

空投式气象测量系统

项宏宇¹, 卜方玲², 孙 灏², 陈芳丽², 代永红²

(1. 国防信息学院, 武汉 430010; 2. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 海拔3000 m范围内, 垂直间隔10 m各层次的水平面风速风向是关系到空降空投准确性的关键参数。空投式气象测量系统由3~10个测量节点和1个中继节点组成, 所有节点空投至空降场上空。利用二维超声波风速风向测量仪和三维电子罗盘, 提出了伞降过程中水平面风速风向测量方法, 给出伞降测量节点和中继节点的设计方案, 采用星型网络拓扑结构无线连接测量节点和中继节点, 引入载波侦听多点接入/冲突避免协议, 避免多个测量节点与中继节点通信时可能发生的冲突。基于嵌入式开发平台, 搭建原理样机。采用NS2仿真软件对MAC层通信协议进行了仿真, 物理和仿真实验结果表明, 空投式气象测量系统能自动组网并探测空降场上各个水平面的气象参数。

关键词: 空投; 气象测量; 水平面风向风速; 移动自组织网; CSMA/CA

中图分类号: V271.4; TN96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0083-06

A Meteorological Measurement System for Parachute Landing

XIANG Hongyu¹, BU Fangling², SUN Hao², CHEN Fangli², DAI Yonghong²

(1. Academy of Defense Information, Wuhan 430010, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The horizontal wind speed and direction of each 10 meters vertical gap within 3000 meters above sea level are key factors affecting the accuracy of parachute landing. A parachute meteorological measurement system was proposed, which was composed of 3~10 measuring nodes and 1 relay node. All of the nodes were dropped over the landing site. The wind speed and direction measured by 2-axis ultrasonic anemometer and pitch, roll and azimuth angles measured by digital compass were used to compute horizontal wind speed and direction in the process of parachute landing. The construction schemes of measuring nodes and relay node were given. Star topology was applied to connect measuring nodes to relay node through wireless channel. CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) was employed to avoid the conflicts that may happen when multiple measuring nodes sending data to relay node. Prototype nodes were constructed on embedded development board. The MAC protocol was simulated by NS2. The results of experiment and simulation show that the proposed systematic scheme is capable of automatically organizing network and measuring meteorological parameters of different levels over landing area.

Key words: parachute; meteorological measurement; horizontal wind speed and direction; mobile self-organizing network; CSMA/CA

0 引言

空降空投是将人员和物资快速地部署到地面交通

工具难以到达地区的主要手段之一。近年来, 在汶川地震、舟曲泥石流灾害以及频繁发生的化工厂爆炸和有毒气体泄漏等事故灾难中, 救灾物资、器械甚至抢险人员往往需通过空投或空降的方式送达灾害发生区域。

空降空投地区局域气象参数(如水平面风向风速)是影响空降空投准确性的关键因素。现阶段, 空降场上空各个层次的水平面风向风速观测大都采用雷达

收稿日期: 2011-12-21

修回日期: 2012-01-16

基金项目: “九七三”项目(2011CB707102)

作者简介: 项宏宇(1982—), 男, 重庆人, 硕士, 讲师, 研究方向为无线传感器网络。

测风法,气象引导人员携带雷达、气球等设备,在着陆场,利用雷达跟踪气球位移,根据气球单位时间内的位移,测量不同层面的水平风向和风速。雷达测风法测量的精度比较高^[1],但是,测量过程需要人的参与,在危险地区探测,难以保障探测人员安全。移动气象站也是探测局域气象参数的手段之一,气象观测设备需运抵空降场地,由技术人员进行实地观测,如果遇到地震灾害(如汶川地震),运输设备和人员到灾区是非常困难的。因而,需要寻求一种新的测风方法,不受地理条件的限制,又能准确地测量风速和风向。

