

# 基于 IEEE 802.11e 的无线传感器/执行器网络丢包判器设计

姚毅<sup>1,2</sup> 刘勇<sup>1,2</sup> 沈轩帆<sup>3</sup> 廖勇<sup>3</sup> 赵明<sup>3</sup>

(四川理工学院自动化与电子信息学院 自贡 643000)<sup>1</sup>

(四川理工学院人工智能四川省重点实验室 自贡 643000)<sup>2</sup>

(重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室 重庆 400044)<sup>3</sup>

**摘要** 在目前的无线传感器/执行器网络(Wireless Sensor and Actuator Networks, WSANs)中,无线传感器及其所传输信息的业务类型趋于多样化;同时,在实时性要求较高的工业系统中,无线网络环境下的丢包将给整个系统带来严重的危害。为提高 WSANs 的可靠性,提出了一种基于 IEEE 802.11e 的 WSANs 丢包判决器的优化设计方法。该方法采用提供服务质量(Quality of Service, QoS)的 IEEE 802.11e 作为 WSANs 的数据通信协议,推导出该协议下的 WSANs 丢包概率矩阵,并将基于该丢包概率矩阵的龙伯格状态观测器的输出作为丢包的判决阈值,把网络中的丢包现象作为一种故障信号,从而设计出 WSANs 的丢包判决器。该丢包判决器不仅能有效判断网络中是否出现了丢包,而且还能通过判决器输出的故障信号波形判断丢包原因,即传感器节点故障,或是由于信道环境不稳定造成的随机丢包。最后,通过 MATLAB/OMNET++ 的混合仿真验证了该设计的有效性。

**关键词** 无线传感器/执行器网络, IEEE 802.11e, 服务质量, 丢包判决器, 丢包率, 故障检测

**中图分类号** TP273      **文献标识码** A      **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.013

## Packet Drop Detector Design Based on IEEE 802.11e in Wireless Sensor and Actuator Networks

YAO Yi<sup>1,2</sup> LIU Yong<sup>1,2</sup> SHEN Xuan-fan<sup>3</sup> LIAO Yong<sup>3</sup> ZHAO Ming<sup>3</sup>

(School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Artificial Intelligence of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)<sup>2</sup>

(Key Laboratory of Aircraft TT&C and Communication, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>3</sup>

**Abstract** In the current wireless sensor and actuator networks (WSANs), wireless sensor and its service types of transferring information tend to be diversified; at the same time, in the real-time industrial systems, packet drop under the wireless network environment will bring serious damage to the whole system. To improve the reliability of WSANs, this paper proposed an optimal design method for WSANs packet drop detector based on IEEE 802.11e. The method adopts IEEE 802.11e which provides quality of service (QoS) as data communication protocol, deduces WSANs packet drop probability matrix under the protocol, and uses the output of the Luenberger state observer based on the packet drop probability matrix as the decision threshold of packet drop, takes the packet drop in the network as a fault signal, thereby designs a WSANs packet drop detector. The packet drop detector mentioned in this paper not only can effectively determine whether there is a packet drop in the network, but also distinguish the cause of packet drop through the judgment of the fault signal waveform, that is, the sensor node fault, or random packet drop caused by unstable channel environment. Finally, the effectiveness of the proposed design is demonstrated by the results of MATLAB/OMNET++ hybrid simulations.

**Keywords** Wireless sensor and actuator networks, IEEE 802.11e, Quality of service, Packet drop detector, Packet drop rate, Fault detection

## 1 引言

传统的 IEEE 802.11 标准只能提供“尽力而为”的服务,对服务质量没有保障,不能很好地支持视频、语音等多媒体实时业务。IEEE 802.11e 标准对 IEEE 802.11 标准的媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)协议进行了增强,引入了业务等级的概念,增加了新的 QoS 参数和帧结构,从而

提高了无线网络的性能。IEEE 802.11e 的增强型分布式信道接入(Enhanced Distributed Channel Access, EDCA) MAC 机制是基于竞争的方式访问信道,它定义了 4 种访问类型(Access Category, AC),使用了 8 种用户优先级来接入无线网络,为不同的业务类型提供不同的业务等级,使得实时业务(如音频、视频业务)能获得较高的接入信道的优先级<sup>[1]</sup>。

