

## 应用于无线传感网的接收信号强度指示器的设计<sup>①</sup>

刘继华<sup>②\*</sup> 李智群<sup>③\*\*\*</sup> 王利丹<sup>\*</sup> 李 伟<sup>\*\*\*</sup> 章 丽<sup>\*\*\*</sup>

(\* 东南大学射频与光电集成电路研究所 南京 210096)

(\*\* 东南大学射频集成电路与系统教育部工程研究中心 南京 210096)

**摘 要** 采用 SMIC 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺设计了应用于无线传感网(WSN)的接收信号强度指示器(RSSI),其核心电路是采用跨导放大器构成的限幅器、半波整流器和相应的偏置电路。其工作在电流模形式下,对工艺角和温度具有良好的补偿特性。芯片测试结果表明:在电源电压为 1.8V 时,RSSI 的直流功耗为 4.14mW,2MHz 输入信号频率下的检测范围为 -58 ~ -7dBm(以 50 $\Omega$  阻抗作参考),对应的输出指示直流电压为 0.48 ~ 1.45V,检测斜率约为 18.2mV/dB,非线性误差小于  $\pm 0.7\text{dB}$ 。芯片面积为 0.654mm $\times$ 0.430mm。

**关键词** 无线传感网(WSN), CMOS, 接收信号强度指示器(RSSI), 限幅放大器, 半波整流器

## 0 引言

无线传感网(wireless sensor networks, WSN)是一种由传感器节点组成的无线网络,它能够实时地监听、感知和采集网络中的信息,并进行发布。因此,无线传感网络在军事侦察、环境信息检测、医疗健康监护、工业生产控制以及商业等领域有着广泛的应用前景。无线传感网技术正处在起步阶段,它的研究内容包括传感器芯片设计、传感器节点配置、网络体系结构、网络的容量与生命周期以及安全性等几个方面。本文设计的接收信号强度指示器(received signal strength indicator, RSSI)用于无线传感网收发机之中,它与可变增益放大器共同组成了自动增益控制单元,用以扩展接收机接收信号的动态范围。该模块的传统结构一般都是采用非平衡对与电压模限幅放大器组合实现强度指示功能,该结构对工艺角和温度变化比较敏感,不适合高性能的接收机应用。本文的设计基于 SMIC 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺,采用电流模工作形式,对工艺角和温度具有良好的补偿特性,并且具有检测动态范围宽、非线性误差小和功耗低的特点。

## 1 电路结构及设计

由于无线传感网的应用广泛且环境多变,其接

收信号强度的动态范围非常大。接收信号强度指示器(RSSI)的作用是检测接收机中可变增益放大器前的信号强度,将其反馈给基带电路用于调节可变增益放大器的增益,使其输出信号幅度相对稳定,这样能够大大降低系统对 A/D 采样精度的要求,且能够保证接收机具有良好的性能。

本文设计的 RSSI 采用电流模形式实现对数放大功能,主要由限幅放大器(limiting amplifier)、半波整流器(half-wave rectifier)、低通滤波器(low-pass filter)、直流失调消除电路(offset subtractor)和相应的偏置电路组成。限幅放大器由 6 个限幅器级联组成,限幅器将输入信号放大后送给下一级,同时将输入信号转换为限幅电流信号。半波整流器将每个限幅器的限幅电流信号进行整流并叠加后送给低通滤波器,滤波器输出一个指示信号强度的直流电压,它与输入信号强度近似成对数关系。RSSI 结构框图如图 1 所示<sup>[1,2]</sup>。

### 1.1 限幅器设计

图 1 所示的 RSSI 电路实现对数放大的输入信号范围是从最后一级开始限幅到所有限幅放大器均限幅,因此它的检测范围和检测精度主要取决于限幅放大器的输入限幅范围以及限幅放大器链路的总增益和稳定性。图 1 中的限幅器由具有稳定增益的跨导放大器构成,其结构如图 2 所示,图 2 同时给出

