

增益自适应高频低噪声放大器的单片集成设计研究

孙宇, 陈华君, 吴孙桃, 郭东辉

(厦门大学 福建 厦门 361005)

摘要: 高频低噪声放大器(LNA)是无线通讯设备关键器件之一。由于无线通讯设备特别是移动通讯设备使用环境的条件限制,往往需要LNA器件具有自适应增益功能,以保证接收信号的稳定性。拟设计一款具有自适应增益控制的高频LNA单片集成电路,以TSMC 0.18 μm的RF-CMOS器件模型和工艺参数,给出一个增益范围在0~17 dB、噪声抑制比为0.2 dB,适用于DCS1800手机中的1.8 GHz增益自适应CMOS放大器电路。

关键词: 射频集成电路; 低噪声放大器; 增益自适应; CMOS

中图分类号: TN722.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2008)11-056-04

Research on the Monolithic Circuit Design of High-frequency LNA with AGC

SUN Yu, CHEN Huajun, WU Suntao, GUO Donghui

(Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

Abstract: High-frequency Low-Noise Amplifier (LNA) is one of the key devices about wireless communication equipment. As wireless communication equipment in particular the use of mobile communication equipment environmental conditions, often require LNA having the function of gain adaptive, in order to ensure the stability of signal reception. This paper is intended to design a high-frequency adaptive gain control of LNA monolithic integrated circuits. This paper used TSMC 0.18 μm RF-CMOS device model and gain adaptive CMOS amplifier circuit are given with process parameters in a gain of 0~17 dB, the noise suppression than 0.2 dB, applying to the DCS1800 phones.

Keywords: RF-IC; low noise amplifier; adaptive gain control; CMOS

1 引言

作为无线通讯系统中的关键器件模块,低噪声放大器(LNA)是把从天线接收来的信号进行低噪声放大的电路模块。由于从天线接收来的信号强度变化大,噪声干扰大,所以低噪声放大器电路往往需要具有增益自适应变化控制功能,且保持有噪声抑制功能。对此,许多射频LNA的设计采用双模设计的模式,即当输入信号较小时,调高LNA的增益,而当输入信号较大时,则适当调低LNA的增益,以满足后续电路的高线性度处理要求^[1]。但这种双模式LNA电路设计的增益变化并非连续可调,不能保证足够的线性度要求,因此增益连续可调的LNA电路设计已成为近年来的研究热点^[2-4]。

目前增益连续可调的LNA电路设计一般是采用外加控制电路来实现输入偏置的调整,以达到LNA增益的自适应变化控制的目的,但它往往不能保证低噪声的性能。本文则采用设计了一款自适应反馈输出阻抗控制的LNA电路,其独立于混频器等后续电路,可连续控制增益自适应,不影响原有LNA的低噪声系数的最佳性能。优化设

计出一款最大增益为17 dB、噪声抑制比为0.2 dB的适用于DCS1800手机中的增益自适应LAN芯片电路。

2 增益自适应LAN电路原理

射频系统前端使用的低噪声放大器一般可以采用MOS器件源极串联电感反馈匹配共源电路来设计^[5-8]。它是利用源筒并电感来实现输入阻抗匹配,可得到较好信号放大和噪声抑制功能。图1是该低噪声放大器的基本电路原理图。

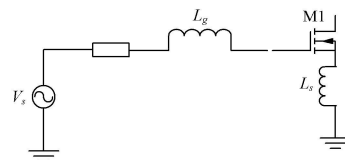


图1 源筒并电感型共源低噪声放大器

其中, V_s 是射频信号源, R_s 是信号源内阻, L_s 是源筒并电感, L_g 是栅极电感。为了保证MOS管M1构成电路达到输入匹配的要求, L_s 和 L_g 的取值^[5,8]可分别设计为:

$$L_s = \frac{R_s}{\omega_T} \quad (1)$$

$$L_g = \frac{1}{\omega_T^2 C_{gs}} - L_s \quad (2)$$

其中, ω_0 是工作频率, C_{gs} 是 MOS 管 M1 的栅源寄生电容, ω_p 是 MOS 管 M1 的特征频率, 可表示^[9]为 $\omega_p = \frac{3\mu(V_{gs} - V_t)}{2L^2}$, 式中 L 是 MOS 管 M1 的栅长, μ 是迁移率, V_{gs} , V_t 分别是 MOS 管 M1 的栅源电压和阈值电压。为了保证低功耗, LNA 最佳噪声性能 MOS 管 M1 栅宽可设计为^[6]:

$$W_{opt} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_p C_{ox} R_s Q_{s,opt}} \triangleq \frac{1}{3\omega_p L C_{ox} R_s} \quad (3)$$

其中, $Q_{s,opt}$ 是最优输入匹配回路品质因数, C_{ox} 是单位面积栅电容。该 LAN 的电路增益可以表示^[10]为:

$$A_v = \frac{3\mu(V_{gs} - V_t)}{4\omega_0 R_s L^2} Z_{out} \quad (4)$$

因此, 通常情况下自适应增益放大器是通过调整 V_{gs} 来实现的。

但是, V_{gs} 的调整通常是通过输入直流偏置来实现的, 不可避免会影响已优化低噪声的输入匹配设计, 为此, 我们设计如图 2 的自适应增益低噪声放大器电路结构, 它是通过调整可变输出阻抗 Z_{out} 来实现 A_v 的自适应控制的。即当天线接收到的信号 RF_{in} 减弱时, 经前置放大后的输出信号电平 V_{out} 减弱, 二极管峰值包络检波器提取电平 V_{av} 及经低通滤波后得到电平 V_1 均减弱的, 这样通过与基准电平 V_{ref} 比较放大来控制可变输出阻抗 M_o , 也就使输出阻抗 Z_{out} 增大达到自适应增益 LNA 的增益 A_v 增大的目的。

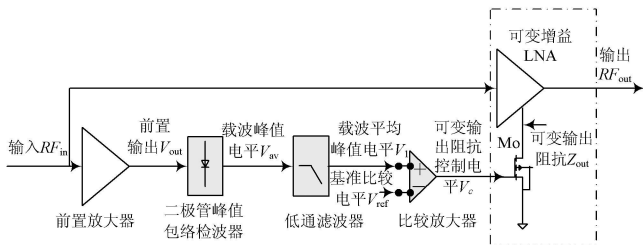


图 2 自适应增益 LAN 的电路原理框图

显然, 图 2 所给的自适应增益电路可能存在不稳定问题, 为了分析该电路的稳定性, 可以把该电路看成双端输

入输出网络, 即可采用微波理论 S 参数进行分析。要保证该自适应电路的稳定性, 其电路参数须满足按下面不等式^[11], 即:

稳定因子:

$$K = \left| \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11}| * S_{22} - S_{21} * S_{12}|^2}{2|S_{21}S_{12}|} \right| > 1 \quad (5)$$

且中间因子:

$$\Delta = |S_{11}| * S_{22} - S_{21} * S_{12}| < 1 \quad (6)$$

其中, S_{11} 为反映输入端阻抗匹配的输入端反射系数, S_{21} 为反映反向隔离性能的从输出端传输到输入端反向增益 S_{12} (亦称反向传输系数), S_{21} 为正向增益, S_{22} 反映输出端阻抗匹配的输出端反射系数 S_{22} 。

3 CMOS 集成电路设计

要设计单片集成的图 2 自适应增益 LAN 电路, 可以采用标准 CMOS 工艺器件来设计。考虑到 MOS 器件在集成电路中的其他因素如温度变化、衬底噪声等共模参数的影响, 该电路中的各放大电路均采用差分输入放大电路来实现。而差分 LNA 的差模交流小信号输入相当于差分放大器电路的其中一端接地^[8, 12, 13], 因此, 差分 LNA 电路的主要参数 L_s, L_g, W_{opt} 设置方法与单端 LNA 电路设计类似。