无线传感器/执行器网络通过散布在空间各区域的传感

到稿日期:2015-07-31 返修日期:2015-09-24 本文受人工智能四川省重点实验室开放基金(2015RZJ03)资助。

姚毅(1961—),男,硕士,教授,主要研究方向为智能检测技术, E-mail: yy6166@126.com; 刘勇(1981—),男,硕士,实验师,主要研究方向为计算机应用; 沈轩帆(1994—),男,主要研究方向为通信工程; 廖勇(1982—),男,博士,副研究员,主要研究方向为无线网络通信, E-mail: liaoy@cqu.edu.cn(通信作者); 赵明(1994—),女,主要研究方向为通信工程。

器节点监测、感知和采集监测对象的信息。因此,WSANs被广泛地运用于各个领域,包括国防军事、智能家居、环境监测、医疗卫生和目标跟踪等。WSANs正朝着低成本、低功耗、安全、智能化和多样化等方向发展<sup>[2,3]</sup>。除了传输数据业务的传统的温度、湿度等传感器外,对实时性要求较高的音视频业务的图像、声音等传感器在WSANs中的使用也越来越广泛<sup>[4]</sup>。

在无线网络中,由于无线链路不稳定、传输频段易受干扰等,丢包的问题难以避免。而在某些实时性要求较高的系统中,丢包将会给系统带来十分严重的危害。据笔者调研,目前处理WSANs丢包问题的主要方法是通过网络编码或均衡的方式对丢失数据进行恢复,但并不能对丢包的原因进行判断分析<sup>[5,6]</sup>,即不能做出有针对性的改进使丢包率降低。故采用恰当的通信协议来协调各传感器、执行器节点的网络资源,同时使用合理的手段来检测WSANs中的丢包,并判断分析丢包的原因就显得十分重要。

针对以上问题,本文提出一种基于IEEE 802.11e的WSANs丢包判决器的设计方法,主要贡献如下:1)为了适应传感器、执行器节点传输业务多样化的趋势,本文将支持QoS的IEEE 802.11e协议引入WSANs中,将各个传感器节点按其业务类型和传输数据的实时性要求划分不同的优先级,从而实现通信资源的合理分配;2)将分组碰撞作为丢包的主要原因,分析了差错信道下EDCA的丢包概率,提出了WSANs中的丢包概率矩阵 $P_{drop}$ ;3)将基于丢包概率矩阵的龙伯格状态观测器的输出作为丢包的判决阈值,把丢包当作一种故障,设计出WSANs的丢包判决器,并且能通过判决器输出的故障信号判断丢包原因是传感器节点故障还是由于链路不稳定造成的随机丢包。

## 2 基于IEEE 802.11e的WSANs模型

图1是基于IEEE 802.11e的WSANs系统框图,主要由3部分构成:1)控制系统(包括被控系统、传感器和执行器);2)具有随机数据传输延迟的IEEE 802.11e无线网络,将传感器测得的控制系统输出信号 $y_k$ 反馈给执行器,形成闭环反馈;3)故障检测滤波器通过无线网络获取到 $y_k$ 和执行器信号 $u_k$ 进行故障检测<sup>[7]</sup>。

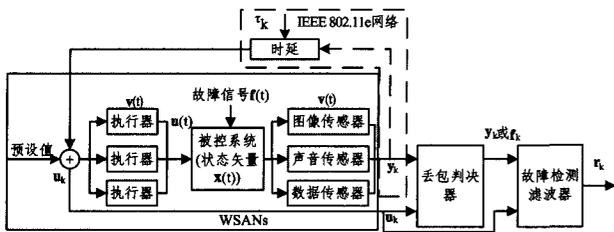


图1 基于IEEE 802.11e的WSANs丢包判决器系统框图

图1所示的WSANs中包含了3类具有不同传输业务的传感器节点(图像、声音和数据传感器),系统的输出 $y_k$ 由各个传感器节点经由IEEE 802.11e无线网络传送至丢包检测

$$\tau = \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{R+1})}{W(1-(2p_c)^{M+1})(1-p_c) + (1-2p_c)(1-p_c^{R+1}) + 2^M p_c^{M+1} W(1-2p_c)(1-p_c^{R-M})}, R > M \quad (2)$$

