

网络编码在无线数据传输补偿机制中的运用*

袁慎芳, 宋 帅, 高 尚, 胡步青, 王子龙, 任元强

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了降低无线传感器网络中由于各种因素影响造成的丢包率, 提出了一种基于网络编码的数据传输补偿机制。该机制在普通星型网络架构的基础上, 设计并加入了一种协作节点。此节点需要对收到的同一个信道内多个采集节点的数据进行编码运算, 之后将运算生成的补偿数据包发送至基站, 上位机通过基站上传的数据包来补偿得出采集节点在基站处的数据丢失。采用确定性编码方式减少节点的运算量, 采用事件触发机制保证协作节点发包时刻的有效性, 网络中数据包通过时分多址(time division multiple access, 简称 TDMA) 机制保障其实时可靠收集。对网络中加入协作节点的影响进行了实验验证, 结果表明, 此方法中引入的协作节点可以稳定工作, 上位机可以正确解码, 并能有效降低网络的丢包率。

关键词 无线传感器网络; 丢包率; 网络编码; 数据补偿

中图分类号 TP393

引 言

无线传感器网络(wireless sensor networks, 简称 WSN)是由大量依据特定通讯协议和可进行相互通信的无线传感器节点组成的网络^[1-3]。相较于传统的有线网络, WSN 的丢包率较高。丢包率的高低决定了网络中整个数据的完整性, 继而影响系统的数据处理等进程; 所以, 降低无线传感器网络的丢包率具有重要的意义。目前, 人们一般采用重传来减小 WSN 的丢包率, 普通的重传方法是发送节点通过收到接收节点的反馈信息来重新发送出错或者丢失的数据^[4-5]。通常, 无线传感器网络的丢包现象是由无线干扰、发送信号弱、节点硬件问题等原因引起的^[6-7]。实际应用中, 丢失数据包通常分布在各个发送节点上。重传需要接收节点将反馈信息传到发送节点, 这样信道内各种数据繁杂而紧密, 对无线信道的占用率很高; 因此, 如何有效利用现有网络资源, 提高数据传输质量是现阶段无线传感网络研究的热点^[8-9]。

由于重传需要发送节点与接收节点的信息交互, 而这个交互信息也有可能发生丢失。当提高发送节点的发送数据频率或节点数量时, 信道内产生的相邻数据包的时间间隔 t 被缩短。若采用重传,

信道内由于交互信息的存在, t 被进一步缩短。如果没有良好的同步机制, 数据包的碰撞将越来越频繁, 重传次数越来越多, 发送节点的数据发送时刻将会引入较高的延迟, 实时性无法得到保证^[10-11]。

笔者的研究对象是无线传感器网络下的连续实时数据采集系统, 针对其采样频率较高以及实时性的要求, 提出了一种基于网络编码思想的数据传输补偿机制。

1 基于网络编码的协作架构

笔者设计了一种基于网络编码的协作架构, 见图 1。信道内包含 n 个采集节点、1 个协作节点、1 个管理节点以及 1 个基站。系统工作流程如下:

- 1) 上位机通过管理节点发送启动网络命令;
- 2) 采集节点开始同步采集生成数据并广播;
- 3) 协作节点收到采集节点的数据后, 对其编码运算并向基站发送补偿数据包;
- 4) 基站在接收数据的同时通过串口向上位机上传数据;
- 5) 管理节点每隔一定时隙对整个网络进行时间同步;
- 6) 上位机通过管理节点发送网络停止命令。

* 国家杰出青年基金资助项目(51225502); 国家自然科学基金重点资助项目(50830201); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj130102); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