如图 3 所示, 我们给出可单片集成的自适应增益 LNA 电路, 其中 M_{s1}, M_{s2} 是共源级主放大管, 共栅管 M_{g1}, M_{g2} 用以减少 M_{s1}, M_{s2} 的米勒电容的影响。 M_{s1}, M_{s2} 的源极反馈电感 L_{s1}, L_{s2} 与栅极电感 L_{g1}, L_{g2} 共同组成了输入匹配网络, $C_{out1}, C_{out2}, L_{out1}, L_{out2}$ 构成输出网络, 两者均谐振于工作频率。 M_{11}, M_{12} 为偏置管, 它们与 $R_6, R_7, R_8, R_9, C_5, C_6$ 构成偏置电路。该偏置电路对由电流增益及热漂移引起的电流变化都构成稳定的负反馈^[15]。经前置放大后的输入载波信号能被隔直峰值检测电路检测, 检测出的反映载波信号平均峰值电平的 V_1 经比较放大器与基准比较电平 V_{ref} 相比较放大, 产生可变输出阻抗控制电平 V_c 来调节可变输出阻抗 Z_{out} , 达到增益自适应的目的。

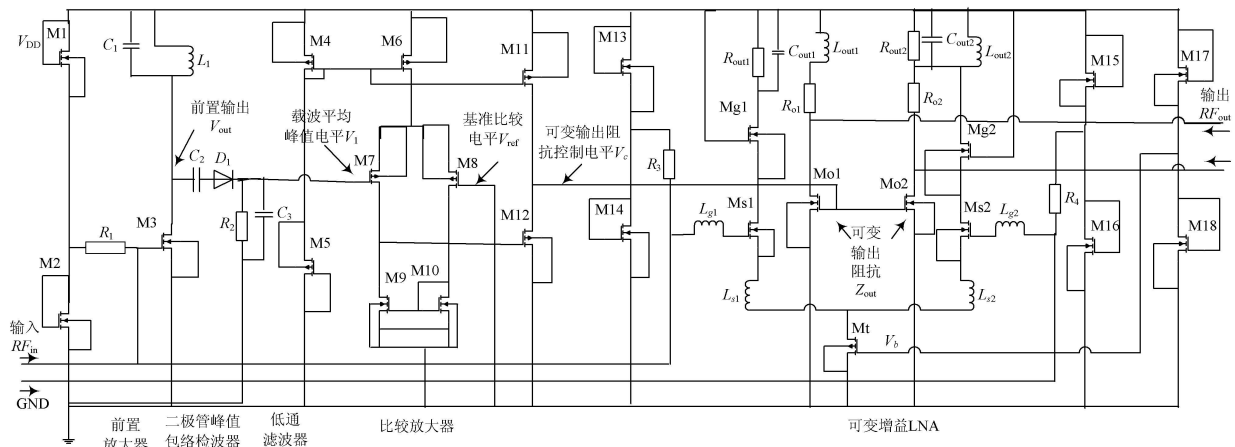


图 3 自适应增益单片 CMOS 集成 LNA 电路图

针对于 DCS1800 双频段手机^[6]用的自适应增益 LNA 电路设计,要求电路性能满足:噪声系数为 1.5~2.5 dB,最大增益为 15~20 dB,功耗电流小于 8 mA,带宽为 75 MHz(1 805~1 880 MHz)。采用 TSMC-0.18 μm CMOS 工艺的 RF-CMOS 器件模型,所设计电路的各器件参数如表 1 所示。