其中, $R$ 表示分组重传次数限制, $M$ 为最大退避阶数, $W$ 表示初始竞争窗, $W = W_{min}$ , $W_{min}$ 是指最小竞争窗口。联合式(1)和式(2),利用数值方法就可以求得理想信道下的 $p_c$ 与 $\tau$ 。

假设系统采用的是无纠错编码,若发送的分组数据或者分组的确认信息由于信道衰落或者噪声导致某一比特发生错

误,那么该分组将被发送传感器节点重传。误,那么该分组将被发送传感器节点重传。

器中进行判决,若没有发生丢包,则将原信号 $y_k$ 输出至故障检测滤波器中进行下一步操作;若检测到丢包,则丢包判决器将产生一个丢包故障信号 $f_k$ ,并将其传送至故障检测滤波器。

在IEEE 802.11e的协议中,定义了4种AC,分别为AC\_VO(对应音频业务),AC\_VI(对应视频业务),AC\_BE(对应“尽力而为”的数据业务),AC\_BK(对应背景数据业务),其优先级顺序为 $AC\_VO > AC\_VI > AC\_BE > AC\_BK$ 。EDCA是一种基于竞争的MAC层接入协议,其与分布式协调控制(Distribution Coordination Function,DCF)最大的区别在于使用可变长度的仲裁时隙(Arbitration Inter-Frame Space,AIFS)代替固定长度的DCF帧间间隔(DCF Inter-Frame Space,DIFS),即对于不同的AC数据帧采用不同的帧间隔,AIFS值是根据不同的业务类型而变化的,这样就能保证不同优先级业务的区别接入。于是,高优先级的业务在竞争中将更容易获得信道的使用权;反之,低优先级的业务在信道竞争激烈时可能会出现“饥饿”现象<sup>[8]</sup>。

因此在WSANs中,个别传输业务实时性要求高的传感器节点应该被赋予更高的优先级,而实时性要求低的节点可以被赋予较低的优先级,从而保证系统能够高效有序地运行。

按照优先级的不同,不同类型的传感器节点应对应不同的AC。其中,声音传感器对应AC\_VO,图像传感器对应AC\_VI,实时性较高的数据业务传感器对应AC\_BE,实时性较低的数据业务传感器对应AC\_BK。

## 3 基于IEEE 802.11e的WSANs丢包概率分析

每个传感器节点在传输数据之前,都要经历AIFS然后进入退避阶段,此时在退避窗口(Contention Window,CW)内随机选择一个数作为退避计数器的初值,如果在退避期间发现退避计数器减少到0,并且感知到信道处于空闲状态,此时该传感器节点进行数据的传输。若分组发出一段时间后此节点没有收到接收方发来的确认信息(Acknowledge,ACK),则该节点在重新经历一次退避过程后,将重传这一分组, $R$ 为重传次数的上限。丢包率是分组重传次数超过重传次数上限 $R$ 的概率。在差错信道条件下,丢包的原因主要有两类:1)由于归属同一AC的多个节点在退避过程中所得到的退避计数器初值相等而导致的分组碰撞;2)由于信道衰落或噪声造成误码而导致的帧丢弃<sup>[9,10]</sup>。在大部分的实际应用中,前者是丢包的主要原因。

### 3.1 丢包概率

假设系统中共有 $N$ 个传感器节点,分组碰撞是由在某一时刻内其余 $N-1$ 个传感器中至少有1个节点同时发送分组数据造成的。在分析分组碰撞时,可认为信道是理想信道。通过建立二维过程马尔科夫链模型,得到的分组碰撞概率 $p_c$ 为<sup>[10,11]</sup>

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (1)$$

其中, $\tau$ 为任意时隙内发送分组的概率,如式(2)所示:

$$\tau = \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{R+1})}{W(1-(2p_c)^{M+1})(1-p_c) + (1-2p_c)(1-p_c^{R+1}) + 2^M p_c^{M+1} W(1-2p_c)(1-p_c^{R-M})}, R > M \quad (2)$$

误,那么该分组将被发送传感器节点重传。

记误比特率为 $P_b$ ,有效负荷长度为 $L$ ,分组的头长度为 $H$ , $H = H_{MAC} + H_{PHY}$ ( $H_{MAC}$ 表示MAC帧头的长度, $H_{PHY}$ 表示物理层帧头的长度),分组确认信息长度为 $H_{ACK}$ ,得到分组传输错误的概率 $p_p$ 为<sup>[12]</sup>

$$p_p = 1 - (1 - P_b)^{L+H+H_{ACK}} \quad (3)$$

分组丢失的概率应由误码丢包概率和分组碰撞概率两部分组成。令  $p$  为分组丢失的概率,则有<sup>[12]</sup>

$$p = p_c + p_p - p_c p_p = 1 - (1 - \tau)^{N-1} (1 - P_b)^{L+H+H_{MAC}} \quad (4)$$

