

# 全双工系统的全数字自干扰消除

付亚飞, 周 荣

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**随着无线技术的快速发展,无线频谱资源日益短缺,提高无线频谱利用率已经成为目前无线通信领域的研究热点之一。全双工中继系统因其具有更广的覆盖范围、更大的系统吞吐量以及更有效的频谱效率而受到广泛关注。但在全双工中继技术应用中,通信的同时与同频特性使得中继站出现信号泄露,从而导致了严重的环路自干扰问题,严重影响了通信系统性能的发挥。基于现有全双工系统自干扰消除方案,在分析发射机与接收机电路相位噪声、非线性失真和量化噪声的基础上,采用辅助接收机电路重构射频(Radio Frequency, RF)自干扰信号的副本,在数字域中抵消自干扰信号和发射机的损伤。仿真实验结果表明,所采用的全数字消除方法能够有效消除 FD 系统的自干扰,显著提升系统效能。

**关键词:**全双工;自干扰消除;数字消除;残留自干扰

**中图分类号:**TP302.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2017)04-0176-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2017.04.039

## All-digital Self-interference Cancellation in Full-duplex System

FU Ya-fei, ZHOU Rong

(College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and  
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** With the rapid development of wireless technology, shortage of wireless spectrum becomes more and more prominent and thus effective utilization of radio spectrum is a hot spot for investigation in current wireless communications. FDR (Full Duplex Relay) systems have paid more attentions due to its wider coverage, larger system throughput and more effective spectrum efficiency. However, the leakage of signal appears because of characteristics in same time and frequency in applications of FDR technology, which leads to serious loop interference and prevents the communication system from its normal performances. On the bases of existing self-interference of FD system cancellation scheme and analysis on transmitter and receiver circuit phase noise, and nonlinear distortion and quantization noise, a copy of self-interference signal from auxiliary receiver circuit reconfiguration RF (Radio Frequency) has been employed to counteract self-interference signal and transmitter damage in the digital-domain. Simulation results show that the use of all-digital self-interference method can effectively eliminate self-interference of FD system and promote the system performance.

**Key words:** FD; SIC; digital cancellation; residual self-interference

## 0 引言

目前常见的全双工通信系统有时分双工(Time Division Duplex, TDD)和频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)。由二者的工作原理可知,时分双工虽然同频但却不同时,频分双工虽然同时却不同频,它们都没有真正的实现同时同频,从而极大地浪费了资源。近年来,许多学者开始研究一种全新的通信系统——同时同频的全双工通信系统,即在单一频率下(上、下行链路的带宽相同)<sup>[1]</sup>,同时接收信号并发送信号。

该技术既可以解决时分双工信道不一致的问题,

又可以缓解频分双工系统带宽资源浪费的问题,从而得以节省时间和频谱资源,提高系统性能。相对于 FDMA 系统而言,同时同频全双工系统的带宽是其一半,而信道容量却比 TDMA 增加了一倍<sup>[2]</sup>。在全双工系统中,信号收发器的发射天线和接收天线间距离不大,使得接收到的自干扰信号的功率有可能是有用信号功率的几倍<sup>[3]</sup>,对于一个同时同频的全双工系统而言,要想实现信号的正常接收,必须有效抑制自干扰信号。

最近的国内外研究表明,可以通过研究不同的系

收稿日期:2016-05-06

修回日期:2016-09-08

网络出版时间:2017-03-07

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2014AA01A705)

作者简介:付亚飞(1991-),男,硕士研究生,研究方向为协作通信技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170307.0920.020.html>

统架构和自干扰消除技术来消除自干扰信号。使用数字域减值抑制技术,即减轻收发机的相位噪声和非线性效应对自干扰消除性能的影响。利用独立的振荡器和接收路径对全双工系统中的相位噪声进行估计和抑制<sup>[4]</sup>。改进的数字消除技术与非线性抑制算法提出通过抑制收发机的非线性来抑制自干扰信号<sup>[5]</sup>。研究表明,即使是使用非常复杂的技术,也只能相应地抑制大约2 dB的相位噪声,因此全双工系统的相位噪声抑制仍然是一个相当大的问题。