表 1 电路图中各电子器件参数

MOS 管			
N 型 MOS 管	宽长比 W/L / $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	P 型 MOS 管	宽长比 W/L / $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
M1, M13, M15	0.54/0.18	M4	180/0.18
M2, M14, M16	4.5/0.18	M5	18/0.18
M3	800/0.18	M6	180/0.18
M9, M10	10.8/0.18	M7	1.08/0.18
M12	2.7/0.18	M8	1.08/0.18
M17	0.54/0.18	M11	2.7/0.18
M18	18/0.18		
Mg1, Mg2	500/0.18		
Ms1, Ms2	500/0.18		
Mt	1000/0.18		
Mo1, Mo2	180/0.18		
电容		电感	
C_1	29 pF	L_1	255 pF
C_2	10 pF	L_{out1}, L_{out2}	255 pF
C_3	100 fF	L_{g1}, L_{g2}	11.5 nH
C_{out1}, C_{out2}	29 pF	L_{s1}, L_{s2}	280 pF
电阻			
R_1	10 k Ω	R_2	5 M Ω
R_3	10 k Ω	R_4	10 k Ω
R_{o1}, R_{o2}	50 Ω	R_{out1}, R_{out2}	1 k Ω

表 1 中所列器件,对于 MOS 管选用 TSMC 0.18 μm RF-CMOS PDK 中的 rfnmos2v, rfpmos2v 做参数化单元版图,并设置单元版图具有保护环、虚拟哑多晶硅单元、N 型深阱等特殊版图工艺,同时使其满足参数化版图的所谓“硬约束”选项,增加了版图面积,但避免了各种非理想因素的干扰。其中,尺寸最大的 1 000 μm 的 MOS 管版图面积为 62.36 $\mu\text{m} \times 50.31 \mu\text{m}$ 。对于电容选用 TSMC-0.18 μm RF-CMOS PDK 中的专门为 RF 电容器件定制的 mimcap_shield 做参数化单元版图,电路图中数值最大的 29 pf 电容的版图面积为 245.15 $\mu\text{m} \times 196.11 \mu\text{m}$ 。对于电感选用标准片上电感 ind_std 做参数化单元版图,11.5 nH 的电感版图约为 383.36 $\mu\text{m} \times 376.54 \mu\text{m}$ 。对于电阻选用精度最高的多晶硅电阻,5 M Ω 的大电阻选用高

电阻率的 rphripoly_rf 做参数化单元版图时面积约为 20.19 $\mu\text{m} \times 8.22 \mu\text{m}$ 。最终,此芯片电路可在 2 mm \times 2 mm 的版图面积内完成版图设计。

4 仿真结果分析

为了验证电路设计的性能参数,采用 ADS 电路仿真软件^[7]进行仿真。仿真时调用了 TSMC 0.18 μm CMOS RF BSIM3 tt 模型,所得的仿真结果如下:

(1) 输入阻抗匹配性能:在 1.8 GHz 工作频率下,如图 4 所示,反射系数 $S_{11} = -49$ dB,说明输入阻抗回路的匹配性能良好。

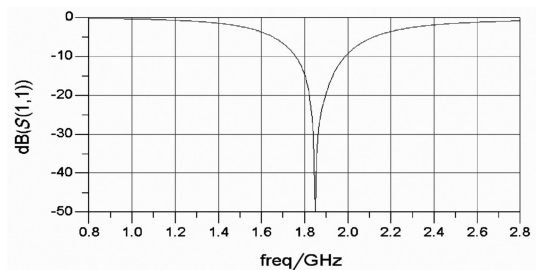


图 4 当 $L_s = 280$ pF, $L_g = 11.5$ nH 时
输入阻抗匹配的仿真结果

(2) 增益、反向隔离性能:在 1.8 GHz 工作频率时,如图 5,图 6 所示,电路增益 $S_{21} = 17$ dB,反向传输系数 $S_{12} = -45$ dB,说明该电路有较好的隔离输入与输出的功能,满足 DCS1800 的设计要求。

