

基于卡尔曼滤波的车内空气质量远程实时监测系统^{*}

陶红波¹ 方勇¹ 许广宏² 卜冬曜¹ 金彦亮¹

(1. 上海大学通信与信息工程学院 上海 200444; 2. 泛亚汽车技术中心有限公司 上海 201201)

摘要: 针对车内空气质量远程实时监测,设计了一种基于卡尔曼滤波的车内空气质量远程实时监测系统。系统以 Exynos 4412 微处理器为控制与信号处理核心,通过多个气体传感器采集 PM2.5、PM10、甲醛浓度以及温度、湿度数据,在均值滤波消除数据的脉冲噪声后,利用卡尔曼滤波递归估计出气体最优数值,降低车辆不同状态下对传感器采集数值的精度影响,提高车辆空气质量监测的精度。监测数据在安卓开发板上绘图显示,并发送至移动终端,实现远程实时监测。当超过空气正常阈值,移动端可反向对车内进行声光报警与通风控制。实验表明,该系统能够有效提高污染气体监测的准确性与移动性。

关键词: 车内空气质量;传感器;卡尔曼滤波

中图分类号: TN919.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Remote monitoring system for air quality in vehicle based on kalman filter

Tao Hongbo¹ Fang Yong¹ Xu Guanghong² Bu Dongyao¹ Jin Yanliang¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd, Shanghai 201201, China)

Abstract: In this paper, a remote monitoring system for air quality in vehicle is designed based on Kalman filter. The microprocessor Exynos 4412 is used as the controller and signal processor in this system. The data of PM2.5, PM10, formaldehyde, temperature and humidity are obtained by gas sensors. The mean filtering is used to eliminate pulse noise of data and the Kalman filtering is used to calculate the optimal estimation values. These data draw graphics are displayed on the Android board and sent to mobile terminal for remote real-time monitoring. When the data is more than the normal threshold, the mobile terminal is able to give the acousto-optic alarm and control the car air system. The experimental results show that the system can effectively improve the accuracy of pollution monitoring and mobility.

Keywords: air quality in vehicle; air sensors; Kalman filtering; remote monitoring

1 引言

汽车内空气质量的实时监测为及时掌握车内空气污染状况、改变通风模式等有重要的意义,受到业界广泛关注^[1]。文献[2]设计了基于多传感器的空气质量监测系统获取车内空气质量数据,并通过上位机显示。文献[3]提出了基于数据融合的车内空气质量监测方法,采集的空气质量数据通过离线 MATLAB 算法,获取车内空气质量的监测数据。文献[4]基于 ARM 设计了车内空气污染物自动检测系统。但目前大多数车内空气质量监测系统设计存在以下几个问题:1)监测系统没有考虑传感器受到车内环境、车辆状态、车辆温湿度等的影响,采集的数据可能不具备可比性;2)系统无法进行在线数据处理,监控系统的实时性得不到保障;3)系统没有考虑远程监控和反向控制问题。针对

目前监测系统存在的不足,本文设计一种基于卡尔曼滤波的远程实时监测系统,实现车内污染气体浓度远程实时且高精度监控。

2 系统平台

2.1 系统框架

本系统包括车内端和移动端两部分。车内端以 Exynos 4412 微处理器为控制与信号处理核心,车内端主要包括 7 寸触控显示屏、多个传感器、微处理器、内置存储模块、3G 模块及开发板上嵌入的外围模块组成,开发板运行安卓 4.2 操作系统。移动端采用普通的安卓智能手机。微处理器通过 UART 接口从传感器中读取数据,利用卡尔曼滤波算法分析处理,驱动显示屏进行绘图显示,通过服务器发送至移动端。监测系统硬件框图如图 1 所示,车内端