① 863 计划(2007AA01Z2A7)和江苏省“六大人才高峰”资助项目。

② 男,1982 年生,硕士;研究方向:射频集成电路设计;E-mail:liujihua1982@163.com

③ 通讯作者,E-mail: zhiqunli@seu.edu.cn

(收稿日期:2009-06-02)

了直流失调消除电路的结构<sup>[3-5]</sup>。

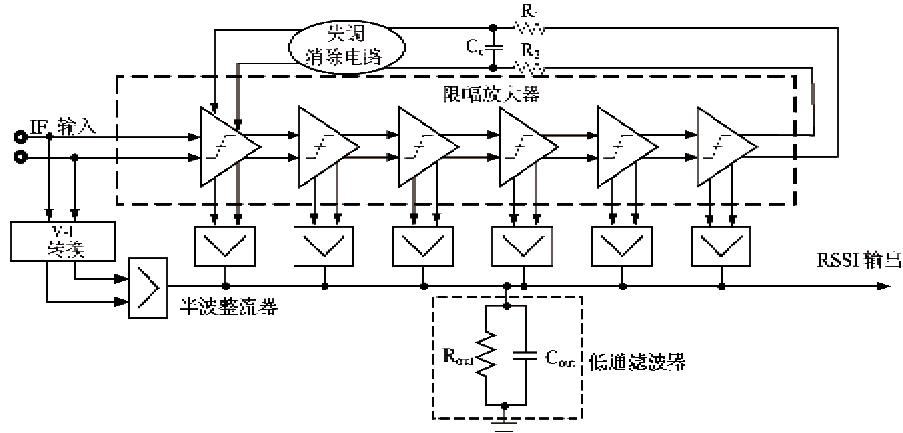


图1 RSSI 结构框图

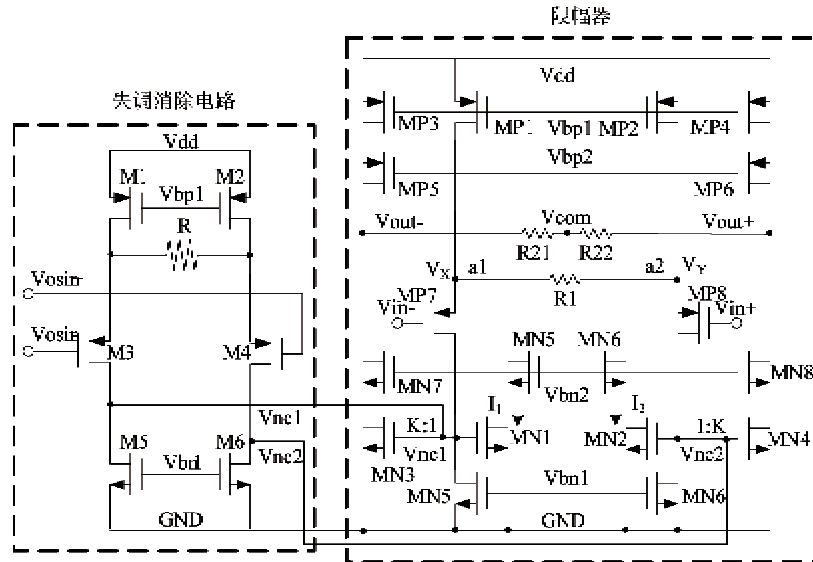


图2 带失调消除电路的限幅器结构

由图2可知,限幅器输入晶体管 MP7 和 MP8 组成源极跟随器,将输入差分信号加载到电阻  $R_1$  上。流过  $R_1$  的交流信号电流通过电流镜 MN1 和 MN3 与 MN2 和 MN4 镜像到输出端,并加载在跨接于输出端的电阻  $R_{21}$  和  $R_{22}$  上。其增益表达式推导如下:

$$\begin{cases} V_Y - V_X = V_{in} \\ I_1 - I_2 = \frac{V_{in}}{R_1} \\ K \cdot (I_1 - I_2) \cdot R_2 = V_{out} \end{cases}$$

$$\Rightarrow Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K \cdot (R_{21} + R_{22})}{R_1} \quad (1)$$