局域范围内的气象参数(如水平面风向风速、海拔高度、大气压力等)是保证人员和物资准确空投的关键因素。本文提出一种空投式气象测量系统,该系统空投到空降场上空,在伞降过程中对海拔高度 3000 m 范围内每 10 m 间距水平风速风向进行测量,同时测量大气压力、海拔高度、地理位置信息和温湿度等信息。测量值无线传递给中继设备,由中继设备转发给 100 km 以内载有通信接收机和天线的飞机。该系统机动性强、测量准确性高,适合于人难以进入的局域地区气象观测,将开辟局部气象观测的新方法。

1 系统总体设计

空投式气象测量系统由伞降气象参数测量节点和通信中继节点组成,通过飞机空投到观测区域上空,运用移动自组织网络通信技术,将测量节点观测的气象数据汇集到中继节点,再传递给 100 km 范围内的机载通信接收机。空投式气象测量系统总体设计方案如图 1 所示,3~10 个测量节点与中继节点组成 1 个移动自组织网络,测量节点在伞降过程中测量各个水平面的风向风速、温湿度和大气压等气象数据。中继节点负责将各个节点的测量数据转发给远程接收机,中继节点落地后还可以为后续空降空投的定位提供位置参考信息。

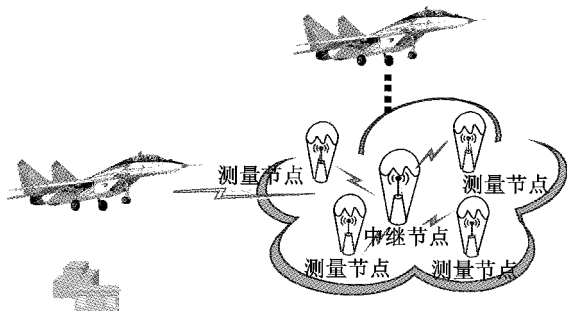


图 1 空投气象测量系统示意图

Fig. 1 The scheme of parachute meteorological measurement system

为了减少空投设备的难度和整个系统的成本,测量节点的射频通信半径在 1 km 范围内,设备体积小,天线比较短。中继节点的射频通信半径在 100 km 范围内,因而,需要携带大功率放大器,设备和天线的体积都比较大,此外,中继节点的存储器容量较大,具备较高的数据处理能力。通过设计不同体积的降落伞使中继节点下降速度接近测量节点的下降速度,下降速度控制在 2~3 m/s 范围内。

2 伞降风速风向测量节点的设计方法

测量节点的主要任务是气象参数探测和数据传输,其面临的主要难题是如何在伞降移动过程中测量水平风速风向,因而,节点的设计应围绕水平风速风向测量这一核心问题展开。

2.1 伞降过程中的风速风向测量方法

超声波在无风情况下,其传播速度大约为 343 m/s;而在有风时,超声波传播的速度会叠加上风速,顺风时传播速度快,逆风时传播速度慢^[2-4]。在二维平面上,利用超声波的传播特性能够测量风速和风向,其原理如图 2 所示。

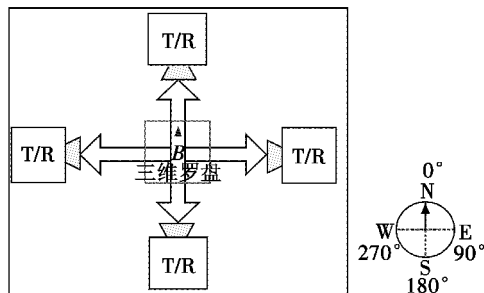


图 2 水平风速风向测量与校正模块结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of model for horizontal wind speed and direction measurement and correction

在支撑平面上设置两对超声波传感器,每个传感器标识为 T/R,它既能发送超声波,也能接收超声波,其中,一对固定在设定的南北方向,另一对固定在设定的东西方向,两对探头间的距离均为 d cm。如图 3 所示, X 表示支撑平面的北向, Y 表示支撑平面的东向。