收稿日期: 2012-12-06; 修回日期: 2013-02-05

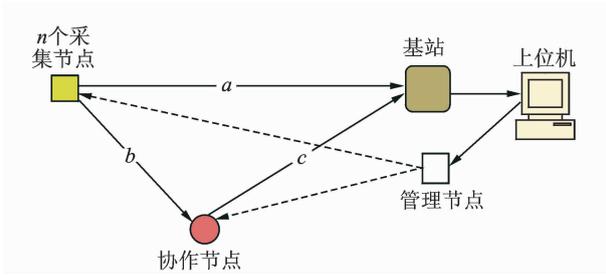


图 1 基于网络编码的协作架构示意图

Fig. 1 Schematic plot of the network coding based cooperation framework

2 数据传输补偿机制的基本思想

2.1 基本编码公式

网络编码(network coding)^[12]是由 Ahlswede 等提出的,它对编码和路由技术进行了融合,在传统存储转发的路由方法基础上,通过允许对接收的多个数据包进行编码信息融合,增加单次传输的信息量,提高网络整体性能。网络编码的本质是利用节点的计算能力提高链路带宽的利用率^[13]。

如图 2 所示,采集节点与协作节点采用 TDMA 机制发送数据包,每个节点被分配到一个相等的时隙。考虑到单个时隙的长度问题,协作节点被限定发送两种不同编码运算后的补偿数据包。

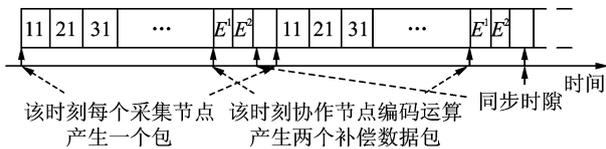


图 2 基于节点地址的 TDMA 机制

Fig. 2 Node address based TDMA mechanism

笔者以 n 个采集节点依次发送完一个数据包 $D_i (1 \leq i \leq n)$ 的时间加上协作节点连续发送两个补偿数据包 E^1 和 E^2 的时间为 1 个周期。

假设 D_1, D_2, \dots, D_n 是一个周期内 n 个采集节点分别采集到的数据包, r_1, r_2, \dots, r_n 为系数, E 为协作节点编码生成的数据包,编码方式如下

$$E = \sum_{i=1}^n r_i D_i \quad (1)$$

如果 r_i 为随机数,则会出现极大数或者负数的情况,这对节点的运算会造成一定的困难,消耗节点的资源。所以采用确定性编码方式,即 r_i 是确定的实数,并且是尽量小的正数,这样一定程度上减少了节点的运算量,缩短运算时间。由于系数是确定的,所以无需传输系数矩阵,将其固化在程序中即可。

通过使系数尽量小的方式也可以控制数据包的长度,保证编码后的数据包长度不能超过 CC2420 的 TXFIFO 可存放的长度极限(128 字节)。

由于之前设定协作节点发送两种不同编码运算的补偿包,那么系数就是一个 $2 \times n$ 的矩阵,即

$$r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了尽可能解出丢失的数据包,所以 D_i 的系数 r_i 两两均不能是一个线性的关系,即需要满足

$$r_{11}/r_{21} \neq r_{12}/r_{22} \neq \dots \neq r_{1n}/r_{2n} \quad (3)$$

笔者在设计实验系统时选取了 6 个采集节点,即 $n=6$,所以在考虑到系数矩阵要足够小时,系数矩阵被设置为

$$r = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2^2 & 2^3 \\ 2^3 & 2^2 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

对 6 个采集节点的协作架构,基本编码公式为

$$\begin{cases} E^1 = D_1 + D_2 + D_3 + 2D_4 + 2^2D_5 + 2^3D_6 \\ E^2 = 2^3D_1 + 2^2D_2 + 2D_3 + D_4 + D_5 + D_6 \end{cases} \quad (4)$$

为了尽量简化协作节点的运算,所以选取的系数都是按照移位运算,节点能在很短的时间内进行计算。在编码这一步消耗的时间越少,就越有足够的时间来发送数据包,避免碰撞的发生。

2.2 编码运算方法

笔者使用的是南京航空航天大学研制的无线应变节点^[14],节点的处理选择 MSP430 芯片,采用 12 位 AD,拥有 4 路应变采集通道,每个通道采集 8 次打一个数据包,所以数据部分长度为 $8 \times 4 \times 16 \text{ bit} = 512 \text{ bit} = 64 \text{ byte}$ 。

