

带有低噪声单端转差分电路的射频增益可控放大器

何晓丰* 莫太山 马成炎 叶甜春 甘业兵 钱敏

(中国科学院微电子研究所 北京 100029)

摘要: 为了改进传统电路中单端转差分电路的噪声性能, 提高传统射频可变增益放大器的覆盖范围和步进精度, 该文设计了一种带有低噪声单端转差分电路的射频增益可控放大器。该文利用噪声抵消技术降低了噪声系数, 利用电容交叉耦合技术展宽电路带宽, 利用输出源级跟随器的增益可调功能实现更高的步进精度。电路采用 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS 工艺, 1.8 V 供电电源, 在 $170\text{--}870 \text{ MHz}$ 频率信号输入下, 可以实现最低 3.8 dB 的噪声系数, 55 dB 的动态范围, 步进精度 0.8 dB , 消耗 14.76 mW 的功耗, 面积 $800 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ 。测试结果表明在覆盖更宽的频段范围下, 该文设计的射频可变增益放大器在消耗相同功率条件下与传统的单端转差分电路相比可以达到更低的噪声系数, 同时整个可变增益放大器可以提供更高的步进精度。

关键词: 宽带放大器; 增益控制; 噪声系数; 单端转差分

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0976-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00990

RF Programmable Amplifier with Low Noise Single-ended Differential Circuit

He Xiao-feng Mo Tai-shan Ma Cheng-yan Ye Tian-chun Gan Ye-bing Qian Min

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To reduce the noise figure in the tradition low noise amplifier, extend the bandwidth and achieve more precise step accuracy, a RF programmable amplifier with low noise single-ended differential circuit is proposed. The single-ended differential circuit uses the noise cancellation method to reduce the noise figure and uses the capacitance cross technique to extend the bandwidth. The improved source-level follower structure can achieve more precise step accuracy. The circuit is fabricated in $0.18 \mu\text{m}$ CMOS process. Under 1.8 V power supply and $170\text{--}870 \text{ MHz}$ frequency signal input, the circuit achieves a 3.8 dB noise figure. The circuit shows a 55 dB gain control range by 0.8 dB each step. The overall power consumption is less than 14.76 mW , and the die area is $800 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$. The test result shows that the circuit can provide lower noise figure and cover wider bandwidth while consumes the same current comparing with the tradition structure and the circuit can provide more precise step accuracy.

Key words: Broadband amplifier; Gain control; Noise figure; Single-ended differential switch

1 引言

在中国, 欧洲以及世界其他地方, 数字电视广播(DTV)都能提供高品质的视频广播服务及其他多媒体服务。但是不同的国家有不同的移动电视的标准^[1-3], 例如, 中国移动多媒体广播(CMMB), 韩国数字多媒体广播(DMB), 日本综合业务数字广播(ISDB-T)和欧洲数字视频广播(DVB-H), 不同的标准其所覆盖的频率不同, 为了达到覆盖最广阔的商业环境的目的, 同时满足降低系统成本的目的, 设计一种兼容 UV 波段的低成本射频接收芯片是最好的选择。

由于覆盖频段范围较宽, 在信号的接收过程中, 干扰信号容易进入射频前端系统, 这些干扰信号的信号强度大多大于有用信号的信号强度, 最大的干扰信号甚至可以比有用信号高 40 dB , 干扰信号既有来自有用波段之外的信号, 也有来自于有用波段之内的信号。在有用波段之外的信号可以通过射频前端的 SAW 滤波器滤除, 有用波段之内的信号就无法滤除了。传统的方式是采用信道选择滤波器^[4], 将信道选择滤波器的中心频率对准当前接收的信号的信道, 滤除其他信道的信号, 采用这种方式实现需要一个复杂的信道选择滤波器, 尤其是对于移动数字电视这种多信道的通信系统, 滤波器的设计就更为复杂。一种新的方法是采用射频自动增益控制器^[5], 当射频输入受到强信号干扰时, 自动降低前端系统的增益, 防止信号链路饱和, 下变频

