A Novel Wideband Active Inductor with Simultaneously High Inductance Linearity and High and Constant *Q* Peak Values at Different Frequencies*

LIANG Yan, ZAHNG Wanrong*, NA Weicong, JIN Dongyue, XIE Hongyun, XU Yamei, CAI Ziteng
(College of Microelectronics, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A novel wideband active inductor with simultaneously high inductance linearity, and high and constant *Q* peak values at different frequencies is proposed. It is mainly composed of a gyration loop circuit, a direct current bias module with an external voltage tunable terminal V_{tune1}, a regulated common-source and common-gate circuit with an external voltage tunable terminal V_{tune2}, and a two-stage voltage shift circuit. The mutual cooperation among the four circuit modules and the combined tuning of the two external tunable terminal voltages of V_{tune1} and V_{tune2} can make the novel active inductor have different excellent comprehensive performances, i.e., high linearity of inductance value, high and constant *Q* peak value at different frequencies and high *Q* factor in broadband. Based on the TSMC 0.18 μm CMOS process, the verification results have illustrated that the linearity $L_{-1\,dB}$ of *L* value is as high as −10 dBm, the operation frequency band of $Q>10$ is up to 2.7 GHz, 3.45 GHz and 3.7 GHz respectively, and under high frequencies of 2.6 GHz, 3.75 GHz and 5.2 GHz, the *Q* peak values can be as high as 1 100, 1 089 and 1 102 respectively with the variation of only 2%.

Key words: active inductor; the linearity of inductance; high quality factor
EEACC: 1220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.05.001

一种电感值线性度高和 *Q* 值在多频点下保持恒定的新型宽带有源电感*

梁 岩, 张万荣*, 那伟聪, 金冬月, 谢红云, 许雅妹, 蔡梓腾
(北京工业大学信息学部微电子学院, 北京 100124)

摘 要: 提出了一种电感值线性度高、*Q* 值在多频点下保持恒定的新型宽带有源电感。它主要由回转器回路、带有一个外部电压调控端 V_{tune1} 的直流偏置模块、带有一个外部电压调控端 V_{tune2} 的共源-共栅调制支路以及两级电平转换电路等 4 个电路模块组成。通过 4 个电路模块的相互配合及其 2 个外部调控端电压 V_{tune1}、V_{tune2} 的组合调节, 使得新型有源电感具有如下的优秀电感综合性能: 高的 *L* 值线性度, 在多频点下具有高且基本恒定的 *Q* 峰值, 且在宽频带内具有高 *Q* 值。基于 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺进行验证, 结果表明, 新型有源电感的 *L* 值线性度 $L_{-1\,dB}$ 高达 −10 dBm; $Q>10$ 的工作频带分别高达 2.7 GHz、3.45 GHz、3.7 GHz; 在 2.6 GHz、3.75 GHz、5.2 GHz 三个高频点下, 分别取得了 1 100、1 089、1 102 的 *Q* 峰值, 变化率仅为 2%。

关键词: 有源电感; 线性度; 高 *Q* 值
中图分类号: TN722.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2023)05-1169-05

在片金属薄膜无源螺旋电感是设计带通滤波器(Band-Pass Filters, BPFs)、压控振荡器(Voltage Controlled Oscillators, VCOs)以及低噪声放大器(Low Noise Amplifies, LNAs)等射频集成电路(Radio Frequency Integrated Circuits, RFICs)的基本元件之一。然而, 它的几何尺寸是固定的, 因而电感值、*Q* 值和工作频率等性能参数都不可调谐; 在高频下, 由于趋肤效应导致寄生电阻增大, 以及涡流效应导致衬底损耗, 因而在高频下 *Q* 值较低; 另外, 它也占用较大芯片面积。所以, 它越来越难以满足 CMOS RFICs 的小型化、高性能和可重构的要求[1-5]。为了克服在片金属薄膜无源螺旋电感上述不足, 采用 MOS 晶体管构成的电路来模拟电感性能, 即有源电感(Active Inductor, AI), 引起了研究人员的广泛关注[6-10]。