由于数据部分长度很长,协作节点进行系数相乘时,并不把它看成一个整体,而是按每 2 个字节将其划分为各个单元,如图 3 所示。

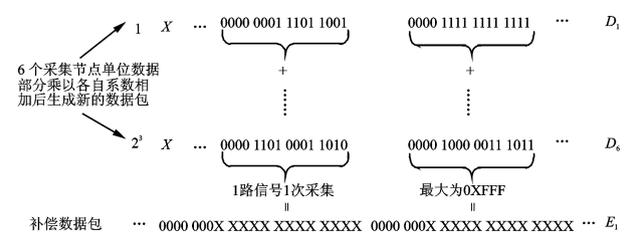


图 3 协作节点的编码运算

Fig. 3 Coding operation of the cooperation node

这样划分的结果相当于 1 个采集节点的 1 个应变通道采集 1 次会得到 1 个 2 字节数据,将它乘以对应的系数,每个采集节点都做类似的运算,之后按照数据包对应位进行相加得到编码运算后的补偿数

据包。由于采用的是12位AD,所以1路信号1次采集最大为0XFFF,而之前每个式子设置的系数之和均为17。极限情况下,相加的最大结果为0X10FEF,数据发生溢出。如图3所示,补偿数据包在对应的位置上开辟了3个字节来存放采集节点1路信号的运算结果。

2.3 协作节点发包时刻的确定

协作节点在本架构中并不局限于数据转发的功

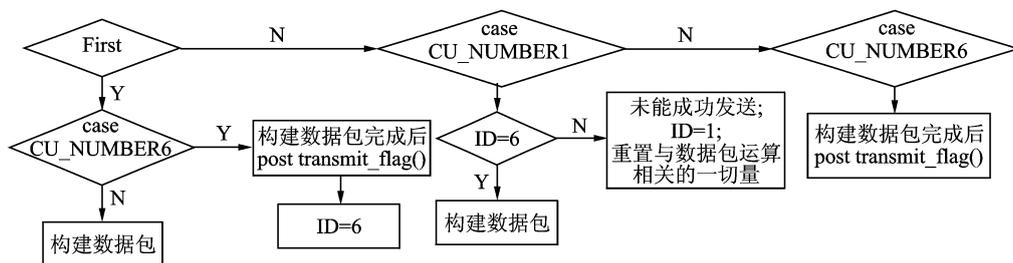


图4 协作节点事件触发机制流程图

Fig. 4 Flowchart of the event-triggered mechanism of cooperation node

1) 通过标志位“First”来判断是否是第1个周期,若First=1是第1个周期,则继续判断此刻收到的数据包是否是第6个采集节点的数据包,若不是,则一直构建数据包;若是,则启动发送补偿数据包任务 post transmit_flag(),并且置ID=6。

2) 若First=0,通过数据包的地址位判断,若是“CU_NUMBER1”(第1个采集节点的数据包),则判断ID是否为6,若不是,那说明上个周期的补偿数据包没有成功发送,此时置ID=1,重置程序中一切与数据包运算相关的变量;反之说明上个周期的补偿数据包成功发送,此时继续构建数据包。地址位从“CU_NUMBER2”到“CU_NUMBER5”都是类似的情况。

3) 任何情况下,通过数据包地址位判断若是“CU_NUMBER6”,直接启动补偿数据包发送任务 post transmit_flag(),并且置ID=6。

简单来说,就是判断数据包地址位。如果是“CU_NUMBER1”到“CU_NUMBER5”这5个中的任一个,程序需要判断上个周期的补偿数据包是否已成功发送;如果是“CU_NUMBER6”,就直接启动发送任务。

2.4 上位机处正确解包

基站接收到采集节点和协作节点的数据包后通过串口上传到PC机,上位机采用C语言编写。采集节点发送的每个数据包都带有自身的节点序号,协作节点在对数据包进行运算时都会将其带有的序

能。由于时隙的限制,单周期内补偿数据包的发送个数有限,那么就要求一个补偿数据包所带有的采集节点数据包的信息越多越好。协作节点何时发送补偿数据包也是关键,既不能与采集节点的发送时隙引起冲突,又不能浪费空余的时隙。这里选取事件触发机制来确定协作节点的数据包发送时刻。触发协作节点发送的事件是协作节点收到单周期内第6号采集节点的数据包的到来。