在广泛研究全数字化自干扰消除技术的基础上,将 SISO (Single-In-Single-Out)-FD 数字自干扰消除进化扩展至 MIMO (Multiple-In-Multiple-Out)-FD 数字自干扰消除,与射频和模拟消除技术<sup>[6]</sup>相比,有效

抑制了发射机和接收机的自干扰。在系统架构中加入了辅助接收机链路,可重建包括所有发射机损伤的数字域的发射射频自干扰信号副本,可作用于辅助和普通接收机链之间共享的振荡器以减轻接收机的相位噪声,以抵消数字域中自干扰信号和发射机损伤。此外,采用辅助接收机链和普通接收机链共享一个共同振荡器的方法,可缓解接收机的相位噪声,有效减轻收发机的损伤<sup>[7]</sup>,降低技术实现的复杂度。

## 1 系统模型

给出的系统模型详细说明了全双工收发机的结构。图1为基于全双工收发机的全数字自干扰消除技术的框图。

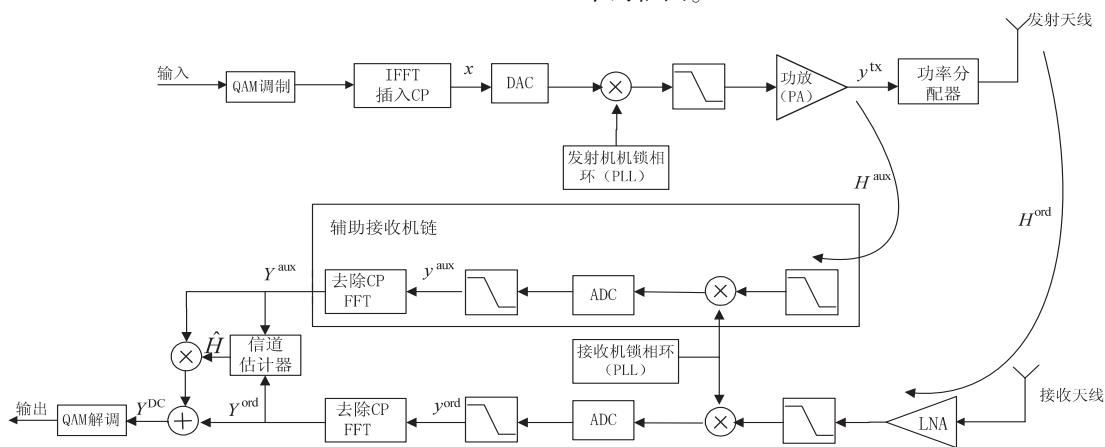


图1 全数字自干扰消除的框图

如图1所示,该收发机由普通的收发链路和消除自干扰的辅助接收机链路构成。在发射机一侧,输入信号经QAM(正交幅度调制)后上变频到射频频率。随后将上变频信号过滤、放大,通过发送天线发送。一部分放大信号反馈到辅助接收机链。在辅助接收机输入端的信号功率是由功率分配器控制的,因此,辅助接收机链路上的低噪声放大器(LNA)可忽略。反馈信号和普通接收机接收的信号下变频到基带后通过辅助接收机和普通接收机进行区分。辅助接收机链路和普通接收机链路是相同的,并共享相同的锁相环(PLL)。功率放大器(功放)到辅助接收机的无线信道的传递函数表示为 $H^{\text{aux}}$ ,无线自干扰信道传递函数的频域表示为 $H^{\text{ord}}$ 。

输出信号反馈到信道估计模块,以获得普通信道和辅助信道的估计比值( $H^{\text{ord}}/H^{\text{aux}}$ )。信道估计所使用的传输时域正交训练序列位于每个数据帧的开始。该数字干扰消除的过程是:估计信道的输出信号与辅助接收机的输出信号相乘,并从接收到的信号中减去这个相乘的结果,得到无干扰信号。