由于 AI 是采用晶体管合成的, 因此, 一方面, 它的尺寸可以随着 CMOS 工艺节点的缩减而变得很小, 频率可以很高, 另一方面, 可以通过改变晶体管的偏置电流, 对电感值、*Q* 值和工作频率进行调节。

项目来源: 国家自然科学基金项目(61774012, 61574010, 61901010); 北京市自然科学基金项目(4192014, 4204092); 中国博士后科学基金项目(2019M650404); 北京市朝阳区博士后科研经费项目(2019ZZ-9)
收稿日期: 2022-05-10 **修改日期**: 2022-07-04

然而,现有 AI 电路拓扑,过多地依赖它的正跨导器和负跨导器两个基本模块来获得电感性能,导致电感值、Q 值和工作频带等性能参数指标相互影响。目前还缺乏有效技术手段和性能增强电路模块,与正跨导器和负跨导器模块一起构成一个整体以实现分工合作,来同时优化 AI 不同性能参数指标。另一方面,由于 AI 中 MOS 晶体管的漏极电流是二阶非线性的,当输入功率较高时,导致跨导 g_m 被压缩,因而 L 值线性度较低。文献[11]提出了一款有源电感,通过将共源配置的晶体管添加到反馈回路中,并与正跨导器并联,来减弱二阶非线性电流的影响,线性度 $L_{-1\,dB}$为+8 dBm,但是在 3 GHz 下取得的,工作频率不高,且 Q 峰值仅为 70。文献[12]提出了一款有源电感,采用共源-共栅结构的 NMOS 晶体管构成负跨导器来提高 Q 值,结果显示 Q 峰值为 341,但仅能在 2.51 GHz 下取得,不能在多个频点下均获得高 Q 峰值,且 Q 大于 10 的工作频带仅为 0.69 GHz (2.00 GHz~2.69 GHz)。文献[13]提出了一款有源电感,通过调节电源电压和负跨导器的直流偏置电压,在 14.2 GHz、16.4 GHz、17.5 GHz 多频点下取得了 1 532、1 257、1 882 的高 Q 峰值,但 Q 峰值的变化率高达 40%,没能在多频点下实现高 Q 峰值保持恒定特性,且没有采取减弱二阶非线性电流的措施,导致其线性度 $L_{-1\,dB}$较低,仅为-25 dBm。

因此,针对上述文献中有源电感的不足,本文创新性地提出了一款新型有源电感,它联合采用回转器回路、带有一个外部电压调控端 V_{tune1}的直流偏置模块、带有一个外部电压调控端 V_{tune2}的共源-共栅调制支路以及两级电平转换电路等 4 个电路模块,实现了电感多种优秀的综合性能:高的 L 值线性度;在多频点下具有高且基本恒定的 Q 峰值,且在宽频带内具有高 Q 值。

本文安排如下:第 1 节详细给出了所提出的新型有源电感的电路拓扑结构,并通过分析小信号等效电路,来解释其获得优异性能的机制,第 2 节对新型有源电感的性能进行了验证,在第 3 节中给出了结论。

1 新型有源电感的电路设计

本文提出的新型有源电感的电路拓扑如图 1 所示。主要由回转器回路、直流偏置模块、共源-共栅调制支路以及两级电平转换电路等四个电路模块构成。

回转器回路由 NMOS 晶体管 M_1、M_2、M_4 和反馈电阻 R_1 构成,其中,共源配置的 M_1 管以及堆叠在 M_1 上的 M_2 管形成共源-共栅结构,共同构成负跨导器;共漏配置的 M_4 管为正跨导器。反馈电阻 R_1 连接在

