

基于压缩传感的模数转换器设计

韩晨曦, 魏经纬, 李冬梅
(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 随着宽带信号应用的普及, 压缩传感理论打破了传统奈奎斯特模数转换器在硬件上的瓶颈. 设计了一款基于压缩传感理论的模数转换器, 并提出了一种针对多路并行结构、压缩传感信号重构的校准方法. 系统在 180 nm 工艺下进行电路和版图设计. 设计指标是基于压缩传感利用低于信号奈奎斯特频率的模数转换器达到 160 MHz 采样频率, 12 bit 量化精度. 经校准的整体后仿指标达到 160 MHz 10.25 bit, 核心面积为 2.08 mm², 优值(FOM)为 110 fJ. SAR 模数转换器后仿指标达到 40 MHz 10.08 bit, 优值(FOM)为 56 fJ. 在整体上验证了设计结构和算法的正确性和有效性.

关键词: 压缩传感; SAR; 电容失配; 宽带

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)02-0007-05

Design of an ADC Based on Compressed Sensing Theory

HAN Chen-xi, WEI Jing-wei, LI Dong-mei

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As the wide band signal application popularizing, traditional ADC based on Nyquist sampling theory is limited, which can be conquered by compressed sensing theory. This paper presents an ADC based on compressed sensing theory, and put forward a calibration method to estimate the mismatch of multipath when reconstructing the original signal from compressed sensing measurement. The whole system is implemented in UMC 180 nm fabrication. It consists multipath to measure the input signal but quantized by a single quantizer. The quantizer is a SAR ADC which can work individually. The object is to design an ADC achieving 160 MHz sampling frequency and 12 bit ENOB with a sub-Nyquist quantizer. The whole system achieves a post-layout 160 MHz 10.25 ENOB with a figure of merit of 110 fJ/conv-step, and occupies 2.08. The SAR ADC achieves a post-layout 40 MHz 10.08 bit with a FOM of 56 fJ/conv-step. The simulation shows the correctness and effectiveness of the system structure and calibration method.

Key words: compressed sensing; SAR; capacity mismatch; wide bandwidth

1 引言

作为数字处理领域的新进展, Candes^[1]等人在 2006 年提出的压缩传感理论在处理稀疏信号时打破了奈奎斯特采样定理的限制, 降低了获取信息的冗余度, 降低了系统关键模块的工作频率. 目前关于压缩传感方面的研究, 理论主要集中在算法上面, 在实际应用方面针对不同算法的实现结构、电路失配等进行的研究是重点. 本文设计了一种

一种基于压缩传感理论和基于奈奎斯特采样理论的双模式模数转换器结构, 以分别适用于超宽带可压缩信号处理和医学图像处理等领域. 整体结构通过 MATLAB 进行整体结构的搭建, 并确定各模块的性能, 在 UMC180 nm 工艺下完成电路和版图设计. 本文采用总体上多路独立随机求内积、单路量化的结构进行实现, 在减少了量化失配的同时又保证了观测矩阵随机性, 以满足多种恢复算法对观测矩阵的要求. 整体结构的版图提参后仿

收稿日期: 2015-04-03; 修回日期: 2015-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61171001)

结果中,在压缩传感模式下,利用采样频率为 40 MHz 的量化器,达到的性能指标为 160 MHz 采样 SNR 62 dB, FOM 值为 110 fJ, 整体压缩比为 4; 在传统奈奎斯特模式下,指标为 40 MHz, SNR 60.5 dB, FOM 值为 56 fJ.

2 压缩采样理论

压缩传感理论在处理稀疏信号时,在数据的采集阶段就完成一定程度的信号压缩,从而降低采集信息的冗余度. 一个 N 维的离散信号 x , 如果 x 仅存在 K 个非零系数,那么 x 就是 K 稀疏信号. 根据信息论的原理,一个 K 稀疏的信号仅需要 K 维信号进行表征即可,而用 N 维的信号进行描述,就存在大量的冗余. 如果利用一个 $M \times N$ 的观测矩阵 φ 对 N 维的信号进行观测,就可以获得一个 M 维的内积 $y = \varphi x$. 压缩传感理论就是根据 x 的稀疏性质作为边界条件进行欠定方程组的求解. 根据信息论,如果观测维度 ($M > K$), 且 M 个观测维度线性无关,此时的信息理论上包含了 x 的所有信息,可以支持信号 x 进行 0 范数优化重构. 但是 Zhang^[2] 指出 0 范数优化问题是一个非凸优化问题,无法在多项式时间内进行求解,所以在实际的应用中无法直接应用. 为了使得这个问题得到解决,根据 Tao^[1] 的证明,当矩阵 A 满足等距限定条件 (RIP) 时,进行稀疏信号的准确重构. 相关研究^[3-4] 表明,如果矩阵的系数服从独立的高斯随机分布、随机伯努利分布、随机 DFT 变换矩阵抽取矩阵,则会在极大的概率上满足 RIP 条件. 目前常用的求解算法包括基于优化的追踪匹配算法^[5] (MP)、基于组稀疏的交替方向迭代算法^[6] (PADM) 和基于贪婪思想的基追踪算法^[7] (BP).