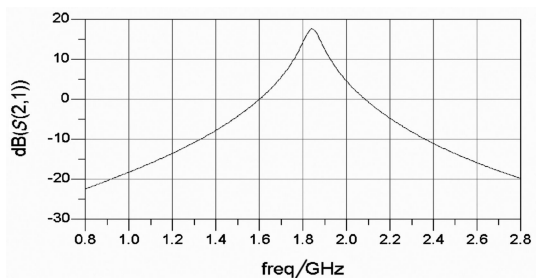


图 5 增益 S_{21} 随频率的变化关系

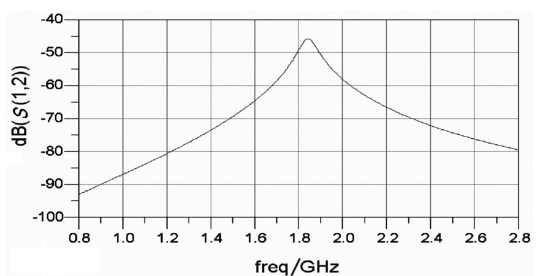


图 6 反向传输系数 S_{12} 随频率的变化关系

(3) 电路稳定性:图 7,图 8 是 LNA 的稳定因子 K 、中间因子 Δ 随频率变化的关系。根据微波理论,当稳定因子 $K > 1$ 且中间因子 $\Delta < 1$ 时 LNA 处于绝对稳定状态。

图 7 中, K 始终大于 1, Δ 始终小于 1,这说明 LNA 在所设计的频域内始终稳定。

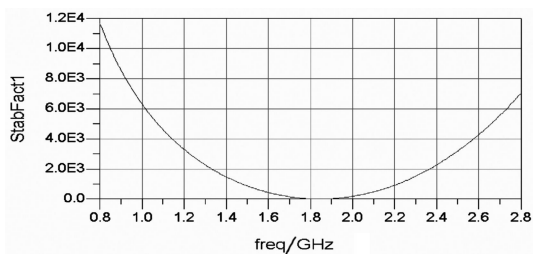


图 7 稳定因子 K 随频率的变化关系

(4) 噪声系数 NF : 在 1.8 GHz 工作频率时, 如图 9 所示, 噪声系数为 0.2 dB, 达到 DCS1800 所需的设计指标要求。

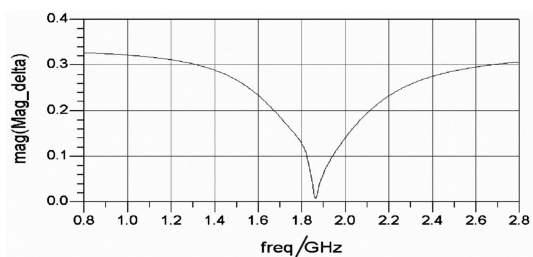


图 8 中间因子 Δ 随频率的变化关系

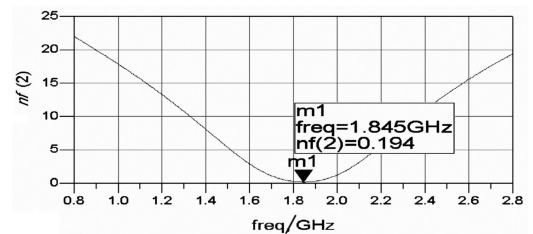


图 9 1.8 GHz 时 LNA 的噪声系数 $NF=0.2$ dB

(5) 带宽范围: 如图 10 所示, 从 1 805~ 1 880 MHz, 约为 75 MHz(图标 m1, m3 所指为 -3 dB 带宽频率点, 图标 m2 所指为中心频率点), 符合设计指标要求, 有较好的抑制带外信号的功能。

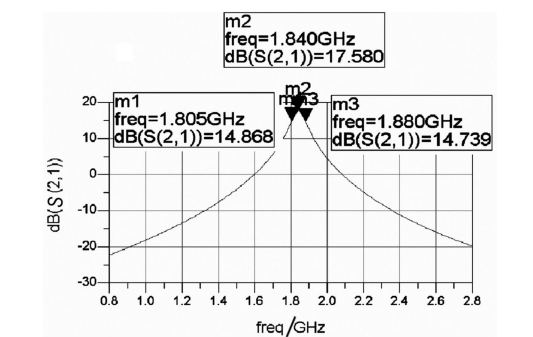


图 10 LNA 带宽

(6) 功耗电流: 在工作电压 1.8 V 下, 功耗电流为 7.84 mA, 满足设计指标要求。

(7) 增益控制变化范围: 从 0~ 17 dB, 具有设计所要求的 AGC 控制功能。当输入信号强度为 -30 dBm 时, 增益为 17 dB(图标 m1 所示), 如图 11 所示。当输入信号强度大于 -30 dBm 时, 增益控制模块开始自动增益控制, 当