式(1)中的  $K$  为电流镜的比例。在理想情况下,当  $R_1 = R_{21} = R_{22}$  和  $K = 2$  时,得  $Gain = 4$  (即 12dB),

即每个限幅器的增益为 12dB。

图2所示限幅器的仿真波形如图3所示。

如图3所示,当输入信号为上升沿和下降沿不对称的差分信号时(对称的差分信号经过几级限幅器之后会发生一定的失真,如上升沿和下降沿的不对称),a1 和 a2 点的电压波形会发生变形,从而影响了电流  $I_1$  和  $I_2$  及输出电压信号的边沿及相位,经过多级限幅器的积累会对电路的稳定性和检测的精度有一定的影响。通过在输入晶体管的漏极添加连接成二极管形式的 N 沟道 MOS 管 MN9 和 MN10 来改进电路,改进后的电路如图4所示,对应的仿真波形如图5所示。

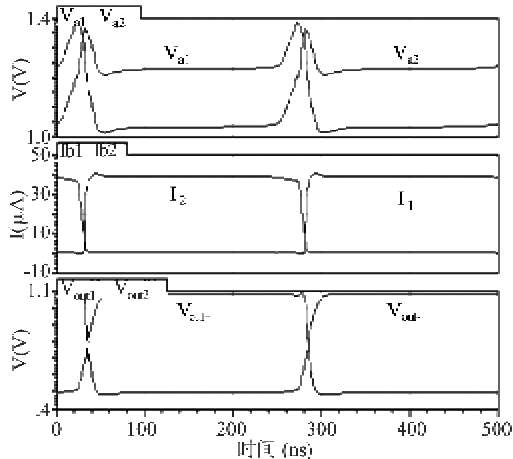


图3 图2所示限幅器的仿真波形

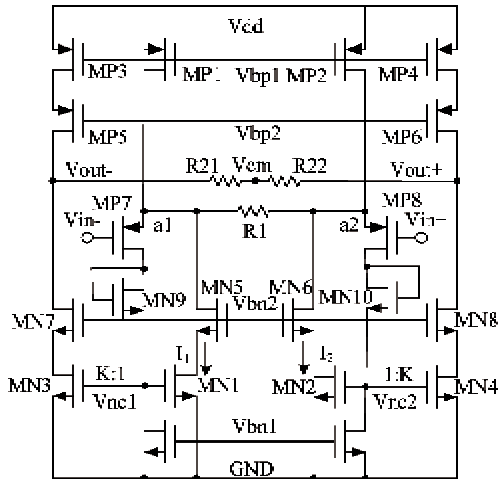


图4 改进后的限幅器结构

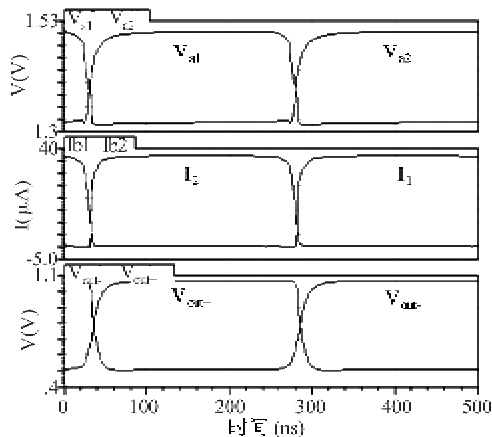


图5 改进后的限幅器仿真波形

由于MN9和MN10至少会消耗一个 $V_{th}$ ,因此减小了输入的共模电压范围。本设计中第一级限幅器采用图2所示的结构,保证RSSI具有较大的输入共模范围。其余5级限幅器均采用改进后的限幅器,使RSSI能够稳定工作,并减小检测误差。

## 1.2 半波整流器设计

限幅器单元在本设计中并不直接提供电压信号的限幅和整流的功能,所以需要额外的半波整流器配合实现电流模形式的限幅和整流。半波整流器电路如图6所示,其中Vnc1和Vnc2为半波整流器的输入端,连接在图2或图4所示限幅器的同名端点(Vnc1和Vnc2)。