2011-09-21 收到, 2011-12-27 改回

核高基重大专项 (2009ZX01031-002-008)资助课题

*通信作者: 何晓丰 hexiaofeng@casic.ac.cn

后通过中频滤波器将干扰信号滤除，达到抑制干扰同时不会减少有用信号信噪比的方案，采用这种方案实现需要射频前端提供高达 50 dB 的动态范围。

传统的射频接收机系统在射频前端一般采用单端低噪声放大器来降低系统的噪声系数，第 2 级采用差分低噪声放大器，这就需要片外另加一个单端转差分的巴伦电路来实现单端转差分的功能。为了减少系统的外部元件和系统功耗，可以采用一个片内的单端转差分电路来实现单端转差分功能，同时要求此电路能够实现增益可调功能。

本文提出了一种带低噪声单端转差分电路的射频增益可控放大器。此电路可以提供最低 3.8 dB 的噪声系数，最大增益下提供-12 dBm 的三阶交调点，55 dB 的动态范围，步进精度 0.8 dB，消耗 14.76 mW 的功耗，本文第 2 节介绍系统的整体结构，第 3 节介绍各个子电路设计，第 4 节介绍实验结果，最后总结全文。

2 系统结构

为了满足有强干扰信号输入条件下，射频信号链路不会被干扰信号所饱和而产生额外的三阶项，要求数字增益可配置的射频放大器能够提供很好的线性度。由于射频输入的带宽覆盖范围超过 600 MHz，要求数字增益控制射频放大器能满足宽带要求。图 1 给出了数字增益可配置的射频宽带放大器的整体结构框图，它的电路构成包括增益可配置的单端转差分电路，增益可配置宽带放大电路和增益可配置的缓冲驱动电路。增益可配置的单端转差分电路的输入端接入射频前端单端低噪声放大器(LNA)输出的射频信号，它提供一个单端转差分的功能同时降低噪声系数，它的输出端连接增益可配置宽带放大电路的输入端，增益可配置的宽带放大器将输入信号进一步放大，最后通过增益可配置的

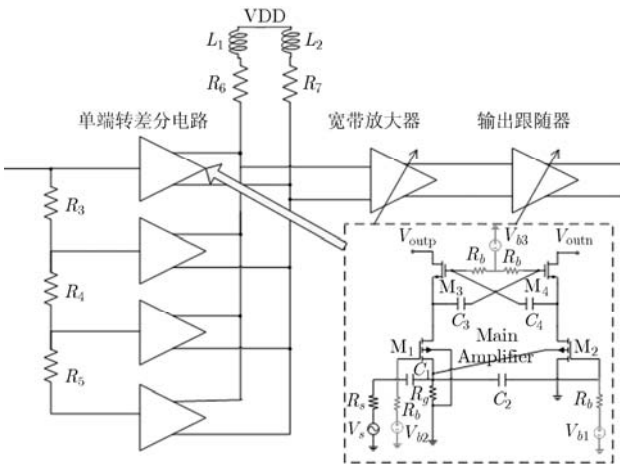


图 1 数字增益可配置的射频宽带放大器整体结构框图

缓冲驱动电路驱动后级的混频器电路。

第 1 级的单端转差分电路可以提供 42 dB 的动态范围，每档的步进精度为 14 dB。第 2 级的宽带放大器电路分为两个部分，其中电路粗调部分能够实现 12 dB 的动态范围，步进精度为 4 dB，细调部分能够实现 4.5 dB 的动态范围，步进精度为 1.5 dB。第 3 级的缓冲电路能够提供 1.6 dB 的动态范围，步进精度为 0.8 dB。为了保证在步进过程中不会出现不能覆盖的部分，实现整个增益调节范围的无缝连接，采用可调增益的后级的动态范围略大于前级的最小步进精度的调节方案来实现。数字控制增益可配置的射频宽带放大器的增益调整范围，即增益控制的最大动态范围为(精调步距 a)+(细调步距 b +细调步距 c)+粗调步距 $d=(0.8a)+(1.5b+4c)+14d$ dB, a, b, c, d 为设计值。理论上总的增益动态范围 60 dB，由于增益步进中的覆盖调整的作用，总的增益动态范围可达 50 dB，步进精度 0.8 dB。