3 系统的设计

在整体上本系统采用了奈奎斯特采样和压缩传感采样双模式的设计结构,充分利用系统的设计资源,提升了本系统的适用范围. 结合对压缩传感理论恢复算法的探究,设计了如图 1 所示的系统. 该系统总体上包括四个主要模块:硬件实现的随机观测电路、输出保持电路、SAR ADC 和软件实现的信号恢复模块. 该系统在传统模式下工作的时候,多路选择器会选通外界的信号直接传入 SAR ADC 的输入端,此时 SAR ADC 的输出就是 40 MHz 频率采集点的直接量化值;而在压缩传感模式下工作的时候,通过随机观测电路得到一组对输入信号 160 MHz 离散

结果随机正负积分值,通过输出保持电路,输入到 40 MHz 工作的 SAR ADC,将量化结果传输到信号恢复模块进行重构输出.

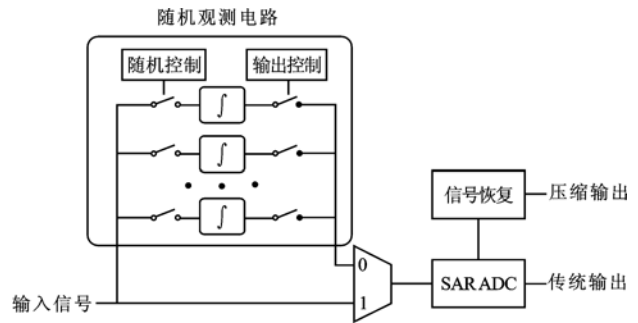


图 1 系统

3.1 信号恢复模块设计

在利用压缩传感理论进行信号的重构时,不同的重构方法的恢复效果和对硬件的需求也不相同: MP 算法在计算复杂度上有一定的优势,但是精度上有所欠缺,同时需要的观测维度要高于其他方法两倍; BP 算法在精度上有较大优势,但计算复杂度很高;基于组稀疏的 PADM 算法,在假设信号具有组稀疏特性基础上,降低了优化复杂度,并具有较高恢复精度. 为了降低对硬件的需求条件,保证本文的设计目标为 160 MHz 采样、70 dB 的精度,同时考虑到系统适用的信号如 UWB 雷达信号、GSM 信号均在频域具有组稀疏特性,所以选择 PADM 算法作为基础算法并优化. 但是原本 PADM 没有考虑较多的电路设计和实现中的非理想因素,如放大器的有限直流增益会影响观测的精度,电容失配会引起各支路观测不匹配的影响. 在本设计中,采用开关电容结构的积分器实现对信号的观测,放大器的有限增益和电容失配会直接影响每一支路的积分系数 α_k ,进而对单路的观测结果

$$y_k = \alpha_k \sum_{i=1}^N A_{ki} X_i \quad (A_{ki} \in \{-1, 1\}) \quad (1)$$

造成影响. 根据对工艺的估算,积分系数的系统误差约为 1% ~ 2%, 这种系统误差无法满足 70 dB 的精度需求,因此需要对误差进行校准. 考虑到输入信号频率与采样频率无关,所以可以假定采样点服从独立同分布. 以单位峰值正弦为例,所有采样点均服从均值为 0 方差为 0.5 的分布. 根据中心极限定理, N 个独立同分布的随机点之和趋于正太分布:

$$Y_k \sim N(0, \frac{\alpha_k^2}{2N}) \quad (2)$$

根据 M 帧的观测结果 $Y_{ki}, i = 1, 2, \dots, M$, 可以得到 Y_k 方差:

$$\sigma_K^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{ki}^2 \quad (3)$$

这是对方差 $\frac{\alpha_k^2}{2N}$ 的无偏估计,进而求得对第 k 路积分系数

$$\alpha_k = \sqrt{2N\sigma_k^2} \quad (4)$$

的无偏估计.并根据假设检验原理,利用后续观测结果对估计进行检验迭代.图2显示了在 MATLAB 中利用系统级模型,对失配误差及估值仿真的结果.