协作节点事件触发机制流程图如图4所示。

号信息存入补偿数据包内,以便让上位机识别要对哪些数据包进行数据融合。这样,通过补偿数据包内的序号信息与之前统计到的丢失采集节点数据包的序号信息相比较来确定是否需要解码。

1) 若采集节点到基站处丢失一个数据包 D_x ,则用一个补偿数据包即可,本节使用 E^1 进行求解。上位机首先判断丢的是哪个包,确定 D_x 在式(4)中的系数。

当 $1 \leq X \leq 3$ 时,在这个范围内任何一个数据包丢失,系数均为1,这里假设丢 D_1 ,上位机根据式(5)得出协作补偿包 A^1

$$A^1 = D_2 + D_3 + 2D_4 + 2^2D_5 + 2^3D_6 \quad (5)$$

$$\text{易得 } D_1 = E^1 - A^1 \quad (6)$$

当 $4 \leq X \leq 6$ 时,与第1种情况的区别只是系数不同,运算方法一样。

2) 如果采集节点到基站处丢失两个数据包 D_x, D_y ,则需要用到两个补偿数据包。上位机首先判断丢的是那两个包,确定 D_x, D_y 在式(4)中的系数,共有4种情况,继而根据不同情况对应的公式来进行解包。

当 $1 \leq X \leq 3, 1 \leq Y \leq 3$ 时,这里假设丢 D_1, D_2 ,上位机根据式(7)得出协作补偿包 A^1, A^2

$$\begin{cases} A^1 = D_3 + 2D_4 + 2^2D_5 + 2^3D_6 \\ A^2 = 2D_3 + D_4 + D_5 + D_6 \end{cases} \quad (7)$$

易得

$$\begin{cases} D_1 = [(E^2 - A^2) - 2^2(E^1 - A^1)]/2^2 \\ D_2 = [2^3(E^1 - A^1) - (E^2 - A^2)]/2^2 \end{cases} \quad (8)$$

另外 3 种情况是: $1 \leq X \leq 3, 4 \leq Y \leq 6; 4 \leq X \leq 6, 1 \leq Y \leq 3; 4 \leq X \leq 6, 4 \leq Y \leq 6$ 。

以上 3 种情况与第 1 种情况的区别只是系数不同,运算方法一样。

2.5 理论分析

假设丢包率为 P ,各采集节点在时间 T 内发送的总数据包数为 M ,基站在时间 T 内收到的总数据包数为 N ,则

$$P = (M - N) / M \times 100\% \quad (9)$$

如图 1 所示,假设 a, b, c 为各链路的丢包率,笔者依据通常情况下丢包率与节点间物理距离长短成正比的论断,列出丢包率值间的不等关系式,即 $0 \leq b \leq c \leq a \leq 1$ 。a. 若没有协作节点,只有采集节点通过基站向上位机传输数据包,那么丢包率 $P_1 = a$;

b. 按照图 1 设计的节点拓扑分布图,有协作节点的补偿数据包来补偿采集节点到基站的丢包。同周期内,上位机统计没有丢包的情况如表 1 所示。那么,丢包率为

$$P_2 = a \times [1 - (1 - b)(1 - c)] = a(b + c - bc) \geq a(2\sqrt{bc} - bc) = -a(\sqrt{bc} - 1)^2 + a \geq -a(\sqrt{aa} - 1)^2 + a = 2a^2 - a^3$$

表 1 上位机统计无丢包时各链路通信情况

Tab. 1 Statistical results of the package loss of every channel

情况	A->C	A->B	B->C	PC 处
有无丢包	无	X	X	无
有无丢包	有	无	无	无

A 为采集节点;B 为协作节点;C 为基站;A->B 表示采集节点到协作节点的通信;X 表示有无丢包都适用

如图 5 所示,加入协作节点后, P_2 的曲线在区间内都是在 P_1 的下方,图上取了 3 个点来比较两种方式的丢包率,可以看出在加入协作节点后,整个网络的丢包率下降明显。

