

基于 MEMS 传感器惯性测量单元设计与实现

张 瑛,薛 梅,王 阳,成谢锋

(南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210023)

摘 要:随着微电子机械系统(MEMS)技术的发展,出现了大量高性价比 MEMS 传感器,被广泛应用于多个领域。然而惯性测量单元通常包括多个传感器,如三轴 MEMS 加速度、角速度和磁力传感器,这样要求有多个数据通道输出,给原型系统设计和开发带来不便。基于此,文中设计了一种惯性传感板,集成 MEMS 三轴加速度传感器、三轴角速度传感器和三轴磁力传感器,通过单个 UART 串口可以读取9通道数据。经过试验验证,该惯性传感单元能够满足一般原型系统的快速设计和开发。

关键词:三轴加速度传感器;角速度传感器;磁力传感器;惯性测量单元;PCB 板

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)08-0207-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.053

Design and Implementation of MEMS-based Inertial Measurement Unit

ZHANG Ying, XUE Mei, WANG Yang, CHENG Xie-feng

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications,
Nanjing 210023, China)

Abstract: With the development of MEMS technique, more and more MEMS sensors are appearing due to the high performance-cost ratio, which are widely used for a lot of applications. For the inertial measurement unit, it generally includes several kinds of sensors such as 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer, and 3-axis gyroscopes. Thus to use it, multiple channels are required to communicate with them, which adds the implementation complexity. To combat this problem, in this paper, design an inertial measurement unit which assembles 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer, and 3-axis gyroscopes, with only one UART output interface to support the nine channels data transmission. Experiments validate the design and show it fits to rapid design and development of general prototypes.

Key words: 3-axis accelerometer; 3-axis magnetometer; 3-axis gyroscopes; inertial measurement unit; PCB board

0 引 言

当前随着微电子技术进一步发展, MEMS(微机电技术)传感器因其高性价比被广泛应用于娱乐和工业应用中。如当前很多手机中,利用加速度和角速度(又称陀螺仪)传感器来开发游戏,最有代表性的是 iPhone^[1]和基于 Android 平台的手机游戏开发。再如任天堂的 WII 游戏^[2],利用 3 轴加速度传感器和角速度传感器配合摄像头,来实时跟踪人体运动,开发出许多老少皆宜的交互式游戏,如打乒乓球、网球、拳击等健身游戏。除此以外,在人机交互、机器人姿态控制、桥梁检测等领域也有 MEMS 传感器的应用。

惯性测量单元(IMU)主要利用惯性传感器如加

速度传感器和陀螺仪传感器来测量三维空间中的方位。基于这个特性,惯性测量单元在航空航天、机器人、运动捕获等多个领域广泛应用。然而过去由于传感器价格昂贵,只能用于特定领域。而近年来由于 MEMS 传感技术的发展,基于 MEMS 传感器的 IMU 成为可能。由于 MEMS 传感器的高性价比,利用 MEMS 传感器实现的惯性测量单元有可能被更广泛地应用,如玩具市场、人体运动捕获^[3]等。

然而由于 MEMS 传感器主要是国外开发产品,国内工业和学术领域应用还相对较少,尤其是具有数字接口的惯性测量单元,市场上不多见,基于此文中主要介绍利用三轴加速度传感器、三轴角速度传感器和三

轴磁力传感器构成的惯性测量单元,提供统一的串口数据输出,目的是便于研发过程中原型系统的建立和算法设计分析。

1 MEMS 惯性传感器

1.1 三轴加速度传感器

MEMS 加速度传感器类似于弹簧,其中 F 是外力, m 是质量, a 是加速度。由牛顿第二定律和 Hook 定理^[4],有

$$F = ma = kx \quad (1)$$

其中 x 指距离, k 是弹簧弹性范围内固有系数。因而根据测量的距离长度和已知物体质量及弹簧系数,就可以获得加速度 a 的值。

上面介绍的是单轴加速度工作原理,两轴加速度是通过把两个加速度传感器垂直布置得到的。同理,三轴加速度是利用 3 个单轴加速度传感器,相互垂直放置得到。MEMS 加速度传感器虽然可以用于测量运动时的加速度,但用于测量位移距离,又带来很大的误差。在实际应用中,更主要的是利用三轴加速度传感器来测量静态或准静态环境下物体的倾斜角,从而估计物体在三维空间的倾斜程度。但三轴加速度不能完全确定物体在三维空间中的方位,需要磁力传感器来确定方位角,完成三维空间方位确定。