3 模块电路设计

3.1 增益可配置单端转差分电路设计

巴伦型低噪声放大器由于其可以替代片外的单端转差分低噪声放大器越来越受到重视^[6]，其利用共栅结构获得宽带匹配，利用共源和共栅结构获得差分输出，同时将共栅管的噪声抵消以获得更低的噪声系数^[7]。传统的共栅结构如图 2(a)所示，为了抵消噪声需要满足以下关系：

$$R_1 g_{m1} = R_2 g_{m2} \quad (1)$$

但是，抵消共栅管产生的噪声之后，共源管的噪声成为电路中主要的噪声来源。一种有效降低共源管的噪声的方式是利用不平衡的共源和共栅管尺寸。这种方法实际是在保证满足共栅管噪声抵消要求的条件下，提高共源管的跨导，来降低共源管产生的噪声，不过在实际电路中，两个输入管的尺寸比例

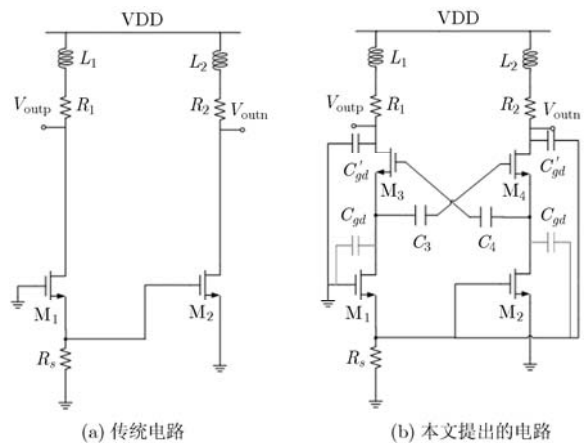


图 2 比较传统电路和本文提出的单端转差分电路结构框图

不能超过 2，不然有限的压降容易使得共源管进入线性区工作，同时电路两端输出信号的不平衡性也会难以满足设计要求。本文提出了一种利用跨导增强技术来提高跨导的方法，在不增加功耗和电路平衡性的前提下，进一步降低电路噪声系数。本文提出的结构如图 1 右下角虚线框所示，将共栅管衬底反接到共源管的源极上，同时将共源管的衬底接入到共栅管的衬底上，这种电路的小信号模型如图 3 所示，经推导可以得到电路的输出电压

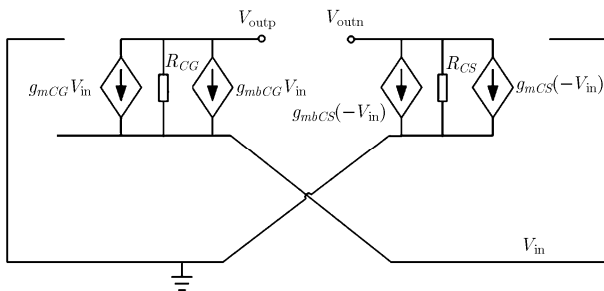


图 3 跨导增强技术的小信号框图

$$V_{out} = (-V_{in})(g_{mb1} + g_{m1})R_1 + (-V_{in})(g_{mb2} + g_{m2})R_2 \quad (2)$$
从式(2)可以看出，电路的跨导提高了，实际电路中利用这种跨导提高技术，可以将跨导提高到原来的 1.2 倍。同时共栅管的噪声抵消的条件变为

