

## An Active Inductor with Simultaneously Enhanced $Q$ - $f$ Characteristics and Robustness to Supply Voltage Fluctuation \*

WANG Xiaoxue, ZHANG Wanrong\*, NA Weicong, REN Yangui, LI Nanxing, GAO Wenjing, WU Yinfeng  
(College of Microelectronics, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A novel active inductor with enhanced  $Q$ - $f$  characteristics and strong robustness to supply voltage fluctuation is presented. Firstly, a gyrator, a direct current bias circuit and a shunt branch are constructed, and the cooperativeness among these modules and the joint tuning of their external bias voltages enhance  $Q$ - $f$  characteristics, i.e. the  $Q$  peak value can be tuned independently in a wide range with respect to the inductance value at the same frequency and the  $Q$  peak value can keep almost unchanged at different frequencies. Secondly, a voltage regulator module, composed of sensing unit and amplification unit, is employed to strengthen the robustness of the inductance value and  $Q$  peak value to the fluctuation of supply voltage. The verification results indicate that at the frequency of 3.84 GHz, the  $Q$  peak value can be adjusted from 636 to 4 032 with the large tuning rate of 533%, while the inductance variation is of only 0.13%. Under the frequencies of 3.84 GHz, 2.40 GHz and 1.54 GHz, the  $Q$  peak values can be high up to 4 032, 4 039 and 4 043 respectively with the variation of only 0.2%. The supply sensitivities of inductance value and  $Q$  peak value are 0.011 nH/mV and 20.0/mV respectively.

**Key words:** active inductor; robustness; supply sensitivity; quality factor  
EEACC: 2140 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2024.01.002

## 一种 $Q$ - $f$ 特性和对工作电压波动鲁棒性增强的有源电感 \*

王晓雪, 张万荣\*, 那伟聪, 任衍贵, 李楠星, 高文静, 吴银烽  
(北京工业大学信息学部微电子学院, 北京 100124)

**摘要:** 提出一种品质因数( $Q$ )-频率特性( $Q$ - $f$ 特性)和对工作电压波动鲁棒性增强的新型有源电感。首先,通过回转器、直流偏置电路、分流支路三个构成模块的相互配合和它们的外部偏置端电压的协同调节,增强了 $Q$ - $f$ 特性,即实现了在同一频率下 $Q$ 峰值相对于电感值可大范围独立调节以及在不同频率下 $Q$ 峰值保持基本不变的2种 $Q$ 值特性。其次,通过设置由感知单元与放大单元构成的稳压模块,增强了电感值和 $Q$ 峰值对工作电压波动的鲁棒性。结果表明,在3.84 GHz频率下, $Q$ 值可从636调节到4 032,调节率高达533%,而电感值变化率仅为0.13%;在3.84 GHz、2.40 GHz和1.54 GHz不同频率下,分别取得4 032、4 039和4 043的高 $Q$ 峰值, $Q$ 峰值变化率仅为0.2%;电感值和 $Q$ 峰值的工作电压敏感度分别为0.011 nH/mV和20.0/mV。

**关键词:** 有源电感;鲁棒性;电压敏感度;品质因数

中图分类号: TN711.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2024)01-0010-05

片上金属薄膜无源螺旋电感作为一种重要元器件,被广泛应用于射频电路中,如用于低噪声放大器的阻抗匹配电路、压控振荡器的谐振电路、滤波器的频率选择电路<sup>[1-3]</sup>。然而,因为它的形状是固定的,所以电感值、品质因数( $Q$ )等性能参数均不可调节,而且面积大,另外,由于趋肤效应和衬底的涡流效应所导致的损耗,使得 $Q$ 值在高频下严重退化,不能实现理想电感的 $Q$ 不随频率变化的特性<sup>[3-4]</sup>。为了克服上述缺点,基于有源器件合成的等效电感即有源电感(Active Inductor, AI),因面积小和性能参数可调节而备受国内外学者关注<sup>[5-7]</sup>。