1.2 三轴磁力传感器

磁力传感器主要受地磁场作用,从而输出当前的方位。如磁力传感器应用于罗盘时,通常罗盘位于水平面上。传感器测得地磁场水平分量和,通过计算可得方位角

$$\gamma = \arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (2)$$

这种情况,要求罗盘位于水平面。在实际应用中,往往需要应用到非水平状态,此时就不能利用公式(2)来计算方位角。此时可以利用三轴加速度传感器和三轴磁力传感器,来计算三维空间中的任意方位角。即需要利用倾斜角,来矫正磁力传感器坐标。

假设三轴磁力传感器与加速度传感器位于同样方向,即磁力传感器 $X-Y-Z$ 坐标跟三轴加速度传感器 $X-Y-Z$ 位于同样的坐标。根据三轴加速度传感器的输出可以得到倾斜角。根据三轴磁力传感器输出,公式(3)和(4)给出矫正之后的地磁场向量:

$$H_x = H'_x \cos\theta + H'_y \sin\psi - H'_z \sin\theta \cos\psi \quad (3)$$

$$H_y = H'_y \cos\psi + H'_z \sin\psi \quad (4)$$

1.3 三轴角速度传感器

角速度传感器就是所说的陀螺仪。常用的角速度传感器或陀螺仪成为万向节陀螺仪 (Gimbal Gyroscope),其中三个彼此垂直的环成为万向节。外面万

向节通常固定,而中间的万向节具有 1 个自由度,里面的万向节具有 2 个自由度。这样整个陀螺仪有 3 个自由度。通过对三个环运动测量,可以获得三维空间角速度。

然而由于万向节陀螺仪体积比较庞大,笨拙,束缚了其进一步应用。因而出现了 MEMS 角速度传感器,这种传感器主要基于科氏力工作原理^[5]。通过测量这个科氏力,就可以获得角速度。当获得角速度后,可以计算当前角度为:

$$\theta = \theta_0 + \int \omega dt \quad (5)$$

其中 θ 为计算得到的当前角度, θ_0 为初始角度, ω 为运动过程中的角速度。

2 三维空间方位描述

基于惯性测量单元提供的测量值,可以提供三维空间中的方位。常用的三维空间方位表示方法有欧拉角和四元数方法。此处简单介绍这两种描述方法,并介绍基于异构数据融合算法根据惯性测量单元得到的三维空间方位。

2.1 欧拉角、欧拉矩阵和四元数

根据欧拉角旋转定理^[5,6],任何旋转都可以描述为绕某个轴向的旋转。假设轴向量为 $V = [x, y, z]$,旋转角度为 θ ,此时旋转用欧拉角描述为:

$$x = \theta V \quad (6)$$

欧拉角虽然可以直观描述三维空间中的旋转变换,但不适合描述三维空间中的连续旋转,因而常用欧拉矩阵或四元数来表示。利用旋转矩阵描述三维方位变化会出现万向节死锁问题,也就是说旋转矩阵会出现奇异解,因而出现 hamilton 四元数表示方法。即定义四元素。

$$q = (q_1, q_2, q_3, q_4) \quad (7)$$

此时向量 V_1 绕向量 U 旋转 θ 角后为向量 V_2 ,有

$$V_2 = q V_1 q^{-1} \quad (8)$$

2.2 基于 Gauss-Newton 互补姿态滤波算法

上面介绍了三维空间方位表示方法,下面介绍利用惯性测量单元获得三维空间方位的滤波算法。以 Bachmann 基于 Gauss-Newton 互补姿态滤波算法为例^[7]。算法中利用到的加速度、磁力、角速度均用四元数来表示,具体如下:

加速度单位向量 $h = [0 \ h_1 \ h_2 \ h_3]$,磁力单位向量 $b = [0 \ b_1 \ b_2 \ b_3]$,角速度向量 $w = [0 \ p \ q \ r]$ 。定义测量向量: $\vec{y}_0 = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ b_1 \ b_2 \ b_3]^T$ 。