丢包率是分组重传次数超过重传次数限制  $R$  的概率,所以  $p_d$  如式(5)所示:

$$p_d = p^{R+1} = [1 - (1 - \tau)^{N-1} (1 - P_b)^{L+H+H_{ACK}}]^{R+1} \quad (5)$$

由以上分析可知,在给定重传次数限制  $R$  的条件下,丢包率与分组发送概率  $\tau$ 、节点数目  $N$ 、误比特率  $P_b$  和分组长度  $L$  等参数有关。

### 3.2 WSANs 的丢包概率矩阵

通过前面分析,已经得出了影响丢包概率的几个因素。对于一个固定的 WSANs,传感器节点数  $N$  是不变的;而重传次数  $R$ 、竞争窗口  $W$  和分组头长度  $H$  在同一节点中也是不会随时间变化的。所以,一方面,在信道环境不发生突变的前提下,我们可以认为一个传感器节点所对应的丢包率是不随时间变化的;另一方面,每一个传感器节点所处的信道环境各有差异,这就导致了不同传感器节点的误比特率  $P_b$  可能有所不同,而且由于不同节点传输业务类型不同,因此传输分组的长度  $L$  也是不同的。

综合以上两点,可以得出每个传感器节点对应的丢包概率  $p_{di}$  是相对固定的,而不同节点间的丢包概率是不同的。为便于描述 WSANs 特有的丢包概率特性,提出 WSANs 的丢包概率矩阵  $\mathbf{P}_{drop}$  作为之后设计丢包判决器的重要参数。

丢包概率矩阵  $\mathbf{P}_{drop}$  是一个数量矩阵,如式(6)所示:

$$\mathbf{P}_{drop} = \begin{bmatrix} p_{d1} & & & 0 \\ & p_{d2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & p_{dN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,对角线上的各元素是将式(5)的各个参数设为定值之后计算得到的各路传感器节点所对应的丢包率,  $p_{di} \in [0, 1]$ ,其余元素为 0;而  $\mathbf{P}_{drop}$  的阶数等于传感器节点的数量  $N$ 。

## 4 丢包判决器的设计

### 4.1 判决门限

将图 1 中的 WSANs 系统用一个连续时间空间微分方程描述,得到式(7)<sup>[13,14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_f \mathbf{f}(t) + \mathbf{B}_d \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_d \mathbf{v}(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^P$ ,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^M$  和  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^N$  分别是被控系统的状态向量、输入向量(或控制向量)和输出向量。 $\mathbf{v}(t)$  是一个未知输入向量,称作扰动向量,用来表示传感器测量噪声、建模误差或模型不确定性。故障采用一个变量(或称作故障信号)  $\mathbf{f}(t) \in \mathbb{R}^q$  来描述。

将式(1)离散化后,在  $[kT, (k+1)T]$  内积分并应用泰勒近似  $e^{-\mathbf{A}t} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}t]$ ,可以得到式(8)<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}_k + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u}_k + \Gamma_d \mathbf{d}_k + \bar{\mathbf{B}}_f \mathbf{f}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \bar{\mathbf{D}}_d \mathbf{d}_k \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\bar{\mathbf{A}} = e^{\mathbf{A}T}$ ,  $\bar{\mathbf{B}}_f = \int_0^T e^{\mathbf{A}t} \mathbf{B}_f dt$ ,  $\bar{\mathbf{B}} = \int_0^T e^{\mathbf{A}t} \mathbf{B} dt$ ,  $\Gamma_d = [-\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{D}}_d]$ ,  $\mathbf{d}_k = [\Delta \mathbf{u}_k \cdot \tau_k \mathbf{v}_k]^T$ ,  $\bar{\mathbf{D}}_d = [0 \ \mathbf{D}_d]$ ,  $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^P$  为系统的输入向量,  $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^N$  为系统的输出向量,  $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^M$  为系统的状态向量。