$$(g_{mb2} + g_{m2})R_2 = (g_{mb1} + g_{m1})R_1 \quad (3)$$

由于满足 $g_{mb} = \eta g_m$ ，所以共栅管的抵消条件仍然能够满足。同时这种跨导提高的技术还提高了电路增益，降低了等效负载电阻到输入端的噪声。

为了达到宽带要求，本文提出了一种利用电容交叉耦合的方式，展宽带宽，但不引入额外的噪声。单端转差分电路的主极点由两个输入管的 C_{gd} 产生的米勒等效电容和负载共同作用。引入电容交叉耦合结构如图 2(b) 所示，就可以消除电路的米勒效应，展宽带宽，同时由于引入的交叉管的噪声在输入端被抵消而不会引入额外的噪声，实际电路中可以将原电路带宽提高到 1.2 倍。图 4 给出了传统电路和利用上述两种技术后的电路在噪声系数和增益方面的比较。

增益可配置的实现是利用 3 个电阻衰减电路和 4 个相同的单端转差分放大器实现，用于覆盖 42 dB 的动态范围和提供 14 dB 每档的步进精度，增益可配置是通过设定 R_3, R_4, R_5 这 3 个电阻值来得到不同的衰减值实现的。每级的单端转差分的放大器电路结构如图 2(b) 所示。

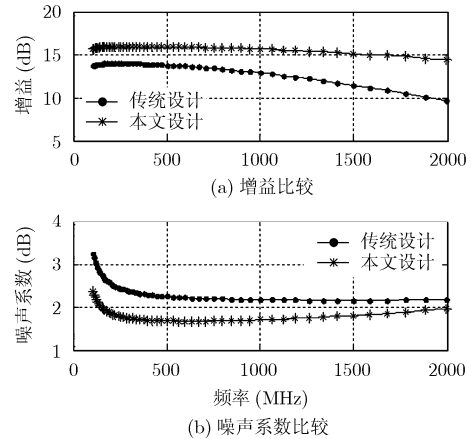


图 4 传统结构和本文提出结构在增益和噪声系数上的比较

3.2 宽带放大器电路设计

第 2 级宽带放大电路除了需要提供大带宽外还需要提供高的线性度，传统的提高电路线性度的方法主要是采用负反馈^[8]，但是这会增加额外的功耗，尤其是对射频电路而言需要满足大带宽的条件下，功耗的增加更是十分的巨大。本文通过在原有的差分管基础上增加两个伪差分的输入管(图 5)，利用处于亚阈值区的伪差分管的跨导二次导数特性抵消处于饱和区工作的差分管的跨导二次导数特性来提高线性工作范围的。而增益控制则是通过分别控制全差分放大电路的尾电流和伪差分电路的偏置电压实现的。

全差分电路的输入管的跨导的二次导数偏离零点是导致三次谐波增加的主要原因。全差分电路输入管的跨导的二次导数偏离零点的方向总是负电压方向，而伪差分电路输入管的跨导的二次导数偏离零点的方向随流过输入管的电流大小改变，电流大时是负电压方向，而电流小时是正电压方向，通过这种特性可以利用处于亚阈值区的伪差分对的输入管的跨导的二次导数偏向正电压抵消全差分电路的输入管的跨导的二次导数偏向负电压，从而提高整体电路的线性度。由于伪差分对偏置于亚阈值，采