收稿日期:2016-04

* 基金项目:上海汽车集团科技基金会(2015-1505)资助项目

和移动端用户界面如图 2、3 所示,车内端界面中上面是 PM2.5 与 PM10 的实时数据波形曲线,由于空气成分变化缓慢,效果波形为平缓的直线,中间是 5 个空气数据的显示区,及采集程序的开始与关闭控制按钮,最后是用于本地保存和发送远程端的按钮。移动端分为两部分,首先是接收的 5 种数据在 UI 控件上显示,其次为声光报警和风扇循环控制按钮。声光报警模块采用车内端上的蜂鸣器与 LED 灯,通过改变模块的引脚电平,控制声光报警模块的开启与关闭,由于反向控制最主要过程是发出改变通风模式的信号到 T-box 端,驱动空调系统通风。系统中获取改变通风



图 3 移动端操作界面

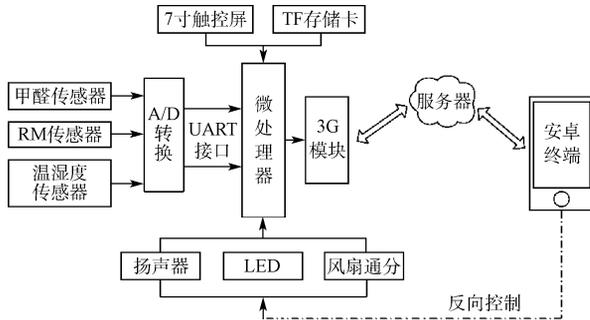


图 1 监测系统硬件框图

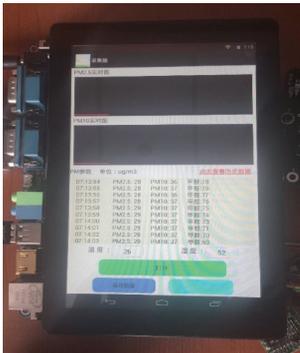


图 2 车内端操作界面

的信号后,使用 5 V 风扇代替车内的空调系统,开启风扇增加空气流动。

2.2 检测传感器

甲醛传感器采用 ZE08-CH₂O 型电化学甲醛模组,内置温度传感器,可进行温度补偿。传感器将空气浓度转化为微弱电动势信号,并通过放大电路和 A/D 电路转换

成数字信号。传感器的 7 个引脚作为输出,输出方式包括 DAC 模式与 UART 模式,使用引脚 P5 和 P6 作为 UART 输出,分别与单片机的 CON 串口的引脚 3 和引脚 4 连接。与微处理器通信方式分为主动上传式和主机查询式^[5],本系统设置为主动上传式,采集信号间隔设置为 1 s,通信协议命令格式如表 1 所示。

PM 传感器采用型号 SDS011 的激光传感器,采用激光检测原理,当激光照射到通过检测位置的颗粒物时会产生微弱的光散射,在特定方向上的光散射波形与颗粒直径有关,通过不同粒径分类统计可以得到不同粒径的颗粒物数量浓度。采集空气中 0.2~10 μm 悬浮物浓度,同时检测 PM2.5 与 PM10 浓度。响应速度小于 10 s,稳定性高,使用引脚 2 和 5 作为 PWM 输出。引脚 6 和 7 作为 UART 输出^[6]。采集间隔设置为 1 s,上传至上位机的数据为 10 Byte/帧,通信协议命令格式如表 2 所示。

表 1 甲醛传感器通信协议

| 起始位 | 命令 | 气体浓度高位 | 气体浓度低位 | 保留 | 保留 | 气体浓度高位 | 气体浓度低位 | 校验位 |
|------|------|--------|--------|------|------|--------|--------|-----|
| 0xFF | 0x86 | 参数 | 参数 | 0x00 | 0x00 | 参数 | 参数 | 校验和 |

表 2 PM 传感器通信协议

| 报文头 | 指令号 | PM2.5 低字节 | PM2.5 高字节 | PM10 低字节 | PM10 高字节 | 保留 | 保留 | 校验位 | 报文尾 |
|------|------|-----------|-----------|----------|----------|------|------|-----|------|
| 0xAA | 0xC0 | 参数 | 参数 | 参数 | 参数 | 0x00 | 0x00 | 校验和 | 0xAB |