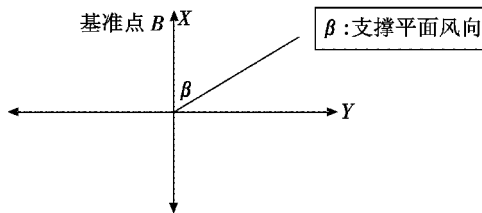


图 3 二维超声波风向测量结果示意图

Fig. 3 Wind direction measured by 2-axis ultrasonic anemometer

通过测量南北、东西正交方向上超声波来回传播的时间 t_{12} 、 t_{21} 、 t_{34} 和 t_{43} ，可以得到南北方向上的风速分量和东西方向上的风速分量^[3] V_x 和 V_y ，合成平面二维风速 V 和风向 β (偏离地球正北向的角度)^[5-7]。

$$V_y = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (1)$$

$$V_x = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right) \quad (2)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3)$$

$$\beta = \arctan \frac{V_y}{V_x} \quad (4)$$

然而，在伞降过程中，超声波传感器的支撑平面难以保持水平，因而，需要对超声波测得的风速和风向进行校正。三维电子罗盘可以提供实时的方位角 α 、俯仰角 θ 和翻滚角 γ ，如图 4a 和图 4b 所示，为校正二维超声波测风设备的测量数据提供了必要的参数。

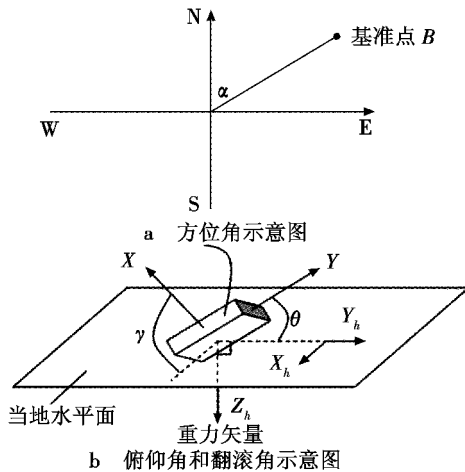


图 4 三维电子罗盘测量平面倾斜角度示意图
Fig. 4 Diagram of pitch, roll and azimuth angles measured by digital compass

伞降过程中^[8]的水平面风速风向测量模块由二维超声波风速风向测量模块与三维罗盘^[9-10]两个部分组成，其结构示意见图 2。三维罗盘和两对超声波传感器固定在同一支撑平面上，三维罗盘的正北方向标识 B (也称基准点 B) 指向设定的北向传感器，与南北向超声波传感器对固定在同一条直线上，三维罗盘的中心与南北、东西两对传感器的交点重合。

方位角 α 测量的范围是 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，正北为 0° ，正南为 180° 。假设 β 是二维超声波风向测量值，如图 3 所示， β 表示风向偏离南北传感器轴线的角度；又假设三维罗盘测量的南北传感器轴线与地球北极偏离的角度为 α ，则实际的风向 θ_{out} 为

$$\theta_{out} = (\alpha + \beta) \bmod 360 \quad (5)$$

俯仰角 θ 是支撑平面东西轴线 Y 与水平面的夹

角，其取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。利用 θ 可校正得水平面上东西向风速。

$$V_{hy} = \frac{V_y}{\cos \theta} \quad (6)$$

翻滚角 γ 是支撑平面南北轴线 X 与水平面的夹角，其取值范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。利用 γ 可校正得水平面上南北向风速。

$$V_{hx} = \frac{V_x}{\cos \gamma} \quad (7)$$

校正后的水平面合成风速为

$$V_{out} = \sqrt{\left(\frac{V_x}{\cos \gamma} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{\cos \theta} \right)^2} \quad (8)$$

2.2 测量节点构造方法

测量节点结构示意见图 5，在嵌入式开发平台上，集成水平面风速风向测量模块、GPS 模块、以及大气压力、海拔高度和温湿度传感器等。控制单元根据海拔高度测量值启动其他模块工作，若海拔高度与 10 m 的整数倍数值之差的绝对值小于等于 1 m，则水平面风速风向测量模块、温湿度传感器、GPS 以及大气压传感器分别测量和计算水平面风速风向、温湿度、地理位置以及大气压力数据各一次。