假设传感器节点引入的噪声分量  $\mathbf{d}_k = 0$ ,在  $\mathbf{C}\mathbf{x}_k$  左端乘

以丢包概率矩阵  $\mathbf{P}_{drop}$  得到  $\mathbf{P}_{drop}\mathbf{C}\mathbf{x}_k$ ,显然  $\mathbf{C}\mathbf{x}_k$  中的每一个元素  $\sum_{i=0}^{M-1} c_{ij}x_i$  均大于  $\mathbf{P}_{drop}\mathbf{C}\mathbf{x}_k$  中的对应元素  $p_{di} \sum_{i=0}^{M-1} c_{ij}x_i$ ,数学表达式如式(9):

$$\begin{cases} |\sum_{j=0}^{M-1} c_{ij}x_j| > |p_{di} \sum_{j=0}^{M-1} c_{ij}x_j| \\ 0 < |p_{di} \sum_{j=0}^{M-1} c_{ij}x_j| \end{cases}, i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (9)$$

考虑传感器节点引入的噪声  $\mathbf{d}_k$ ,将式(9)转化为式(10):

$$\begin{cases} |\sum_{j=0}^{M-1} c_{ij}x_j| + d_i > |p_{di} \sum_{j=0}^{M-1} c_{ij}x_j| + d_i \\ d_i < |p_{di} \sum_{j=0}^{M-1} c_{ij}x_j| + d_i \end{cases}, i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (10)$$

其中,  $d_i$  为传感器节点引入噪声矩阵的对应元素。

结合式(8)与式(10),有  $\mathbf{y}_k$  中的每一个元素  $y_{ki}$  均大于  $\mathbf{P}_{drop}\mathbf{y}_k$  中的对应元素  $p_{di}y_{ki}$ ,数学表达式如式(11):

$$\begin{cases} y_{ki} > p_{di}y_{ki} + (1 + p_{di})d_{ki} \\ d_{ki} < p_{di}y_{ki} + (1 + p_{di})d_{ki} \end{cases}, i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (11)$$

此处需要强调,  $\mathbf{y}_k$  是 WSANs 的输出向量,而非丢包判决器的输入向量。

当  $\mathbf{P}_{drop}$  中元素都较小时,可以近似认为  $(1 - p_{di})d_{ki} = d_{ki}$ ,即

$$\begin{cases} y_{ki} > p_{di}y_{ki} + d_{ki} \\ d_{ki} < p_{di}y_{ki} + d_{ki} \end{cases}, i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (12)$$

当网络正常运行时,丢包判决器可以获取到系统输出  $\mathbf{y}_k$ ,但在网络出现丢包时,丢包判决器的输入仅为噪声。从而由式(12)可知,将  $\mathbf{P}_{drop}\mathbf{y}_k + \mathbf{d}_k$  作为丢包判决的阈值是合理的。

然而,在出现丢包的情况下,丢包判决器的输入仅为噪声,判决器无法获取到系统准确的输出值  $\mathbf{y}_k$ 。为了应对这种情况,本文设计了基于丢包概率矩阵的龙伯格观测器,以观测器的输出  $\mathbf{y}_h$  来逼近  $\mathbf{P}_{drop}\mathbf{y}_k + \mathbf{d}_k$ 。

### 4.2 丢包判决器的结构

图 2 是本文提出的丢包判决器的结构框图。丢包判决器以  $\mathbf{y}_k$  和  $\mathbf{u}_k$  为输入,首先经过基于丢包概率矩阵的龙伯格状态观测器得到判决阈值  $\mathbf{y}_h$ ,将  $\mathbf{y}_h$  与输入  $\mathbf{y}_k$  进行比较,判断是否发生丢包,将判决结果作为二选一选择器的驱动信号,未丢包时输出输入信号  $\mathbf{y}_k$ ,丢包时输出故障信号  $\mathbf{f}_k$ 。

为实现闭环极点的任意配置,必须进行状态反馈。然而系统的状态变量并不都是易于直接检测得到的,有些状态变量甚至根本无法检测。这样,就引出所谓状态观测或者状态重构问题。根据龙伯格(Luenberger)提出的状态观测器理论,解决了在确定性条件下受控系统的状态重构问题,从而使状态反馈成为一种可实现的控制律<sup>[16]</sup>。