车内空间狭小封闭,挥发性污染气体的有害程度受到温湿度的影响,故系统采用 DHT11 型传感器获取温湿度。

传感器连接电路图如图 4 所示。

引脚 2 为数据总线,与微处理器的 I/O 端相连,通过

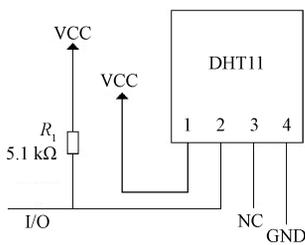


图 4 DHT11 传感器连接电路图

外接一个约 5.1 k 的上拉电阻控制电压,当通信开始时,传感器拉高 R1 电阻保持高电平,检测外部主机的查询信号,主机的 I/O 端设置输出低电平保持 18 ms,发出查询信号,传感器随之输出 80 ms 低电平作为应答信号,紧接着输出 80 ms 高电平通知主机准备接收数据,完成数据传输。每个通信周期发送 40 bit 数据,高位先出。

所述传感器在采集精度和反应速度上均能满足要求,使用 UART 与 Android 开发板进行通信,通讯端口设置为波特率:9 600 bps,数据位:8,停止位:1,校验位:None。

2.3 软件设计

监测系统的车内端与移动端均为基于安卓下的 Java 编程,车内端由主程序和多个线程组成。功能上包括系统初始化、交互显示程序、数据采集程序、卡尔曼算法程序、远程发送程序、声光报警程序组成。通过调用多个线程同时进行。移动端包括交互显示程序、数据接收程序、反向控制程序。其程序主要流程如图 5 所示。

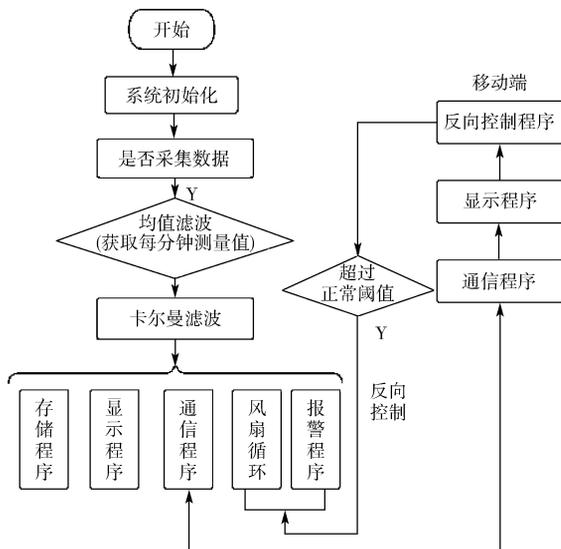


图 5 系统程序流程

车内端程序运行步骤如下:

1) 系统硬软件初始化,硬件初始化包括电源上电、Exynos 4412 芯片启动、时钟控制、中断控制、串口、3G 通信模块、寄存器、定时器等。软件初始化包括传感器采集类、数据格式及算法处理类、无线通信类、UI 界面启动。

2) 数据采集,分别调用 3 个线程实时扫描监听 3 个串口。线程扫描后均休眠 1 000 ms,通过休眠减少占用系统资源,每个线程休眠时间与其传感器采集数据间隔吻合,从而达到实时采集功能,收到传感器数据后需进行初步格式整理,将字节流格式转换成十进制。

3) 信号分析处理,将 3 种污染气体数据分别进行信号处理,每 5 s 采集的数据分成 5 组,进行均值滤波,消除由电磁干扰引起的幅值较大、瞬时的脉冲信号和高速移动下连接不稳定引起的高斯噪声。利用卡尔曼滤波分析实现递归估计,得出气体浓度最优估计值,使其无限接近气体浓度真实值。

4) 最后分别调用线程完成无线发送移动端和 PM 颗粒物数据实时绘图显示。另外,用户可触发本地存储与查看历史数据等监听事件^[7]。

移动端接收车内端空气质量数据,在 UI 界面上更新空气浓度数值。当空气参数超过阈值时,可反向对车内端声光报警与通风控制,flag1 与 flag2 分别为声光报警与风扇循环的控制标志位,当用户按下声光报警或风扇循环按钮时,按钮触发监听事件,将标志位设置为“true”,写入移动端 socket 通信对象的输入流,发起服务请求。