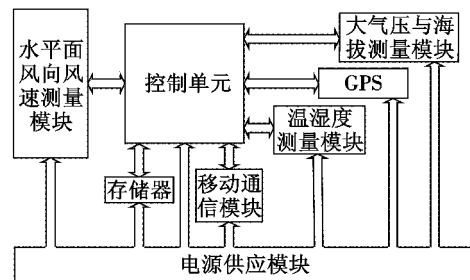


图 5 测量节点结构图
Fig. 5 Construction of measuring node

3 移动自组织网络

单个测量节点观测的气象参数可信度不高，通过对多个测量节点探测值的数学分析，可提高测量气象参数的准确性和可信度，再考虑成本因素，因而，设计一个由 3 ~ 10 个测量节点和中继节点组成的移动自组织网，探测复杂地区相关气象参数，提高人员和物质空投的准确性和安全性。

3.1 中继节点

图 6 为中继节点构造图，它也是在嵌入式开发平台上集成大功率通信模块和高增益天线，实时转发所有测量节点的观测数据。中继节点存储器容量较大，用以保存所有测量节点的观测数据；同时，它还具有一定的数据处理能力，能对观测数据进行统计分析，计算出准确性比较高的气象参数。

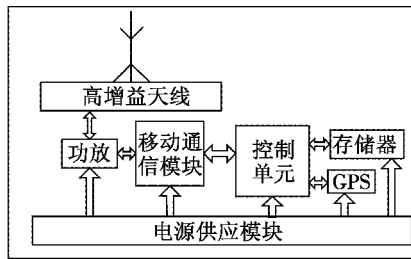


图6 中继节点结构图

Fig. 6 Construction of relay node

3.2 气象测量系统工作过程

移动自组织网的所有节点均由引导飞机投放到探测区域上空^[11],测量节点的工作流程如图7所示。测量节点投放的瞬间,由于惯性的作用,节点下降过程的状态变化剧烈,7 s以后基本趋于稳定^[5],因此节点离开飞机后,利用嵌入式系统的内部时钟定时7 s,7 s后,海拔高度测量器开始工作,然后进入气象参数观测程序。

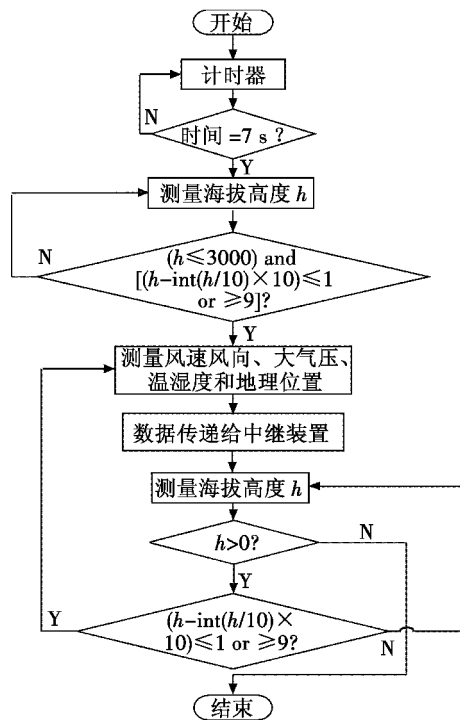


图7 气象测量流程图

Fig. 7 Flow chart for meteorological measurement

中继节点实时接收、转发观测数据,落地后,重复发送观测数据、统计分析数据和地理位置信息,防止数据包丢失,还为空降空投任务提供位置参考信息。

3.3 冲突避免机制

为了可靠地传输气象观测数据,采用星型网络结构,所有的测量节点将观测数据发送给中继节点,通信半径设计在一跳范围内,以免因多跳通信链路的不稳定性产生数据包丢失。由于所有测量节点向中继节点发送观测数据,通信会产生冲突,因此,采用 CSMA/CA

载波侦听多点接入/冲突避免协议的方式。

测量节点准备与中继节点通信前,先在通信频道上进行载波监测,侦听信道是否空闲。在某个测量节点与中继节点通信完毕准备释放信道的瞬间,可能有多个测量装置正在等待通信频道空闲,此时发生通信冲突的概率最大,因此,当测量装置检测到信道空闲时还不能立即发送数据,而是要采用“二进制指数退避算法”随机延时一段退避时间,测量装置在检测到信道空闲时启动退避计数器,只要信道空闲,退避计数器就递减,如果检测到信道被占用则暂停退避计数器并保持计数器的值不变,当重新检测到信道空闲时,退避计数器在原先计数值的基础上再递减,当计数值递减到零时,该测量装置获得无线信道的使用优选权,该测量装置就准备向中继装置发送数据。