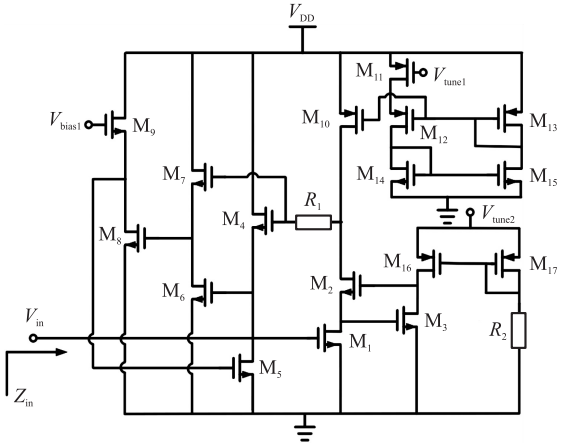

图 1 新型有源电感的电路拓扑

正、负跨导器之间,以增大等效电感值和 Q 值。

直流偏置模块由 NMOS 晶体管 M_5、M_{14}、M_{15}和 PMOS 晶体管 M_{10}~M_{13}构成,其中,M_5 管为正跨导器提供偏置电流,M_{10}~M_{15}管构成了自偏置电流源,为负跨导器提供偏置电流。M_{11}管工作在线性区,并与 M_{12}管的源极相连,构成了 M_{12}管的源极退化电阻,同时,在 M_{11}管的栅极配置了一个外部电压调控端 V_{tune1},来对新型有源电感的工作频率进行调控。

共源-共栅调制支路由 NMOS 晶体管 M_3、PMOS 晶体管 M_{16}和 M_{17}以及电阻 R_2 构成,与负跨导器相连,形成了负反馈结构,从而增大了 Q 值和扩展了工作带宽。M_{16}、M_{17}管和 R_2 为该支路提供偏置电流,同时,为该支路配置了一个外部电压调控端 V_{tune2},来对新型有源电感因调节工作频率而引起的 Q 值变化进行补偿。

两级电平转换电路由 NMOS 晶体管 M_6~M_9 构成,其中,M_6、M_7 管构成了第一级电平转换电路,M_8、M_9 管构成了第二级电平转换电路,同时,在 M_9 管的栅极配置了一个外部偏置电压 V_{bias1},两者共同作用,来改善新型有源电感的线性度。

因此,通过以上四个电路模块之间的紧密配合及其他们的外部调控端电压 V_{tune1}和 V_{tune2}的协同调节,可使新型有源电感实现如下性能:①高的 L 值线性度;②在多频点下具有高且恒定的 Q 峰值,③且在宽频带内具有高 Q 值的优秀特性。

下面,对其实现不同种类优秀性能的机理分别进行简要说明。

①新型有源电感能够取得 L 值高线性度的机理。

有源电感具有低的线性度是由于晶体管的漏极电流是二阶非线性的。由于 M_4 管的栅源电压变化范围比 M_1 管大,因此,要想提高新型有源电感的 L 值线性度,重点是改善 M_4 管漏极电流的非线性。

当输入信号电压为 v_{in}时,M_4 管的漏极电流可

以表示为:

$$I_{D4}=K(V_{gs4}+v_{in}-V_{TH})^2=K(V_{gs4}-V_{TH})^2+2K(V_{gs4}-V_{TH})v_{in}+Kv_{in}^2 \quad (1)$$

式中:K 为常数,V_{gs4} 为 M_4 管的栅源电压,V_{TH} 为 M_4 管的阈值电压。

由 I_{D4} 的表达式可以看出,第一项为直流偏置决定的漏极电流,第二项为与输入信号电压 v_{in} 成正比的电流项,前两项分别构成了直流项和交流项。而第三项 Kv_{in}^2 是一个二阶的非线性电流项,当输入较高的信号时,它导致 M_4 管的直流偏置点发生偏移,进而影响了 M_4 管的跨导值。

为了消除 M_4 管漏极电流中的二阶非线性项电流的影响,本文引入了一个由 M_5 管构成的补偿电流源和两级电平转换电路,使得 M_5 管具有和 M_4 管相同的二阶非线性项电流,因而 M_4 管的二阶非线性项电流得以抵消。机理如下:当 M_4 管的栅源电压为 $V_{gs4}+v_{in}$ 时,第一级电平转换电路的输出电压等于 M_4 管的栅极电压 $V_{gs4}+v_{in}$,第二级电平转换电路的输出电压等于 $V_{bias1}-V_{gs4}-v_{in}$,将第二级电平转换电路的输出电压作用于 M_5 管的栅极上。令 M_4 管与 M_5 管的宽长比相等,$(W/L)_4=(W/L)_5$,则流过 M_4 管的总电流 I_o 为:

$$I_o=K(V_{gs4}+v_{in}-V_{TH})^2-K(V_{bias1}-V_{gs4}-v_{in}-V_{TH})^2=K(V_{bias1}-2V_{TH})(2V_{gs4}-V_{bias1})+2K(V_{bias1}-2V_{TH})v_{in} \quad (2)$$