车内端接收到移动端控制指令时,驱动声光报警模块或风扇模块,实现报警提示或通风控制。

服务器与移动客户端通信程序采用基于 TCP 协议的 Socket 方式^[8],服务器首先创建一个 ServerSocket 对象并且指定端口号,调用 Accept 函数监听客户端的连接请求。移动端根据指定的 IP 地址和端口号创建 Server 对象,通过 TCP 三次握手建立连接。

完成连接后进行双向通信,将空气数据和反向控制指令分别写入输入输出流,完成数据交互。

3 信号分析处理

在监测的过程中,传感器采集的精确度与反应灵敏度受到汽车流动风速、温度、湿度的影响^[9-10],通过不同风速对 SDS001 甲醛传感器采集数据,以及不同湿度对 ZE08-CH2O 型甲醛传感器数据分析,实验结果如表 3 所示。

表 3 传感器特性分析

| | 空气 | 0 | 200 | 500 |
|-----------|-------|--------|--------|--------|
| | 流量 | (sccm) | (sccm) | (sccm) |
| SDS001 | PM2.5 | 37 | 41 | 91 |
| | PM10 | 45 | 60 | 110 |
| ZE08-CH2O | 湿度 | 25RH% | 40RH% | 60RH% |
| | 甲醛值 | 23 | 30 | 44 |

表 3 中,气体参数单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,空气流量单位为 sccm。其中单位时间内空气流量变化对颗粒物采集影响较大,在 500 sccm 时,颗粒物浓度采集值增大了两倍,当传

感器本身或环境因素突然改变造成采集误差时,卡尔曼能够根据当前估计值修正未来估计值的误差。降低外部误差干扰。

在许多应用传感器的领域,精度低一直是影响准确性的一个重要原因,例如定位导航领域中存在地理位置传感器精度不足,陈维克等人采用卡尔曼滤波处理提高定位精度^[11];另外李婷婷等在 RSSI 值和三边测量法的定位基础上,利用卡尔曼滤波实现建筑物内人员精确定位^[12]。

本文使用卡尔曼滤波对风速、温湿度造成的传感器精度影响作优化处理,提高采集精确度。卡尔曼滤波相比较其他精度算法,如维纳滤波与温度补偿算法等,卡尔曼具有更高的反应速度和稳定性^[13]。系统主要对 PM2.5、PM10、甲醛 3 种污染气体分别使用卡尔曼滤波。在此之前,通过均值滤波消除数值较大的瞬时脉冲噪声。具体实现过程如下:

首先,因为传感器均设置采集间隔为 1 000 ms,将每种污染气体 5 s 中采集的五组浓度值通过均值滤波处理,消除脉冲干扰和高斯噪声。将平均值作为卡尔曼处理中离散系统一个时刻的观测值。 $z(k, i)$ 表示第 k 时刻第 i 个采集的数据。均值滤波表达式如下:

$$z(k) = (z(k, 1) + z(k, 2) + \dots + z(k, n)) / 5, n = 5 \quad (1)$$

其次,引入一个随机离散线性系统:

$$\mathbf{X}(k) = \Phi(k)\mathbf{X}(k-1) + \Gamma(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k) \in R^n$ 为 k 时刻的状态变量, $\Phi(k) \in R^n$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{u}(k)$ 为输入或控制信号, $\Gamma(k)$ 为控制加权矩阵, $\mathbf{w}(k)$ 是过程噪声,假定符合高斯分布的白噪声。

在本系统中,系统中未引入输入或控制变量,故状态预测方程可视作为:

$$\mathbf{X}(k | k-1) = \Phi(k)\mathbf{X}(k-1 | k-1) + \mathbf{w}(k) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}(k | k-1)$ 是 k 时刻状态预测值, $\mathbf{X}(k-1 | k-1)$ 是 $k-1$ 时刻最优估计值。

传感器一般测量方程为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Z}(k) \in R^m$ 为经过均值滤波后 k 时刻的观测向量, \mathbf{H} 为系统的测量矩阵, $\mathbf{v}(k)$ 为测量噪声,系统中 $\mathbf{Z}(k)$ 当 $k=0$ 为系统采集, $k>0$ 为测量更新值^[14]。