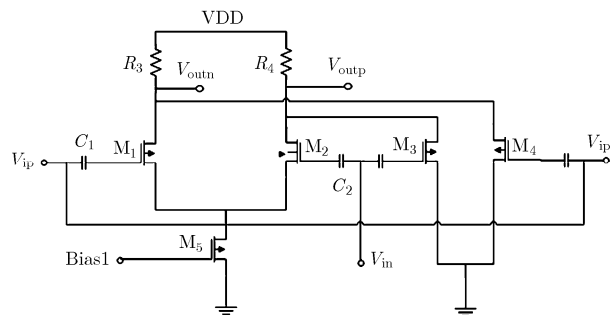


图 5 线性度改进宽带放大器电路结构框图

用这种方法进行的线性化补偿不需要提供过多的额外电流，节约了功耗，同时也不会改变电路原有的噪声系数。

3.3 输出源级跟随器设计

作为数字控制增益可配置的射频宽带放大器的输出级，应该能够提供小的输出阻抗来驱动下级电路，同时还需要有很高的线性度^[9]和带宽。为了满足上述要求，源级跟随器是比较好的可以选择的结构，源级跟随器有低的输出阻抗，同时相比其他结构，在消耗相同电流的情况下能提供更好的线性度。为了实现增益可调的目的，本文采用了一种通过改变输入管对来改变电路增益的方法来提供 1.6 dB 的增益范围，步进精度 0.8 dB。

图 6 给出了具体的电路实现结构，输入级由 M_1, M_2, M_3, M_4 共同构成， M_5 管为尾电流管提供输入管所需的偏置电流，Bias2 为输入管的偏置电压， C_1 为隔直电容， R_1, R_2, R_3, R_4 为偏置电阻， M_2, M_3, M_4 通过开关 SW_1, SW_2, SW_3 选择接入电路。为了实现 0.8 dB 的精确步进，采用的是通过晶体管的的比例决定增益的方法。当输入管 M_2 接入电路时电路的增益可以通过式(4)得到。

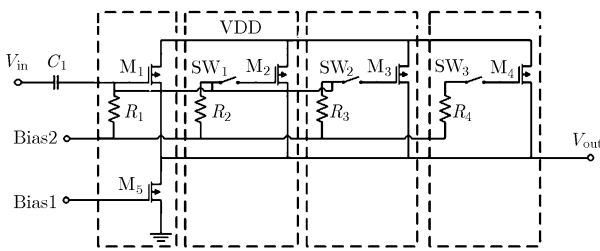


图 6 输出增益可配置的源级跟随器结构框图

$$A_V = \left. \begin{aligned} & \frac{(1/g_{m2})//R_L}{(1/g_{m2})//R_L + 1/g_{m1}} \approx \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{m2}} \\ & = \frac{kW_1 - kW_2}{kW_1 + kW_2} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} = \frac{\Delta W}{W_1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta W}{W_1} \approx \lg \left(\frac{\Delta W}{W_1} \right), \quad W_1 \gg \Delta W$$

其中//为电阻并联符号， g_{m1}, g_{m2} 为输入管 M_1 和 M_2 的跨导， R_L 是 M_1 和 M_2 管的漏极电阻的并联， W_1 和 W_2 分别为输入管 M_1 和 M_2 的宽。通过式(4)可以看出，增益的改变可以通过改变输入管的宽度的差值来实现，即要实现精确的指数线性的精度，可以改变每次接入管与 M_1 管的宽度的差值来实现。

4 测试结果

本文电路采用 0.18 μm CMOS 工艺进行流片，图 7 是部分射频芯片照片，其中框出了本文设计的

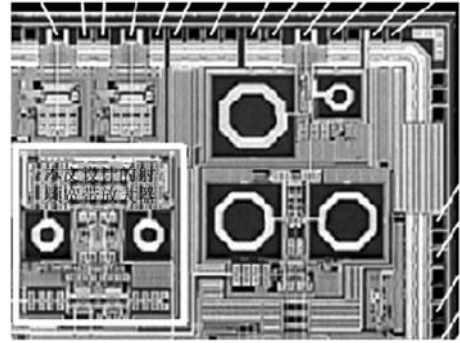


图 7 芯片概貌图

增益可配置的射频宽带放大器电路的概貌图。总电流为 8.2 mA，供电电源为 1.8 V，故整个增益可配置的射频宽带放大器电路功耗为 14.76 mW。

4.1 S 参数测试

通过网络分析仪匹配后的 S 参数如图 8 所示，其中显示了增益配置为最大情况下的输入匹配，从图中可以看出输入匹配 S_{11} 在 170 MHz 到 870 MHz 都能够达到 -10 dB 以下。图 8 所示 S_{21} 增益最大可以达到 30 dB，3 dB 带宽满足覆盖要求，同时输出 S_{22} 在覆盖带宽范围内基本在 -10 dB 以下。