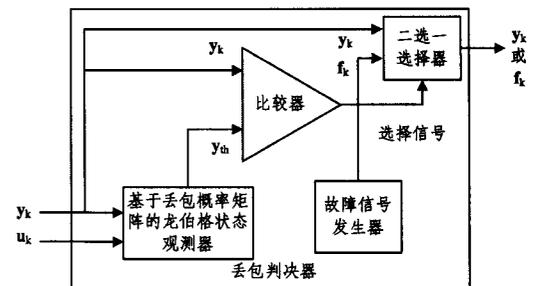


图 2 丢包判决器结构框图

本文将状态观测器作为一种系统输出的估计手段,利用

状态观测器重构的状态变量  $\hat{x}_k$  进一步求解系统的输出向量  $\hat{y}_k$ , 并将  $\hat{y}_k$  与丢包概率矩阵  $P_{drop}$  相乘, 从而逼近判决阈值  $P_{drop} \hat{y}_k$ 。

基于丢包概率矩阵的龙伯格状态观测器可由式(13)描述如下:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \bar{A} \hat{x}_k + \bar{B} u_k + L(y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{y}_k = C \hat{x}_k \\ y_{th} = P_{drop} \hat{y}_k + (y_k - \hat{y}_k) \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $y_{th} \in R^M$  为该状态观测器的输出信号,  $L \in R^{N \times M}$  是该状态观测器的增益矩阵。本文通过使用状态观测器来重构系统的输出变量  $\hat{y}_k$ , 用  $(y_k - \hat{y}_k)$  来还原传感器中的噪声分量  $d_k$ , 当增益矩阵  $L$  能够较好地抑制接收到的信号中的噪声时,  $\hat{y}_k$  就能够不断逼近  $y_k$ , 从而使得  $y_{th}$  逼近  $P_{drop} \hat{y}_k + d_k$ , 使得丢包的判断趋于准确。即该观测器可以使得  $y_{th}$  满足式(14):

$$\begin{cases} y_{ki} > y_{th,i}, i=0,1,2,\dots,N-1 \\ d_{ki} < y_{th,i} \end{cases} \quad (14)$$

将  $y_k$  和  $u_k$  作为输入得到  $y_{th}$  之后, 将  $y_{th}$  与此时的输入  $y_k$  作比较, 当  $y_{ki} > y_{th,i}$  时, 判定为没有丢包, 反之则判定为丢包。由判定的结果作为选路器的驱动信号, 当没有发生丢包时, 选路器将把输出信号  $y_k$  交给故障检测滤波器做下一步处理; 当发生丢包时, 选路器将选择由故障信号发生器发出的故障信号作为输出, 故障检测滤波器收到该故障信号后, 再进一步根据故障信号波形判断丢包原因是节点故障还是链路上的随机丢包, 并做出相应的处理。

## 5 仿真分析

为了验证本文提出的丢包判决器性能, 在 OMNET++ 仿真平台上搭建了一个 IEEE 802.11e 网络(包含 6 个传感器节点、6 个执行器节点和 1 个位于中心的接入节点 (Access Point, AP)), 传输速率是 2Mbps, 数据包  $y_k$  和  $u_k$  的长度都是 112byte。

WSANs 的仿真拓扑如图 3 所示, 其中传感器节点包括 1 个 AC\_VO 节点、2 个 AC\_VI 节点、2 个 AC\_BE 节点和 1 个 AC\_BG 节点。

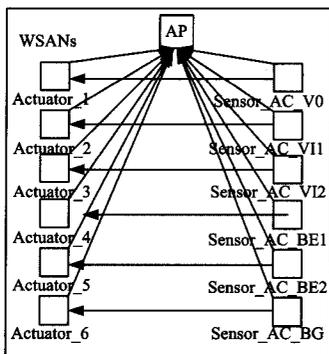


图 3 WSNs 的仿真网络拓扑

在设定系统仿真参数时, 短帧间间隔 (Short Inter-Frame Space, SIFS)、点协调控制帧间间隔 (Point coordination function Inter-Frame Space, PIFS)、DIFS 和扩展帧间间隔 (Extended Inter-Frame space, EIFS) 与 IEEE 802.11 中定义的一

样, 而 AIFS 为 IEEE 802.11e 协议新增加的时间间隔, 其计算公式如下<sup>[1]</sup>:

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] * a \text{ slot Time} + a \text{ SIFS Time}$$