协方差预测方程:

$$\mathbf{P}(k | k-1) = \Phi(k)\mathbf{P}(k-1 | k-1)\Phi'(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (5)$$

最后,输出当前时刻的系统估计值并更新卡尔曼增益和协方差。

$$\mathbf{X}(k | k) = \mathbf{X}(k | k-1) + \mathbf{K}_g(k)(\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\mathbf{X}(k | k-1)) \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_g(k) = \mathbf{P}(k | k-1)\mathbf{H}' / (\mathbf{H}\mathbf{P}(k | k-1)\mathbf{H}' + \mathbf{R}(k)) \quad (7)$$

$$\mathbf{P}(k | k) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_g(k)\mathbf{H})\mathbf{P}(k | k-1) \quad (8)$$

结合上一时刻的最优估计值进行卡尔曼滤波处理。得到该时刻的最优估计值,通过迭代运算获取每个时刻的最优估计值,从而提高空气参数的监测准确度。其数据处理流程如图 6 所示。

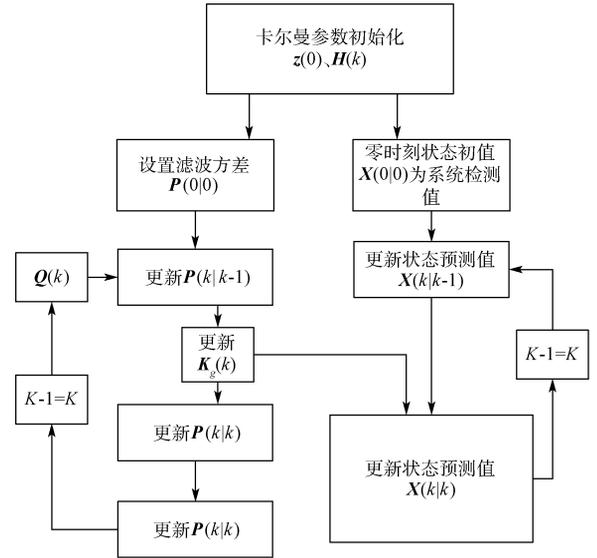


图 6 数据处理流程

算法过程用 Java 语言进行实现,分别对每个传感器数据用卡尔曼滤波处理,矫正由复杂环境下引起的测量误差。实验证明,本系统使用卡尔曼滤波有效减少环境引起的监测误差,提高空气参数的准确性。

4 实验验证

为了验证该监测系统的准确度,以及验证卡尔曼滤波处理对于提高空气数据精确度的作用。在本实验中将车内检测端置于汽车内部进行检测,开发板安装两个检测安卓程序,其中一个程序为普通采集,另一个增加卡尔曼滤波程序进行采集。在 1 min 时间内,分别打开两个程序进行采集。实验中采用市场上专业的空气质量检测仪同时进行数据采集。并将检测仪采集的数据作为对照组。

该实验测试汽车 3 个内部不同环境,分别为汽车封闭静止、汽车封闭下高速行驶、汽车通风下高速行驶。不同于静止状态,高速行驶中汽车引擎驱动和尾气燃烧产生污染颗粒物,3 个环境下可进行对比观察。本次实验测试系统中 PM2.5、PM10 及甲醛 3 种气体。每个测试环境下对 3 种气体分别测量 3 次数据,对 3 次结果求其平均值,记录数据,最后与对照组进行对比,实验数据如表 3 所示。

测量相对误差公式如下^[15]:

$$e = \frac{|R-r|}{r} \times 100\% \quad (9)$$

式中:针对某一项污染气体数值, R 为监测系统所测的数值, r 为专业检测仪检测的数值, e 为监测系统测量的相对误差。

表 4 实验数据中,气体浓度数值单位均为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。卡尔曼和普通分别代表通过卡尔曼滤波处理与普通采集。通过相对误差公式可得,卡尔曼滤波处理后的系统与普通系统相比,平均相对误差减少了 4.53%。达到 8.3%。由