4.2 噪声系数测试

图 9 给出了增益配置于最大条件下噪声系数的测试结果，以及其与仿真的比较结果。从图中可以看到相比于仿真，测试出的噪声系数明显增大，分析板上噪声和数字干扰导致最终的结果与仿真的有一定的差距，测试的噪声系数在低频达到最优大约为 4.2 dB，全波段低于 5.6 dB。

4.3 三阶交调测试

图 10 给出了采用双音法测试输入频率为 533 MHz，配置于最大增益下的电路的输入三阶交调点 (IIP3) 的测试结果，从图中可以看到在最大增益下，增益与三阶交调项的线性近似交点对应在输入为 -12 dBm，即电路的 IIP3 可以达到 -12 dBm。

4.4 动态范围、三阶交调变化

图 11 给出了输入频率为 533 MHz，电路的增益和输入 IIP3 随数字控制信号变化的结果，从图中可以看到随着数字控制变化增益从 30 dB 减小到 -25 dB，增益动态范围为 55 dB，步进精度为 0.8 dB，输入 IIP3 从 -12 dBm 增加到 24 dBm。

表 1 给出了本文设计的数字可配置的射频宽带放大器与文献中的比较结果，从表中可以看出，本设计在噪声系数和动态范围上相比其他几种稍有优势，同时在满足相同带宽条件下，可以提供比较高的噪声系数。

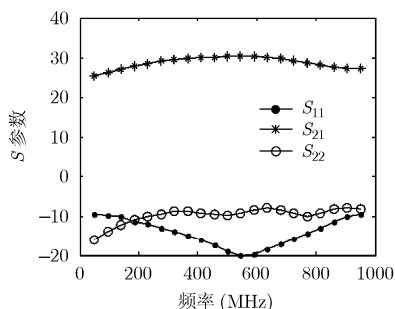


图8 可变增益放大器的S参数测试结果

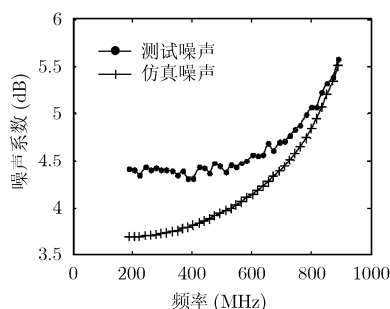


图9 测试的噪声系数与仿真的噪声系数比较

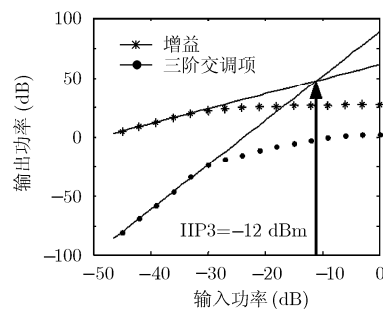


图10 最大增益下输入IIP3测试

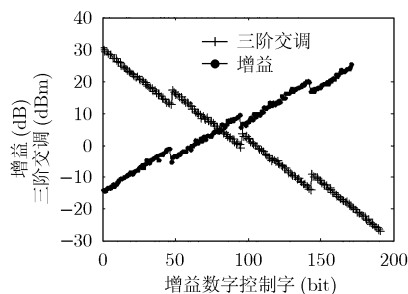


图11 测试增益和输入IIP3随数字控制变化

表1 可配置的射频宽带放大器性能比较

文献	文献[11]	文献[10]	文献[12]	本文
工艺(μm)	SIGE	CMOS	CMOS	CMOS
	0.25	0.13	0.18	0.18
动态范围(dB)	31/0.8	60/6	33/6	55/0.8
带宽(MHz)	473-767	470-870	50-860	170-870
增益(dB)	19	16	15	30
噪声系数(dB)	4.3	2.7	4.2	4.2
IIP3(dBm)	-1.5	-14	2.6	-12
功耗(mW)	22	25	10	14.76

