

1.3~2.2 GHz 低噪声低功耗 CMOS LC VCO 的设计

陈 华, 郭桂良, 张玉琳, 姜 宇, 韩荆宇, 阎跃鹏

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 基于 TSMC 0.18 μm RFCMOS 工艺, 设计并实现了一个宽带低功耗低相位噪声的高性能压控振荡器 (VCO)。为实现 1.3~2.2 GHz 调谐范围, VCO 采用 7-bit (128 根调谐曲线) 固定电容阵列, 同时也获得了超低的增益, 降低了相位噪声。为弱化宽调谐范围带来的增益波动, VCO 采用 3-bit 可变电容阵列来提升低带曲线的斜率, 以期与高带一致。为实现每根曲线的宽线性范围, 可变电容采用分布式偏置电压技术。为降低相位噪声, 还提出了一种输出零偏置架构以及电流源噪声滤除技术。测试结果表明, 调谐电压的线性范围为 0.2~1.6 V; VCO 输出频率范围为 1.3~2.17 GHz; 高带调谐曲线叠合超过 50%, 低带超过 80%; VCO 增益仅为 19 MHz/V; 增益波动范围为 13~25 MHz/V。当振荡频率为 1 312 MHz, 1 MHz 频偏处相位噪声为 -116.53 dBc/Hz; 当振荡频率为 2 152 MHz, 1 MHz 频偏处相噪为 -112.78 dBc/Hz。VCO 功耗电流为 1.2~3.2 mA, 电源电压为 1.8 V。提出的 VCO 既能提供 51% 的频率覆盖, 又能实现低相位噪声, 已经被成功应用于工业自动化无线传感网 (WIA) 射频收发机芯片中。

关键词: 宽带; 低相位噪声; 低功耗; 压控振荡器; 锁相环; 频率综合器

中图分类号: TN752

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)01-0024-05

A 1.3~2.2 GHz Low Phase-Noise Low-Power CMOS LC VCO

CHEN Hua, GUO Gui-liang, ZHANG Yu-lin,
JIANG Yu, HAN Jing-yu, YAN Yue-peng

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

Abstract: This paper presents a wide-band low phase-noise and low power voltage-controlled oscillator (VCO). To cover a frequency range of 1.3~2.2 GHz and maintain extremely low gain, a bunch of 128 tuning curves realized by 7-bit switching capacitor array is applied in VCO. On the other hand, wide-range leads to huge gain variation. To combat it, a 3-bit self-controlled varactor array is also proposed. Besides, to enlarge each tuning curve linear range, distributed biased varactor technique is still adopted. Fabricated in TSMC 0.18 μm CMOS process, the tuning curve linear range is 0.2~1.6 V, and VCO can cover 1.3~2.17 GHz frequency. The overlap of high band adjacent curves is more than 50%, and low band is even more than 80%. The average gain is only 19 MHz/V, and the fluctuation range is 13~25 MHz/V. For 1312 MHz, the VCO phase noise is -116.53 dBc/Hz at 1 MHz offset; while for 2 152 MHz, it is -112.78 dBc/Hz. VCO consumes 1.2~3.2 mA for a 1.8 V supply voltage. The proposed VCO can achieve wide tuning range and low phase noise. It has been successfully integrated in the frequency synthesizer for Wireless networks for Industrial Automation (WIA) applications.

Key words: wide band; low phase noise; low power; voltage-controlled oscillator; synthesizer

1 引言

在工业自动化无线传感网 (WIA) 的射频收发

机中, 需要高性能低功耗的频率综合器。而频率综合器的功耗主要来自压控振荡器 (VCO) 和高速分频器。如果能将 VCO 的调谐频率做宽, 那么高速分频

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-04-30

基金项目: 国家“八六三”重大专项资助项目 (2011AA040102)

器就会极大简化,从而降低整体功耗.另一方面,频率综合器的带外相位噪声主要是由 VCO 决定的.所以设计一个宽带低噪声 VCO 具有十分重要的意义.采用单个 VCO 实现宽调谐,再配合低幅度的输出电压及可调节的尾电流源,可以实现低功耗.