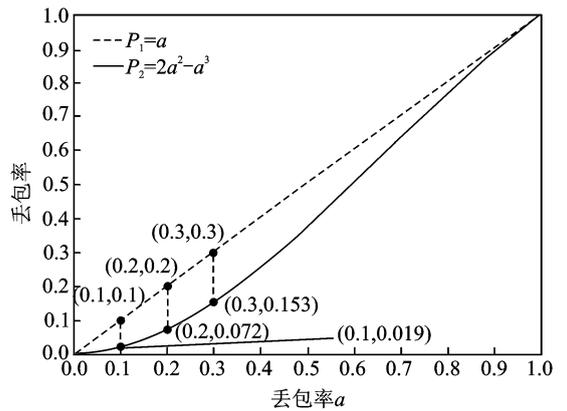


图 5 加入协作节点前后丢包率对比图

Fig. 5 Comparison chart of the package loss rate before and after introducing the cooperation node

3 数据传输补偿机制的优点

综上所述,将数据传输补偿机制应用在连续实时的数据采集系统有如下优点:

- 1) 编码运算只引入了移位、加减法运算,这种运算操作对节点本身的要求就较低,并且运算的时间越短,协作节点的补偿数据包可以更快的发送;
- 2) 协作节点在 TDMA 机制的基础上加入事件触发机制来发送,规避了没有接收完数据包就发送补偿数据包的可能。

4 实验验证

按照图 1 构建实验系统,实验所用的器件如图 6(a)所示。拓扑结构上协作节点处于采集节点和基站的中间,但更接近采集节点。这是为了保证协作节点能尽量全地接收采集节点的数据包,这样使补偿数据包包含的数据信息更全面。

为了验证此机制的工作有效性,必须使其中的某个采集节点丢包率相对其他采集节点较大,通过协作节点来解出其丢失的数据包内容。因此,设计实验时人为设置“高丢包率节点”是一个可行的方

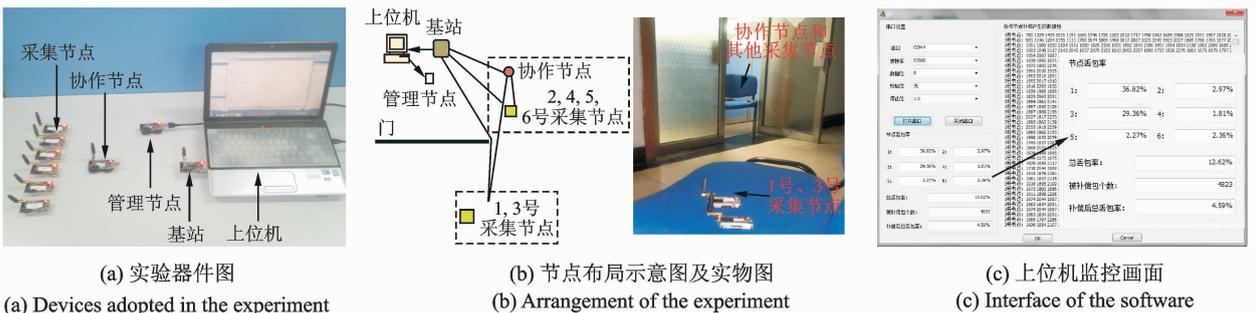


图 6 实验系统与结果图

Fig. 6 Evaluation setup and result

法,需要保证节点与基站的通信受到阻碍,但是与协作节点的通信是畅通的。

笔者将1号和3号采集节点作为“高丢包率节点”放置于屋外,协作节点和剩下的4个采集节点放置于门口,基站放置于屋内,如图6(b)所示。

采集节点采集数据频率为32Hz,每采集8次构建1个数据包,即每250ms产生1个数据包。实验系统中一共有6个采集节点和1个协作节点,而协作节点在被事件触发后连续发送两个包。发送数据采用TDMA机制,则每个采集节点根据地址分配到的时隙长为 $250\text{ms}/(6+2)=31.25\text{ms}$ 。同时管理节点对信道内的采集节点和协作节点进行时间同步。基站收到数据后直接通过串口提交至上位机处,上位机进行存包与解包操作。