目前 AI 大多基于回转器原理来合成的,由正、负跨导器首尾相连构成,当输出端口接入回转电容

时,在输入端口就会表现出电感特性<sup>[4,7]</sup>。然而,在调节电感值、 $Q$ 值这两个性能指标的其中之一时,会影响另一个性能指标,难以获得 $Q$ 值相对于电感值可以独立调节且 $Q$ 值在不同频率下保持不变的 $Q$ - $f$ 特性,这是因为 AI 电路的各个单元之间缺乏深度合作和不同调节端电压间还没有完善的协同配合机制<sup>[8-10]</sup>。例如,文献[9]给出的一种 AI,由回转器、可调反馈电阻和可控电流源构成,通过联合调控后两个模块,使得 AI 在 1.57 GHz、2.42 GHz 和 3.25 GHz 频率下分别取得了 2 672、1 752 和 822 的  $Q$  峰值,但  $Q$  峰值的变化率却高达 225%,未能实现在不同频率下  $Q$  峰值保持基本恒定的优异  $Q$ - $f$  特性,这是因为所构成的电路模块只有三个,再也没有

**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: 2022-07-14 修改日期: 2022-09-08

去补偿因频率变化导致  $Q$  值不同进而保持  $Q$  值基本恒定的其他电路模块;文献[10]设计了一款由可调负跨导器、正跨导器、可控电流源和负电容构成的 AI,它利用其中的可调负跨导器和可控电流源两个可调模块,实现了 6.55 GHz 频率下  $Q$  峰值从 221 到 566 的调节,但伴随着的等效电感值却由 19.6 nH 变化到 26.3 nH,变化率高达 25%,这是由于其余的正跨导器和负电容两个模块,没有调控机制来补偿电感值变化的结果,因而无法实现  $Q$  峰值相对于电感值进行独立调节的优异特性。

有源电感特性对工作电压波动的敏感性也是需要考虑的一个问题,由于 AI 的跨导器由晶体管构成,是在一定偏置电压下工作的,所以工作电压的波动必然会对 AI 的性能造成影响<sup>[11-13]</sup>,然而,无论是上述文献[9-10],还是其他的大多数文献都关注较少<sup>[12-13]</sup>。文献[13]采用自偏置可控电流镜来降低因工作电压波动对电感性能的影响,实现了在工作电压波动 1 mV 时电感值变化 0.013 8 nH 的性能和在 2.88 GHz、3.02 GHz 和 3.16 GHz 的不同频率下分别取得了 1 819、130 和 34 的  $Q$  峰值,但  $Q$  峰值的变化幅度高达 1 785,不能实现在不同频率下保持  $Q$  峰值基本不变的  $Q$ - $f$  特性,这是由于该款 AI 并没有其他可调模块来补偿因调节频率引起  $Q$  峰值的变化。

为了解决上述问题,本文提出一种新型的 AI 拓扑,由回转器模块、直流偏置模块、分流支路和稳压模块构成,并为前三个模块分别配置了外部电压偏置端  $V_{11}$ 、 $V_{12}$  和  $V_{13}$ ,通过不同模块的相互配合以及它们的外部端口电压协同调控,既实现了优秀  $Q$ - $f$  特性及其多样性,又增强了性能对工作电压变化的强鲁棒性。

本文安排如下:第一节,首先给出了新型有源电感的电路拓扑,其次通过小信号等效模型,解释了  $Q$  值相对于电感值可独立调节和不同频率下  $Q$  值保持基本不变的 2 种  $Q$ - $f$  特性,以及稳压模块通过反馈来降低性能参数对工作电压波动的敏感度。第二节对所提出的有源电感性能进行验证。第三节给出结论。

## 1 新型有源电感的电路设计

本文提出的新型有源电感电路拓扑如图 1 所示,包括回转器模块、分流支路、偏置电流模块和稳压模块等四个部分,既增强了  $Q$ - $f$  特性,又增强了 AI 性能参数对工作电压波动的鲁棒性。下面将对各个部分的构成及其功能进行扼要的说明。

回转器模块的正跨导器由 NMOS 管  $M_1$ 、 $M_{15}$  和 PMOS 管  $M_2$ 、 $M_3$  构成,负跨导器由 NMOS 管  $M_4$  构