宽带 VCO 设计被广泛地研究^[1-5].文献[1]中使用开关电容阵列(SCA)实现高达 73% 的调谐范围,但是显现出很大的增益(K_{VCO})波动和频率步长(F_{step})波动.文献[2-3]中利用可变电容阵列(SVA)解决此问题.文献[4]中使用 16 根调谐曲线来实现几乎恒定的增益和频率步长,但是,固定电容和可变电容的取值没有规律,因此该方法只能用于低数量的调谐曲线设计.文献[5]中提供了一种伪指数电容阵列的方法.

基于以上文献,本文提出 VCO 采用 128 根调谐曲线来覆盖 1.3~2.2 GHz 的频率范围(接近 51%).为补偿 K_{VCO} 和 F_{step} 的波动,谐振腔中加入 3 bit 可变电容阵列^[2].为扩展每条曲线的线性范围,可变电容都由分布式电压来偏置^[6].为压制调谐电压上的噪声,VCO 的调谐增益要尽可能小,本文使用 7 bit SCA 来达成此目的.为进一步降低相位噪声,VCO 还采用了输出电压零偏置技术及电流源滤波技术.

2 电路设计

相位噪声是衡量 VCO 性能的一项重要指标.基于经典的 Leeson 公式,文献[7]中提出了一个公式可以预测调谐电压上的噪声对 VCO 相噪的影响,如式(1)所示:

$$L(f_m, K_{VCO}) = 10 \log \left\{ \left(\frac{f_0}{2Qf_m} \right)^2 \left[\frac{FkT}{2P_{sig}} \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{K_{VCO} V_m}{2f_m} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

式中, f_0 是 VCO 中心振荡频率, f_m 是频偏频率, f_c 是闪烁噪声的拐角频率, Q 是品质因数, P_{sig} 是功耗大小,与输出振荡幅度有关, K_{VCO} 是 VCO 的调谐增益, V_m 是调谐电压上低频噪声的平均幅度值, K 是 Boltzmann 常数, T 是绝对温度.

通过对式(1)的分析,我们知道有三种方法可以有效地降低 VCO 的相位噪声,分别是:使用高 Q 值的电感;将 VCO 的输出摆幅最大化;降低 VCO 的调谐增益.然而,受限于工艺,电感的 Q 值不可能太高,本项目 VCO 使用的对称电感 Q 值为 8.又由于本文提出的 VCO 采用了输出电压零偏置结构,基

于工艺上的安全考虑,VCO 输出电压的单端幅值不能超过 PN 结电压,所以输出信号摆幅不能太大.基于以上分析,最好是将 VCO 的调谐增益做得尽可能小,小的增益意味着 VCO 需要更多的调谐曲线.

下面进行 VCO 的频率调谐范围设计.为了覆盖 1.3~2.2 GHz 的宽频率范围,本文采用数字调谐技术.为了实现相邻调谐曲线的叠合超过 50%,并且超低调谐增益($\approx 20\text{MHz/V}$),VCO 需要采用 7 bit 二进制权重的固定电容阵列来实现.文献[5]中指出增益波动和调谐范围之间存在三次方关系:

$$\frac{K_{VCO, \max}}{K_{VCO, \min}} = \left(\frac{2 + TR}{2 - TR} \right)^3 \quad (2)$$

由于本文的调谐范围为 51.4%,由式(2)计算得到 K_{VCO} 会产生 4.84 倍的调谐增益波动.为了压制这么大的增益变化,VCO 使用了 3 bit 可变电容阵列,来使 VCO 低频带部分的调谐曲线斜率提升,以期与高频带部分一致.另外,为了使每一条调谐曲线的线性范围最大化,VCO 采用了分布式偏置电压技术.