文中考虑了主要的发射机损伤和接收机损伤,即发射机和接收机的相位噪声、发射机和接收机的非线性

性模数转换器(ADC)的量化噪声以及接收机的高斯噪声。因为从功放(PA)处获得的反馈信号中包含了发射机的减损副本,所以该架构可以有效减轻发射机的所有损伤。此外,通过共享辅助接收机链路和普通接收机链路之间的锁相环可以缓解接收机的相位噪声。

考虑发射机的相位噪声 $\varphi^{\text{tx}}$ 和功放的非线性失真信号 $d^{\text{tx}}$ ,则发射信号在功放处的输出信号可以表示为:

$$y^{\text{tx}}(t) = x(t)e^{j(2\pi f_c t + \varphi^{\text{tx}}(t))} + d^{\text{tx}}(t) \quad (1)$$

其中, $x$ 为发射的基带信号; $d^{\text{tx}}$ 为由功放导致的发射机的非线性失真信号; $f_c$ 为载频。

辅助接收机输出的数字基带信号 $y^{\text{aux}}$ 可表示为:

$$y_n^{\text{aux}} = (y_n^{\text{tx}} * h_n^{\text{aux}})e^{j\varphi_n^{\text{rx}}} + q_n^{\text{aux}} + z_n^{\text{aux}} \quad (2)$$

其中, $*$ 表示卷积; $n$ 表示采样时间; $y_n^{\text{tx}}$ 为 $y^{\text{tx}}(t)$ 的数字基带表示; $h_n^{\text{aux}}$ 表示从功放的输入端与辅助接收机输入端之间的有线信道; $\varphi^{\text{rx}}$ 表示接收机的相位噪声; $q^{\text{aux}}$ 表示辅助接收端ADC的量化噪声; $z^{\text{aux}}$ 表示辅助接收机的高斯噪声。

类似地,数字基带信号 $y^{\text{ord}}$ 在普通接收机处的输出信号可以表示为:

$$y_n^{\text{ord}} = (y_n^{\text{ix}} * h_n^{\text{ord}}) + d_n^{\text{ix}} + q_n^{\text{ord}} + z_n^{\text{ord}} + s_n^{\text{soi}} \quad (3)$$

其中,上标 ord 表示普通接收机的链路信号; $d^{\text{ix}}$ 表示由低噪声放大器导致的接收机的非线性失真信号; $s^{\text{soi}}$ 表示接收到的有用信号。

经过数字自干扰消除后的信号  $Y^{\text{DC}}$  可以表示为:

$$Y_k^{\text{DC}} = Y_k^{\text{ord}} - Y_k^{\text{aux}} H_k \quad (4)$$

$$\hat{H}_k = \frac{Y_k^{\text{ord}}}{Y_k^{\text{aux}}} \quad (5)$$

其中,大写字母表示相应的频域信号; $k$ 表示某一个子载波; $\hat{H}$ 表示用最小二乘法(LS)计算的普通信道和辅助信道( $H^{\text{ord}}/H^{\text{aux}}$ )的比值。

## 2 全数字自干扰消除方案

文中研究的数字自干扰消除技术的主要思想是:获得所传送的包括所有发射机损耗的自干扰信号的副本,并在接收机的数字域自干扰消除模块中使用此副本信号。假设辅助接收机链和普通接收机链是没有损耗的,那么该技术架构能够完全消除自干扰信号和发射机损伤。但是由于接收机损伤和信道估计误差的存在,不可能完全消除自干扰。实际上,接收机损伤和信道估计误差还会引入某些限制自干扰消除效果的因素。