4 物理和仿真实验

为了验证气象测量系统设计方案的可行性,建立了测量节点和中继节点原理样机。测量节点控制单元选用 ARM s3c2440 开发板,水平风速风向测量模块由英国 GILL instruments 公司的 WindSonic 2-Axis Ultrasonic Anemometer 二维风速风向测量仪和美国 PNI 公司的 TCM3.0 三维电子罗盘组成, GPS 模块选用 TTL-LEA-5H/S,温湿度传感器采用 SHT7x,海拔高度和大气压力传感器采用陕西帅克传感仪器制造公司产品 SS5501,存储器选用 SD 存储卡。中继节点的控制单元、GPS 模块和测量节点一样,SD 卡的容量比测量节点的大,通信模块相比于测量节点,增加了功率放大器,其全向天线增益比测量节点的高。

为了适应多种地理环境,测量节点和中继节点都采用三射频模块 nRF905,可从 433 MHz、868 MHz、915 MHz 3 个中心频段选择一个组建移动自组织网^[12],将测量节点观测数据发送给中继节点。

4.1 水平风速风向测量实验

利用一个落地风扇作为风源,通过移动风扇位置和变换档位,给出 3 种不同风向和风速组合。测量节点分别置于桌面和搭建的斜面上,测量水平风向风速。为了检验测量结果,选用便携式风向风速仪、指南针、和平衡仪进行了水平风速风向的测量,其值称为参考风向、风速。手持式设备和测量节点测试结果见表 1。表中,风向、风速是测量节点观测结果。

由表 1 可知,测量节点在桌面和倾斜面上测量的水平风速与手持设备测量结果的绝对误差在 0.1~0.5 m/s 之间,风向的绝对误差在 10°~20°之间。两种测量方法测得风向的大致方位是接近的,但是误差相对较大,原因和手持式设备读数精度低有一定的关系。

表 1 风向风速对比测试结果

Table 1 Results of wind speed and direction measurement

测量环境	风向/(°)	风速/ (m·s ⁻¹)	参考风向/ (°)	参考风速/ (m·s ⁻¹)
水平面	251	3.98	240	4.1
水平面	297	3.29	285	3.4
水平面	335	2.88	320	2.9
倾斜面	266	3.5	252	3.9
倾斜面	283	3.04	270	2.9
倾斜面	295	3.13	280	3.3

由于测量节点采用的所有传感器的工作温度在 -40 ~ 80 °C 之间,大气压传感器的测量范围是 0 ~ 128 kPa,海拔高度的测量范围是 -2000 ~ 30000 m,而青藏高原的大气压小于 100 kPa,年温度在 -20 ~ 20 °C 之间,因此,可以确定空投式气象测量系统能应用于海拔高度在 6000 m 范围内的气象参数测量。

4.2 自组织网络通信实验

网络通信实验分为两个,第一个是基于 nRF905 的点对点通信实验,测量节点和中继节点都采用 433 MHz 频段进行通信。测量节点发送数据和中继节点接收到的数据截图分别显示于图 8a、图 8b,通信距离为 100 m,发送的一包数据是 32 字节,持续发送 100 包,数据传输没有错误发生,点对点通信实验成功。

```

=====tx data : 0x11      received data 0 is: 0x11
=====tx data : 0x6b      received data 1 is: 0x6b
=====tx data : 0x6a      received data 2 is: 0x6a
=====tx data : 0xa5      received data 3 is: 0xa5
=====tx data : 0x5a      received data 4 is: 0x5a
=====tx data : 0xb6      received data 5 is: 0xb6
=====tx data : 0xaa      received data 6 is: 0xaa
=====tx data : 0xaa      received data 7 is: 0xaa
=====tx data : 0x11      received data 8 is: 0x11
=====tx data : 0x6b      received data 9 is: 0x6b
=====tx data : 0x6a      received data 10 is: 0x6a
=====tx data : 0xa5      received data 11 is: 0xa5
=====tx data : 0x5a      received data 12 is: 0x5a
=====tx data : 0xb6      received data 13 is: 0xb6
=====tx data : 0xaa      received data 14 is: 0xaa
=====tx data : 0xaa      received data 15 is: 0xaa
=====tx data : 0x11      received data 16 is: 0x11
=====tx data : 0x6b      received data 17 is: 0x6b
=====tx data : 0x6a      received data 18 is: 0x6a
=====tx data : 0xa5      received data 19 is: 0xa5
=====tx data : 0x5a      received data 20 is: 0x5a