本文提出的宽带低噪声低功耗 VCO 的整体电路如图 1 所示.它具有小调谐增益且低增益抖动.本文提出的 VCO 使用 LC 型而不是环形^[8-9],是因为 LC 型具有更好的相位噪声性能.该 VCO 含有一个 7 bit 二进制权重的固定电容阵列,及 3 bit 二进制权重的可变电容阵列.可变电容阵列采用分布式偏置技术.因为 PMOS 管具有更低的闪烁噪声,而且 PMOS 管做在 NWELL 中,可以避免衬底对管子的噪声注入,所以理论上用 PMOS 做交叉耦合管可以获得 5~10 dB 的相位噪声改善.又考虑到工作频段仅为 1~3 GHz,低于 5 GHz,所以 PMOS 管的低电子迁移率不是问题.基于以上考虑,交叉耦合管以及尾电流管均采用 PMOS 管来实现.交叉耦合管必须要产生足够的跨导以抵抗谐振腔的损耗.差分四端电感的中心抽头接地,从而构成一个输出电压零偏置结构.该结构导致尾电流源必须放在顶端,即 top-biased 结构.尾电流大小采用可调节形式,以抵抗在频率调谐过程中的输出幅度变动,这样可以改善相噪,并降低功耗.另外,尾电流源中加入的 RC 低通滤波器可以较好地滤除低频噪声.仿真结果如图 2 所示.由仿真结果可见,若使用了 RC 滤波器,VCO 的相位噪声在 10 kHz 处可以降低 8 dB,在 100 kHz 处降低 11.6 dB,在 1 MHz 处降低 2.68 dB.