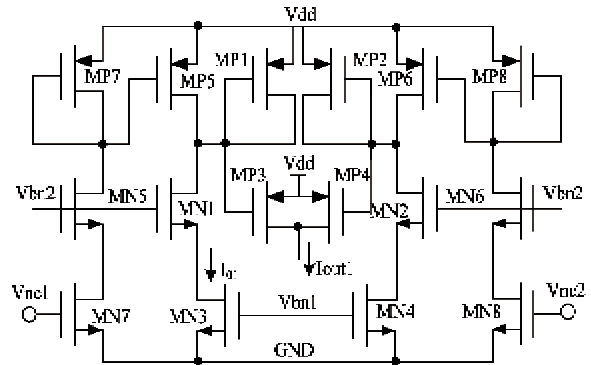


图6 半波整流器电路

电流模形式的整流能最大限度地减小工艺角和温度变化带来的影响。仿真波形如图7所示,图7(a)为差分输入信号波形,图7(b)为如图2和图4所示限幅器的晶体管MN1和MN2的漏源电流 $I_1$ 和 $I_2$ 波形,它们随着输入信号的增强会进入限幅的状态,等效的输入电压限幅范围完全取决于偏置电流和电阻 $R_1$ 的乘积,通过适当设计的偏置电路提供与 $R_1$ 相关的偏置电流,其乘积的偏差可以非常小。它的设计将在偏置电路设计中说明。图7(c)中给出了半波整流器的输出信号,半波整流器的作用是镜像支路电流 $I_1$ 和 $I_2$ 并取出该电流的限幅信号进行合成。

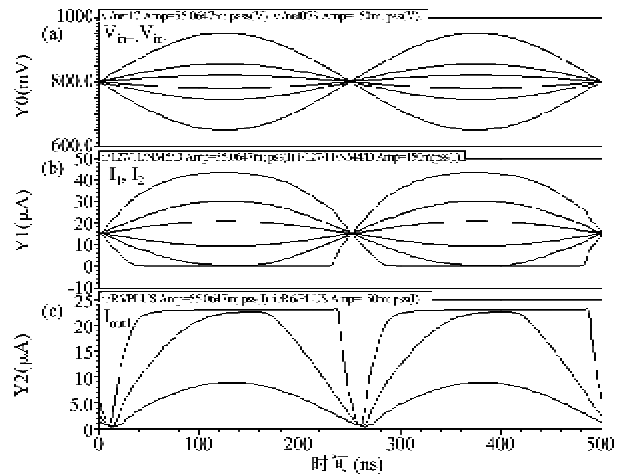


图7 半波整流器整流波形

### 1.3 电压-电流转换电路设计

RSSI 对数检测范围的上限取决于限幅器的限幅范围(如图 2 所示的限幅器的限幅电压  $V_{cm}$  等于  $R_1$  与  $I_1$  的乘积)。为了扩展 RSSI 的对数检测范围,在 RSSI 电路的输入端添加一个电压-电流的转换单元电路,如图 8 所示。它的输入限幅范围取决于  $R_3$  与  $I_1$  的乘积,取  $R_3 = k \times R_1$  ( $R_1$  为图 2 所示限幅器中的电阻),则该单元电路的等效限幅电压  $V_{cm1}$  可表示为

$$V_{cm1} = I_1 \times R_3 = I_1 \times k \times R_1 = kV_{cm} \quad (2)$$

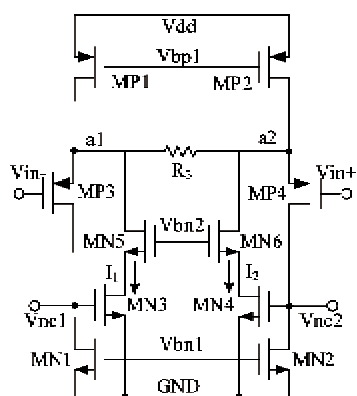


图 8 电压-电流转换单元

在实际的电路设计中,调整  $R_3$  的阻值以获得最大限度的扩展,在本设计中取  $R_3 = 3 \times R_1$ 。图 9 给

出了 RSSI 电路添加该单元电路前后的对数检测范围的仿真对比,可以发现该单元电路大约能够拓展 11dB 的对数检测范围,相当于以增加较小的功耗实现 7 级限幅器级联的对数检测范围的效果。