```

a 发送数据截图 b 接收数据截图

图 8 收发数据截图

Fig.8 Screenshot of data sending and receiving

第二个实验是利用 ns2 仿真工具做星型网络结构下多对一 CSMA/CA 载波侦听通信协议仿真,网络节点数目分别是 5、10 和 15,且每个节点的移动是随机的,速度为 2 m/s,拓扑场景范围是 500 m * 500 m,节点间的通信距离是 300 m,数据包发送速率是 50 kb/s,每个数据包大小为 32 字节,仿真结果分别如图 9 和图 10 所示。

由图 9、图 10 可以看出,5 节点和 10 节点的延迟分别在 1 ms、0.1 s 和 1 s 附近,5 节点、10 节点和 15 节点的抖动率分别在 0.0005、0.1 和 0.5 左右,而且,5 节点发送了 460 个包,接收到了 460 个包,10 节点发送了 400 个包,接收到了 399 个包,15 节点发送了 400 个包,接收到了 388 个包。根据仿真实验,得出 5 节点、10 节点和 15

节点的平均丢包率分别是 0、0.25% 和 3%,说明在测量节点数量小于 15 个时,星型移动网络的稳定性较好。若从经济上考虑,3 个节点的成本较低,但是 5 ~ 10 个节点经过统计分析得到的数据准确性更高,因此,认为投放 5 个测量节点是比较好的选择。