输入信号强度达到 -10 dBm, 增益为 0 dB(图标 m1 所示), 如图 12 所示。

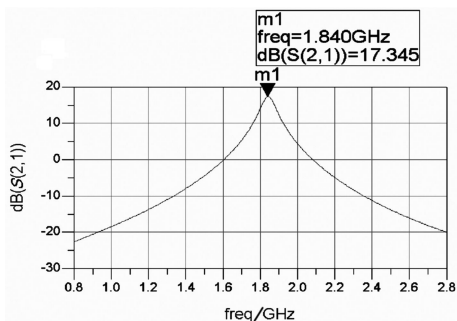


图 11 输入信号强度为 -30 dBm 时的最大增益

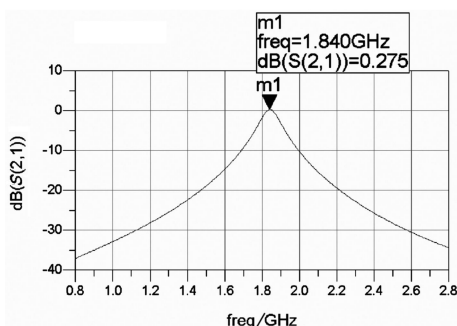


图 12 输入信号强度为 -10 dBm 时的最小增益

5 结语

本文设计了一款新颖的适用于 DCS1800 手机 RF 部分的增益自适应 LNA 电路, 其特点是使用自身输出信号实现反馈控制, 不需要外来信号, 且几乎不影响 LNA 的噪声系数、输入匹配等关键指标。

参 考 文 献

- [1] Razavi B. 射频微电子[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] Lini Lee, Jamuar S S. Current mode Approach for a Variable gain Low Noise Amplifier[J]. Networks, 2005. Jointly held with the 2005 IEEE 7th Malaysia International Conference on Communication. 2005 13th IEEE International Conference on, 2005, 2: 16 18.
- [3] Tsai, Ming-Da Liu, Rear Chieh Lin, et al. A Low-Voltage Fully Integrated 4. 5-6 GHz CMOS Variable Gain Low Noise Amplifier [C]. European Microwave Conference, 2003: 13- 16.
- [4] 黄煜梅, 叶菁华, 朱臻, 等. 2. 4 GHz 增益可控的 CMOS 低噪声放大器 [J]. 固体电子学研究与进展, 2004, 24(4): 498 504.
- [5] 陶葵, 王志功, 谢婷婷, 等. 2. 9 GHz 0. 35 μm CMOS 低噪声放大器 [J]. 电子学报, 2001, 29(11): 1 530 1 532.
- [6] 姚飞, 成步文. 1 GHz 0. 5 μm CMOS 低噪声放大器的设计 [J]. 半导体学报, 2004, 25(10): 1 291 1 295.

(下转第 62 页)

3.2 回路滤波器抗干扰效果仿真分析

在该仿真中, 本文采用 Monte Carlo 仿真, 仿真 50 次。其中, 目标 SINR $t(k)$ 设为 8 dB, 反馈信道 BER P_b 设为 10^{-3} 。在单个手机通信系统中干扰 MAI 可以近似地看作常数。信道干扰用标准差从 0.5~2 dB 的高斯白噪声仿真。仿真结果如图 3 所示。