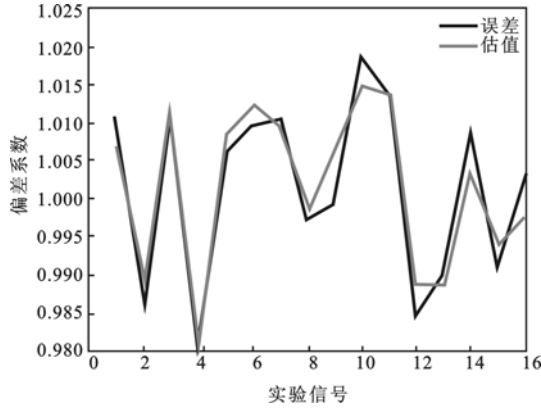


图2 失配误差及估值仿真结果

所以经过校正的算法表示如下:

输入: A (观测矩阵), y (观测结果)

α_0 (标准积分系数)

输出: $\hat{x}$ (重建信号)

初始化

$$\sigma_0^2 = \text{var}(Y_k) \alpha_k = \sqrt{2M} \sigma_0$$

$$z \in R^n, \lambda_1 \in R^n, \lambda_2 \in R^n, \beta_1, \beta_2 > 0, \gamma_1, \gamma_2 > 0$$

每 M 帧

$$\sigma_{ki}^2 = \text{var}(Y_{ki})$$

如果检验不支持 $\sigma_{ki}^2 = \sigma_0^2$

$$\text{更新 } \alpha_k = \sqrt{M(\sigma_0^2 + \sigma_{ki}^2)}$$

$$Y_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_0} Y_k$$

不满足 $\|x - z\|_2 > \varepsilon$ 循环

$$\begin{cases} x \leftarrow (\beta_1 I + \beta_2 A^T A)^{-1} (\beta_1 z - \lambda_1 + \beta_2 A^T b + A^T \lambda_2) \\ r_i \leftarrow x_{gi} + \frac{1}{\beta_1} (\lambda_1)_{gi} \\ z \leftarrow \sum_{i=1}^s (\max\{||r_i||_2 - \frac{\varphi_i}{\beta_1}, 0\}) \frac{r_i}{||r_i||_2} \\ \lambda_1 \leftarrow \lambda_1 - \gamma_1 \beta_1 (z - x) \\ \lambda_2 \leftarrow \lambda_2 - \gamma_2 \beta_2 (Ax - b) \end{cases}$$

3.2 随机观测电路

前文所述是为了使观测矩阵满足 RIP 条件,采用了多路结构,每条支路采用独立的随机序列作为

控制信号.由于过少的观测点无法保证算法的有效,经计算观测的帧长不能小于 60.根据 Tao 的论述,信号的观测值不能小于 $k \times \log N$ 估算,对于稀疏度为 2 的观测值不能小于 12.为了留有一定裕度,整体采用了 64 个周期为 1 帧,16 路并行的结构.在每一个路中包含一个受控的积分器、一个随机控制器和一个输出缓冲模块模块.图3是受控积分器的电路图,该电路采用差分方式输入.在采样阶段,根据随机控制信号 $D_i \in \{-1, 1\}$, $\Phi_1 \Phi_2$ 其中一个闭合, Φ_2 断开,完成对电容 $C_1 C_2$ 的充电;在积分阶段, $\Phi_1 \Phi_2$ 全部断开, Φ_2 闭合,根据运算放大器的虚短虚断的特性, $C_1 C_2$ 的电荷会分别转移到 $C_3 C_4$ 上.同时为了实现帧之间的独立,在每一帧的第一个采样周期,对积分电容进行清零.设输入信号的离散采样正负端分别为 x_i 和 $-x_i$,从而可以求得正端输出增量为 $y = D_i x_i C_1 / C_2$,完成了对输入信号的随机观测.