其中,  $AIFSN$  表示不同 AC 所对应的仲裁帧间间隔数,  $a \text{ slot Time}$  为一个时隙的时间,  $a \text{ SIFS Time}$  为一个 SIFS 的时间。

WSANs 中基于 IEEE 802.11e 协议仿真的主要参数如表 1 所列。

表 1 主要仿真参数

参数名称	符号表示	取值
信道速率	$R_c$	2Mbps
MAC 层头长度	HMAC	224bit
物理层头长度	HPHY	192bit
AIFS(AC_VO)	AIFS(AC_VO)	30us
AIFS(AC_VI)	AIFS(AC_VI)	30us
AIFS(AC_BE)	AIFS(AC_BE)	50us
AIFS(AC_BK)	AIFS(AC_BK)	150us
SIFS 长度	SIFS	10us
时隙长度	$a \text{ slot Time}$	20us
确认信息长度	HACK	304bit
重传次数	R	4

通过 OMNET++ 仿真得到了每一路无线传感器的误比特率  $P_{bi}$ , 并结合设定的参数通过式(5)计算得到了丢包概率矩阵  $P_{drop}$  如下:

$$P_{drop} = \begin{bmatrix} 0.00005 & & & & & 0 \\ & 0.00061 & & & & \\ & & 0.00061 & & & \\ & & & 0.00235 & & \\ & & & & 0.00235 & \\ 0 & & & & & 0.01276 \end{bmatrix}$$

对于被控系统, 在采样间隔为 0.05s (20Hz) 的条件下, 离散化后的系统(式(13))的矩阵参数为

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.05 \\ 0 & 0.9975 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以抑制噪声为最优化目标, 通过特征根优化的方法求解增益矩阵  $L$ <sup>[15]</sup>, 结果如下:

$$L = \begin{bmatrix} 0.020 & 0.035 & 0.036 & 0.055 & 0.054 & 0.102 \\ 0 & 0.015 & 0.014 & 0.035 & 0.035 & 0.853 \end{bmatrix}$$

仿真结果如图 4、图 5 所示。图 4 为加入丢包判决器与未加入丢包判决器的 WSNs 在发生丢包时故障检测滤波器的输出信号, 丢包是通过将 5~5.1s 时间段内系统的输出  $y_k$  强制赋值为噪声信号  $d_k$  进而模拟得到的。由图 4 可见, 当 WSNs 发生丢包时, 若不接入丢包判决器, 则很难判断此时系统是否发生丢包; 而加入丢包判决器后, 发生丢包时, 则能够明显观测到故障检测滤波器输出了一个脉冲信号, 表示这一时刻发生了丢包。

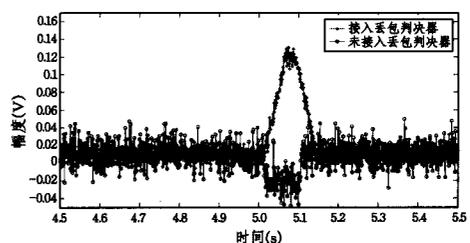


图 4 丢包时接入与未接入丢包判决器的故障检测滤波器输出对比

图 5 为链路随机丢包与由于节点故障而产生丢包时故障检测滤波器输出信号的比较图。从图中可以看出,链路发生随机丢包时故障检测滤波器输出为一个脉冲信号;而当传感器节点发生故障时,丢包判决器将无法接收到任何有效的信息,此时故障检测滤波器的输出为一个逐渐衰减的阶跃信号,如图 5 所示。