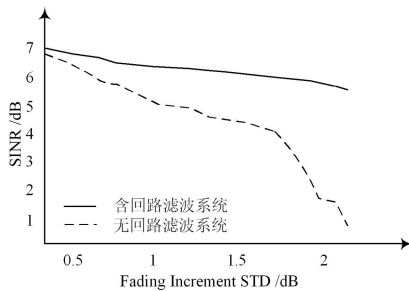


图 3 抗干扰效果仿真比较

由仿真结果可以看出, 加有本设计的回路滤波器的通信系统比原来的系统有更好的抗噪声干扰性能, 特别是在信道噪声的干扰较大时, 其效果更加明显。

4 结 语

本文描述了 CDMA 系统的简化结构。通过 H_∞ 控制理论, 设计出了该无线通信系统的回路滤波器, 并分析了其在抗信道干扰中的作用。由于在本文中并没有考虑回路

时间延迟对功率控制造成的影响, 且通过遗传算法求解设计的 H_∞ 回路滤波器, 故该设计滤波器的思想不仅可以应用在 CDMA 通信系统中, 在 TDMA, FDMA, 地域和卫星通信中也可以得到一定应用。

参 考 文 献

- [1] Ariyavisitakul S, Chang L F. Signal and Interference Statistics of a CDMA System with Feedback Power Control[J]. IEEE Trans. Commun., 1993, 41: 1 626-1 634.
- [2] Lee B K, Chen H W, Chen B S. Power Control of Cellular Radio Systems via Robust Smith Prediction Filter[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2004, 3(1): 1 822-1 831.
- [3] Su H J, Geraniotis E. Adaptive Closed loop Power Control with Quantized Feedback and Loop Filtering [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2002(1): 76-86.
- [4] Gunnarsson F, Gustafsson F, Blom J. Dynamical Effects of Time Delays and Time Delay Compensation in Power Controlled DS-SS CDMA[J]. IEEE Sel. Areas Commun., 2001, 19(1): 141-151.
- [5] Francis B A. A Course in H_∞ Control Theory[M]. Berlin, Germany: Springer Verlag, 1987.
- [6] Chen B S, Lee B K, Peng S C. Maximum Likelihood Parameter Estimation of F-ARIMA Processes Using the Genetic Algorithm in the Frequency Domain[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2002, 50: 2 208-2 220.

作者简介 李 崇 男, 1985 年出生, 本科。研究方向为无线通信系统, 信号识别。

李 鼎 男, 1985 年出生, 本科。研究方向为宽带多媒体卫星的纠错编码与星上交换, 低轨卫星的信道特性与模型。

姚 骏 男, 1985 年出生, 本科。研究方向为无线通信系统, 信噪比估计。

(上接第 59 页)

- [7] 马晓民, 王文骥. 1.8 GHz 0.35 μm CMOS 低噪声放大器的实现[J]. 半导体技术, 2002, 27(8): 46-49.
- [8] 詹福春, 王文骥, 李长生. 2.4 GHz 0.25 μm CMOS 集成低噪声放大器的设计[J]. 半导体技术, 2004, 29(5): 81-85.
- [9] Adel S Sedra, Kenneth C Smith. 微电子电路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [10] 池保勇, 余志平, 石秉学. CMOS 射频集成电路分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [11] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [12] 马涛, 柴常春, 康英, 等. 一种基于 CMOS 工艺的差分低噪声放大器设计[J]. 北京电子科技学院学报, 2007, 15(2): 36-38.
- [13] 危长明, 陈迪平, 王镇道, 等. 一种新型 900 MHz CMOS 低噪声放大器的设计[J]. 半导体技术, 2004, 29(1): 63-67.
- [14] Thomas H. Lee. CMOS 射频集成电路设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [15] Lucek J, Damen R. Designing an LNA for a CDMA front end[J]. RF Signal Processing, 1999; 22(21): 20-30.
- [16] 双频手机 RF 部分的设计[EB/OL]. http://solution.eccn.com/PDF/RF_071344_12.pdf, 2007-07-15.
- [17] RFIC Design Flow[EB/OL]. http://eesof.tm.agilent.com/products/design_flows/rfic/, 2007.

作者简介 孙 宇 男, 1979 年出生, 江苏泰州人, 硕士研究生。主要研究方向是 CMOS 模拟、数模混合、射频集成电路设计。