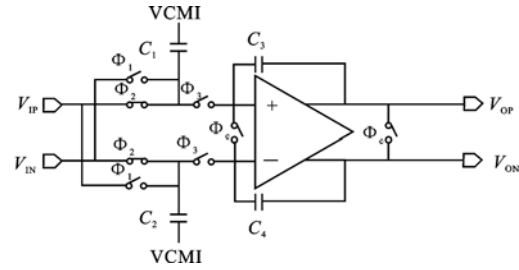


图3 受控积分器电路

考虑到随机观测同样在恢复系统里使用,如果使用随机矩阵,则需要在采集系统与恢复系统中进行矩阵的传输,增大了整体的数据量,因此在本系统中随机控制器采用伪随机数发生器电路实现,根据电路中的初始状态在信号恢复模块实现观测矩阵的恢复.同时为了保证整体观测矩阵的 RIP 特性,每一路伪随机数发生器采用如图4所示的 Fabonacci 结构的 M 序列发生器,以使得矩阵较好地满足伯努利分布.其中 V_x 的引入防止了伪随机发生器进入锁死状态,同时可以进行初始状态的同步.

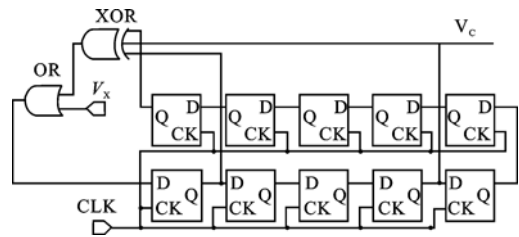


图4 Fabonacci 结构的 M 序列发生器

3.3 保持电路设计

由于本系统采用的是多路采样,单路量化的结

构,而且所有支路的有效输出是在帧末,为了使得所有输出顺次进入量化器进行量化,本系统设计了一个驱动能力较强的模拟寄存器,如图 5 所示。

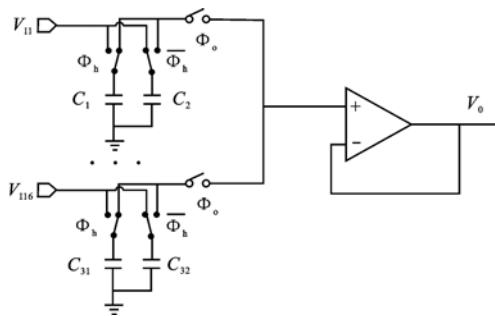


图 5 模拟寄存器

16 路积分器的输出连接在输入端,在每一帧结束的时候进行切换,从而利用乒乓机制,一个电容在跟随积分器输出,另一电容保持上一次积分的输出电压,按照控制顺序依次输入到后续的放大器中。放大器采用电压跟随器式连接方式,以保证输出与输入电压相同,同时具有较大的驱动能力。考虑到积分器的输出是接近满幅,所以放大器采用了如图 6 的轨到轨结构。

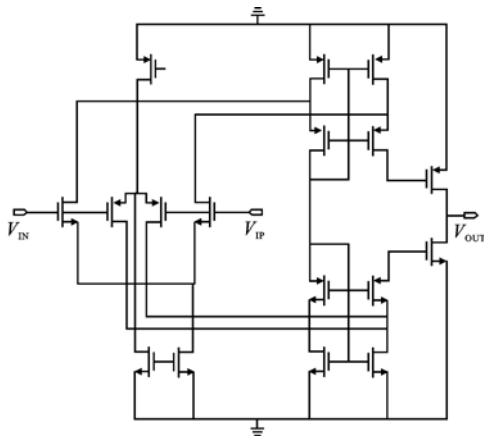


图 6 轨到轨结构

该结构利用随着共模电平偏移,放大系数偏移相反的两对 NMOS 和 PMOS 管作为输入,使得输入范围接近满幅度。

3.4 SAR ADC 设计

SAR ADC 是本系统的核心模块之一,根据相关的理论分析,要使得压缩传感的精度达到 60 dB、采样频率达到 160 MHz,量化器的精度需要 60 dB、采样频率达到 40 MHz。为了保有一定的裕量,设计指标为 12 bit 量化,40 MHz 采样频率。本文设计的 SAR ADC 其结构如图 7 所示。