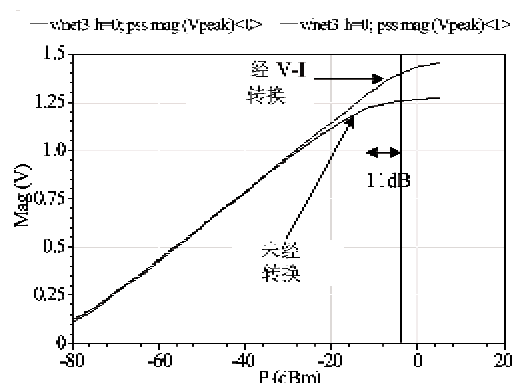


图9 检测曲线对比

### 1.4 偏置电路设计

为了使整个 RSSI 电路的性能对温度和工艺角的变化不敏感,偏置电路利用带隙基准源提供基准电压  $V_{ref}$ ,通过如图 10 所示的宽摆幅偏置电路为整体电路提供具有工艺角和温度补偿的偏置<sup>[6]</sup>。如图 10 所示偏置电路中的  $V_{bp2}$  和  $V_{bn2}$  消耗的电压裕度仅为一个阈值电压与两个过驱动电压之和,与一般的偏置电路相比节约了一个阈值电压。

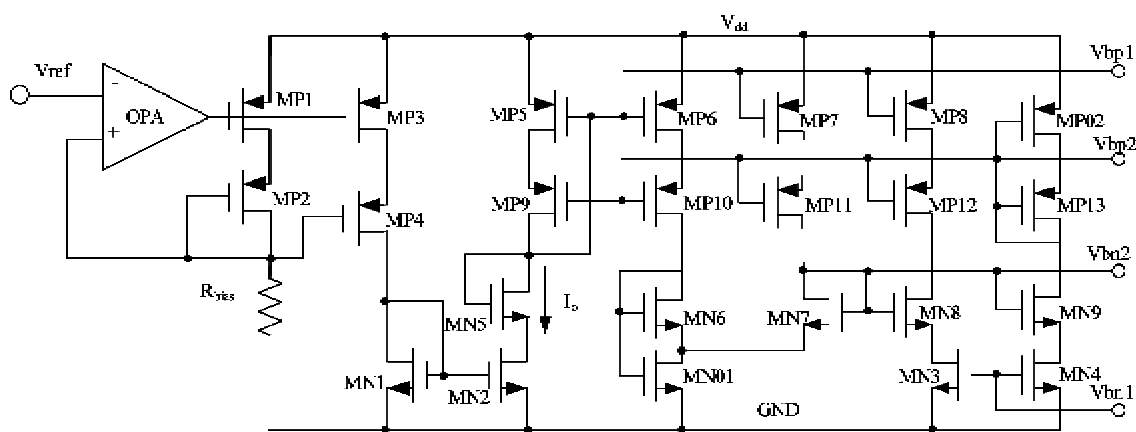


图 10 宽摆幅偏置电路

选取 MP1 和 MP3 的宽长比为 1:1, MN1 和 MN2 的宽长比为 1: $n$ , 则可以得知  $I_o = nV_{\text{ref}}/R_{\text{bias}}$ 。当温度发生变化时, 只要  $V_{\text{ref}}$  不变, 则  $I_o$  的温度特性只与  $R_{\text{bias}}$  有关。同时, 在图 6 所示的半波整流器电路中, 选取 MP1、MP5 和 MP3 的宽长比为 1:1: $K$ , 并且左右电路参数完全对称, 则  $I_{\text{out1}}$  的峰值表达式可表示为