从式(2)可知,采用两级电平转换电路后,流过 M_4 管的总电流中,二阶非线性项 Kv_{in}^2 被消除,从而提高了新型有源电感的 L 值线性度。

②新型有源电感能够在宽频带内具有高 Q 值、在多频点下均具有高 Q 峰值且几乎恒定不变的机理,可通过对其电路进行小信号等效电路分析,来进一步说明。

图 2 为稳压器其新型有源电感核心电路的小信号等效电路图。其中 g_{m1}、g_{m2}、g_{m3} 和 g_{m4} 分别为 NMOS 管 M_1、M_2、M_3、M_4 的跨导,C_{gs1}、C_{gs2}、C_{gs3} 和 C_{gs4} 分别为 NMOS 管 M_1、M_2、M_3 和 M_4 的栅源电容,g_{ds1}、g_{ds2}、g_{ds3} 和 g_{ds4} 分别为 NMOS 管 M_1、M_2、M_3、M_4 的输出电导。

该新型有源电感可等效如图 3 所示的无源 RLC 电路。

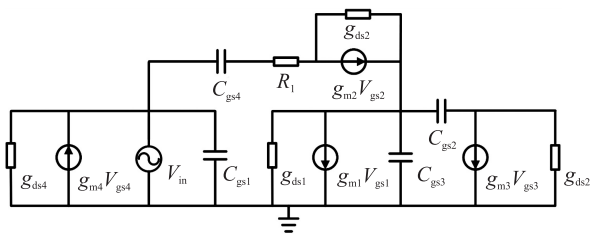

图 2　新型有源电感的小信号等效电路

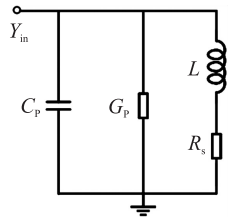

图 3　新型有源电感的无源 RLC 等效电路

图 3 中,L 为等效电感,R_S 为等效串联电阻,C_P 为等效并联电容、G_P 为等效并联电导,它们可以分别表示为:

$$L=\frac{g_{m4}g_{m2}C_{gs4}+\omega^2C_{gs4}^2C_{gs2}(1+R_1g_{ds2})}{g_{m4}^2g_{m2}g_{m1}+\omega^2g_{m2}g_{m4}C_{gs4}^2} \quad (3)$$

$$R_S=\frac{g_{m4}g_{ds2}g_{ds1}\frac{g_{ds3}}{g_{m3}}+\omega^2[g_{m2}C_{gs4}^2-g_{m4}C_{gs4}C_{gs2}(1+R_1g_{ds2})]}{g_{m4}^2g_{m2}g_{m1}+\omega^2g_{m2}g_{m1}C_{gs4}^2} \quad (4)$$

$$G_P=\frac{2g_{ds2}+R_1g_{ds2}^2}{1+R_1g_{ds2}} \quad (5)$$

$$C_P=C_{gs1} \quad (6)$$

有源电感的品质因子 Q、零点频率 ω_Z 和自谐振频率 ω_0 可分别表示为:

$$Q\approx\frac{\omega_0L}{R_S}=\frac{g_{m4}g_{m2}C_{gs4}+\omega^2C_{gs4}^2C_{gs2}(1+R_1g_{ds2})}{g_{m4}g_{ds2}g_{ds1}\frac{g_{ds3}}{g_{m3}}+\omega^2[g_{m2}C_{gs4}^2-g_{m4}C_{gs4}C_{gs2}(1+R_1g_{ds2})]} \quad (7)$$

$$\omega_Z\approx\frac{R_S}{L}=\frac{g_{m4}g_{ds2}g_{ds1}\frac{g_{ds3}}{g_{m3}}+\omega^2[g_{m2}C_{gs4}^2-g_{m4}C_{gs4}C_{gs2}(1+R_1g_{ds2})]}{g_{ds4}g_{m1}g_{m3}C_{gs2}(1+R_1g_{ds2})} \quad (8)$$

$$\omega_0\approx\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{\frac{g_{m4}g_{m2}C_{gs4}C_{gs1}+\omega^2C_{gs4}^2C_{gs2}C_{gs1}(1+R_1g_{ds2})}{g_{m4}^2g_{m2}g_{m1}+\omega^2g_{m2}g_{m1}C_{gs4}^2}}} \quad (9)$$