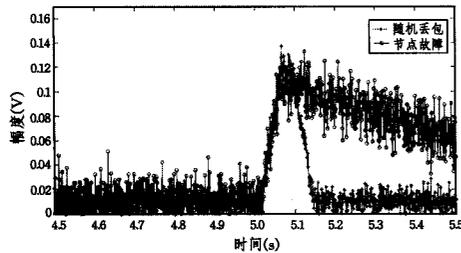


图 5 随机丢包与节点故障丢包的故障检测滤波器输出对比

综上,本文所设计的丢包判决器与故障检测滤波器结合使用能够有效地判决链路中出现的丢包现象,并能根据故障检测滤波器的输出信号波形判定丢包的原因。

**结束语** 本文提出了一种基于 IEEE 802.11e 的 WSNs 丢包判决器设计方法,旨在对 WSNs 中存在的丢包现象进行有效判决和处理。该方法采用具有 QoS 的 IEEE 802.11e 作为 WSNs 的通信协议,根据传感器传输数据的类型划分了不同的 AC;根据二维过程马尔科夫链的建立,推导了差错信道条件下的丢包概率矩阵  $P_{drop}$ ;并将该丢包概率矩阵与龙伯格观测器的设计相结合,得出了丢包判决器的判决阈值向量  $y_n$ ,进而设计出了 WSNs 丢包判决器。最后,通过 MATLAB/OMNET++ 混合仿真验证了所提设计的有效性,这一设计不仅能有效地对 WSNs 中的丢包进行判决,并且能够通过其输出来判断丢包的原因,从而可为 WSNs 的故障检测提供更为准确的参考。

### 参考文献

- [1] Zhou L F. Study on QoS of IEEE 802.11e[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006(in Chinese)  
周莉芳. 基于 IEEE 802.11e 的 QoS 研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006
- [2] Hou Y D, Wen C L, Chen Z G. Designing method of residual generator for multi-sensor fault detection and isolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(2): 429-434(in Chinese)  
侯彦东, 文成林, 陈志国. 多传感器故障检测与隔离的残差产生器设计方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 429-434
- [3] Zhao J B. Research on infrastructural technology to build sensor networks applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese)  
赵江滨. 传感器网络应用开发基础技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
- [4] Si H F, Yang Z, Wang J. Review on research status and application of wireless sensor networks[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(1): 16-20(in Chinese)  
司海飞, 杨忠, 王珺. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 16-20
- [5] Xie M. Study on loss recovery using a network coding buffering strategy in WSN[D]. Hefei: Anhui University, 2012(in Chinese)  
谢梦. 无线传感器网络中基于网络编码缓冲策略的丢包恢复研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2012
- [6] Song Y X. Research on key techniques of data reliable transmission in wireless sensor network[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2014(in Chinese)  
宋永献. 无线传感器网络数据可靠传输关键技术研究[D]. 南京: 江苏大学, 2014
- [7] Liao Y, Dai X W, Liu G Y, et al. Detection and eigenstructure optimization in IEEE 802.11 wireless sensor actuator networks for building automation[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2013, 27(9): 793-808
- [8] Zhang Z. Improvement of throughput based on IEEE 802.11e EDCA model[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2010, 25(2): 56-59(in Chinese)  
张志. 基于 IEEE 802.11e EDCA 模型吞吐量的改进研究[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(2): 56-59
- [9] Liao Y, Yang S Z, Wang D. Analysis and verification of TCP goodput of poisson distribution station over WLANs[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(6): 92-98(in Chinese)  
廖勇, 杨士中, 王丹. 泊松分布传感器节点 TCP 流在 WLANs 中的吞吐量分析与验证[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(6): 92-98
- [10] Bianchi G. Performance analysis of IEEE 802.11 distribution coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547
- [11] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. IEEE 802.11 packet delay-a finite retry limit analysis[C]// Proc. of IEEE GLOBECOM. San Francisco: IEEE, 2003: 950-954
- [12] Cheng Y, Zhang Y, Gao X Q. Performance analysis of packet dropping probability under error-prone channel in WLAN[J]. Journal on Communications, 2007, 28(5): 126-131(in Chinese)  
程远, 张源, 高西奇. 差错信道下无线局域网丢包率性能分析[J]. 通信学报, 2007, 28(5): 126-131
- [13] You K Y, Xie L H. Survey of recent progress in networked control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(2): 101-118 (in Chinese)  
游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 101-118
- [14] Ding S X, Zhang P, Shen Y, et al. An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Information, 2013, 9(1): 462-471
- [15] Liao Y, Dai X W, Zhou X. A fault detection filter design with eigenstructure optimization in wireless networked control systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(6): 1236-1240 (in Chinese)  
廖勇, 代学武, 周昕. 基于特征根优化的无线网络控制系统故障检测滤波器设计[J]. 电子学报, 2015, 43(6): 1236-1240
- [16] Zhu F L, Wang K, Han D. Unknown input observer design based on auxiliary outputs[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(3): 249-354 (in Chinese)  
朱芳来, 王昆, 韩冬. 基于辅助输出构造的未知输入观测器设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(3): 249-354