本文提出的 VCO 采用输出电压零偏置架构,以降低相位噪声.因为输出电压 DC 点为 0,为了安

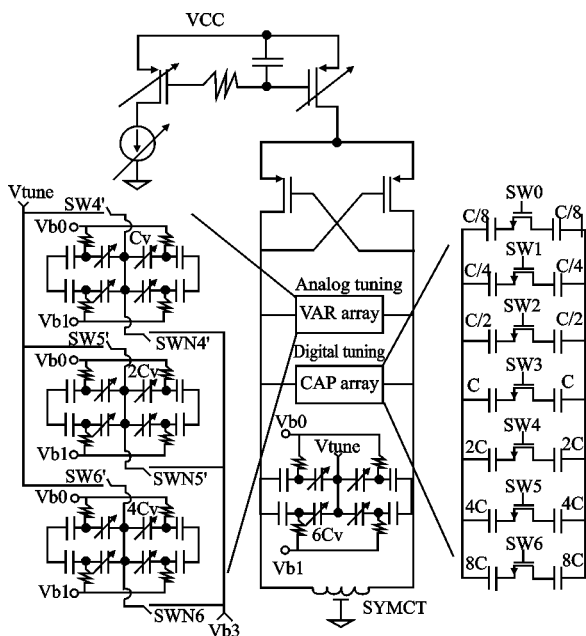


图1 本文提出的 VCO 的电路结构图

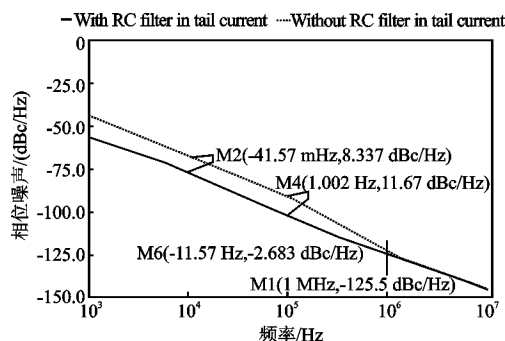


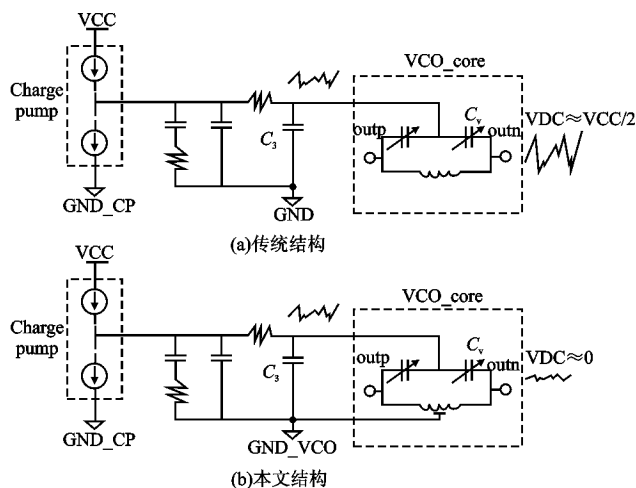
图2 尾电流源中的 RC 滤波器降低相位噪声

全起见,输出幅度不应该超过 PN 结的导通电压,该 PN 结可能是由 P 型衬底和 N 型阱构成。所以, VCO 的输出幅度不会太大,这也节省了一定的功耗,同时也与后续电路的低幅度输出保持一致。另一方面,在 DC 或者很低的频率时, VCO 的输出虚地,来自于调谐电压上的噪声不会污染 VCO 的输出共模电平,如图 3(b)所示。为了增强对比,图 3(a)所示的一个传统的偏置结构,输出偏置电压不为 0。对于一个互补结构的 VCO 来说,输出偏置电压一般设置为 $V_{CC}/2$ 。因此从 VCO 的输出到滤波器的 GND 之间就会形成一个电压分压器。该电压分压器由 C_v 和 C_3 组成。由下面(3)式可知,调谐电压上的噪声 V_n 传递到 VCO 输出端时已经被放大了许多。

$$V_{out,n} = V_n * [(C_v + C_3)/C_v] \quad (3)$$

3 测试结果及性能比较

本文提出的 VCO 采用 TSMC 0.18 μm RFCMOS

图3 V_{tune} 噪声对 VCO 输出的影响

工艺来实现,这种工艺可以集成 VCO 所需的全部有源和无源器件(包括 Accumulated MOS 管和带抽头的差分片上螺旋电感),而且仿真 model 都很完善。本文提出的 VCO 已经集成在 WIA 的频率综合器中,流片回来后的芯片照相图如图 4 所示。

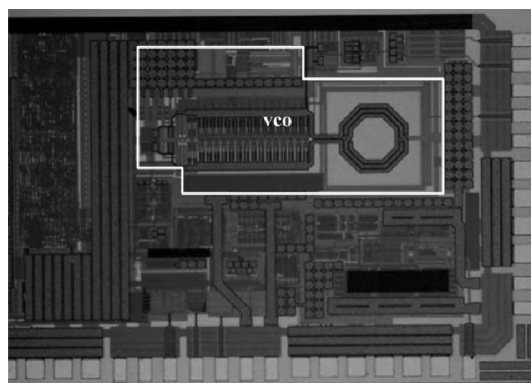


图4 本文提出的 VCO 的芯片照相图

使用 R&S FSV Signal and Spectrum Analyzer 来测试 VCO 的调谐曲线和相位噪声。128 根频率调谐曲线如图 5 所示。由图可见,该 VCO 的频率调谐范围为 1.304~2.167 GHz,每根调谐曲线的线性范围为 0.2~1.6 V;高带相邻曲线的叠合超过 50%,低带超过 80%;调谐增益的变化范围为 15~25 MHz/V。由此可见,本文提出的 VCO 实现了宽范围覆盖,并且具有超低的调谐增益以及小的增益抖动。

由于 VCO 被集成在频率综合器中,不易单独引出 PAD 进行测试,本文采用 VCO 经过除 4 分频之后来测试 VCO 相噪。VCO 除 4 后的相位噪声如图 6 所示。由于 PLL 环路带宽是 200 kHz,所以只测试 100 kHz 和 1 MHz 处的相位噪声。图中上方曲

线对应 VCO 最高频率点 $f=2\ 152\ \text{MHz}$, $100\ \text{kHz}$ 处相噪为 $-97.83\ \text{dBc/Hz}$, $1\ \text{MHz}$ 处相噪为 $-124.78\ \text{dBc/Hz}$, 换算到 VCO 的输出端, 需要加 $12\ \text{dB}$. 下方曲线对应 VCO 最低频点 $1\ 312\ \text{MHz}$, $100\ \text{kHz}$ 处相噪为 $-104.7\ \text{dBc/Hz}$, $1\ \text{MHz}$ 处相噪为 $-128.53\ \text{dBc/Hz}$. 可见, VCO 振荡频率越低, 相噪越好. 需要说明的是, 由于测试时 VCO 的控制电压由电源供给, 存在一定的噪声, 所以实际的 VCO 噪声要稍好于测试值.