为了更加清楚地了解各种损伤的影响和所涉及的权衡,对损伤因素进行了整体性的研究分析。在分析中,所有发射机损伤都是整体分析的,只有接收机的损伤是单独分析的。在分析过程中,个体损伤、辅助信道传递函数和普通信道传递函数假设都是已知的,并单独研究了信道估计误差的影响。研究分析是基于具有 64 路子载波(频率 20 MHz)的 OFDM 系统,载波频率设定为 2.4 GHz。

本节将研究数字消除技术对自干扰消除的总的性能效果,包括接收机和收发机的所有损伤,系统中影响残留自干扰功率的所有设计权衡和因数都会加以讨论。影响残留自干扰功率的因素包括:每一个接收机的损伤功率、接收到的自干扰功率、决定非视线传输功率大小的莱斯因子、自干扰信道的特性(比如:相干带宽、多普勒频率等)。在实际的全双工系统中,上述四个参数并不是相互独立的。自干扰信道的莱斯因子与所消除的自干扰信号功率成反比<sup>[8]</sup>。因此,为了得到更加可靠的实验结果,在整体的研究中,不能忽略 4 个参数间的相关性。

文中给出的所有系统参数是基于实际的收发机及实时实验结果。发射机和接收机的损伤数据<sup>[9]</sup>如下:

(1)假设发射机和接收机相位噪声的总功率为-40 dBm; 万方数据

(2)假设 ADC 的量化位数为 14 位;

(3)接收机输入功率电平范围为-25 ~ -5 dBm, 高斯噪声功率为-90 ~ -72 dBm;

(4)发射机和接收机三阶失真功率电平是-45 dB 线性功率电平的分量。

该系统进行仿真的信道模型是 5 Hz 的多普勒频率信道,训练开销假设为 4%。

根据系统模型,提出三种实际情况下的被动抑制技术:

(1)使用天线间隔为 35 cm 的全向天线和 20 dB 的自干扰信道莱斯因子,可以被动抑制 25 dB 的自干扰<sup>[10]</sup>;

(2)发射机和接收机的天线使用吸收材质的定向天线<sup>[9]</sup>,且自干扰信道莱斯因子为 0 dB 时,可以被动抑制 25 dB 的自干扰;

(3)使用可重构定向天线<sup>[11]</sup>,且自干扰信道的莱斯因子为 0 dB 时,最高可以被动抑制 25 dB 的自干扰。

三种方案提出的自干扰消除技术都能抑制相位噪声和非线性效应,使得残留自干扰功率低于接收机的噪底。因此,和以往的数字消除技术相比,文中所研究的数字消除技术不再受相位噪声和非线性效应的限制。在第一种方案中,由于接收的自干扰功率相对较高,比起其他噪声,接收机的高斯噪声是主要的性能限制因素。然而,高斯噪声随着发射功率的减小而减小,从而降低了残留自干扰功率。因此,这种方案中消除的被动抑制量相对较低,所以该方案更适合应用在发射功率较低的系统中。此外,简单的模拟消除技术(例如 Balun 技术<sup>[12]</sup>)可用于缓解该情况下的高斯噪声的影响。在第二和第三种方案中,高斯噪声也不再是主要的限制因素。消除了接收机的高斯噪声,衰落效应导致的信道误差将会是下一个自干扰消除技术中的瓶颈。然而比起接收机的其他损伤,有很多消除衰落效应的方法。例如,在不同的数据帧之间内插信道;在 OFDM 码元内插入追踪信道变化的导频信号;使用短帧;用插入导频信号的帧代替插入循环前缀的帧。在基于导频的帧结构中,导频子载波插入到 OFDM 码元内,以便在接收端进行信道估计。这样的导频子载波能够快速追踪到信道的变化。