估测向量:

$$\vec{y}(q) = (\hat{q}^{-1} \hat{m} q, \hat{q}^{-1} \hat{n} q) \quad (9)$$

其中 $\boldsymbol{m} = [0\ 0\ 0\ 1]$ 为地球坐标系中的重力单位向量, $\boldsymbol{n} = [0\ n_1\ n_2\ n_3]$ 为地球坐标系中的地磁场单位向量。算法利用 Gauss - Newton 法最小化判别函数。矫正四元数如下:

$$\Delta \boldsymbol{q}_{\text{full}} = [\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X}^{-1}] \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{q}) \tag{10}$$

其中 \boldsymbol{X} 矩阵被定义为:

$$X_{ij} = \left[\frac{\partial y_i}{\partial q_j} \right] \tag{11}$$

在离散时间域,得到更新最优姿态四元数 $\hat{\boldsymbol{q}}$ 的计算公式如下:

$$\boldsymbol{q}_{n+1} = \boldsymbol{q}_n + \frac{1}{2} \boldsymbol{q}^n \boldsymbol{\omega} \Delta t + \alpha$$

$$[\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X}]^{-1} \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{q}_n) = \boldsymbol{q}_n + k \Delta t \Delta \boldsymbol{q}_{\text{full}} + \boldsymbol{q}_{\text{measured}} \Delta t \tag{12}$$

从而可以得到四元数表示的三维空间方位。

3 惯性测量单元设计与实现

3.1 系统结构

根据上述三轴加速度、三轴磁力传感器和三轴角速度传感器互补特性,设计三维空间具有 6DoF 的惯性测量单元。基于该单元数据输出,利用上述互补姿态算法,可以获得三维空间的方位。测量单元采用 UART 串口输出,满足常用的试验开发环境系统或原型系统开发应用。

图 1 给出了惯性测量单元结构图。该系统包括传感器部分和单片机部分,其中传感器部分包括三轴加速度、三轴磁力传感器和三轴角速度传感器。单片机部分负责采集三种传感器数据,并把转换的数据利用 UART 口发送出去。

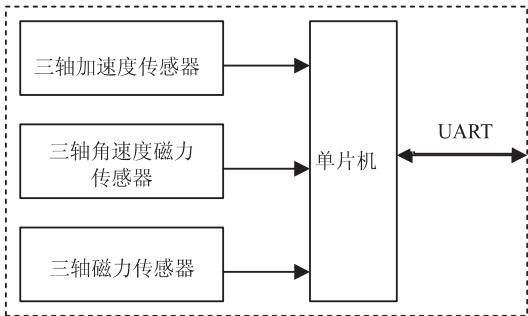


图 1 惯性测量单元系统图

3.2 惯性测量单元设计与实现

图 2 给出了惯性测量单元设计图。其中三轴加速度传感器采用 Analog 公司的低功耗芯片 ADXL345^[8],该芯片供电范围为 2.0 ~ 3.6V,采用 I2C 数字输出,解析为 13 位,输出范围为 $\pm 16g$,体积为 3mm \times 5mm \times 1mm。三轴磁力传感器采用 Honeywell 的低功耗芯片 HMC5883^[9],供电范围为 1.6 ~ 3.3V,支持 I2C 和 A/D

输出,输出范围为 $\pm 8\text{ Oe}$ 。体积为 3.0mm \times 3.0mm \times 0.9mm。三轴角速度传感器采用 InvenSense IDG3205^[10],具有 I2C 和 3 个 ADC 输出。体积为 4mm \times 4mm \times 0.9mm, I2C 输出最快可以达到 400kHz。