在 $1.8\ \text{V}$ 电源供电下, VCO 振荡在最高频率和最低频率时, 功耗电流为 $1.2\sim 3.2\ \text{mA}$. VCO 性能参数的测试值总结在表 1 中. 采用文献[10]中提供的 FOM_T 值定义, 如式(4)所示, 经计算, 本文提出的 VCO 的 FOM_T 值为 -189.8 , 与其他相关的宽带 VCO 的比对比如表 2 所示. 从表中 FOM_T 参数可以看出, 本文设计并实现的 VCO 具有非常好的性能.

$$\text{FOM}_T = \text{Phn} - 20\log\left(\frac{f_0}{\Delta f} \cdot \frac{\text{FTR}}{10}\right) + 10\log\left(\frac{P_{\text{diss}}}{1\text{mW}}\right) \quad (4)$$

式中, FOM_T 为 VCO 的综合性能指标, Phn 为相位噪声, f_0 为中心频率, Δf 为偏移频率, FTR 为调谐范围, 以百分比表示, P_{diss} 为功耗.

表 1 本文提出的 VCO 性能(实际测试值)

参数	测试值
调谐范围/GHz	1.304~2.167
功耗电流/mA	1.2~3.2
$\text{Fvco}=2\ 152\ \text{MHz}$ 相噪	
@100 kHz	$-85.83\ \text{dBc/Hz}$
@1 MHz	$-112.78\ \text{dBc/Hz}$
$\text{Fvco}=1\ 312\ \text{MHz}$ 相噪	
@100 kHz	$-92.7\ \text{dBc/Hz}$
@1 MHz	$-116.53\ \text{dBc/Hz}$

表 2 几种 CMOS LC VCO 的性能比较

文献	工艺/ μm	调谐 范围/%	相位噪声 (dBc/Hz)@1MHz	功耗/mW	FOM_T
[11]	0.18	31	-111	31	-188
[12]	0.065	16	-106	3	-185.7
[13]	0.18	6	-110.2	1.1	-187.2
本文	0.18	51	-116.5	2.1	-189.8

4 结束语

基于 TSMC $0.18\ \mu\text{m}$ RFCMOS 工艺, 本文设计并实现了一个应用于工业无线传感网(WIA)的宽带低噪声低功耗的 VCO. 该 VCO 采用 128 根调谐曲线, 能够覆盖 $1.3\sim 2.2\ \text{GHz}$ 的频率范围, 并且具有超低调谐增益及小增益抖动. 通过采用输出零

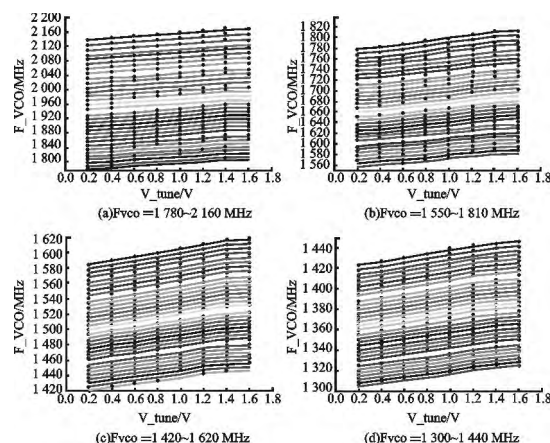


图 5 调谐曲线测试结果

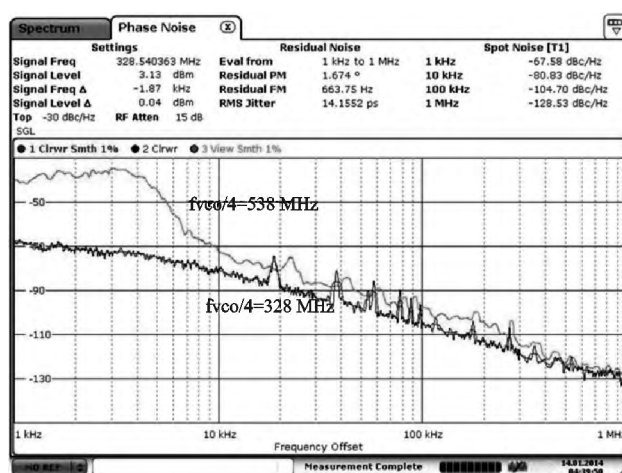


图 6 VCO 相噪测试结果, 频率分别为 $1\ 312\ \text{MHz}$ 和 $2\ 152\ \text{MHz}$

偏置架构以及电流源滤波技术降低相位噪声. 通过采用可调节的电流偏置结构实现低功耗. 本文提出的 VCO 的 FOM_T 高达 189.8 , 已经成功在 WIA 系统的射频收发机中, 并取得了良好的应用效果.