## 3 仿真分析

基于上述三种方案情形,分析了全数字消除技术下的系统可达速率,并与传统的半双工系统的速率进行了比较。假设全双工和半双工系统中收发机的所有损伤都是存在的,信号的发射功率分别为 20 dBm 和 5 dBm。则获得的全双工和半双工速率表达式为:



$$R^{FD} = E[\log_2(1 + \text{SINR}^{FD})]$$

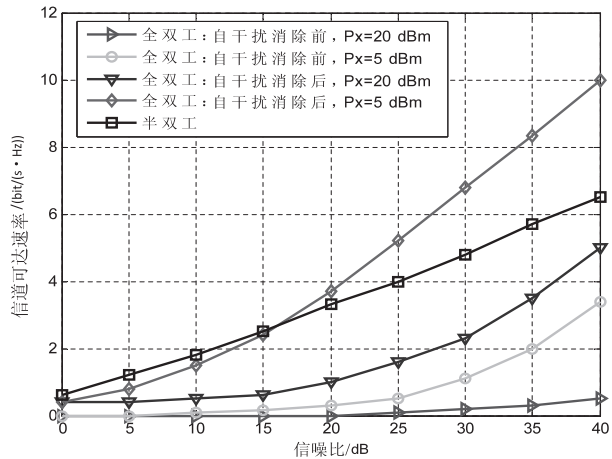
(6)

$$R^{HD} = \frac{1}{2} E[\log_2(1 + \text{SNR}^{HD})]$$

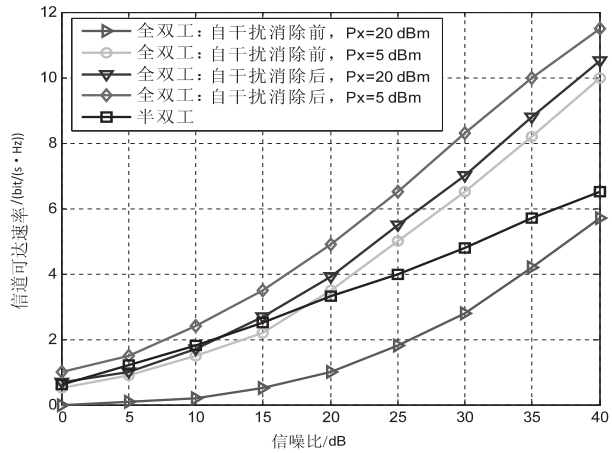
(7)

其中,  $E[\cdot]$  为期望;  $R^{FD}$ 、 $R^{HD}$  分别为全双工系统与半双工系统的可达速率;  $\text{SINR}^{FD}$  为全双工系统中的信干噪比(有用信号与干扰信号加噪声的比值);  $\text{SNR}^{HD}$  为半双工系统中的信噪比;  $1/2$  为半双工系统中的速率系数。

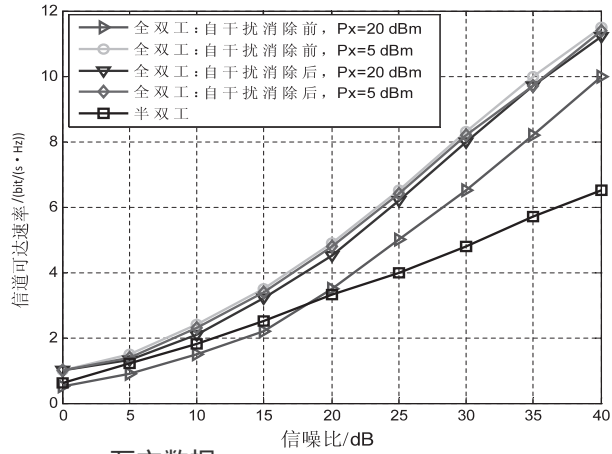
图2反映了三种不同的被动自干扰抑制方案下系统的可达速率与信噪比之间的变化关系图。



(a)第一种方案下信道可达速率随信噪比变化的仿真图



(b)第二种方案下信道可达速率随信噪比变化的仿真图



(c)第三种方案下信道可达速率随信噪比变化的仿真图

图2 系统的可达速率与信噪比变化仿真图  
从这些仿真结果中可以得出以下结论:

(1)三种方案对自干扰消除的效果明显优于传统的数字消除技术,除了第三种方案中发射功率为5 dBm 时与传统的数字消除技术效果相同。第三种方案中,发射功率为5 dBm 且被动抑制量为60 dB 时,只需要消除35 dB 的自干扰信号就能达到接收机的自干扰噪底。消除35 dB 的自干扰对于传统的数字消除技术来说是很容易实现的。但是随着发射功率的增加,文中所研究的数字消除技术将能够更好地抑制自干扰,而传统的数字消除技术将无法抑制更多的自干扰。

(2)图2(a)表示被动抑制量较低的第一种方案,文中的全数字自干扰消除技术只能在低发射功率的应用中使用。

(3)在第二种和第三种方案中,相比于传统的半双工系统,全数字自干扰消除技术明显提高了信号的传输速率,尤其在信噪比值较高的情况下,效果更加显著。

4 结束语

针对全双工技术发展中遇到的技术瓶颈,得出收发天线间存在的自干扰是全双工通信系统面临的主要挑战。通过不断改进全双工消除技术,有效抑制了发射机和接收机的自干扰。在系统架构中加入了辅助接收机链路,可重建包括所有发射机损伤的数字域的发射射频自干扰信号副本,可作用于辅助和普通接收机链之间共享的振荡器以减轻接收机的相位噪声,以抵消数字域中自干扰信号和发射机损伤。此外,给出了非线性估计和抑制技术用于减轻接收机的非线性效应,并详细分析和研究了发射机和接收机的损伤对自干扰消除性能的影响。仿真结果表明,全数字自干扰消除技术能够有效改善全双工系统的残余自干扰和信道速率。目前仅研究了两个节点之间的自干扰消除的情况,并没有研究中继节点的自干扰消除,后续工作可推广至研究全双工中继系统数字自干扰消除问题。

参考文献:

[1] Jain M, Choi J, Kim T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless [C]//Proceedings of ACM Mobicom. [s. l.]: ACM, 2011: 301-312.

[2] Parkvall S, Dahlman E, Furuskar A. LTE-advanced-evolving LTE towards IMT-advanced[C]//Vehicular technology conference. [s. l.]: IEEE, 2008: 1-5.

[3] Koffman I, Roman V. Broadband wireless access solutions based on OFDM access in IEEE 802. 6[J]. IEEE Communication Magazine, 2002, 4(4): 96-103.

结果如图 5 所示。

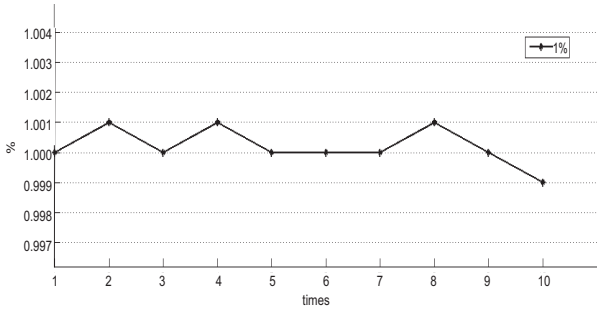


图 5 浓度 1% 一氧化碳气体重复性实验

如图 5 所示,重复性实验测量值误差小,性能表现较为稳定,能够满足设计要求。

## 6 结束语

为了实现对室内、坑道等较为封闭区域空气中有毒有害气体的监测预警,提高相关人员工作生产环境的安全性,设计并实现了一款基于 ARM 的红外气体传感系统。采用单片机进行控制,具有运算速度快、方便操作等特点,非分光红外技术的气体监测实现简单,精准度高,使用寿命长。实验结果表明,该系统具备一定的适应性和实用价值,且具有良好的市场前景。下一步要做的工作是减小体积,将光路从直射变成反射,进一步研究温度对感应系统监测结果的影响,增加探测头设置对照组消除误差,同时设计更加可靠的结构提高用户体验。

## 参考文献:

[1] Dooly G, Clifford J, Leen G, et al. Mid-infrared point sensor for in situ monitoring of CO<sub>2</sub> emissions from large-scale engines[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7636–7642.