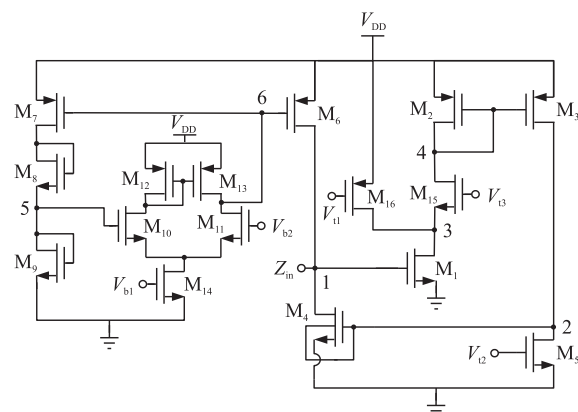


图 1 新型 AI 的电路拓扑

成,正、负跨导器的结合使得电路在输入端口表现出电感特性。进一步,为  $M_{15}$  管配置一个外部偏置电压端  $V_{13}$ ,来调节电感的  $Q$  值;并将  $M_4$  栅极与衬底进行短接配置,以增大等效电感值。

直流偏置模块由 NMOS 管  $M_5$  和 PMOS 管  $M_6$  两个部分构成,分别为正、负跨导器提供偏置电流。进一步,为  $M_5$  管设置了一个外部偏置电压端  $V_{12}$ ,来增强电感性能的可调性。

分流支路由带有一个外部偏置电压端  $V_{11}$  的 PMOS 管  $M_{16}$  构成,连接在正跨导器的  $M_1$  和  $M_{15}$  管之间,对因调节频率引起的电感值变化进行补偿。

稳压模块由 NMOS 管  $M_8 \sim M_{13}$  和 PMOS 管  $M_7$ 、 $M_{13}$ 、 $M_{14}$  构成,并与直流偏置模块中为负跨导器提供偏置的  $M_6$  管连接。其中, $M_7 \sim M_9$  管构成感知单元, $M_{10} \sim M_{14}$  管构成放大单元,两者的配合可以抑制工作电压  $V_{DD}$  波动对负跨导器的影响,从而降低电感性能参数对工作电压波动的敏感度。

最终,通过以上四个模块的相互配合以及三个外部偏置电压端( $V_{11}$ 、 $V_{12}$  和  $V_{13}$ )的协同调控,一方面,降低了电感性能对工作电压波动的敏感度,另一方面,实现了在同一频率下  $Q$  峰值相对于电感值可大范围独立调节和在不同频率下  $Q$  峰值保持基本不变 2 种优秀的  $Q$ - $f$  特性。

下面,将对新型有源电感实现上述性能的机理分两部分进行说明。

### 1.1 增强 $Q$ 值特性的机理

本文提出的新型有源电感具有 2 种优秀  $Q$ - $f$  特性的机理,可以通过分析其小信号等效模型来说明,如图 2 所示。其中, $C_{gsi}$ 、 $C_{bsi}$ 、 $g_{dsi}$  和  $g_{mi}$  分别为 MOS 管  $M_i$  的栅源电容值、源衬电容值、跨导值和输出电导值。

图 2 电路的输入导纳可以表示为:

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_{in}} = g_{ds4} + j\omega C_{gs1} + \frac{1}{A} \quad (1)$$

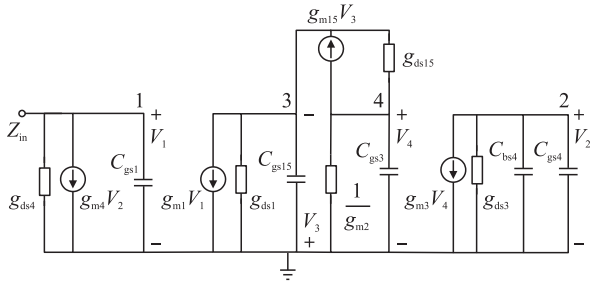


图 2 新型有源电感的小信号等效模型

$$A = \frac{j\omega(C_{gs4} + C_{bs4})(g_{m2} + g_{ds1})g_{m15} + g_{ds3}g_{ds15}(g_{m2} + g_{ds1})}{g_{m1}g_{m3}g_{m4}g_{m15}} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知,新型 AI 可以用图 3 所示的 RLC 等效电路来表示。其中,  $G_p$  为等效并联电导,  $C_p$  为等效并联电容,  $R_s$  为等效串联电阻,  $L$  为等效电感,它们可分别表示为:

$$G_p = g_{ds4} \quad (3)$$

$$C_p = C_{gs1} \quad (4)$$

$$R_s = \frac{g_{ds3}g_{ds15}(g_{m2} + g_{ds1})}{g_{m1}g_{m3}g_{m4}g_{m15}} \quad (5)$$

$$L = \frac{(C_{gs4} + C_{bs4})(g_{m2} + g_{ds1})}{g_{m1}g_{m3}g_{m4}} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,负跨导器  $M_4$  的衬底与栅极的短接配置,使得衬底电容并联到回转器的输出端(节点 2),即在等效电感的公式中引入  $C_{bs4}$  项,因此增大了回转电容值,从而增大等效电感值。

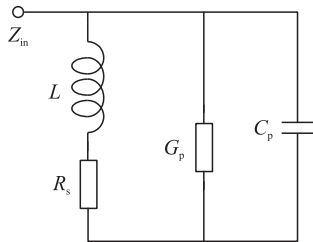


图 3 简化的 RLC 等效电路图

联立式(3)~(6),可以进一步得到有源电感的品质因数  $Q$  值和自谐振频率  $\omega_0$  值:

$$Q = \frac{\text{Im}(Z_{in})}{\text{Re}(Z_{in})} \approx \frac{\omega L}{R_s} = \frac{\omega(C_{gs4} + C_{bs4})(g_{m2} + g_{ds1})g_{m15}}{g_{ds3}g_{ds15}(g_{m2} + g_{ds1})} \quad (7)$$

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC_p}} = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m3}g_{m4}}{(C_{gs4} + C_{bs4})(g_{m2} + g_{ds1})C_{gs1}}} \quad (8)$$

下面结合以上表达式,对新型有源电感能够取得 2 种优秀  $Q$ - $f$  特性的工作机理进行详细的说明。

①在同一频率下,  $Q$  峰值相对于电感值可独立调节的机理。联合等效串联电阻  $R_s$  表达式(5)和  $Q$  值表达式(7)可知,通过调控回转器模块的外部偏

置端电压  $V_{i3}$  可以改变  $M_{15}$  管的跨导值  $g_{m15}$ ,进而改变  $R_s$  的值以实现  $Q$  值的调节。而  $g_{m15}$  的变化不改变  $L$  值,这是因为负跨导器中  $M_1$  和  $M_{15}$  构成共源-共栅形式,其等效跨导值主要由共源-共栅级中  $M_1$  管的跨导值  $g_{m1}$  决定,因而  $L$  值不随  $V_{i3}$  变化而变化。最终,在调节  $Q$  峰值时,电感值能够保持基本不变。

②在不同频率下,  $Q$  峰值保持基本不变的机理。调控直流偏置模块的外部偏置端电压  $V_{i2}$  可以改变  $g_{m1}$ 、 $g_{m2}$ 、 $g_{m3}$  和调节分流支路的外部偏置端电压  $V_{i1}$  可以改变  $g_{m1}$ ,从自谐振频率  $\omega_0$  表达式(8)可知, AI 可以在不同频率下工作。而从  $Q$  值表达式(7)可知,  $Q$  值会随之发生变化,可以通过调节  $V_{i3}$  来改变  $g_{m15}$  而得到补偿,进而保持  $Q$  值基本不变。最终,实现了在不同频率下  $Q$  峰值保持基本不变的特性。

## 1.2 增强电感性能对工作电压波动鲁棒性的机理

为了便于分析,将稳压模块中的感知单元和放大单元进行等效表示,如图 4 所示。其中,  $A$  表示放大单元的小信号增益,  $g_{m7}$ 、 $R_1$  和  $R_2$  分别表示感知单元中  $M_7$  管的跨导值、 $M_8$  和  $M_9$  管的等效电阻值。因工作电压  $V_{DD}$  波动引起的小信号增量用  $\Delta v_{dd}$  ( $\Delta v_{dd} \ll V_{DD}$ ) 表示,直流偏置模块中  $M_6$  管栅极(节点 6)电压  $V_6$  产生的变化量用  $\Delta v_6$  表示。