于高速行驶通风下空气流动大,容易导致测量误差,故在通风下行驶卡尔曼效果不太明显,但在封闭静止和封闭行驶中,卡尔曼滤波处理后气体浓度更接近专业检测仪的数据,能够准确监测车内主要污染物浓度。

表 4 实验数据

| 检测方法 场景 | PM2.5 | | | PM10 | | | 甲醛 | | |
|------------|-------|-----|-----|------|-----|-----|----|-----|-----|
| | 普通 | 卡尔曼 | 检测仪 | 普通 | 卡尔曼 | 检测仪 | 普通 | 卡尔曼 | 检测仪 |
| 封闭静止 | 41 | 45 | 50 | 68 | 71 | 80 | 35 | 40 | 46 |
| 封闭行驶 | 61 | 57 | 50 | 105 | 109 | 112 | 43 | 42 | 38 |
| 通风行驶 | 35 | 35 | 38 | 64 | 63 | 70 | 28 | 30 | 26 |

5 结 论

实验在 3 种不同车内环境下测试,通过卡尔曼滤波处理采集与普通采集对比,污染气体数据浓度值与专业检测仪的相对误差减少至 8.3%,由此表明,移动端能够准确监测空气五种数据且有效提高监测浓度的准确性,超过阈值可反向报警与通风控制,系统界面友好、运行稳定性高,具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 陈小开,程赫明,罗会龙. 载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4599-4604.
- [2] 赵越. 车内空气质量与有害气体探测方法的研究[D]. 长春:中国科学院研究生院,长春光学精密机械与物理研究所,2012.
- [3] 杨莉,王磊,于深华. 基于数据融合的车内空气质量控制系统的研究[J]. 机电一体化, 2009, 15(5): 46-49.
- [4] 刘侃,吴广. 基于 ARM 的车内空气污染物自动检测系统设计[J]. 硅谷, 2013(1):45-46.
- [5] WU W H, JIANG J, LIU W J, et al. A sequential converted measurement Kalman filter in the ECEF coordinate system for airborne Doppler radar [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 25(1): 11-17.
- [6] 焦尚彬,宋丹,张青,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5):436-442.
- [7] 章隆彬,邱恒,马国荣. 基于 Android 操作系统的 XK-I 教育机器人平台设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8):50-53.
- [8] 许文勇. 基于 Socket 的网络编程技术及其实现[J]. 无线互联科技, 2014(5):17-17.
- [9] 梁宏增. 流速和湿度对气体传感器及电子鼻的影响研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [10] 唐芸. 电子鼻气敏传感器的温度调制特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [11] 陈维克,李文锋,首珩,等. 基于卡尔曼滤波的 WSNs 节点定位研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(8):112-116.
- [12] 李婷婷,韩成浩. 基于卡尔曼滤波的建筑物内人员定位系统研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2015(3): 68-70.
- [13] 王建平,徐恒,李奇越. 基于卡尔曼滤波的矿井移动节点定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2):120-126.
- [14] 徐梓皓,周召发,孙立江. 基于卡尔曼滤波器的姿态角测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(1): 1-4.
- [15] 高小强,刘洪英,朱兰,等. 基于霍尔传感器微阵列的呼吸频率检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(5):121-123.

作 者 简 介

陶红波, 1992 年出生, 上海大学通信与信息工程学院在读硕士, 主要研究方向为无线传感网络下嵌入式研究。
E-mail:1125175623@qq.com

方勇, 1964 年出生, 上海大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理, 盲信号处理和智能信息系统等。
E-mail:yfang@staff.shu.edu.cn

许广宏, 工学硕士, 上海泛亚汽车技术中心有限公司, 主要研究方向为车身电子系统等。
E-mail:jixixgh@gmail.com

卜冬曙, 1992 年出生, 上海大学通信与信息工程学院在读硕士, 主要研究方向为移动通信等。
E-mail:shiepbu@163.com

金彦亮, 博士, 上海大学副教授, 主要研究方向为宽带无线通信、无线视频传输、无线传感器网络、物联网。
E-mail:wuhaide@shu.edu.cn