[4] Bliss D W, Hancock T M, Schniter P. Hardware phenomenological effects on cochannel full-duplex MIMO relay performance[C]//*Proceedings of Asilomar conference on signals, system and computing*. [s. l.]: [s. n.], 2012: 4–7.

[5] Ruckus. 802.11n sector access point[EB/OL]. 2012-02-01. <http://www.ruckuswireless.com/products/zone-flex-outdoor/7762-s>.

[6] 任永刚,张亮.第五代移动通信系统展望[J]. *信息通信*, 2014(8): 255–256.

[7] Dahlman E, Mildh G, Parkvall S, et al. 5G wireless access: requirements and realization[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2014, 52(12): 42–47.

[8] Ahmed E, Eltawil A M, Sabharwal A. Self-interference cancellation with nonlinear distortion suppression for full-duplex

[2] Chen H, Karion A, Rella C W, et al. Accurate measurements of carbon monoxide in humid air using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(4): 1031–1040.

[3] Park J S, Yi S H. Nondispersive infrared ray CH<sub>4</sub> gas sensor using focused infrared beam structures[J]. *Sensors & Materials*, 2011, 23(3): 147–158.

[4] Yavari F, Chen Z, Thomas A V, et al. High sensitivity gas detection using a macroscopic three-dimensional graphene foam network[J]. *Scientific Reports*, 2011, 1: 166.

[5] Puton A J, Palko T, Knap A, et al. Module for measurement of CO<sub>2</sub> concentration in exhaled air[C]//*Proceedings of SPIE*. [s. l.]: [s. n.], 2003.

[6] 钱江蓉,陈丛,许磊,等.一种新型热导式氧气浓度测量方法[J]. *电子与封装*, 2016, 16(3): 45–47.

[7] 宋文璟,王学伟,丁家旺,等.海水重金属电化学传感器检测系统[J]. *分析化学*, 2012, 40(5): 670–674.

[8] 王晓玲.催化燃烧式甲烷测定器载体催化元件的原理及技术性能分析[J]. *计量与测试技术*, 2012, 39(2): 12–13.

[9] 曲艺.大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 834–840.

[10] 李家琨,金伟其,王霞,等.气体泄漏红外成像检测技术发展综述[J]. *红外技术*, 2014, 36(7): 513–520.

[11] 张石锐.畜禽生产环境中主要有害气体监测方法研究[D].上海:上海交通大学,2014.

[12] Thapa S, Tangutooru S M, Guilbeau E J, et al. The thermopile: an anisotropic temperature sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2012, 187(8): 132–140.

[13] 张悦,李晓,王志斌.基于热电效应的痕量气体检测技术研究[J]. *中北大学学报:自然科学版*, 2011, 32(5): 625–629.

[14] 张娥.矿井可燃性气体爆炸特性的实验研究[D].西安:西安科技大学,2010.

(上接第 179 页)

systems[C]//*Proceedings of Asilomar conference on signals, system and computing*. [s. l.]: [s. n.], 2013: 1199–1203.

[9] Janevski T. 5G mobile phone concept[C]//*Consumer communications and networking conference*. [s. l.]: IEEE, 2009: 1–2.

[10] Radunovic B, Gunawardena D, Key P, et al. Rethinking indoor wireless: low power, low frequency full duplex[R]. [s. l.]: [s. n.], 2009.

[11] Duarte M, Sabharwal A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: feasibility and first results[C]//*Proceedings of Asilomar conference on signals, system and computing*. [s. l.]: [s. n.], 2010: 1558–1562.

[12] Bharadia D, Katti S. Full duplex MIMO radios[C]//*Proc of USENIX NSDI*. [s. l.]: [s. n.], 2014: 359–372.