参考文献:

- [1] Berny A, Niknejad A, Meyer R. A 1.8-GHz LC VCO with 1.3-GHz tuning range and digital amplitude calibration [J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2005, 40 (4): 909-917.
- [2] Ahn T, Moon J, Moon Y. A fractional-N frequency synthesizer with a wide-band small gain-Fluctuation VCO for mobile DTV applications [C]//7th International Conference on ASIC. China: Guilin, 2007: 303-306.
- [3] Hauspie D, Park E, Craninckx J. Wideband VCO with simultaneous switching of frequency band, active core, and varactor size [J]. IEEE J. Solid-State Circuits,

- 2007, 42(7): 1472-1480.
- [4] Lu L, Chen J, Yuan L, et al. An 18-mW 1.175 - 2-GHz frequency synthesizer with constant bandwidth for DVB-T Tuners [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2009, 57(4): 928-937.
- [5] Kim J, Shin J, Kim S, et al. A Wide-Band CMOS LC VCO with linearized coarse tuning characteristics [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, 2008, 55(5): 399-403.
- [6] Mira J, Divel T, Ramet S, et al. Distributed MOS varactor biasing for VCO gain equalization in 0.13 μm CMOS technology [J]. IEEE RFIC Symp. Dig., 2004(6): 131-134.
- [7] Moon Y J, Roh Y S, Jeong C Y, et al. A 4.39-5.26GHz LC-tank CMOS voltage-controlled oscillator with small VCO-gain variation [J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2009, 19(8): 524-526.
- [8] 谢连波, 桑红石, 方海涛, 等. 低功耗 CMOS 差分环形压控振荡器设计 [J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(5): 104-107.
- [9] 吕荫学, 刘梦新, 罗家俊, 等. 一种 1GHz 多频带压控振荡器的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(2): 1-4.
- [10] Kim J, Plouchart J, Zamdmer N, et al. A 44GHz differentially tuned VCO with 4GHz tuning range in 0.12 μm SOI CMOS [C] // ISSCC. China: Beijing, 2005, 22: 416-607.
- [11] Deng Z, Niknejad A M. A 4-port-inductor-based VCO coupling method for phase noise reduction [J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2011, 46(8): 1772-1781.
- [12] Hsu M, Chiu C. A low-power 10-GHz current reused VCO using negative resistance enhancement technique [C] // Asia Pacific Microwave Conf. Singapore, 2010: 2276-2279.
- [13] Wang T, Li C. A 0.4-V 1.08mW 12 GHz high performance VCO in 0.18- μm CMOS [C] // Radio and Wireless Symp. USA, Santa Clara, CA, 2012: 207-210.

作者简介:



陈 华 男, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为模拟/射频集成电路设计. E-mail: chenhua@imc.ac.cn.

郭桂良 男, (1981-), 博士, 副研究员. 研究方向为模拟电路及射频前端电路设计.

阎跃鹏 男, (1963-), 研究员, 博士生导师. 研究方向为通信与导航系统、模拟射频集成电路设计.

(上接第 23 页)

- [6] 刘爽, 史国友. 基于加权超球支持向量机算法的超文本分类研究 [J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(1): 71-74.
- [7] Guo L, Xiao H T, Fu Q. New support vector data description fuzzy recognition method [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(7): 1882-1886.
- [8] Lee G H, Taur J S, Tao C W. A robust fuzzy support vector machine for two-class pattern recognition [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2006, 8(2): 76-86.
- [9] Blake C L, Merz C J. UCI repository of machine learning databases [EB/OL]. (1988-07-15). [2014-03-25]. <http://www.ics.uci.edu/mllearn/>.

作者简介:

刘 爽 女, (1977-), 博士, 副教授. 研究方向为智能信息处理. E-mail: dlnuliushuang@126.com.

陈 鹏 男, (1977-), 硕士, 副教授. 研究方向为信息安全.

李锡祚 男, (1963-), 博士, 教授, 硕士生导师. 研究方向为电子商务安全.