结合以上表达式,新型有源电感可实现不同种类的优秀性能的机理如下。

①新型有源电感在宽频带内具有高 Q 值的特性是回转器回路和共源-共栅调制支路共同作用的结果。

联合式(3)、式(4)、式(7)和式(8)可以看出,首先,高的 Q 值可通过将反馈电阻 R_1 连接在正、负跨导器之间,以及将共源-共栅调制支路与负跨导

器相连得以实现，一方面，通过引入反馈电阻 R_1，增大了等效电感值 L 和减小了等效串联电阻 R_S，从而增大了 Q 值，这可以从式(3)中分子添加了一项 $\omega^2 C_{gs4}^2 C_{gs2}(1+R_1 g_{ds2})$ 以及式(4)中分子中添加了一个与 R_1 相关的负项 $-\omega^2 g_{m4} C_{gs4} C_{gs2}(1+R_1 g_{ds2})$ 可以看出。另一方面，通过引入共源-共栅调制支路，减小了 R_S，从而进一步增大了 Q 值，这可以从式(4)分子中添加了一个小于 1 的项 g_{ds3}/g_{m3}（$g_{m3} \gg g_{ds3}$）可以看出。其次，宽的工作频带也是通过反馈电阻 R_1 和共源-共栅调制支路与正、负跨导器之间相互作用而得以实现的，等效电感值的增大和等效串联电阻的减小使得零点频率降低，从而实现了宽频带。

②新型有源电感能够取得在多频点下均具有高 Q 峰值且几乎恒定不变的特性得益于直流偏置模块与共源-共栅调制支路及其他们调控端电压 V_{tune1} 和 V_{tune2} 之间的相互配合。

联合式(7)和式(9)可知，通过调节直流偏置模块的外部调控端电压 V_{tune1} 可改变回转器回路的 M_1 管和 M_2 管的跨导 g_{m1}、g_{m2}，从而实现对工作频率的调控。而伴随的 Q 值变化则通过调节共源-共栅调制支路的外部调控端电压 V_{tune2}，改变 M_3 管的跨导 g_{m3}，进而改变等效串联电阻 R_S 的大小，可对 Q 值进行补偿，从而实现了在多频点下均具有高 Q 峰值且可基本保持不变。

2 新型有源电感的性能验证

基于 TSMC 0.18 μm RF CMOS 工艺，利用安捷伦公司的 ADS 射频电路设计工具，对本文提出的新型有源电感进行性能验证。

图 4 所示为采用与未采用两级电平转换电路的两种有源电感的电感值与输入功率的变化情况。可以看出，两种有源电感，电感 1 dB 压缩点 $L_{-1\,dB}$ 分别为-10 dBm和-26 dBm，两者比较可得，$L_{-1\,dB}$ 提高了 16 dB，因此，采用两级电平转换电路有效改善了新型有源电感的 L 值线性度。