从图6(c)的上位机监控画面可以看到,1号节点和3号节点的丢包率相较于其他4个节点的丢包率显得较高。未补偿时的总丢包率为12.63%,若将协作节点补偿解出的数据包计入收到的总包,则总丢包率下降到4.59%。

实验结果表明,数据传输补偿机制对于整个网络的丢包率的控制有一定的效果。

5 结束语

提出了一种基于网络编码的网络协作和数据传输补偿机制,具体分析了数据传输补偿机制的整个工作流程,包括协作节点发包时刻的确定和上位机的可解性。通过理论分析和实验验证了此机制的有效性,实验结果表明,所涉及的无线传感器网络架构在加入协作节点后丢包率有明显的降低。

参 考 文 献

- [1] 于宏毅,李鸥,张效义. 无线传感网络理论·技术与实现[M]. 北京:国防工业出版社,2008:1-36.
- [2] 常琦,袁慎芳,邱雷,等. 基于知识和无线传感网络的结构健康管理[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(1):105-110.
- [3] Chang Qi, Yuan Shenfang, Qiu Lei, et al. Structural health management system based on knowledge and wireless sensor network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2012,32(1):105-110. (in Chinese)
- [4] 汤宝平,贺超,曹小佳. 面向机械振动监测的无线传感器网络结构[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(4):357-361.
- [5] Tang Baoping, He Chao, Cao Xiaojia. Topology of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(4):357-361. (in Chinese)
- [6] Dianati M, Ling Xinhua, Naik K, et al. A node-cooperative ARQ scheme for wireless Adhoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3):1927-1938.

- [7] 肖潇,杨路明,王伟平. 一种低丢包率无线网络中基于网络编码的广播重传方法[J]. 小型微型计算机系统,2009,30(6):1089-1093.
- [8] Xiao Xiao, Yang Luming, Wang Weiping. Broadcasting retransmission approach in lower packets loss rate wireless networks based on network coding[J]. Journal of Chinese Computer System, 2009, 30(6):1089-1093. (in Chinese)
- [9] Chih-Kuang L, Zadorozhny V I, Krishnamurthy P V, et al. A distributed and scalable time slot allocation protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2011,10(5):505-518.
- [10] Junsuk S, Ramachandran U, Ammar M. On improving the reliability of packet delivery in dense wireless sensor networks[C]//Proceeding of 16th International Conference on Computer Communications and Networks(ICCCN). Honolulu, HI: Computer Communications and Networks, 2007.
- [11] Kiyohiro M, Watanabe K, Hayashibara N, et al. Efficient data transmission in a lossy and resource limited wireless sensor-actuator network[C]//IEEE/IS Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing(ISORC). Santorini Island: IEEE, 2007.
- [12] Junga P K R, Abdelrahman M A, Thurman C. Algorithms for reliable data transmission for metal fill monitoring using wireless sensor networks[C]//South-eastcon, IEEE. Huntsville, AL: IEEE, 2008.
- [13] Changhee J, Ness B S. On the delay performance of in-network aggregation in lossy wireless sensor networks[C]//46th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing. Allerton House, UIUC, Illinois, USA: IEEE, 2008.
- [14] Koubaa A, Alves M, Tovar E. GTS allocation analysis in IEEE 802.15.4 for real-time wireless sensor networks[C]//Parallel and Distributed Processing Symposium(IPDPS). Rhodes Island: IEEE, 2006.
- [15] Ahlswede R, Ning Cai, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000,46(4):1204-1216.
- [16] Ning Cai, Yeung R W. Network coding and error correction[C]//Information Theory Workshop(ITW). Bangalore, India: IEEE, 2002.
- [17] Yuan Shenfang, Lai Xiaosong, Zhao Xia, et al. Distributed structure health monitoring system based on smart wireless sensor and multi-agent technology[J]. Smart Mater Struct, 2006,15(1):1-8.



第一作者简介:袁慎芳,女,1968年4月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为智能材料与结构、结构健康监测、信号信息处理技术、无线传感器网络、先进传感技术及先进测控系统。曾发表《Providing self-healing ability for wireless sensor node by using reconfigurable hardware》(《Sensors》2012, Vol. 12, No. 11)等论文。
E-mail: ysf@nuaa.edu.cn