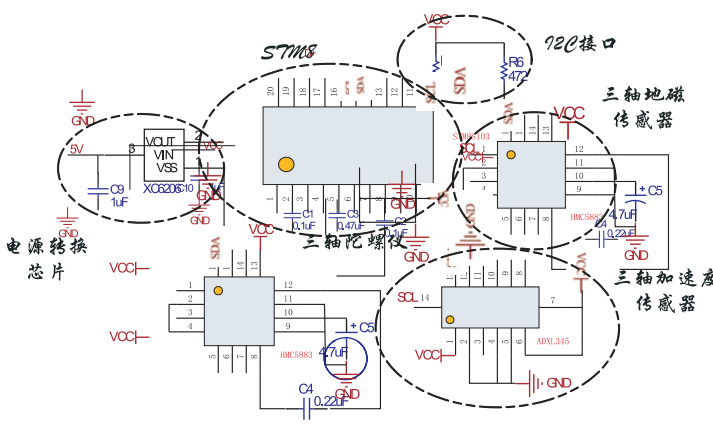


图 2 惯性测量单元设计图

除此以外,选用 ST 公司的 STM8S103 单片机^[11]负责协议转化,把 I2C 数据格式转化为 UART 输出。

图 3 给出了焊接好的实物图,可见设计的板块比一元硬币稍大一点。能够满足各种微小体积应用开发,如飞行器、跌倒监测等。

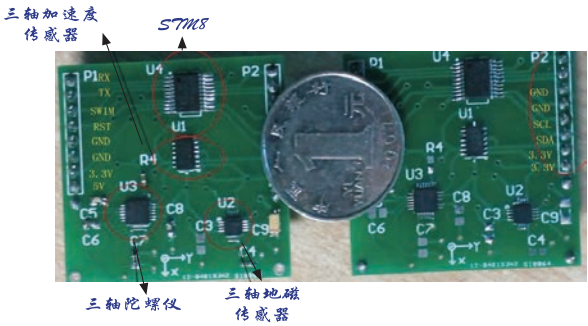


图 3 惯性测量单元实例图

4 系统验证

4.1 采样率设置

根据应用需求,设计的惯性测量单元可以设置高到 200Hz 的采样率。在验证系统中设采定 50Hz,以观察方位测量效果。在 STM8S103 单片机中,有三个定时器,选定定时器 3,设置溢出触发中断。即到达 50Hz 时候,触发中断。

4.2 串口波特率的设置

STM8S103 单片机串口速率设置时,有两个寄存器,即 BRR1 和 BRR2。根据其数据手册规定,必须先写 BRR2,后写 BRR1。其中 BRR1 存放的是分频系数第 11 位到第 4 位;BRR2 存放分频系数第 15 位到第 12 位和第 3 位到第 0 位。

分频系数 = 2M/波特率。

如果需要设置串口波特率为 115200bit/s,此时分频系数为: $2M/115200 = 0x0011$ 。即 BRR2 写入 0x01,在 BRR1 写入 0x01,即可将波特率设置为 115200。

4.3 传感器输出

传感器输出校验,由于 MEMS 传感器都是利用 I2C 口,是二进制数字,实际接收到的数据需要进行修正,来获得对应的角速度、磁力计数器和加速度实际值。以三轴加速度传感器为例。把模块水平放置,那么 X 轴和 Y 轴的度数应该为 0g,Z 轴输出为 1g,获取此时的实际 X、Y 和 Z 轴输出。反过来可以获得 Z 轴为 -1g 时候输出,使 X、Y 轴向接近于 0。根据两次输出,计算 Z 轴 0 点值和刻度,从而可以得到实际 Z 轴加速度值。同理对 X 和 Y 轴进行相类似的修正过程,可以获得这两个轴向实际输出的加速度值。

4.4 三维空间呈现

为了直观感受惯性测量单元方位输出,用 OpenGL^[12]来进行三维空间方位追踪。OpenGL 是计算机图形图像开发常用的工具。此处基于 Microsoft 的 MFC 来开发。

实现的流程图如图 4 所示。即应用程序不断接收串口数据采集到的传感器数据值,根据接收的测量值,实时更新 OpenGL 三维空间图像。当按 ESC 退出键时,结束程序。