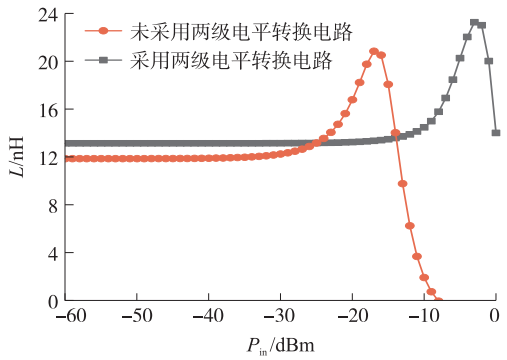

图 4 在 5.2 GHz 下，采用与未采用两级电平转换电路的有源电感 L 值的线性度比较

图 5 所示为通过协同调节回转器回路和共源-共栅调制支路的调控端电压 V_{tune1} 和 V_{tune2}，对新型有源电感的工作频率与 Q 值的调节情况。首先，可以看出，在 V_{tune1} 和 V_{tune2} 组合的三种不同偏置电压 V_{bias1}、V_{bias2} 和 V_{bias3} 下，新型有源电感 Q>10 的工作带宽分别为 2.7 GHz(1.25 GHz~3.95 GHz)、3.45 GHz(1.85 GHz~5.3 GHz)、3.7 GHz(2.8 GHz~6.5 GHz)；其次，可以看出，在 2.6 GHz、3.75 GHz、5.2 GHz 三个不同的工作频点下，分别取得了高达 1 100、1 089、1 102 的 Q 峰值，且 Q 峰值保持几乎恒定，变化率仅为 2%。因此，该新型有源电感实现了在宽频带内具有高 Q 值、在多频点下具有高 Q 峰值且基本恒定不变的特性。

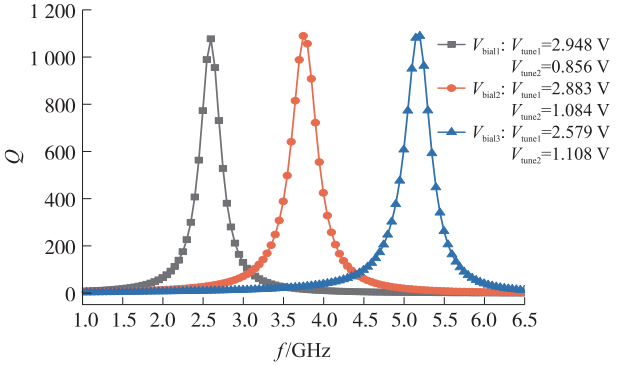

图 5 协同调控 V_{tune1} 和 V_{tune2} 对 Q 值的影响

新型有源电感在上述三种不同组合偏置电压 V_{bias1}、V_{bias2} 和 V_{bias3} 下，在宽频带内具有高 Q 值特性，可以从图 6 所示的电压-电流之间的相位差 ϕ 的角度来说明。

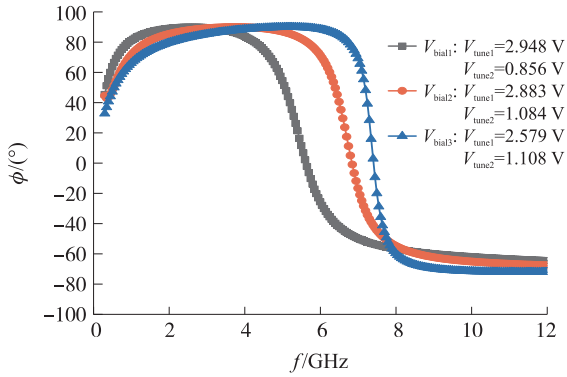

图 6 三种不同的组合偏置电压对有源电感的电压-电流之间的相位差 ϕ 的影响

在组合偏置电压 V_{bias1} 下，随着频率的增加，相位差 ϕ 先增加后减小，导致 Q 值也随之先增大后减小，在 1.25 GHz 处，ϕ = 84.537°，Q = 10.455；在 2.6 GHz处，相位差 ϕ 最大，为 89.948°，最接近 90°，即接近无损耗的理想电感，Q 达到峰值 Q_{max} = 1 100；

在 3.95 GHz 处,$\phi = 84.334°$,$Q = 10.079$。因此对应 $Q>10$ 工作带宽为 2.7 GHz(1.25 GHz~3.95 GHz)。在另外两组不同的组合偏置电压下,相位差 ϕ 随频率的变化也有类似的情况。在组合偏置电压 V_{bias2} 下,在频率 1.85 GHz~5.3 GHz(带宽为 3.45 GHz)内 $\phi>84.346°$,$Q>10$,其中在 3.75 GHz 处,ϕ 最大,为 89.947°,Q 达到峰值 $Q_{max} = 1\ 089$;在组合偏置电压 V_{bias3} 下,在频率 2.8 GHz~6.5 GHz(带宽为 3.7 GHz)内 $\phi>84.455°$,$Q>10$,其中在 5.2 GHz 处,ϕ 最大,为 89.946°,Q 达到峰值 $Q_{max} = 1\ 102$。