根据 KCL 方程,在图 4 中节点 5 处:

$$g_{m7} \times (\Delta v_{dd} - \Delta v_6) = \frac{\Delta v_6}{A} \times \frac{1}{R_2} \quad (9)$$

进而,可以得到  $\Delta v_6$  的表达式:

$$\Delta v_6 = \frac{A \times \Delta v_{dd} \times g_{m7} \times R_2}{1 + A \times g_{m7} \times R_2} \quad (10)$$

由于  $R_2 = 1/g_{m9}$ ,在感知单元中  $M_7$  和  $M_9$  管跨导值近似一样(即  $g_{m9} \approx g_{m7}$ )的情况下,式(10)可简化为:

$$\Delta v_6 = \frac{A}{1+A} \times \Delta v_{dd} = \frac{1}{1+\frac{1}{A}} \times \Delta v_{dd} \quad (11)$$

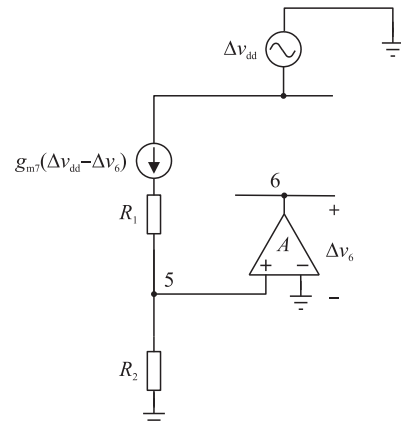


图 4 稳压模块的等效结构图

从上式可以看出,当  $A \gg 1$  时,  $\Delta v_6 \approx \Delta v_{dd}$ 。因此,  $M_6$  管的栅极与源极电压差的变化量为:

$$\Delta v_{gs} = \Delta v_6 - \Delta v_{dd} \approx 0 \quad (12)$$

可以看出,当  $V_{DD}$  增加  $\Delta v_{dd}$  时,  $M_6$  管的栅源电压几乎不变,进而负跨导器的直流偏置几乎保持恒定,最终降低了  $V_{DD}$  波动对 AI 跨导器的影响。因此,实现了电感性能对工作电压波动的强鲁棒性。

## 2 性能验证

基于 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺库,采用射频电路设计工具 Advanced Design System (ADS) 对本文提出的新型有源电感进行性能验证。

图 5 所示是通过调控回转器模块的外部偏置端电压  $V_{i3}$  对  $Q$  值的调节情况,其中,  $V_{i1} = 1.3 \text{ V}$ ,  $V_{i2} = 0.92 \text{ V}$ , 而图 6 所示是在相同偏压下  $L$  值的变化情况。可以看出,在 3.84 GHz 下,可以取得不同的高  $Q$  峰值,且分别为 636、1 558 和 4 032,调节率为 533%,可以大范围调节  $Q$  峰值。而在该频率下,电感值由 15.14 nH 变化为 15.12 nH,变化率仅为 0.13%,几乎不变。结果表明,新型有源电感在同一频率下,  $Q$  峰值相对于  $L$  值可大范围独立调节。