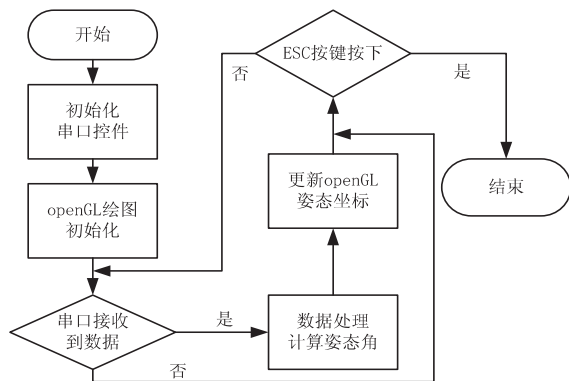


图 4 系统程序实现流程图

4.5 实现代码

(1) 系统初始化。

现在在主对话框的 CCommTestDlg::OnInitDialog() 打开串口,修改成如下代码:

```
// TODO: Add extra initialization here
if(m_ctrlComm. GetPortOpen())
m_ctrlComm. SetPortOpen( FALSE);
m_ctrlComm. SetCommPort(1); //选择 com1
if( ! m_ctrlComm. GetPortOpen())
m_ctrlComm. SetPortOpen( TRUE); //打开串口
Else
AfxMessageBox( " cannot open serial port");
m_ctrlComm. SetSettings( "38400,n,8,1"); //波特率 38400,
```

无校验,8 个数据位,1 个停止位

```
m_ctrlComm. SetInputModel(1); //1:二进制取数据
m_ctrlComm. SetRThreshold(1); //参数 1 表示每当串口接收缓冲区中有多于或等于 1 个字符时将引发一个接收数据的 OnComm 事件
```

```
m_ctrlComm. SetInputLen(0); //设置当前接收区数据长度为 0
```

```
m_ctrlComm. GetInput(); //先预读缓冲区清除残留数据
```

(2) OpenGL 三维呈现。

基本 OpenGL 的函数由几个部分组成,其中 main 函数则为主要的执行函数,用于将各个函数模块结合起来呈现完整功能。Main 函数中程序基本执行过程:

```
glutInit(&argc,argv);
glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE|GLUT_RGB);
glutInitWindowSize(640,480);
glutInitWindowPosition(100,150);
glutCreateWindow("鼠标左键放大右键缩小");
glutDisplayFunc(displayCode); //回调函数
glutKeyboardFunc(myKeyboard);
glutSpecialFunc(specialKey);
glutMouseFunc(myMouse);
myInit();
glViewport(0,0,640,480);
glutMainLoop();
```

这些代码都符合 OpenGL 的最基本制作过程,主要就是利用以上介绍的函数建立了一个三维立方体并设置了回调函数以方便三维立方体重绘。程序的关键部位在于立方体的旋转,其最基本代码如下:

```
glPushMatrix();
rotatex+=0.5; //沿 x 轴方向旋转 0.5 度
glutPostRedisplay(); //glutPostRedisplay() 进行重绘
glPopMatrix();
```

其中 glPushMatrix() 和 glPopMatrix() 函数用于保存原先的各种信息,防止飞机偏移。主要的实现过程就是这样,此后将 OpenGL 和 MFC 进行结合并进行一定的数据处理即可。

4.6 实例呈现

图 5 给出了基于惯性测量单元输出的三维方位变



图 5 惯性测量单元实际输出测试

化图。由连续截图可发现,输出的三维立方体方位随着惯性测量单元不断在变化。上面一排显示左右旋转变化,下面包括惯性测量单元绕中心轴旋转和倾斜变化时的三方位输出。由图中可看到,设计的惯性测量单元,可以满足游戏开发应用或者飞行器开发需求。

5 结束语

文中基于 MEMS 三轴加速度传感器、三轴磁力传感器和三轴角速度传感器设计出惯性测量单元,能够通过一个串口提供这三种传感器 9 个通道数据输出。在此基础上利用 OpenGL 开发出三维呈现系统来验证惯性测量单元的可靠性,满足一般原型系统开发需求。并利用互补姿态滤波算法来说明这三种传感器作为惯性测量单元的工作原理。本惯性测量单元没有集成数据融合算法,下一步开发过程中,将会设计具有数据融合算法的惯性测量单元,能够直接输出三维空间方位数据。

参考文献:

[1] Yu Yan,Zhao Xuefeng,Ou Jinping. A new idea:Mobile structural health monitoring using smart phones [C]//Proc. of Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Dalian,China:[s. n.],2012:714-716.

