元基于改进的Cherry-Hooper放大器,可增大带宽,通过在放大管输出的漏极添加可调谐的PMOS晶体管代替反馈电阻,同时保证了更大的增益调谐范围。此外,利用该可调谐晶体管工作在亚阈值区的特征,在整个动态变化范围内实现出色的dB线性。最后,利用直流失调消除技术优化了电路性能。VGA的增益范围为-33.4~46.9 dB,具有精确的dB线性特性,3-dB带宽为1.89 GHz(0.000 12~1.9 GHz),满足了5G通信系统的要求,同时VGA电路仅占用0.006 mm²面积,1.2 V电源仅消耗16.4 mA电流,在VGA广泛适用的FoM值为1 292,高于目前同类设计,实现了芯片小尺寸和低功耗,适用于5G宽带通信系统中。

参考文献

[1] WANG B D, GAO H, RAINIER V D, *et al.* 60-GHz low-noise VGA

and interpolation-based gain cell in a 40-nm CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(2): 518-532.

- [2] KODAK U, GABRIEL M R. A 5G 28-GHz commonleg T/R front-end in 45-nm CMOS SOI with 3.7-dB NF and -30-dBc EVM with 64-QAM/500-MBaud modulation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(1): 318-331.
- [3] LIU H, BOON C C, HE X F, *et al.* A wideband analog-controlled variable-gain amplifier with dB-linear characteristic for high-frequency applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(12): 1363-1373.
- [4] HASSAN E, AHMET T, KENNETH P. A differential-ramp based 65 dB-linear VGA technique in 65 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(9): 2503-2514.
- [5] BAI C F, WU J H, CHEN C, *et al.* A 35-dBm OIP3 CMOS constant bandwidth PGA with extended input range and improved common-mode rejection [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2017, 64(8): 922-926.
- [6] SONG X, LU Z H, YU X P. An accurate dB-linear CMOS VGA based on double duplicate biasing technique [J]. IEEE Journal of Latex Class Files, 2018, 14(8): 1-4.
- [7] KUMAR T B, MA K X, YEO K S. A 4 GHz 60 dB variable gain amplifier with tunable DC offset cancellation in 65 nm CMOS [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(1): 37-39.
- [8] KONG L S, CHEN Y, CHIRN C B, *et al.* A wideband inductorless dB-linear automatic gain control amplifier using a single-branch negative exponential generator for wireline applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2018, 65(10): 3196-3206.
- [9] WANG Y J, AFSHAR B, CHENG T Y, *et al.* A 2.5 mW inductorless wideband VGA with dual feedback DC-offset correction in 90 nm CMOS technology [C] // Proceedings of the IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Atlanta, Georgia: IEEE, 2008: 91-94.
- [10] KUMAR T B, MA K X, YEO K S. Temperature-compensated dB-linear digitally controlled variable gain amplifier with dc offset cancellation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(7): 2648-2661.
- [11] SAWSEN L, SAMIR B S, MOURAD L. Low power CMOS digital variable gain amplifier design for WiMAX/LTE receiver [C] // Proceedings of the 2018 30th International Conference on Microelectronics. Sousse, Tunisia: IEEE, 2018: 204-207.
- [12] LI Q Q, MA S L, YE F, *et al.* A low power PGA with DC-offset cancellation in 65 nm CMOS process [C] // Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Hangzhou: IEEE, 2016: 946-948.
- [13] 曾健平, 樊明, 陈毓颖, 等. 应用于眼压信号检测的低噪声前置放大器 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(8): 113-116.
ZENG J P, FAN M, CHEN C Y, *et al.* Design of low-noise preamplifier for application of intraocular pressure signal-detection [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(8): 113-116. (In Chinese)
- [14] LIU H, ZHU X, BOON C C, *et al.* Cell-based variable gain amplifiers with accurate dB-linear characteristic in 0.18 μm CMOS technology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(2): 586-596.
- [15] LI J, HUANG F Y, HU X R, *et al.* A 1 GHz 68 dB CMOS variable gain amplifier with an exponential-function circuit [C] // Proceedings of International Symposium on Signals, Systems and Electronics. Iasi, Romania: IEEE, 2010: 17-20.