( $\phi$  为比例系数)

$$I_{\text{out1}} = K \times I_{01} = \varphi \times \frac{V_{\text{ref}}}{R_{\text{bias}}} \quad (3)$$

由此可知,半波整流器的输出电流与偏置电流成正比关系。所以输出电流可以表示为(其中  $\gamma$  为比例系数)

$$I_{out} \approx \gamma \times I_o \times \log V_{in} \quad (4)$$

所以 RSSI 的输出即  $V_{out}$ , 可以表示为

$$V_{out} = I_{out} \times R_{out} = \gamma \times V_{ref} \times \frac{R_{out}}{R_{bias}} \times \log V_{in} \quad (5)$$

同理, 可得电流模限幅器的限幅范围  $V_{cm}$  表达式为 ( $\lambda$  为比例系数)

$$V_{cm} = I_1 \times R_1 = \lambda \times \frac{R_1}{R_{bias}} \times V_{ref} \quad (6)$$

其中  $R_1$ 、 $R_{out}$  和  $R_{bias}$  都选用同种类型的电阻——多层掩模的 poly 电阻, 这种电阻具有相对温度系数很小且方块电阻值很大的特点。因此采用上述设计方法可以大大减小 RSSI 电路对温度和工艺的敏感性。

## 2 测试结果

RSSI 芯片采用 SMIC 0.18 $\mu$ m CMOS 工艺流片, 芯片照片如图 11 所示。芯片采用在片测试法, 测试工作是在东南大学射频与光电集成电路研究所测试平台上完成的。芯片测试框图如图 12 所示, 使用的

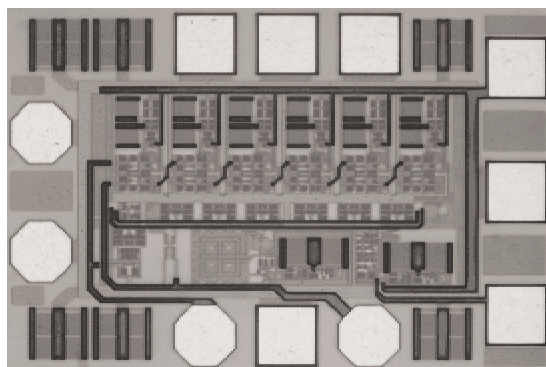


图 11 RSSI 芯片照片

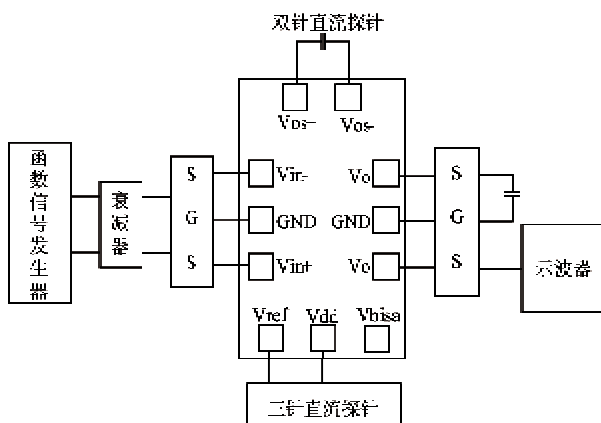


图 12 芯片测试框图

主要仪器有函数信号发生器 (Tektronix afig3252)、示波器 (Agilent 86100A)、直流电源 (Agilent 66309D)、S-G-S 探针、两针直流探针 (MCW-10-5812-2) 和三针直流探针 (MCW-10-5812-3)。由于函数信号发生器能产生的最小信号幅度为 50mV, 远远大于测试需要的最小信号强度, 因此需要将函数信号发生器产生的两路 2MHz 差分正弦信号经过衰减器后送到 RSSI 的输入端, RSSI 输出的直流信号直接送入示波器观察。