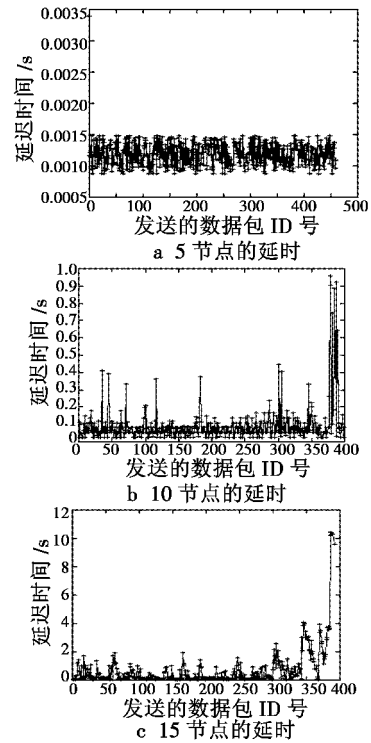


图 9 延时结果图

Fig.9 Delay results of simulation

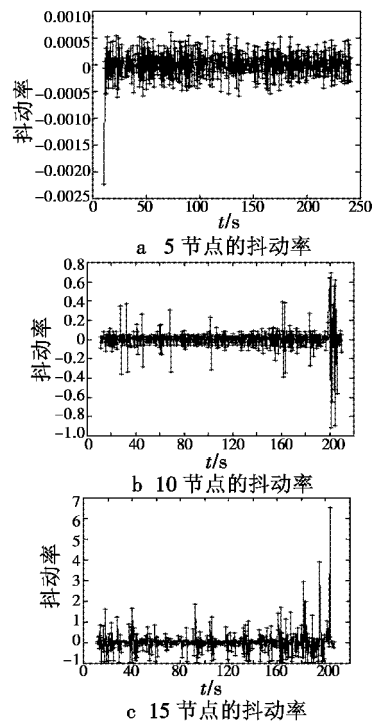


图 10 抖动率结果图

Fig.10 Jitter results of simulation

5 结束语

区域范围内的水平风向、风速和大气压力等,是保证精确投放人员和物资的重要参数。本文从系统架构、水平风向风速测量方法、节点设计和通信协议研究等方面入手,设计了一种无人值守的空降空投气象测量系统,构建了测量节点和中继节点的原理样机,搭建了通信协议仿真研究环境,物理和仿真实验说明,本文提出的空投式气象测量系统可行,该研究在国内外鲜有可借鉴的例子,其成果将开创一种新的气象参数探测方法,提升空降、空投的准确性、机动性和适应性。后续工作将围绕着建立原型系统展开。

参 考 文 献

- [1] 冯力天,郭弘其,陈涌,等. 1.55 μm 全光纤多普勒测风雷达系统与试验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 844-847.
- [2] VALLE M P D, CASTELAN J A U, MATSUMOTO Y, et al. Low cost ultrasonic anemometer[C]//The 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2007, Sept. 5-7, 2007:213-216.
- [3] VILLANUEVA J M M, CATUNDA S Y C, TANSCHETT R. Maximum-likelihood data fusion of phase-difference and threshold-detection techniques for wind-speed measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7):2189-2195.
- [4] WANG L B, WU Y. Time-difference ultrasonic wind detection methods based on cross-correlation theory[C]//The 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI' 2007, Aug. 16, 2007:165-168.
- [5] 甘江英,龚兆岗,张小花,等. 基于 SOPC 技术的超声波风向风速检测系统[J]. 上海海事大学学报, 2009, 30(4):75-79.
- [6] 王葵军,谢扩军. 基于 FPGA 时差法超声波风速风向仪前端电路的设计[J]. 电测与仪表, 2010, 47(7):74-76.
- [7] 罗中兴,魏毅立,施静伟. 基于 DSP 的超声波测风仪[J]. 声学与电子工程, 2009(2):39-41.
- [8] 杨雪松. 降落伞空投过程的仿真研究[C]//2004 年中国航空学会青年科技论坛论文集, 2004:495-503.
- [9] 王丽颖,支炜,孙红霞,等. 基于 HMC1022 磁阻传感器的数字电子罗盘的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1):108-111.
- [10] 马建仓,胡士峰,邵婷婷. 三轴磁阻电子罗盘设计[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(3):142-144.
- [11] 王磊,张瑞华,邢厚子. 无线传感器网络 MAC 协议研究比较[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(21):4043-4045.
- [12] 蔡型,张思全. 短距离无线通信技术综述[J]. 现代电子技术, 2004, 3:65-67.

(上接第 76 页)

参 考 文 献

- [1] RAGHURAJ R, BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Locating sensors in complex chemical plants based on fault diagnostic observability criteria[J]. American Institute of Chemistry Engineering Journal, 1999, 45(2):310-322.
- [2] 杨帆,萧德云. 大型复杂系统的动态 SDG 模型及传感器布置问题[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2):181-186.
- [3] BAGAJEWICZ M, FUXMAN A, URIBE A. Instrumentation network design and upgrade for process monitoring and fault detection[J]. American Institute of Chemistry Engineering Journal, 2004, 50(8):1870-1880.
- [4] 杨光,刘冠军,李金国,等. 基于故障检测和可靠性约束的传感器布局优化[J]. 电子学报, 2006, 34(2):348-351.
- [5] 马存宝,王彦文,史浩山,等. 机载电子设备 BIT 优化设计技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9):2276-2279.
- [6] 陈希祥,邱静,刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(1):68-73.
- [7] FIJANY A, VATAN F. A new efficient algorithm for analyzing and optimizing the system of sensors[C]//IEEE Aerospace Conference, 2006:1-8.
- [8] 国防部科学技术工业委员会. GJB2547-95 装备测试性大纲[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1995.
- [9] 中国人民解放军空军雷达学院. GJB3970-2000 军用地面雷达测试性要求[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2000.

欢迎投稿 网址: <http://www.dgykz.com>