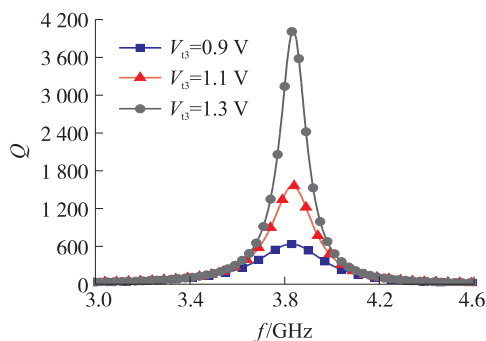


图 5 调节  $V_{i3}$  对  $Q$  值的影响

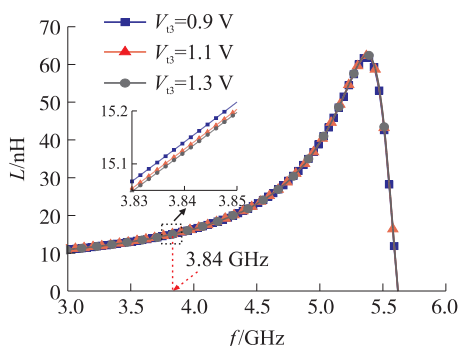


图 6 调节  $V_{i3}$  对  $L$  值和  $\omega_0$  值的影响

图 7 是在三个组合偏压 ( $V_{BIAS1}$ 、 $V_{BIAS2}$ 、 $V_{BIAS3}$ ) 情况下,  $Q$  值的变化情况,其中  $V_{BIAS1}$ 、 $V_{BIAS2}$ 、 $V_{BIAS3}$  与三个外部偏置端电压  $V_{i1}$ 、 $V_{i2}$ 、 $V_{i3}$  之间的关系如表 1 所示。

表 1 三种组合偏置 ( $V_{BIAS1}$ 、 $V_{BIAS2}$ 、 $V_{BIAS3}$ ) 情况

组合偏置	$V_{i1}/\text{V}$	$V_{i2}/\text{V}$	$V_{i3}/\text{V}$
$V_{BIAS1}$	1.30	0.92	1.30
$V_{BIAS2}$	0.84	0.56	1.43
$V_{BIAS3}$	0.81	0.66	1.37

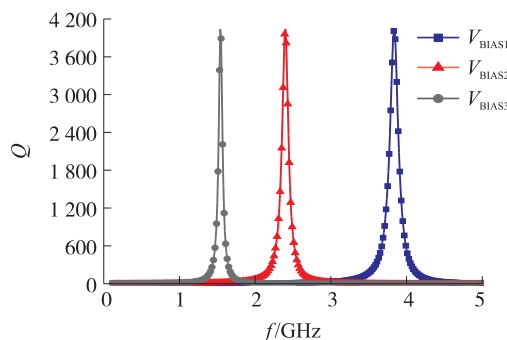


图 7 调节  $V_{i1}$ 、 $V_{i2}$ 、 $V_{i3}$  对  $Q$  值的影响

可以看出,在不同频率 1.54 GHz、2.4 GHz 和 3.84 GHz 下,分别取得 4 043、4 039 和 4 032 的高  $Q$  峰值,变化率仅为 0.2%。结果表明,新型有源电感在不同频率下,  $Q$  峰值能够保持基本不变,实现了人们所期待的理想电感的  $Q$  值不随频率变化的  $Q$ - $f$  特性,这是无源电感做不到的。

为了表征 AI 性能随工作电压  $V_{DD}$  波动的鲁棒性程度,可以利用工作电压敏感度来衡量,其指的是当  $V_{DD}$  波动 1 mV 时,  $L$  值和  $Q$  值的变化量。图 8 和图 9 所示分别是采用与未采用稳压模块时,  $V_{DD}$  波动对  $L$  值和  $Q$  峰值的影响。