[2] Yang Chang-Ming,Hu Jwu-Sheng,Yang Ching-Wen,et al.

(上接第 206 页)

```
to CLK2

set_multicycle_path X -1 -hold -start -from CLK1
-to CLK2
```

4 结束语

多周期路径是数字电路中广泛使用的一种设计技术,文中对多周期路径进行了系统的分析研究,按照多周期路径的分类,提出了一套设计实现和施加约束的方法,有助于设计人员减少对多周期路径的误用和错误处理,有助于提升设计效率,缩短设计周期。

参考文献:

[1] IBM. POWER7 and POWER7+ Optimization and Tuning Guide[M]. [s. l.]:IBM,2012.

[2] 张 斌,张松涛. FPGA 同步电路设计技巧[J]. 计算机与网络,2007(1):40-41.

[3] Nekoogar F. Timing Verification of Application-specific Integrated Circuits (ASICs) [M]. [s. l.]:Prentice Hall PTR,

Dancing game by digital textile sensor,accelerometer and gyroscope[C]//Proc. of IEEE Games Innovation Conference. Shenzhen,China:[s. n.],2011:121-123.

[3] 黄得志,陈文元,杨华锋,等. 基于微加速度传感器的无线鼠标的设计[J]. 传感器与微系统,2006,25(1):50-52.

[4] Hook's Law, Simple Harmonic Oscillator[M]. Cambridge, MA,USA:MIT OCW,2010.

[5] Theory of Operation of Angular Rate Sensors[EB/OL]. 2010-07. <http://www.xbow.com/support/Supportpdffiles/RateSensorAppNot.pdf>.

[6] Goldstein H. Classical Mechanics[M]. 3rd ed. United States of America:Addison Wesley,1980:155-161.

[7] Bachmann E R. Inertial and magnetic tracking of limb segment orientation for inserting humans into synthetic environments [D]. California:Naval Postgraduate School,2000.

[8] Digital 3 axis accelerometer[EB/OL]. 2009-01. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf.

[9] 3-Axis Digital Compass IC HMC5883[EB/OL]. 2011-04. <http://www.dfrobot.com/image/data/SEN0073/HMC5883.pdf>.

[10] STM8S103 单片机[EB/OL]. 2012-05. <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/19777256.html>.

[11] 孙科学,张 瑛,刘 艳,等. 基于 Nios II 的音频信号分析仪设计[J]. 计算机技术与发展,2012,22(8):196-199.

[12] OpenGL[EB/OL]. 2002-04. <http://www.opengl.org/>.

1999.

[4] 王志功. 集成电路设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.

[5] Smith D R,Franzon P D. 面向数字系统综合的 Verilog 编码风格[M]. 汤华莲,田 泽,译. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.

[6] IEEE Standard Verilog Hardware Description Language[S]. IEEE P1364-2005,2008.

[7] 虞 蕾,赵宗涛. PSL 逻辑及验证技术研究进展与展望[J]. 计算机应用研究,2010,27(7):2414-2420.

[8] Bhatnagar H. 高级 ASIC 芯片综合[M]. 张文俊,译. 北京:清华大学出版社,2007.

[9] 李昕蔓,易清明,石 敏. 帧间预测模块的静态时序分析[J]. 微计算机信息,2010,26(6-2):105-107.

[10] 夏宏美,李成诗,韩 芳,等. 深亚微米超大规模集成电路的静态时序分析[J]. 微计算机信息,2006(8):215-218.

[11] Synopsys. Synopsys Design Constraints Version 1.8[M]. [s. l.]:Synopsys,2009.

[12] Synopsys. Synopsys Timing Constraints and Optimization User Guide Version D-2010.03[M]. [s. l.]:Synopsys,2010.

基于MEMS传感器惯性测量单元设计与实现



作者：[张瑛](#)，[薛梅](#)，[王阳](#)，[成谢锋](#)，[ZHANG Ying](#)，[XUE Mei](#)，[WANG Yang](#)，[CHENG Xie-feng](#)
作者单位：[南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京, 210023](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)



英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2013(8)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201308053.aspx