系统模拟部分采用全差分电路设计结构,反馈 DAC 采用分段式电容阵列实现。分段电容技术,可

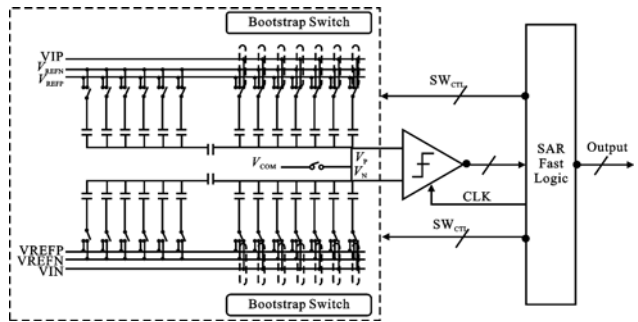


图 7 SAR ADC 结构

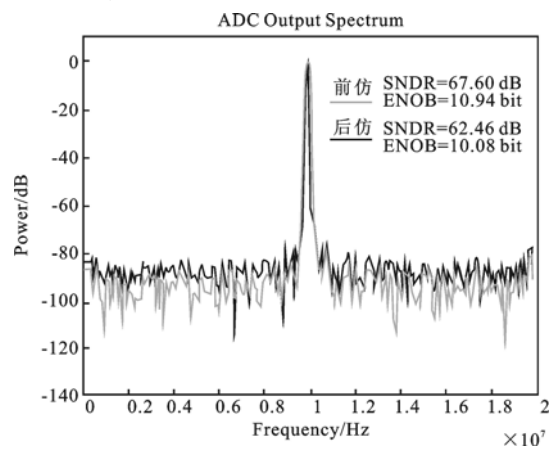
以在负载电容一定的情况下,增大单位电容的容值,从而增大单位电容的面积,进而减小了电容的失配。为了在 180 nm 工艺下达到 50 MHz 12 bit 的指标,每一个位的输出周期需要低于 1.2 ns。为了缩短周期的时间,SAR 在逐次逼近逻辑上采用了异步结构,并优化了比较器模块和 SAR 逻辑模块。

比较器模块采用了如图 8(a) 所示的预充电型比较器。在时钟为低电平时,比较器输出被拉成为高电平;在时钟为高电平,利用输入两端的电压不同,放电速度不同,拉低输出电平,放电快的一端会先达到阈值,由于存在正反馈结构,将较低电平的值降到地,将较高电平的点推高到电源电压,并锁存。该比较器的建立时间短,仅需 330 ps,仿真波形如图 8(b) 所示。

4 版图设计及仿真结果

这款基于压缩传感的双模式 ADC 在 UMC180 nm 1P6M 工艺下完成版图设计。整体版图拨正差分信号路径对称设计,模拟部分与数字部分严格分离,同时减小关键路径和模拟走线的布线长度。对关键 MOS 管提供 dummy 管以保证器件的匹配。

针对该 ADC 的两种工作模式,分别进行了版图前仿真和提取寄生参数后的仿真,如图 9 所示。在压缩传感模式下,输入 23 MHz、1.8 V 的正弦信号,前仿真精度为 68 dB,不经过积分系数校正后仿精度为 49 dB,经过校正可以达到 64 dB。校正后,后仿 FOM 值为 110 fJ。在奈奎斯特模式下,输入 10 MHz、1.8 V 正弦信号,前仿真精度达到 67 dB,后仿精度达到 62 dB,后仿 FOM 值为 55 fJ。



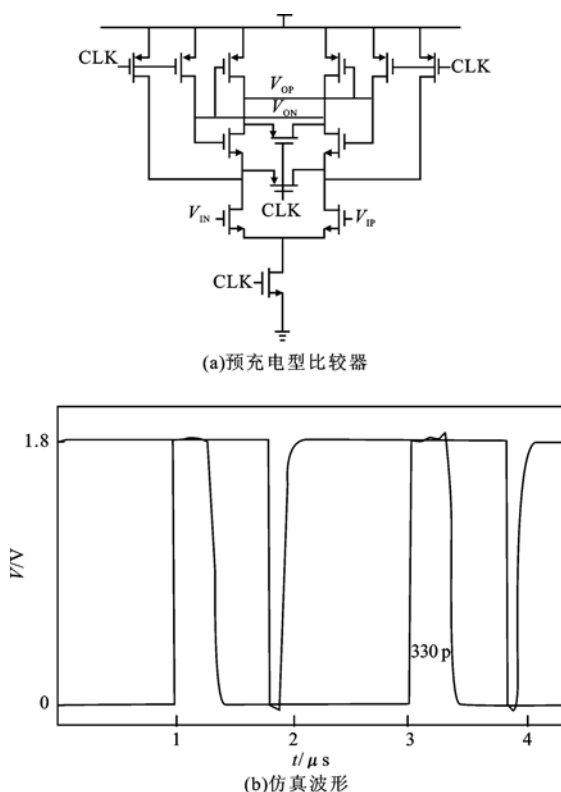
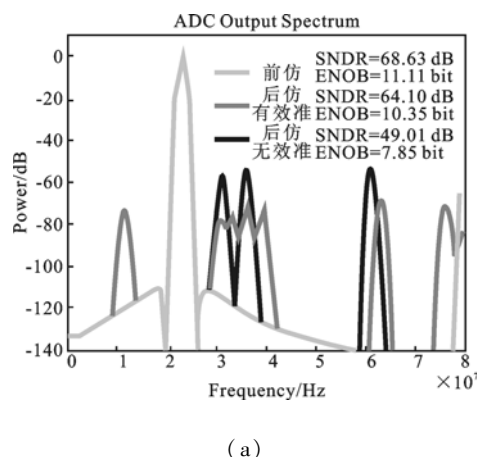