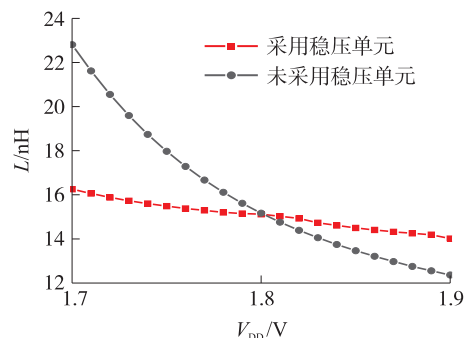


图 8  $V_{DD}$  波动对  $L$  值的影响

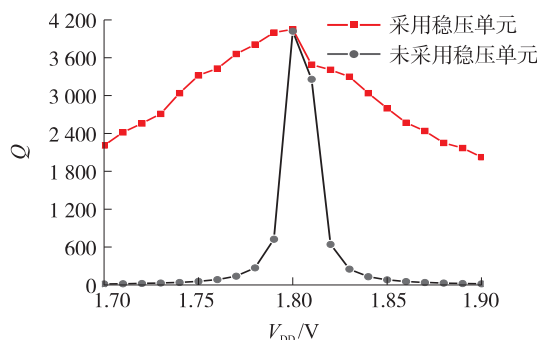


图 9  $V_{DD}$  波动对  $Q$  值的影响

可以看出,  $V_{DD}$  在 1.7 V ~ 1.9 V 之间波动时, 前者的  $L$  值由 16.2 nH 变化为 14.0 nH,  $Q$  峰值由最小值 2 025 变化为最大值 4 032, 所以  $L$  值和  $Q$  峰值的工作电压敏感度分别为 0.011 nH/mV 和 20.0/mV; 而后者  $L$  值和  $Q$  峰值的工作电压敏感度分别为 0.059 nH/mV 和 40.1/mV。相比之下, 稳压模块有效降低了 AI 的工作电压敏感度, 即新型有源电感的性能对工作电压具有更强的鲁棒性。

### 3 结论

本文提出了一种新型的有源电感, 它由回转器模块、直流偏置模块、分流支路和稳压模块构成。通过不同模块的相互配合以及它们的外部端口电压协同调控, 一方面, 增强了电感性能对工作电压波动的鲁棒性, 另一方面, 实现了在同一频率下  $Q$  峰值相对于  $L$  值可大范围独立调节和在不同频率下  $Q$  峰值保持基本不变的 2 种优秀  $Q$ - $f$  特性。基于 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺库进行了性能验证, 结果表明, 电感值和  $Q$  峰值的工作电压敏感度分别为 0.011 nH/mV 和 20.0/mV;  $Q$  峰值在 3.84 GHz 的频率下, 可调范围高达 533%, 而电感值的变化率仅为 0.12%; 在 1.54 GHz、2.4 GHz 和 3.84 GHz 的不同频率下, 取得 4 043、4 039 和 4 032 的高  $Q$  峰值, 且变化率仅为 0.2%。该款有源电感的优异综合性能, 可满足小面积、可重构、高性能的射频集成电路对电感性能的需要。

### 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: 232-236.
- [2] Lim C C, Ramiah H, Yin J, et al. An Inverse-Class-F CMOS Oscillator with Intrinsic-High-Q First Harmonic and Second Harmonic Resonances [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(12): 3528-3539.
- [3] Razavi B. The Active Inductor [A Circuit for All Seasons] [J]. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2020, 12(2): 7-11.
- [4] Mhiri M, Besbes K. Gyrator-C-Based CMOS Active Inductors: Analysis of Performance Optimization Techniques [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2021, 22(8): 65-82.
- [5] Zaiden D M, Grandfield J E, Weller T M, et al. Compact and Wideband MMIC Phase Shifters Using Tunable Active Inductor-Loaded All-Pass Networks [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 66(2): 1047-1057.
- [6] Wang H, Wang H. A Two-Terminal Active Inductor with Minimum Apparent Power for the Auxiliary Circuit [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(2): 1013-1016.
- [7] Yadav P K, Misra P K. Tunable Bandpass Filter Using Double Resistive Feedback Floating Active Inductor for 5 GHz Wireless LAN Applications [J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2021, 108(1): 205-213.
- [8] Yesil A, Yuce E, Minaei S. MOSFET-C-Based Grounded Active Inductors with Electronically Tunable Properties [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, 30(8): 22274-22287.
- [9] Aymen B H, Haddad F, Mhiri M, et al. RF and Microwave Reconfigurable Bandpass Filter Design Using Optimized Active Inductor Circuit [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, 28(9): 21550-21561.
- [10] 张思佳, 张万荣, 谢红云, 等. 一种新型高线性高频有源电感 [J]. *电子器件*, 2021, 44(6): 1309-1313.
- [11] Jang J, Kim H, Lee G, et al. Two-Stage Compact Wideband Flat Gain Low-Noise Amplifier Using High-Frequency Feedforward Active Inductor [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(12): 4803-4811.
- [12] Kumar V, Islam A. Study of Variability Performance of CMOS Active Inductors [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(10): 3101-3111.
- [13] Patel D P, Oza-Rahurkar S. Tunable CMOS Active Inductor Using Widlar Current Source [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2019, 28(2): 1950027.



王晓雪(1995—), 女, 汉族, 河南人, 现为北京工业大学博士研究生, 研究方向为射频集成电路, wangxiaoxue@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。