测试结果与仿真结果对比曲线如图 13 所示, 输入信号功率 ( $P_{in}$ ) 以 50 $\Omega$  阻抗作为参考。表 1 给出了芯片的各项测试参数。由表 1 可知测试结果与仿真结果吻合较好, 能够实现准确的接收信号强度指示。

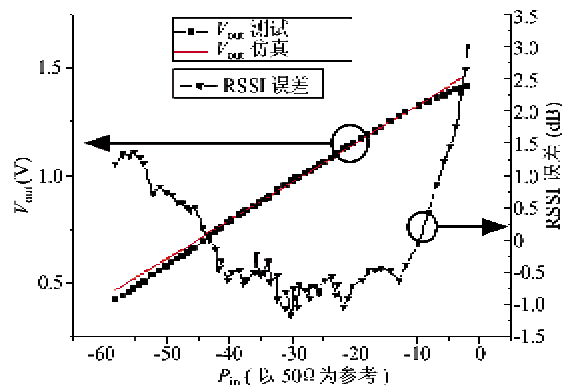


图 13 测试结果与仿真结果对比曲线

表 1 测试结果与仿真结果对比

| 指标名称       | 后仿真       | 测试结果     |
|------------|-----------|----------|
| 工作电流 (mA)  | 2.34      | 2.3      |
| 检测斜率 mV/dB | 18.2      | 18.18    |
| 检测斜率偏差     | -         | -0.1%    |
| 检测范围 (dBm) | -63 ~ -13 | -58 ~ -7 |
| 检测误差 (dB)  | <1        | <1.5     |

## 3 结论

本文采用 SMIC 0.18 $\mu$ m CMOS 工艺设计实现了用于无线传感网接收机的 RSSI 电路。测试结果表明该 RSSI 能够稳定地工作, 输入检测范围达到 51dB, 检测误差小于 1.5dB。在 1.8V 电源电压下, 工作电流为 2.3mA。

### 参考文献

- [1] 袁孝康编著, 自动增益与对数放大器. 北京: 国防工业出版社, 1987

- [2] Chao Y. Circuits and Systems I: Regular Papers. *IEEE Transactions*, 2008, 55(3):722-729
- [3] Ramirez-Angulo J. A precision broadband rectifier in CMOS technology. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuit and Systems*, New Orleans, LA, USA, 1990, 3:1724-1727
- [4] Wu C P, Tsao H W. A 110-MHz 84-dB CMOS programmable gain amplifier with Integrated RSSI function. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, 40(6):1249-1258
- [5] Murji, Rizwan. Design issues of a low power wideband frequency doubler implementation in 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2007, 53(1):53-62
- [6] Gray P R.等著,模拟集成电路的分析与设计,第四版,张晓林等译,北京:高等教育出版社,2005

## Design of a received signal strength indicator for wireless sensor networks

Liu Jihua<sup>\*</sup>, Li Zhiqun<sup>\*\*</sup>, Wang Lidan<sup>\*</sup>, Li Wei<sup>\*\*</sup>, Zhang Li<sup>\*\*</sup>

(<sup>\*</sup> Institute of RF-& OE-ICs, Southeast University, Nanjing 210096)

(<sup>\*\*</sup> RFIC & System Engineering Research Center of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096)

### Abstract

A received signal strength indicator (RSSI) for wireless sensor networks (WSNs) was designed using the SMIC 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS technology. The core part of its whole circuit contains a half-wave rectifier and a corresponding bias circuit, and a limiting amplifier composed of transconductance amplifiers. When the proposed RSSI operated on the current mode, the temperature and process dependence was compensated. The chip was measured under the voltage of 1.8V, and it had the DC power consumption of 4.14mW. When the input signal strength was changed from -58dBm to -7dBm at the frequency of 2MHz, the corresponding output DC voltage changed from 0.48V to 1.45V with a nonlinearity error of  $\pm 0.7\text{dB}$ , and the detection slope was about 18.2mV/dB. The area of the chip was 0.654mm $\times$ 0.430mm.

**Key words:** wireless sensor network (WSN), CMOS process, received signal strength indicator (RSSI), limiting amplifier, half-wave rectifier