5 结论

本文提出了一种带有低噪声单端转差分电路的射频增益可控放大器,集成单端转差分电路减少片外原件,利用输出级跟随器的增益可调功能实现更高的步进精度。本文不但改进单端转差分电路的噪声,同时还利用电容交叉耦合技术展宽电路带宽。电路采用 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS工艺,1.8 V供电电源,在170-870 MHz频率信号输入下,可以实现最低3.8 dB的噪声系数,最大增益下提供-12 dBm的三阶交调点,55 dB的动态范围,步进精度0.8 dB,消耗14.76 mW的功耗。

参考文献

- [1] Wang Chua-chin, *et al.* Wideband 70 dB CMOS digital variable gain amplifier design for DVB-T receiver's AGC. IEEE International Symposium in Circuits and Systems, Kobe, Japan, 2005: 356-359.
- [2] Kang Sanghoon, *et al.* A triband 65 nm CMOS tuner for ATSC mobile DTV SoC. IEEE Radio Frequency Integrated

Circuits Symposium, Anaheim, USA, 2010: 185-188.

- [3] Xiao Jang-hong, *et al.* A high dynamic range CMOS variable gain amplifier for mobile DTV tuner. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, 42(2): 292-301.
- [4] Behbahani F, *et al.* A wideband tunable CMOS channel-select filter for a low-IF wireless receiver. Proceedings of the IEEE in Custom Integrated Circuits, San Diego, 1999: 501-504.
- [5] Kim H, *et al.* A dual-band digital TV tuner for CMMB application SoC. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Baltimore, 2011: 1-4.
- [6] Donggu I, *et al.* A CMOS active feedback Balun-LNA with high IIP2 for wideband digital TV receivers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(12): 3566-3579.
- [7] Mirzalou R, Nabavi A, and Darvish G. A highly linear LNA with noise cancellation for 5.8-10.6 GHz UWB receivers. Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran Iran, 2011: 17-19.
- [8] Byoungjoong K, *et al.* Design and analysis of a cascode bipolar low-noise amplifier with capacitive shunt feedback under power-constraint. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(6): 1539-1551.
- [9] Umoh I and Ogunfunmi T. Digital post-linearization of a wideband low noise amplifier for ultra-wideband wireless receivers. IEEE International Symposium in Circuits and Systems, San Francisco, USA, 2011: 1275-1278.
- [10] Kefeng H, *et al.* A wideband CMOS variable gain low noise amplifier based on single-to-differential stage for TV tuner applications. IEEE Asian in Solid-State Circuits Conference, Fukuoka, Japan, 2008: 457-460.
- [11] Manstretta D. A broadband low-noise single-ended input differential output amplifier with IM2 cancelling. IEEE in Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, Atlanta, Georgia, 2008: 79-82.
- [12] Hwang Myung-woon, *et al.* A multi-mode multi-band CMOS direct-conversion mobile-TV tuner for DVB-H/T and T-DMB/DAB applications. IEEE Symposium in VLSI Circuits, Hawaii Honolulu, 2008: 94-95.

何晓丰: 男, 1985年生, 硕博连读生, 研究方向为射频模拟集成电路的设计与测试。

叶甜春: 男, 1965年生, 中国科学院微电子研究所所长, 研究员, 博士生导师, 研究方向为集成电路设计与应用、纳米加工与制造技术、新型器件。