3　结论

本文提出了一款兼有多种优秀电感性能的新型有源电感,它由回转器回路、带有一个外部电压调控端 V_{tune1} 的直流偏置模块、带有一个外部电压调控端 V_{tune2} 的共源-共栅调制支路以及两级电平转换电路构成。通过 4 个电路模块的有机配合和 2 个调控电压 V_{tune1} 和 V_{tune2} 的联合调控,有源电感实现了高的 L 值线性度、在多频点下具有高且基本恒定的 Q 值以及在宽频带内具有高 Q 值等多种良好的综合性能。对新型有源电感的性能进行验证,结果表明,L 值线性度高达-10 dBm;在 V_{tune1} 和 V_{tune2} 的三种不同的组合偏置电压下,$Q>10$ 的工作带宽分别为 2.7 GHz、3.45 GHz、3.7 GHz;同时,在 2.6 GHz、3.75 GHz、5.2 GHz 三个不同的高频点下,分别取得了高达 1 100、1 089、1 102 的 Q 峰值,变化率仅为 2%。因此,具有上述优异性能的新型有源电感,可应用于 BPFs、VCOs 以及 LNAs 等高线性 RFICs 中,为替代在片金属薄膜无源螺旋电感提供了一个可行的方案。

参考文献:

[1] Yokouchi T, Kagawa F, Hirschberger M, et al. Emergent Electromagnetic Induction in a Helical-Spin Magnet[J]. Nature, 2020, 586(7828): 232-236.

[2] Razavi B. The Active Inductor[A Circuit for All Seasons][J]. IEEE Solid-State Circuits Magazine, 2020, 12(2): 7-11.

[3] Suresh L. N, Manickam B. Multiple Cascode Flipped Active Inductor-Based Tunable Bandpass Filter for Fully Integrated RF Front-End[J]. IET Circuits, Devices and Systems, 2020, 14(1): 93-99.

[4] Faruqe O, Amin M T. Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications[J]. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2019, 65(1): 57-64.

[5] Afroz N, Sayem A S, Hossain A, et al. Design of 2.4 GHz Ultra Wide Band Low Noise Amplifier and Area Reduction Using Active Inductor in 90nm CMOS Technology[C]// 2019 2nd International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET), Dhaka, Bangladesh, 2019: 1-5.

[6] Mhiri M, Besbes K. Gyrator-C-Based CMOS Active Inductors: Analysis of Performance Optimization Techniques[J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(8): 65-82.

[7] 王娜,张万荣,谢红云,等. 一种双回转器有源电感[J]. 电子器件,2017,40(6):1378-1382.

[8] 陈吉添,张万荣,金冬月,等. 一款增益可调且平坦的超宽带低噪声放大器[J]. 电子器件,2017,40(2):326-332.

[9] Prameela A, Daniel E. A Novel High Q Active Inductor Design for Wireless Applications[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 2626-2634.

[10] 张正,张延华,温晓伟,等. 采用可调谐高 Q 有源电感的高优值 VCO 的研究[J]. 电子器件,2021,44(2):272-277.

[11] Bhattacharya R, Basu A, Koul S K. A Highly Linear CMOS Active Inductor and Its Application in Filters and Power Dividers[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(11): 715-717.

[12] Bharath L, Anila D, Ajay C N, et al. A Wide-Band, Low-Power Grounded Active Inductor with High Q Factor for RF Applications[C]//2019 International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems, Coimbatore, India, Springer, 2020, 637: 541-548.

[13] Pandey M, Canelas A, Povoa R, et al. Design and Application of a CMOS Active Inductor at Ku Band Based on a Multi-Objective Optimizer[J]. Integration the VLSI Journal, 2016, 55: 330-340.

梁　岩(1997—),女,黎族,辽宁人,现为北京工业大学硕士研究生,研究方向为射频集成电路,liangyan@emails.bjut.edu.cn;

张万荣(1964—),男,汉族,河北人,教授,现任北京工业大学博士生导师,研究方向为 RF 器件与 RFIC、微电子器件与集成电路可靠性,wrzhang@bjut.edu.cn。