图8 预充电型比较器与仿真波形



(a)

根据仿真的结果分析可知,压缩传感模式精度的下降主要有两个原因,一个是电路之间的失配,这个可以利用校准进行一定的步长,另一方面是 SAR ADC 量化器量化精度的下降,导致后续信号重构受到干扰. SAR ADC 精度下降,主要是由电路的寄生参数所致 DAC 的失配所引起的.

5 结束语

本文针对目前在超宽带等通信应用场景,基于

MATLAB 和 Cadence 设计了一款双工作模式的量化
收稿日期: 2015-04-09; 修回日期: 2015-06-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(61379159); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT1299)

基于压缩传感理论的模数转换器;针对通用信号的 40 MHz、12 bit 精度的 SAR 型模数转换器. 在 UMC180 nm 工艺下完成电路及版图设计,压缩传感模式精度达到 64 dB, FOM 值为 110 fJ; 奈奎斯特模式精度达 62 dB, FOM 值为 56 fJ,基本达到了设计目标.

参考文献:

- [1] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2006, 52(2): 489-509.
- [2] Mallat S G, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [3] Rudelson M, Vershynin R. Sparse reconstruction by convex relaxation: Fourier and Gaussian measurements [C] // Information Sciences and Systems, 2006 40th Annual Conference on. New Jersey, Princeton, IEEE, 2006: 207-212.
- [4] Litvak A E, Pajor A, Rudelson M, et al. Smallest singular value of random matrices and geometry of random polytopes [J]. Advances in Mathematics, 2005, 195(2): 491-523.
- [5] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [6] Deng W, Yin W, Zhang Y. Group sparse optimization by alternating direction method [C] // SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics. USA, San Diego, 2013: 88580R-15.
- [7] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. SIAM journal on scientific computing, 1998, 20(1): 33-61.
- [8] Yenduri P K, Rocca A Z, Rao A S, et al. A low-power compressive sampling time-based analog-to-digital converter [J]. Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, IEEE Journal on, 2012, 2(3): 502-515.

(下转第 17 页)

33 卷 第 2 期 电子学与计算机
2016 年 1 月 MICROELECTRONICS & COMPUTER

Vol. 33 No. 2
February 2016

- [5] Choi B J, Shen X. Adaptive asynchronous sleep scheduling protocols for delay tolerant networks [J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(9): 1283-1296.
- [6] 李季碧,李宾,任智,等. 自适应动态功率控制的机会网络节能高效路由算法[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 49-56.
- [7] Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation [C]//Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques. Italy, Rome, ICST, 2009: 55.

作者简介:

任智男, (1971-), 博士后, 教授. 研究方向为宽带自组网与无线通信.

武杨(通讯作者)男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为机会网络节能路由算法. E-mail: 472417016@qq.com.

张剑波男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为水声传感器网络路由算法.

李季碧女, (1975-), 讲师. 研究方向为机会网络.

(上接第11页)

- [9] D'Angelo R, Trakimas M, Sonkusale S, et al. Compressed sensing of EEG using a random sampling ADC in 90nm CMOS[C]//Body Sensor Networks (BSN), 2013 IEEE International Conference on. USA, Cambridge, IEEE, 2013: 1-5.
- [10] Trakimas M, D'Angelo R, Aeron S, et al. A compressed sensing analog-to-information converter with edge-triggered SAR ADC core[J]. Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, 2013, 60(5): 1135-1148.

作者简介:

韩晨曦男, (1990-), 硕士. 研究方向为模拟及数模混合集成电路设计、SOC 集成电路设计技术等.

E-mail: hcx12@mails.tisnghua.edu.cn.

魏经纬男, (1992-), 博士研究生. 研究方向为模拟及数模混合集成电路设计、SOC 集成电路设计技术等.

李冬梅女, (1966-), 副教授. 研究方向为模拟及数模混合集成电路设计、SOC 集成电路设计技术以及集成电跳入的抗辐射加固技术等.